

CIENERGIA UG

Congreso Internacional de Energía UG

2020



MEMORIAS

EDICIÓN 2020

PREFACIO

En la edición 2020, el Comité Organizador del Congreso Internacional de Energía CIENERGIA UG 2020 invitó a la comunidad científica y tecnológica nacional e internacional, con el objetivo de proporcionar un entorno de intercambio y difusión del conocimiento científico para promover el fortalecimiento y avance de trabajos en el tema energético.

Las actividades que conformaron el evento fueron: conferencias magistrales, ponencias y exposiciones industriales.

El evento se llevó a cabo de manera virtual por medio de la plataforma CISCO WEBEX del 26 al 27 de noviembre del 2020 y se contó con alrededor de 160 participantes, entre asistentes, ponentes, y organizadores.

Dentro de los participantes se tuvieron representantes de las siguientes instituciones:

1. Universidad de Guanajuato
2. Instituto Tecnológico Superior de Abasolo
3. Instituto Superior de Irapuato
4. Zizé de México
5. Agrobioteg
6. Dirección General de Sustentabilidad
7. GERS POWER
8. ITESO

9. Universidad Politécnica de Sinaloa
10. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
11. CINVESTAV del IPN - Guadalajara
12. Universidad Autónoma de San Luis Potosí
13. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
14. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
15. Universidad Politécnica de Aguascalientes
16. Tecnológico de Monterrey
17. Instituto Tecnológico de Querétaro
18. Universidad Autónoma Metropolitana
19. Instituto Politécnico Nacional
20. Tecnológico Nacional de México campus Culiacán
21. Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)
22. Universidad de Colima
23. Universidad del Valle, Cali, Colombia
24. Universidad del Zaragoza, Zaragoza, España

COMITÉ DEL CONGRESO

Presidente

Dr. José Merced Lozano García
Director del DIE de la UG

Coordinación General

Dr. Jesús Martínez Patiño
Director de VIDA UG

Secretario General

Dra. Xiomara González Ramírez
PTC del DIE de la UG

Coordinación Editorial

Dr. Iván Abel Hernández Robles
Director de CINERGIA UG

Coordinación Técnica

Dr. Alejandro Pizano Martínez
PTC del DIE de la UG

Coordinación de Diseño y Difusión

L.A.D Airam Álvarez Bravo

L.A.D Corina Álvarez Ávila
Departamento de Vinculación
CINERGIA UG

ÍNDICE

Diseño y construcción de un cable superconductor de alta temperatura

José Francisco Arreguín González, Natali Andrea Plancarte López, Adrián González Parada, Rubén Jaramillo Vacío, Roberto Cruz Torres.

06

Análisis de Respuesta a la Frecuencia de la Impedancia para la Detección de Fallas

Katya Karina Morales Mejía, Adrián González Parada.

11

Diseño y construcción de una esfera integradora para determinar la vida útil en LEDs de potencia

Cristian Jesús Robles Aguilar, Mario Alberto Juárez Balderas, Gilberto Muñoz Moreno, Adolfo Rafael López Núñez.

17

Efecto del inóculo sobre el potencial metanogénico de la biomasa residual de la microalga *Dunaliella tertiolecta*.

Karla Denisse Luna Avelar, Ángel Valdez Ortiz, Lourdes Janeth Germán Báez, Raquel Barrera, Xavier Font, Antoni Sánchez, David Ulises Santos Ballardó.

21

Sistema integral para el tratamiento de digestato, cultivo de algas y mejora del biogás

Cristóbal Núñez Sierra, Jesús Daniel Rosalez Vargas, Graciela Ma. de la Luz Ruíz Aguilar, César Álvarez Mejía, Carlos Alberto González Razo, Juan Humberto Martínez

26

Algoritmo para falla Cross Country en relevadores con inteligencia artificial en líneas paralelas de 400 kV

Jonathan Iván Monterrubio Palacios, Gaston Hernández Martínez.

32

Diseño y construcción de un cable superconductor de alta temperatura

JOSÉ FRANCISCO ARREGUÍN GONZÁLEZ¹, NATALI ANDREA PLANCARTE LÓPEZ¹, ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA¹, RUBÉN JARAMILLO VACÍO², ROBERTO CRUZ TORRES¹

¹Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato Salamanca

jf.arreguingonzalez@ugto.mx

na.plancartelopez@ugto.mx

gonzaleza@ugto.mx

rc.torres@ugto.mx

²Laboratorio de Distribución LAPEM CFE

ruben.jaramillo@cfe.mx

RESUMEN En el presente trabajo se presenta el diseño y construcción de un prototipo de cable superconductor para instalaciones eléctricas subterráneas con cintas superconductoras de alta temperatura (HTS) de segunda generación (2G). Siendo el primer diseño realizado en Latinoamérica dentro de las instalaciones del Laboratorio de Superconductividad Aplicada del Depto. de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato (DIE-UG), en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM). Con este prototipo se busca estudiar el comportamiento de la distribución de corriente y medir la corriente crítica del cable. En este trabajo se presenta el desarrollo de un cable superconductor utilizando un núcleo de cobre basado en un conductor 1/0 AWG de 37 hilos, recubierto con cintas superconductoras y cintas de cobre, dos terminales de cobre unidas a la fuente de alimentación de CA. Los resultados obtenidos muestran valores óptimos del comportamiento de las cintas superconductoras con respecto a su distribución de corriente en el núcleo.

PALABRAS CLAVE — Cable superconductor; Cintas HTS cable; Distribución de corriente; Corriente crítica.

I. INTRODUCCIÓN

Con el descubrimiento de la superconductividad en 1911 por H. Kamerlingh Onnes y con el descubrimiento de la superconductividad a altas temperaturas por J. Georg Bednorz y K. Alex Müller en 1987, se dio paso al desarrollo de nuevos materiales superconductores con más potencial de aplicaciones comerciales que los superconductores de baja temperatura, que operan a una temperatura por debajo de los 20 K, debido a que los superconductores de alta temperaturas operan a temperatura de 77.35 K [1].

En las últimas décadas se ha investigado en el desarrollo de cables superconductores de alta temperatura para reemplazar cables convencionales, buscando superar limitaciones en sectores donde la capacidad de conducción cobra un papel fundamental, con aplicaciones en espacios reducidos y presentándose como una posible solución para una gran transmisión de energía.

Los materiales superconductores de segunda generación utilizados en la construcción de cables superconductores de alta temperatura, en comparación con el cable de primera generación, tienen superioridad en cuanto a resistencia mecánica y comportamiento en campos magnéticos [2,3]. Se espera un costo de producción más bajo en el futuro, con el desarrollo de nuevas tecnologías tanto en el proceso de fabricación de los materiales como su aplicación a equipo eléctrico.

En este artículo se presenta el primer desarrollo de un prototipo de cable superconductor construido con cintas HTS de segunda generación en Latinoamérica. Este cable fue construido en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato Campus Irapuato-Salamanca en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

II. DESARROLLO

Para la construcción del prototipo se tomaron en cuenta los siguientes parámetros básicos, El cable superconductor debe de tener una capacidad de conducción de 1.2 kA con una longitud de 1.2 m; Esta longitud contempla 10 cm de cada extremo para la colocación de las terminales de Cu utilizadas para conexiones externas. Para las cintas se considera la HTS SuperPower (Re)BCO SP-2G por su gran densidad de corriente y su mejor comportamiento mecánico. Con respecto a las deformaciones mecánicas de las cintas en un cable se considera como afecta el paso de cableado siendo este la distancia medida a lo largo del cilindro correspondiente a un giro completo de la cinta [3].

En estudios realizados previamente [4], se obtuvo como resultado que la cinta HTS SuperPower (Re)BCO SP-2G no presenta disminución de su corriente crítica (I_c), cuando es colocada con un paso de cableado en el rango de 10-25 cm, sobre un núcleo de cable de Cu de 1/0 AWG; por lo que se utilizó ese paso de cableado en la construcción del prototipo.

De acuerdo con la caracterización realizada de las cintas HTS SuperPower (Re)BCO SP-2G, [4], estas presentan una I_c de 120 A, por lo que considerando los requerimientos previos se tienen que colocar 10 cintas HTS; tomando en cuenta el diámetro del núcleo sobre el que se van a colocar las cintas HTS y con el objeto de cubrir toda la sección circular es necesario complementar con cintas de Cu. La Fig. 1 muestra el esquema del cable superconductor que utiliza un cable de cobre 1/0 AWG de 37 hilos de Cu desnudo de diámetro 20.65 mm, sobre el cual se van a colocar 10 cintas superconductoras y 6 cintas de cobre; consideradas de manera alternada 2 cintas HTS + 1 cinta de Cu.

A. SIMULACIÓN EN ELEMENTO FINITO

Es esencial un conocimiento completo de los campos magnéticos para evaluar el desempeño y conocer el comportamiento previo del cable [5]. Durante la transición de estado de un superconductor cambian sus propiedades eléctricas y magnéticas rápidamente. La temperatura crítica y la curva de resistividad del (Re) BCO son representadas en la simulación, bajo la comparación del material puro de YBCO porque incluso una pequeña cantidad de aditivos cambia significativamente las propiedades del material [6]. El cambio de la resistividad del material con la temperatura en proporción a un ligero cambio en las propiedades del material del YBCO como se muestra en la Fig. 2.

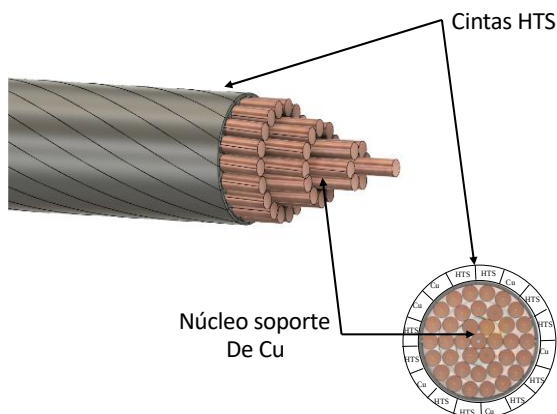


Fig. 1. Esquema de la construcción del cable superconductor con cintas HTS y Cu.

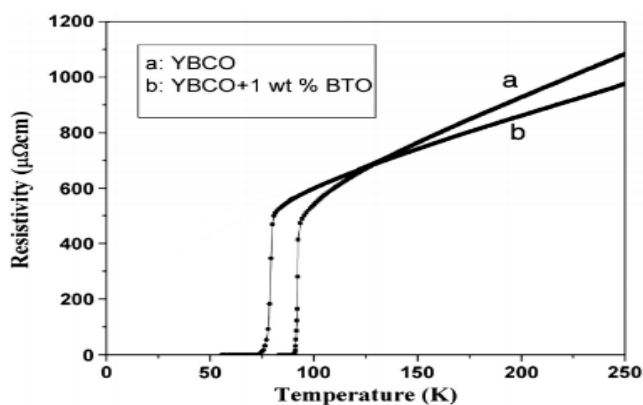


Fig. 2. Resistividad del compuesto YBCO en función de la temperatura [5].

El modelo propuesto de simulación del cable superconductor HTS subterráneo se basa en la cinta (Re)BCO SP-2G SCS4050 producida por la empresa SuperPower. El modelo consta de: 10 cintas (RE) BCO (espesor 0.15 mm, anchura 4 mm), 6 cintas de cobre (espesor 0.30 mm, anchura 4 mm) y un núcleo de cobre (diámetro 20.35 mm).

Se utilizó el software (FEMM) de elemento finito para analizar la distribución e incidencia del campo magnético en los componentes del cable. Para simular el estado de los materiales a temperatura de operación de 77.35 K y tener una estimación de parámetros más exacta.

Simulando el estado de operación del nitrógeno líquido a 77.35 K sobre los materiales. En el caso de la cinta SCS4050 con estabilizador de cobre envolvente (estándar de 2 μm de plata (R_{Ag}) y 40 μm de cobre (R_{Cu}) con sustrato Hastelloy C276 (R_{C276}) su resistividad a lo largo de 1.2 metros para el análisis en elemento finito es posible obtenerla experimentalmente con un modelo de agrupamiento de componentes, Fig. 3 [5].

Donde los coeficientes de calor específicos de Hastelloy, cobre y plata se consideran dependientes de la temperatura, parámetros descritos por la resistividad de la plata y la resistividad del cobre. En la Tabla I, se muestran los detalles de las diferentes corrientes y resistencias propuestas de cada componente dentro de la simulación.

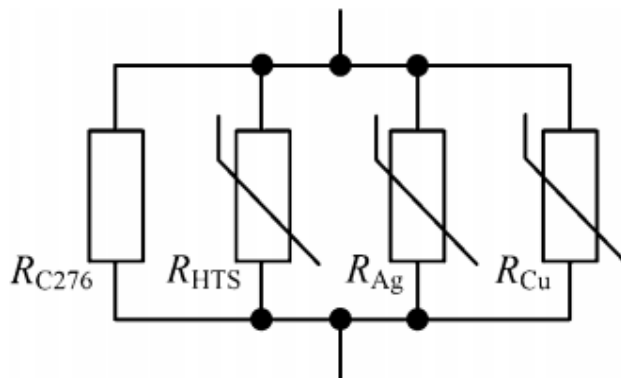


Fig. 3. Circuito equivalente de un segmento de las cintas HTS con estabilizador de cobre [5].

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES PARA 1.20 m PARA SIMULACION CON 1200 AMPERIOS

Componente	Cantidad de piezas	Geometría por pieza	Características a 77.35 K
Cinta de cobre	6 Cintas	4mm x 0.3mm	I_{total} : 3.0205 A
Núcleo	37 hilos	Diámetro: 2.85mm	I_{total} : 10.7482 A
Cinta HTS SCS4050	10 Cintas	4mm x 0.15mm	I_{total} : 1180.2311 A R_{C276} : 1.5 $\mu\Omega$ $R_{\Omega/cinta}$: 1.4998 $\mu\Omega$ R_{Total} : 0.149989 $\mu\Omega$

En la simulación se muestra la interacción de las líneas de flujos magnéticos que inciden en la superficie de las cintas, más específicamente sobre las uniones de las cintas HTS con respecto de las cintas de Cu, de acuerdo con la Fig. 4 existe una mayor densidad de campo magnético sobre la superficie de las cintas Cu logrando incidir de manera considerable en las uniones de ambas cintas formando un campo magnético no uniforme en todo el cable HTS debido a la configuración de cintas y la no homogeneidad de la estructura de las cintas HTS, estas permiten un ligero paso de campo magnético, también se puede observar que la mayor concentración de campo magnético es de 0.0263 T en el modelo propuesto.

Se han desarrollado métodos experimentales para poner a prueba la cinta SCS4050, con una densidad de campo perpendicular a su superficie de hasta 0.7 T sin presentar degradación permanente [7]; por lo que 0.0264 T no representa una degradación para el cable una vez sumergido en nitrógeno líquido las condiciones cambian y la densidad de corriente se concentra en las cintas HTS debido a que presenta una menor resistencia llevando una carga de aproximadamente 118.6114 A por cinta HTS.

B. CONSTRUCCIÓN DEL CABLE

Está bien establecido que existe una relación entre el pico de la corriente crítica y la tensión mecánica de compresión. La contracción térmica entre las partes de los componentes de la cinta HTS puede afectar las propiedades mecánicas y superconductoras en la capa de (Re)BCO [8]. Se han realizado experimentos para minimizar la supresión de la corriente crítica en las cintas superconductoras de segunda generación cuando se enrollan a diferentes grados sobre una superficie cilíndrica [7].

Para la fabricación del prototipo de cable HTS subterráneo, el paso de cableado se definió como la distancia a lo largo del eje cilíndrico que corresponde a un giro completo [3], considerando una distancia de 200 mm para el paso del cableado. Basándose en trabajos previos, donde se utiliza la misma cinta, para comprobar la dependencia de la corriente crítica con respecto del paso de giro del cableado, se ha demostrado que los resultados óptimos de la cinta SuperPower (Re)BCO SP-2G se encuentran en un rango de 100 a 250 mm del paso de cableado sin mostrar degradación. Utilizando el teorema de Pitágoras y la ecuación de la circunferencia se calculó un total de 1.2598 m como longitud de cinta HTS para colocar sobre el núcleo de cobre (1). El paso de cableado propuesto se muestra en la Fig. 5.

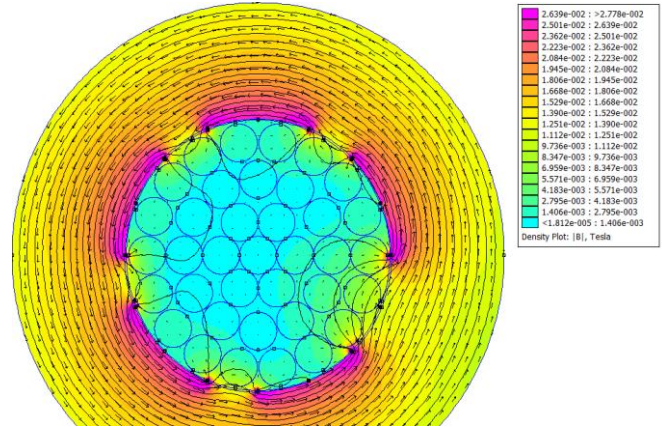


Fig. 4. Incidencia de campos magnéticos sobre la superficie de las uniones.

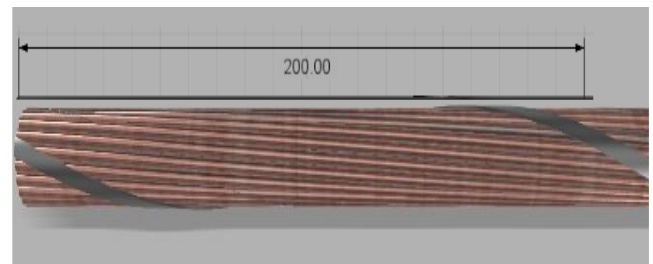


Fig. 5. Paso de cableado para ser instalado en núcleo de cobre.

$$L_t = \left(\frac{(d_c)(2)}{P_c} \right) \left(\sqrt{\left(\frac{(\pi)(d)}{2} \right)^2 + \left(\frac{(P_c)}{2} \right)^2} \right) \quad (1)$$

$$L_t = 1259.8174 \text{ mm}$$

Donde L_t es la longitud total para utilizar por cada cinta. La distancia del cilindro (núcleo del cable) d_c con un diámetro d , tiene un paso de cableado P_c .

Desde el punto de vista de fallas, la parte más importante de las líneas de cable son las uniones y las terminales. Se utiliza un método simple para el diseño en terminales, al inyectar corriente de manera que fluya directamente a las cintas (Re)BCO de forma homogénea a una baja resistencia [9]. Las terminales están pensadas para realizar una conexión entre la fuente y el cable HTS a baja resistencia y para ser soldadas permanentemente a los extremos del cable. Se utilizaron 2 barras cilíndricas de cobre de diámetro 50.8 mm y longitud de 148 mm.

En el diseño del criostato se consideraron las propiedades del unisol como aislante térmico, químicamente conocido como poliestireno expandido, es un material plástico al cual se le introduce aire, con una composición de 5% materia prima y 95% aire. Se elaboró el criostato a partir de un bloque de unisol para contener el nitrógeno.

Para la medición de las variaciones de la distribución de la corriente en el cable, tanto en el núcleo de Cu como en la capa superconductora; se utilizaron sensores tipo Rogowski, los cuales permiten captar pequeñas variaciones de corriente, así como transitorios, colocando dos sensores rodeando el

núcleo de cobre y dos sensores rodeando el cable completo con las cintas HTS colocadas.

III. PRUEBAS

Las pruebas fueron realizadas conectando una fuente de CA en donde el control se realizó con un transformador variable conectado a la fuente de corriente alterna para graduar la corriente que se suministra al cable. En la Fig. 6 se muestra el esquema de la prueba.

A fin de alcanzar el estado superconductor el cable es introducido en el criostato y es llevado a temperatura de criogénica a 77 K, vertiendo nitrógeno líquido en el interior tal y como se muestra en la Fig. 7.

Una primera parte de las pruebas fue realizada en el laboratorio de Superconductividad Aplicada de la DICIS-UG debido a las capacidades con las que cuenta al laboratorio; en donde se aplicó una corriente alterna variable hasta 200 A. La medición de la distribución de corriente se realizó utilizando el osciloscopio Fluke 199C conectado directamente a los sensores Rogowski que esta colocados en el núcleo y las cintas HTS.

Con el fin de lograr la evaluación completa del prototipo del cable llevando este a su máxima capacidad, se realizó una segunda prueba en las instalaciones del Laboratorio de Pruebas Equipos y Materiales (LAPEM) de la CFE, en el Laboratorio de Distribución, en donde se cuenta con una fuente variable de CA hasta 4,000 A para pruebas de diferentes equipos. En este caso se aplicó una corriente variable en forma ascendente y descendente hasta 1200 A, ya que es la capacidad máxima del prototipo del cable HTS, ver Fig. 8.

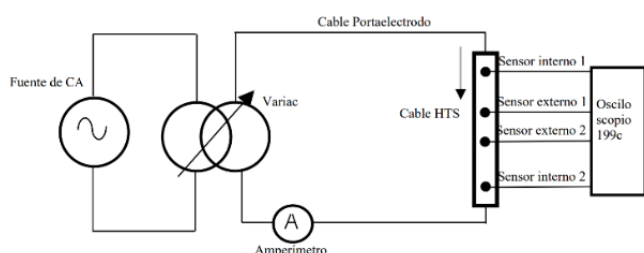


Fig. 6. Circuito de prueba durante la evaluación del cable superconductor.

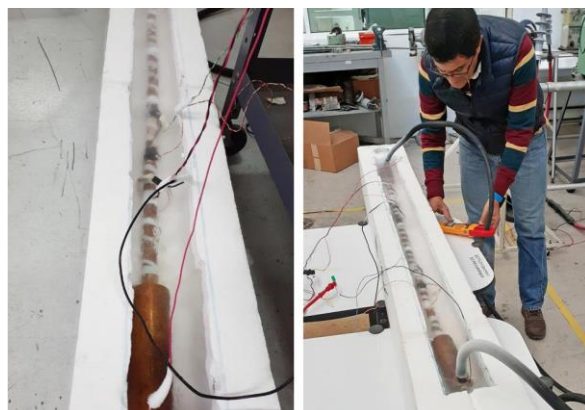


Fig. 7. Cable HTS sumergido en nitrógeno.



Fig. 8. Prueba del cable HTS en el LAPEM a 1200 A.

IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la evaluación realizada en la DICIS-UG a 200 A, se muestran la Fig. 9, en donde se observa que existe la distribución de corriente entre el núcleo de Cu y las cintas HTS, siendo la conducción de corriente mayor en la capa superconductora que en el núcleo de Cu.

En el caso de las evaluaciones realizadas en el LAPEM, muestra una relación de 695 A por las cintas, con respecto a 498 A que transporta el núcleo, Fig. 10, considerando que la resistencia del conjunto de cintas Cu es del orden $m\Omega$ y el conjunto de cintas (Re)BCO está en el orden de $\mu\Omega$, las cintas (Re)BCO transportan el 99 % de corriente.

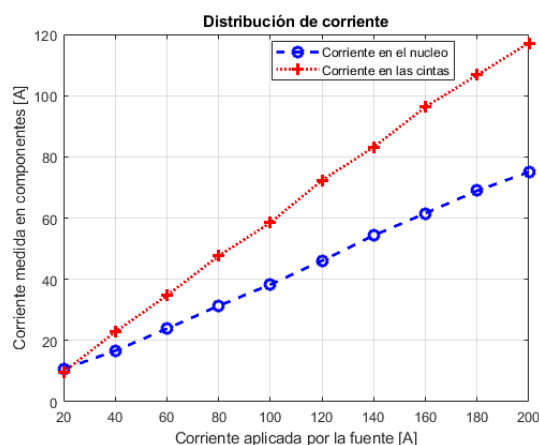


Fig. 9. Distribución de corriente durante la prueba 200 A, entre las cintas y núcleo Cu.

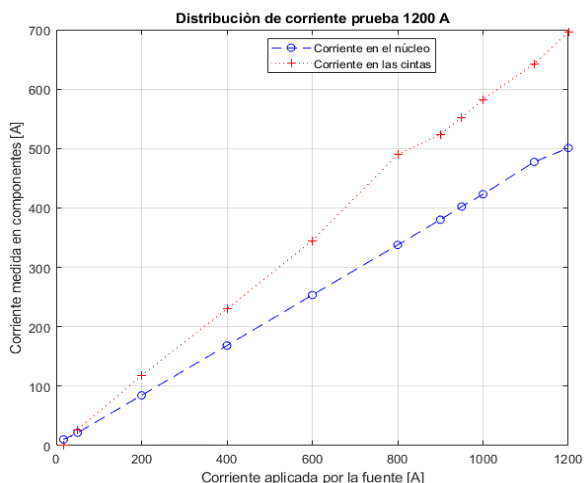


Fig. 10. Distribución de corriente entre las cintas HTS y el núcleo en la prueba a 1200 A.

V. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado con éxito el primer prototipo cable superconductor de alta temperatura. Diseñado para 1.2 kA con pruebas hasta 1200 A realizadas en corriente alterna para mostrar el rendimiento de la configuración propuesta. Cumpliendo con los objetivos de distribución de conducción de corriente sin exceder campos críticos, con un ligero aumento de conducción de corriente por el núcleo, comprobado en las pruebas a 1200 A, debido a factores como la soldadura y manufactura, factores que nos favorecen y permitirán una mayor aceptación de conducción por parte del cable.

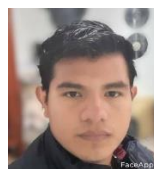
El sistema se comportó de manera estable en el análisis y durante las pruebas. Estas pruebas de estabilidad de sus componentes, solo es el inicio, ya se cuenta con convenios para realizarle pruebas, en donde se espera que este desarrollo de los sea evaluado en el Energy Lab 2.0, del Karlsruhe Institute of Technology, de Alemania.

VI. REFERENCIAS

- [1] Ziad Melhem, High temperature superconductors (HTS) for energy applications, 1st, 1518 Walnut Street, Suite 1100, Philadelphia, PA 19102-3406, USA: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [2] C. Ryu, H. Jang, C. Choi, Y. Kim and H. Kim, "Current status of demonstration and commercialization of HTS cable system in grid in Korea," 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Beijing, 2013, pp. 539-542, doi: 10.1109/AEMD.2013.6780843.
- [3] M. A. Prsa, N. D. Mucalica and K. K. Kasas-Lazetic, "Determination of electromagnetic field in a three-phase system with three single-core power electric cables 110 KV," IEEE EUROCON 2009, St.-Petersburg, 2009, pp. 2040-2045, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167928.
- [4] M. Breschi, E. Berrospe-Juarez, P. Dolgosheev, A. González-Parada, P. L. Ribani and F. Trillaud, "Impact of Twisting on Critical Current and n-value of BSCCO and (Re)BCO Tapes for DC Power Cables," in IEEE Transactions on Applied

Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp. 1-4, June 2017, Art no. 5401404, doi: 10.1109/TASC.2017.2669142.

- [5] Dariusz Czerwinski, Modelling the critical parameters of high temperature superconductor devices in transient states, Lublin: Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618, 2013
- [6] D. Czerwinski, L. Jaroszynski, M. Majka, J. Kozak and B. Charnas, "Comparison of Overcurrent Responses of 2G HTS Tapes," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 3, pp. 1-4, April 2016, Art no. 5602904, doi: 10.1109/TASC.2016.2520080.
- [7] Jack R. Greenwood, Elizabeth Surrey, Damian P. Hampshire, "The Biaxial Strain Dependence of JC of a (RE)BCO Coated Conductor at 77 K in Low Fields", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 5, August 2019
- [8] D. C. van der Laan et al., "Anisotropic in-plane reversible strain effect in Y0.5 Gd0.5Ba2Cu3 O7-δ coated conductors," Supercond. Sci. Technol. vol. 24, no. 11, 2011, Art. no. 115010
- [9] H. S. Yang et al., "Cryogenic design of termination cryostat for HTS power cable," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, pp. 1750-1753, June 2004, doi: 10.1109/TASC.2004.831068.



JOSÉ FRANCISCO ARREGUÍN GONZÁLEZ Estudiante de ingeniería eléctrica en la Universidad de Guanajuato Campus Irapuato Salamanca, participo en el proyecto de "Cambio de velocidad por conmutación electrónica de polos en motores de flujo axial" y como coautor en el proyecto de "Detección de fallas incipientes en el núcleo del estator en máquinas eléctricas rotativa". Actualmente se encuentra realizando su tesis en el diseño de líneas de transmisión compactas.



NATALI ANDREA PLANCARTE LÓPEZ Estudiante de ingeniería eléctrica en la Universidad de Guanajuato Campus Irapuato Salamanca, en su trayecto universitario participo en eventos como el XVI Encuentro Participación De La Mujer En La Ciencia con el tema "Detección de fallas incipientes en el núcleo del estator en máquinas eléctricas rotativa", en la ciudad de León Gto y Veranos de la Ciencia UG con el tema de "Cable Superconductor de Segunda Generación", actualmente labora en el área de ingeniería de proyectos.



ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro, realizó estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Alta Tensión en la F.I.M.E.E. de la Universidad de Guanajuato, Doctorado por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España becado por el CONACYT, en diseño y construcción de motores superconductores de flujo axial de alta temperatura. Actualmente es el responsable del laboratorio de Superconductividad Aplicada y Máquinas Eléctricas Especiales. Sus áreas de investigación son la superconductividad aplicada en equipos eléctricos y el uso eficiente de la energía en los sistemas eléctricos.



ROBERTO CRUZ TORRES Técnico, instrumentista industrial en la Escuela Técnico Terminal oficial Estatal 18 de marzo. Cuenta con cursos capacitación certificado en Sistema Eléctrico Industrial, Seguridad Industrial Nivel Supervisor, diagnosticador de Instalaciones Eléctricas, NSC, First AID Course, ProtoMatS62 LPKF laser y electronics. Actualmente es encargado de la bodega del taller de ingeniería eléctrica.

Análisis de la Respuesta a la Frecuencia de la Impedancia para la Detección de Fallas en Devanados de los Transformadores

KATYA KARINA MORALES MEJÍA, ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA

Universidad de Guanajuato
División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca
kk.moralesmejia@ugto.mx
gonzaleza@ugto.mx

RESUMEN El análisis de la respuesta a la frecuencia (FRA por sus siglas en inglés) en los transformadores de potencia es una herramienta ampliamente utilizada actualmente como estudio del estado de un transformador y su comportamiento a través de su vida útil, permitiendo conocer el nivel de operación en el que se encuentra el equipo después de un cierto periodo de utilización. Este procedimiento ya se encuentra estandarizado y existen equipos de prueba aprobados por la normativa internacional para desarrollar este tipo de evaluaciones. En el presente trabajo se presenta un modelo didáctico para el estudio de FRA de un transformador el cual es determinado a partir de las mediciones reales sobre un transformador, se hace el análisis de la respuesta a la frecuencia de la impedancia del transformador y se pueden detectar variaciones en su comportamiento. Se analizan y se obtienen curvas características para la interpretación del funcionamiento correcto de un transformador; así como se observan las fallas ocasionados por distintos factores los cuales pueden ser internos o externos.

PALABRAS CLAVE — Modelo de transformador, Análisis FRA, Respuesta a la frecuencia, Análisis de la impedancia.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la respuesta en frecuencia se utiliza para identificar problemas mecánicos o eléctricos en los devanados, contactos o núcleos de los transformadores de potencia; cortocircuitos graves o golpes durante el transporte del transformador pueden hacer que el devanado se mueva o se deforme. Se recomienda realizar las pruebas de FRA al final de la prueba de aceptación en fábrica para establecer la huella digital inicial del transformador.

El FRA se basa en la comparación de una prueba actual con una prueba de referencia. Cuando no se dispone del registro de fábrica, la evaluación se puede realizar comparando los resultados entre fases o de un transformador similar [1,2]. Estas fallas detectadas pueden confirmarse mediante otras mediciones, como la resistencia del devanado de corriente continua, la respuesta en frecuencia de pérdidas de dispersión (FRSL), la impedancia de cortocircuito/reactancia de dispersión, la corriente de excitación o la medición de la relación de transformación del transformador (TTR).

El FRA es un método no invasivo. Permite la evaluación confiable de la integridad del transformador de potencia sin aplicar alta tensión. Ningún otro método es tan sensible a las deformaciones mecánicas de la parte activa de los transformadores de potencia como el FRA.

A menudo, FRA puede detectar defectos graves del transformador, al igual que otras pruebas eléctricas. Sin embargo, debido a la sensibilidad de la prueba, un beneficio principal de FRA es la posibilidad de detección de defectos en la integridad mecánica o eléctrica del transformador que no son evidentes con otras pruebas eléctricas.

En general las fallas encontradas en un transformador según la frecuencia aplicada son [3-5]:

- A. Frecuencias Bajas (20 Hz a 10kHz)
 - Problemas en el núcleo.
 - Devanados abiertos/ cortocircuitados.
 - Malas conexiones.
 - Cambio en la impedancia de cortocircuito.
- B. Frecuencias medias (5kHz a 100kHz)
 - Deformaciones en los devanados.
- C. Frecuencias Altas (100kHz a 1MHz)
 - Movimientos de los devanados.
 - Conexiones a tierra o conductores internos.

En la Fig. 1 se muestra las bandas de la respuesta a la frecuencia de acuerdo con la norma IEEE [6], en donde en función del rango de la frecuencia a la que se presentan es el tipo de falla que existe en el transformador; este tipo de prueba ya se encuentra estandarizado, así como los equipos para su evaluación e interpretación.

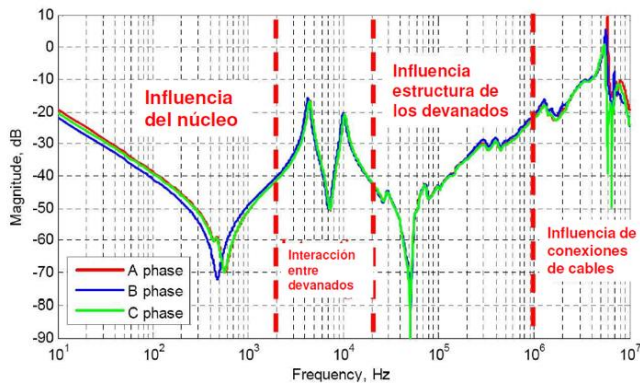


Fig. 1. Fallas Frecuentes del transformador respecto a la frecuencia [6].

II. DESARROLLO

El desarrollo de la evaluación del FRA, se realiza por medio de un método [6], el cual constituye la metodología de prueba estandarizada para llevarla a cabo en donde con los equipos aprobados y de acuerdo con una metodología de conexión se obtienen los parámetros de los transformadores. A continuación, se presentan ambos métodos y sus características principales.

A. METODOLOGÍA PRUEBA ESTANDARIZADA FRA [6-8]

Para llevar a cabo esta metodología, se inyecta una tensión de excitación sinusoidal con una frecuencia continuamente creciente en un extremo del devanado del transformador y se mide la señal de retorno de respuesta en el otro extremo. La comparación de las señales de entrada y salida genera una respuesta en frecuencia exclusiva que puede compararse con el registro inicial de referencia.

El equipo de prueba debe cumplir con una medición de respuesta de frecuencia con las siguientes características:

1. La prueba debe realizarse en un amplio rango de frecuencias para poder diagnosticar problemas en el núcleo, estructura de sujeción, bobinados e interconexiones.
2. Las mediciones sucesivas deben tener la resolución adecuada para proporcionar un diagnóstico inequívoco.
3. El equipo de prueba debe tener los siguientes atributos:
 - a) Calibrado a un estándar aceptable.
 - b) La potencia de salida de la fuente de excitación debe proporcionar la potencia adecuada en todo el rango de frecuencia para permitir una medición consistente de la función de transferencia.
 - c) El equipo de prueba debe ser capaz de medir un rango dinámico suficiente, sobre el rango de frecuencia, para adaptarse a la mayoría de los objetos.
 - d) El sistema de prueba debe proporcionar una impedancia característica constante y conocida.

- e) Se debe utilizar un sistema de tres cables, señal, referencia y prueba, para reducir el efecto de los cables en la medición.
- f) Los cables de prueba deben ser cables coaxiales lo más cerca posible de la misma longitud y menos de 30 m de largo.
- g) Los cables de prueba blindados deben tener la capacidad de conectarse a tierra en cualquier extremo.
- h) Deben presentarse tanto la magnitud como el ángulo de fase de la función de transferencia medida.

En la Fig. 2 se muestra el esquema para la conexión general sobre un equipo y los parámetros de la impedancia que se analizan en el equipo.

Los cambios, el movimiento o la deformación de los componentes internos producen cambios en esta función de transferencia y pueden identificarse mediante la comparación de los trazados en la gráfica obtenida al final de la prueba.

En el caso de la metodología alternativa, esta consiste en hacer mediciones sobre el transformador obteniendo los parámetros para poder realizar y construir un circuito modelo del transformador, considerando las conexiones internas en el transformador

B. MÉTODO ALTERNATIVO

Para este caso se debe de obtener un circuito equivalente (RLC) con parámetros reales de acuerdo con el diseño del transformador (Δ -Y), y analizarse por medio de cualquier software para el modelado de circuitos eléctricos; en este caso se realizó mediante el Software Matlab – Simulink; dicho Software cuenta con las herramientas para la correcta interpretación y modificación de distintos valores de acuerdo con parámetros preestablecidos de fallas comunes.

La Fig.3 muestra los componentes pasivos de un transformador y su interrelación en el diseño típico del transformador; de acuerdo con dicha figura se consideran los valores de cada uno de los parámetros mostrados en ella, los cuales se pueden poner dentro de un circuito de acuerdo con la Fig. 4 para considerar un circuito alternativo basado en los parámetros reales del transformador [8]. Mediante un equipo RLC, se hacen las mediciones para la determinación de los componentes mostrados en la Tabla I.

Las mediciones entre devanados de alta tensión, así como de baja tensión, se realizan por medio de un analizador de circuitos RLC en donde se consideran los mismos parámetros de elementos pasivos para cada una de las fases.

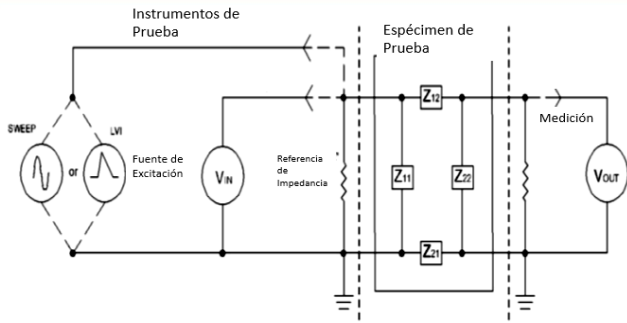


Fig. 2. Esquema de la conexión general para medición de FRA de acuerdo con la norma IEEE [6].

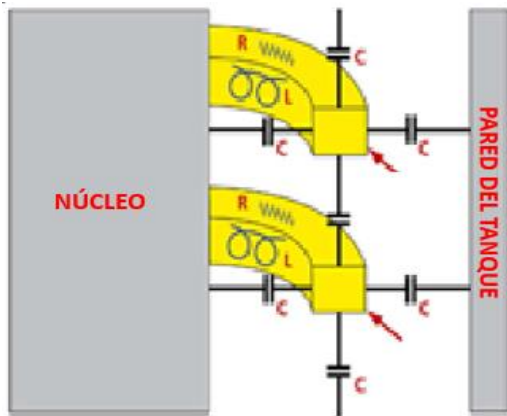


Fig. 3. Conexión de componentes pasivos del transformador.

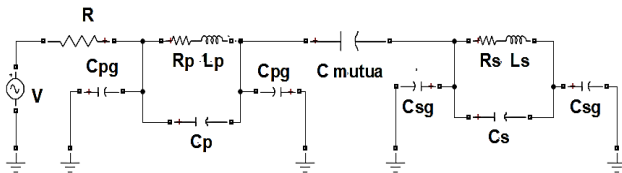


Fig. 4. Circuito equivalente, una fase de transformador.

TABLA I. DEFINICIONES DE PARÁMETROS EN CIRCUITO RLC.

Parámetro	Definición
V	Tensión de prueba
R	Resistencia de acoplamiento
R _p	Resistencia del Primario
R _s	Resistencia del Secundario
L _p	Inductancia del Primario
L _s	Inductancia del Secundario
C _p	Capacitancia del Primario
C _s	Capacitancia del Secundario
C _{pf}	Capacitancia por fase del Primario
C _{sf}	Capacitancia por fase del del Secundario
C _{pg}	Capacitancia del devanado primario a Tierra
C _{sg}	Capacitancia del devanado Secundario a Tierra
C _{mutua}	Capacitancia entre devanado Primario y Secundario

En la [Tabla I](#) se muestra la identificación de cada uno de los elementos del circuito de la [Fig. 4](#), para su análisis.

Cabe señalar que en todas las mediciones de FRA, las técnicas de puesta a tierra tendrán un efecto significativo en los resultados de la prueba. Por lo tanto, la puesta a tierra, incluida la selección de los conductores de tierra, así como sus rutas, deben ser precisas, repetibles y documentadas.

Para el desarrollo del circuito completo del transformador se considera el circuito de la [Fig. 4](#) y este se repite para cada una de las fases, considerando la conexión en la que se encuentran cada una de estas; en el caso de una conexión Δ (primario) y (secundario), se consideraría dicho circuito con las conexiones entre cada una de las fases y sus capacitancias asociadas a estas (C_{pf}, C_{sf}).

Y en la [Fig. 5](#) se muestra el esquema de conexión para su análisis, de un transformador en conexión Δ-Y obtenido a partir del circuito de la [Fig. 4](#); en este caso se encuentra con un neutro flotado.

Las conexiones tanto del primario con el núcleo y del secundario respecto al tanque; respecto a la [Fig. 5](#) se observan dichas conexiones aterrizadas para obtener el mismo efecto capacitivo; la fase de alta tensión que físicamente se encuentra conectada al núcleo mediante la cual se encuentra aterrizada en el Software se conectara directamente a tierra para conservar las propiedades de cada elemento dentro del circuito RLC planificado. La parte de baja tensión a diferencia de la conexión de alta tensión quedara sin el neutro aterrizado, esto con la finalidad de no afectar los elementos pasivos con ruidos innecesarios que se llegan a generar al considerar un corto circuito por la conexión en Y.

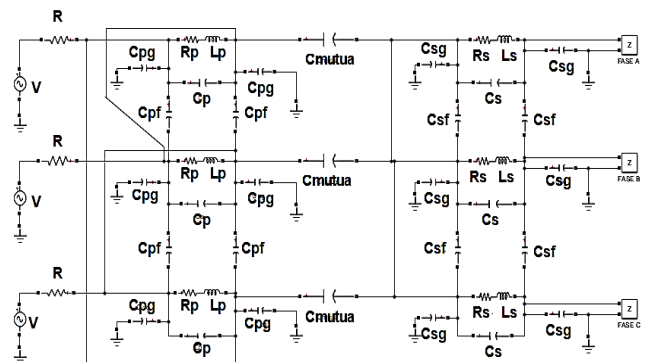


Fig. 5. Circuito equivalente, transformador trifásico conexión Δ-Y, neutro flotado.

III. EXPERIMENTACIÓN

Para el uso del método alternativo del FRA se hace la medición de la impedancia de una sola fase y posteriormente de cada una de las fases tomándose como referencia la que no se encuentra acoplada con otra fase; es necesario considerar los siguientes puntos:

1. Conocer los valores para la impedancia, resistencia y capacitancia de cada devanado de las fases.
2. Conocer los valores y pérdidas de las conexiones entre fase.
3. Considerar las puestas a tierra de manera adecuada de acuerdo con la conexión que se esté llevando a cabo.
4. Considerar una resistencia de acoplamiento con un rango de valores donde se pueda desprejar la corriente.
5. Añadir una fuente de prueba sinusoidal con su respectivo desfaseamiento entre cada una de las fases.
6. Conocer el tipo de falla que refleja cada componente pasivo del circuito RLC.
7. Considerar los cambios en los componentes que determinan una falla mecánica- eléctrica.

En la [Tabla II](#) se muestran los valores de cada uno de los parámetros obtenidos para un transformador en buenas condiciones, en este caso se toman los mismos parámetros para cada una de las fases, ya que estas se encuentran en buen estado y se suponen similares en cuanto a su diseño.

En el caso de un transformador con falla, los parámetros obtenidos se muestran en la [Tabla III](#), observándose únicamente diferencias en la fase B, simulando un desplazamiento de la fase B acercándola a un punto de tierra.

A partir de los parámetros de las [Tablas II](#) y [III](#), se obtienen graficas comparativas para interpretación de un transformador en condiciones óptimas y otro con falla.

TABLA II. PARÁMETROS DE CIRCUITO RLC EN BUENAS CONDICIONES PARA UNA SOLA FASE.

Parámetros	Primario	Secundario
Rp / Rs	250MΩ	3850MΩ
Lp / Ls	1350 mH	650mH
Cp / Cs	167 pF	850 pF
Cpf / Csf	167 pF	167 pF
Cpg / Csg	2473 pF	3223 pF
Cmutua	3200 pF	3200 pF

TABLA III. PARÁMETROS DE CIRCUITO RLC EN CONDICIONES DE FALLA.

Parámetros	Primario	Secundario
Rp / Rs (Fase A)	250MΩ	3850MΩ
Rp / Rs (Fase B)	250MΩ	3850MΩ
Rp / Rs (Fase C)	250MΩ	3850MΩ
Lp / Ls (Fase A)	1350 mH	650mH
Lp / Ls (Fase B)	1350 mH	650mH
Lp / Ls (Fase C)	1350 mH	650mH
Cp / Cs (Fase A)	167 pF	850 pF
Cp / Cs (Fase B)	167 pF	850 pF
Cp / Cs (Fase C)	167 pF	850 pF
Cpf / Csf (Fase A)	167 pF	167 pF
Cpf / Csf (Fase B)	29730 pF	167 pF
Cpf / Csf (Fase C)	167 pF	167 pF
Cpg / Csg	2473 pF	3223 pF
Cmutua	3200 pF	3200 pF

IV. RESULTADOS

Los resultados de la simulación se muestran a continuación en donde en la [Fig. 6](#), se observa la respuesta a la frecuencia de la impedancia del transformador de acuerdo con los parámetros medidos previamente ([Tabla II](#)) así como el comportamiento de la fase que se observa en la [Fig. 7](#), para las condiciones de un transformador sin falla.

En la [Fig. 6](#) se observa la impedancia medida desde las conexiones del lado secundario, obteniendo la misma impedancia de la fase A con respecto a la fase C; esto de acuerdo a que ambas fases tienen conexiones independientes, es decir su conexión Y no interfiere con otras fases ya sea del lado primario o secundario; cosa contraria con la fase B, ya que esta fase toma en cuenta las capacitancias entre fase de dos distintas fases (fase A-B y fase C-B) del lado primario; esto conlleva a un ligero cambio en la impedancia obtenida del lado secundario.

La [Fig. 7](#), se muestra un resultado parecido a los obtenidos de la [Fig. 6](#), en donde el desfaseamiento de acuerdo con la frecuencia, lo cual produce el mismo cambio que en la impedancia de acuerdo con la igualdad entre fase A y fase C, así como la diferencia en la fase B.

Para el caso de un transformador con falla, la simulación se hace a partir de los datos mostrados en la [Tabla III](#). En este caso debido a que la simulación en cada una de las fases sería muy similar, únicamente se analiza la fase con falla que en este caso es la fase B, encontrándose diferencias de la variación de la impedancia en función de la frecuencia, respecto al registro inicial. Esto se muestra en la [Fig. 8](#), en donde se observa esta diferencia.

En el caso del análisis de la fase, es resultado muestra ser más evidente, de acuerdo con lo mostrado en la Fig. 9, ya que en este caso el desplazamiento se tiende a mover hacia el rango de 10^3 Hz, coincidiendo con la frecuencia de la interacción entre devanados.

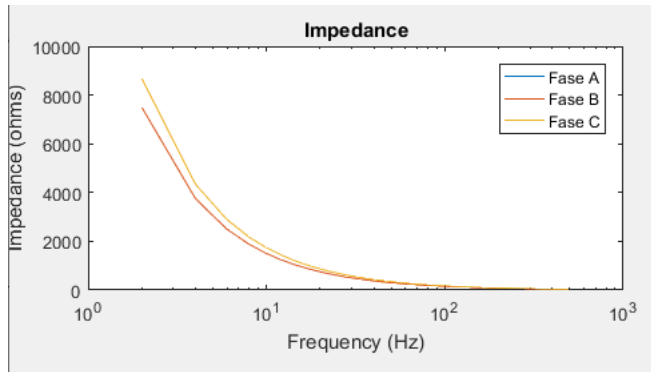


Fig. 6. Impedancia de circuito trifásico.

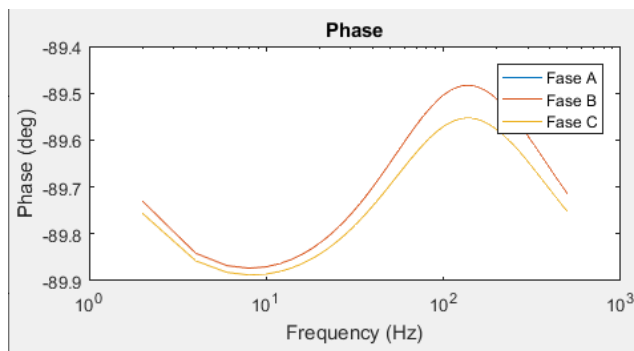


Fig. 7. Desfasamiento de Circuito Trifásico en condiciones ideales.

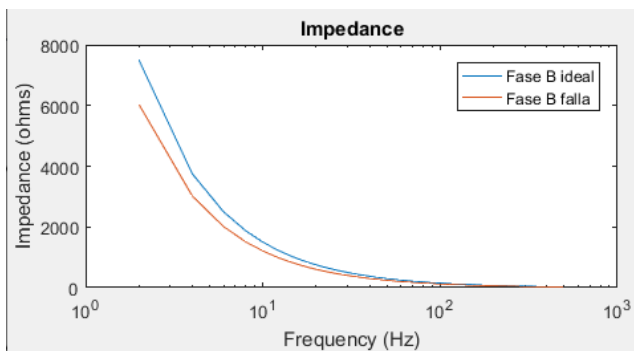


Fig. 8. Comparativo entre el desplazamiento de la impedancia respecto a su posición original en condiciones de falla.

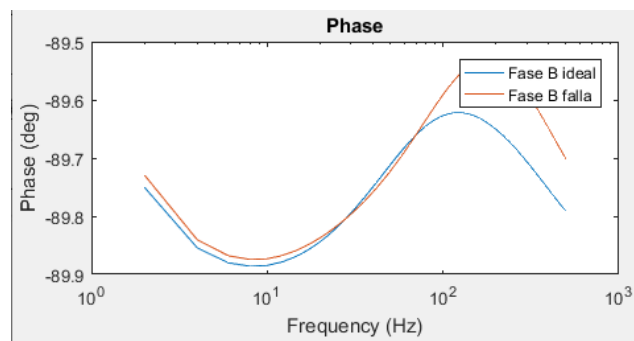


Fig. 9. Análisis de la fase respecto a su condición inicial y en condiciones de falla.

V. CONCLUSIONES

Se muestra una metodología de prueba que puede ser implementada para el análisis de fallas en transformadores a partir de un circuito obtenido a partir de parámetros reales.

Este circuito puede ser obtenido por medio del empleo de un equipo sencillo y de bajos costo, como es un puente RLC portátil, en comparación de equipo más costoso como es el utilizado para la prueba de FRA estandarizada.

El objetivo de este trabajo es la comprensión del fenómeno de la respuesta a la frecuencia de un transformador a partir del análisis de la impedancia del circuito simulado a partir de las mediciones reales en un transformador.

Dicho concepto de prueba fue bastante eficiente para poder ahorrarse la prueba física del transformador, esto debido a las condiciones bajo las cuales nos hemos visto afectadas y para poder seguir implementando conocimientos y obtener el seguimiento adecuado de distintas normas que se deben llevar a cabo para la certificación y mejora continua en las maquinas eléctricas.

REFERENCIAS

- [1] D. A. K. Pham, T. M. T. Pham, H. Borsi and E. Gockenbach "A New Method for Purposes of Failure Diagnostics and FRA Interpretation applicable to Power Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 6; December 2013
- [2] CIGRE Report 342 WG A2.26, "Mechanical-condition assessment of transformer windings using FRA", 2008.
- [3] IEC 60076-18 Ed. 1.0, "Power Transformers - Part 18:
- [4] D. A. K. Pham, T. M. T. Pham, V. N. C. Ho, H. Borsi and E. Gockenbach, "Measurement-based Physical Transformer Parameters for FRA Interpretation and Failure Diagnosis-Part I: Core analysis", IEEE Trans. Power Delivery, 2013.
- [5] D. A. K. Pham, T. M. T. Pham, V. N. C. Ho, H. Borsi and E. Gockenbach, "Measurement-based Physical Transformer Parameters for FRA Interpretation and Failure Diagnosis-Part II: Winding analysis", IEEE Trans. Power Delivery, 2013.
- [6] IEEE C57.149, "Guide for the Application and Interpretation of FRA for Oil Immersed Transformers", 2012.
- [7] J. A. Martinez, R. Walling, B. A. Mork, J. Martin-Arnedo, and D. Durbak, "Parameter determination for modeling system transients- Part III: Transformers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 2051-2062, 2005
- [8] B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ishchenko, D. L. Stuehm, and J. Mitra, "Hybrid transformer model for transient simulation - Part I: Development and Parameters", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 248-255, 2007
- [9] S. V. Kulkarni, and S. A. Khaparde, Transformer Engineering Design and Practice, Marcel Dekker, ch. 3, 2004.

BIOGRAFÍAS



KATYA KARINA MORALES MEJÍA Estudiante de Ingeniería Eléctrica, colaboradora en sociedad de alumnos AMM con conocimientos del área de Ingeniería Mecatrónica, Servicio Profesional en el área de Calidad de la Energía.



ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro, realizó estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Alta Tensión en la F.I.M.E.E. de la Universidad de Guanajuato, Doctorado por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España becado por el CONACYT, en diseño y

construcción de motores superconductores de flujo axial de alta temperatura. Actualmente es el responsable del laboratorio de Superconductividad Aplicada y Máquinas Eléctricas Especiales. Sus áreas de investigación son la superconductividad aplicada en equipos eléctricos y el uso eficiente de la energía en los sistemas eléctricos.

Diseño y construcción de una esfera integradora para determinar la vida útil en LEDs de potencia

CRISTIAN JESÚS ROBLES AGUILAR¹, MARIO ALBERTO JUAREZ BALDERAS². GILBERTO MUÑOZ MORENO², ADOLFO RAFAEL LÓPEZ NÚÑEZ²

¹Alumno del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

²Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

cristianjesus0809@hotmail.com

mario.jb@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN Actualmente los sistemas de iluminación basados en LED de potencia tienen un gran auge, ya que este tipo de iluminación es compacta, de bajo costo, mejor eficacia luminosa y una mayor vida útil. Para establecer la vida útil de un LED se deben considerar varios parámetros, uno de los más importantes es la temperatura del LED, a mayor temperatura del LED, este sufre un mayor deterioro y por ende una corta vida útil, la cual, y de acuerdo con la norma LM80 indica que un LED llega a su fin cuando este pierde un 20% de su flujo luminoso, y para medir este flujo luminoso es necesario una esfera integradora. Este artículo se divide en dos partes: la primera presenta el diseño y fabricación de una esfera integradora equipada con un luxómetro para medir el flujo luminoso, se detalla el tipo los materiales empleados para su construcción, así como el cálculo para obtener la constante k de la esfera, dicha constante es la variable de ajuste que se obtiene mediante el promediado de varias pruebas bajo ensayo con lámparas patrón de las cuales se conocen previamente sus características eléctricas y lumínicas. La segunda parte del artículo emplea una esfera integradora para determinar la vida útil de un LED de potencia, en donde este se envejeció durante nueve mil horas a 85 °C y se determinó que en ese tiempo se llegó a un 89% del flujo luminoso y que la resistencia en CD del LED disminuyó.

PALABRAS CLAVE — LED, Vida útil, esfera de Ulbricht.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los equipos más utilizados en un laboratorio de fotometría, para determinar el flujo luminoso de cualquier tipo de lámpara, es la implementación de una esfera de Ulbricht [1].

Una esfera de Ulbricht o esfera integradora se caracteriza principalmente por ser hueca en su interior, estar recubierta por una pintura blanca especial con cierta concentración de sulfato de bario (BaSO_4) la cual añade propiedades como el texturizado de la pintura sin comprometer el esplendor, alta reflectancia, anticorrosión y soporte de temperaturas de hasta 350°C, con esto se obtiene una alta reflectancia de hasta el 99% dependiendo de la calidad, pureza y concentración del sulfato de bario mezclado en la pintura blanca [2].

Para que una esfera de Ulbricht se comporte como esfera integradora es necesario poner una barrera, esta barrera conocida como deflector se sitúa entre el equipo de medición y el foco luminoso, mediante esta prueba también se determina que la esfera es una superficie Lambertiana y por tanto refleja la luz uniformemente en cualquier punto de la esfera [1][3].

Por otra parte, cuando se llega al fin de la vida útil del LED (light emitting diode, por sus siglas en inglés) su luminosidad se reduce entre un 70% y 80%, lo cual lo establecen las normas LM70 y LM80. La reducción de la

luminosidad que emite el LED es debido al envejecimiento de este a lo largo de su vida útil, dicho envejecimiento tiene efectos sobre los materiales de los cuales está compuesto el LED, además de efectos eléctricos que se pueden observar en el voltaje y corriente, esto es adicional al flujo luminoso [4].

II. DESARROLLO

A. FLUJO LUMINOSO E ILUMINANCIA

La iluminancia es el flujo luminoso incidente sobre una superficie por unidad de área, habitualmente se denota como E , su unidad de medida es el lux (lx) [1].

El flujo luminoso (Φ): es una medida de la potencia total de luz visible emitida por las fuentes de radiación. Al hablar de cantidad total de luz se dice que el flujo luminoso proporciona una medida cuantitativa y global de la cantidad de luz que la fuente luminosa emite en todo el espacio que le rodea. Su unidad de medida es el lumen (lm) [1].

En la Fig.1 se muestra un ejemplo de las diferencias entre la iluminancia y el flujo luminoso, estas dos unidades de medida son parte fundamental del presente artículo. Como se observa en la Fig. 1 la iluminancia cambia según la distancia y el área que cubre el haz de luz proveniente del LED, por tanto, la iluminancia es equivalente al flujo luminoso sobre un área en específico, como se observa al ser mayor el área en donde se incide ese flujo luminoso la iluminancia disminuye, en caso contrario, el flujo luminoso es el mismo

en todo el haz de luz que emite el LED, por ello es que se dice que el flujo luminoso es equivalente a la cantidad de luz que una fuente luminosa emite entorno al espacio que le rodea.

B. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se reportan los materiales de construcción para la esfera, el tipo de LED patrón empleado para la calibración de la esfera, posteriormente en la siguiente sección se muestra la obtención del promedio para obtener la constante k de la esfera.

Inicialmente se realizó un modelado 3D haciendo uso del software AutoCAD (software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y modelado 3D), en el cual se presentó la idea de diseño para la estructura de la esfera de Ulbricht. Para construir la estructura para la esfera se usó perfil de aluminio estructural el cual, tiene dos ranuras con un ancho de 8 milímetros en toda la longitud del perfil, este material fue utilizado debido a su versatilidad, durabilidad, dureza y peso ligero. La esfera de integradora modelada en 3D se muestra en la Fig. 2 con las dimensiones reales de construcción.

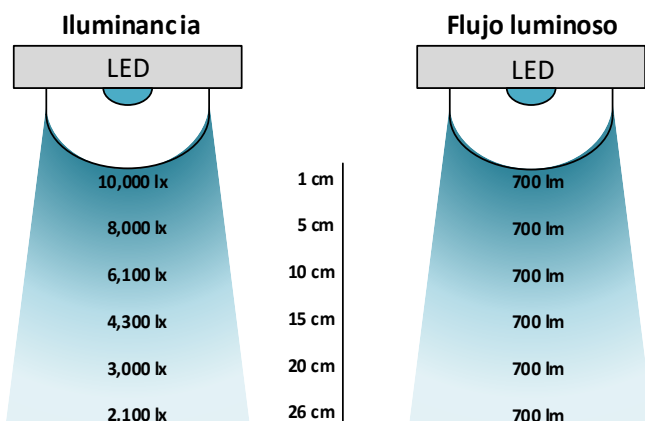


Fig. 1. Diferencia entre iluminancia y flujo luminoso. (Fuente: Elaboración propia).

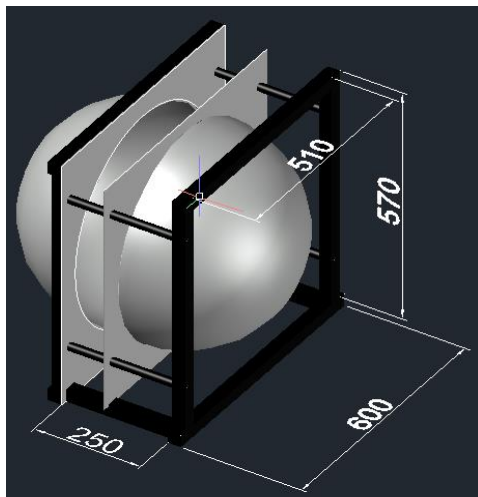


Fig. 2. Esfera de Ulbricht, con dimensiones reales en milímetros.

El material utilizado para la esfera es acrílico transparente de alto impacto de 3 milímetros de grosor, moldeado en dos partes semiesféricas de 500 milímetros de diámetro, el hecho de usar acrílico de alto impacto es con la finalidad de añadir más robustez a la esfera y por ende tenga una mayor duración, estas semiesferas están montadas dentro de un marco cuadrado de 600 milímetros. Para las guías lineales se escogieron varillas redondas de acero inoxidable de 8 milímetros de diámetro con una longitud de 310 milímetros por cada varilla, los bujes para las guías lineales y la tornillería son de acero inoxidable para mejor estética y mayor durabilidad.

Para la aplicación de la pintura, primero en la parte externa de ambas semiesferas de acrílico se aplicaron 4 capas de pintura base color negro, mediante esta práctica lo que se pretende es que la luz emitida por las lámparas bajo ensayo no salga del interior de la esfera, es necesario que se cubra el total de ambas semiesferas con el color negro uniformemente, continuando con la aplicación de pintura, una vez que las capas de pintura negra se han secado totalmente, se procedió con la aplicación de la pintura de color blanco con una pequeña concentración de sulfato de bario, en el interior de ambas semiesferas de acrílico. Es importante mencionar que se aplicaron cuatro capas uniformes de pintura blanca. Por último, una vez seca la pintura blanca del interior y la pintura negra externa, se añadieron cuatro capas más de pintura gris a la parte externa para proteger a la esfera, esta pintura es empleada en la industria automotriz y tiene un acabado con cierta rugosidad.

Esta parte de la aplicación de la pintura es vital en el desarrollo del prototipo de la esfera, pues se deben cuidar muchos detalles en la aplicación de la pintura para asegurar que la superficie interna de la esfera es una superficie completamente Lambertiana, es decir, una superficie completamente plana cuya finalidad es proporcionar el mismo índice de reflectancia en todos los puntos de la Esfera [1]. La esfera terminada se muestra en la Fig. 3.

C. OBTENCIÓN DE LA CONSTANTE k DE LA ESFERA INTEGRADORA

La constante k de la esfera está determinada por las dimensiones de la esfera, el tipo y calidad de la pintura. Con esta constante k de la esfera, se puede establecer el valor del flujo luminoso que emite una determinada lámpara bajo ensayo, midiendo la Iluminancia E dada en luxes, haciendo uso de la Ec. (1) [2].

$$\Phi = kE \quad (1)$$

Para obtener esta constante se realizan pruebas con varias fuentes de luz, en este caso lámparas comerciales, de las cuales se conocen sus características lumínicas por la información impresa en su empaque, a estas fuentes luminosas se denominan fuente patrón, la constante

$k = 0.1944$ de la esfera se obtuvo promediando los datos de la [Tabla I](#), de las diferentes fuentes luminosas.

III. PRUEBA Y FUNCIONAMIENTO

Para el desarrollo de las pruebas se empleó un LED de luz blanca de la marca LED GOLDEN DRAGON® LUW W5SM, con una potencia de 1W y un flujo luminoso de 80 lm [5], este LED fue montado en un pequeño sustrato de cobre del tipo MCPCB, el cual tiene una resistencia térmica de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C/W}$, el LED junto con el sustrato se colocan en disipadores de aluminio para LED de 1W.

En la [Fig. 4](#) se muestra que la disipación de temperatura del LED bajo prueba es de $35.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, sin embargo, la temperatura ambiente varía a lo largo del año y conforme transcurre el día y la noche, por lo tanto, para que esta variación no afecte en la predicción de la vida útil del LED se coloca en un horno con una temperatura constante de 85°C , dicha temperatura está establecida dentro de las normas de las pruebas térmicas [4], y es considerada para pruebas rápidas de envejecimiento.



Fig. 3. Esfera integradora prototipo final.

TABLA I. LECTURAS DEL LUXÓMETRO CON DISTINTOS FOCOS.

Lectura del luxómetro	Foco	$k\left(\frac{\Phi}{E}\right)$
3780 lx	810 lm	0.2142
4880 lx	840 lm	0.1721
660 lx	130 lm	0.1969

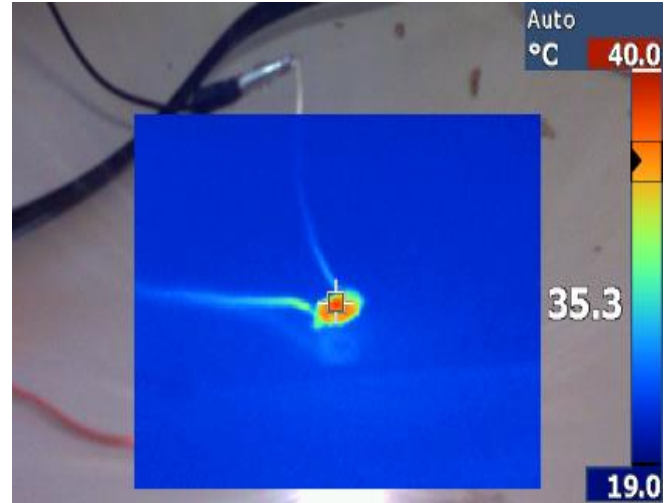


Fig. 4. LED bajo prueba 1.

El foco de 130 lm de la [Tabla I](#) es un foco LED empleado como patrón, para una prueba de funcionamiento que se realizó para corroborar el correcto funcionamiento de la esfera de Ulbricht.

Durante ese periodo se monitorea la corriente, voltaje y temperatura en periodos de 4000 h de funcionamiento, esto bajo las condiciones anteriormente citadas, hasta cumplir con un periodo de 9000 h de maduración. Para esto se empleó una alimentación constante de un convertidor CD-CD (regulador de conmutación) de corriente.

Para las pruebas parciales, se obtuvieron los siguientes valores de lúmenes, al inicio de las pruebas se midieron los 80 lm en un tiempo cero, a las 4000 horas la medición fue de 74.8 lm, y la última medición a las 9000 h se obtuvo 71.2 lm, en términos de porcentaje esta cantidad corresponde a un 89% de la cantidad inicial, según la norma LM80, un LED está al final de su vida útil cuando el porcentaje llega un 80% del valor inicial, por lo tanto, se obtiene una recta que caracteriza la depreciación luminosa, la Ec. (2) obtenida corresponde a la vida útil del LED.

$$Vidautil(h) = -0.001184h + 96.97 \quad (2)$$

En la [Fig. 5](#) se demuestra que el porcentaje de vida útil del LED bajo prueba, aplicando la ecuación (2) para determinar cuándo se llega a un 80% de lúmenes, corresponde al tiempo de 14,300 horas, se puede establecer que el fin de la vida útil llega en ese tiempo, sin embargo, es importante recordar que este valor se obtuvo con una prueba de $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual corresponde a una prueba acelerada.

Durante este intervalo se observó un deterioro de la unión de la curva V-I del LED y se observa que inicialmente la curva V-I (color rojo) tiene una menor pendiente, conforme envejece su pendiente aumenta como se observa en la curva V-I (color verde), se debe considerar que ambas mediciones se realizaron a 25°C , esto se muestra en la [Fig. 6](#).

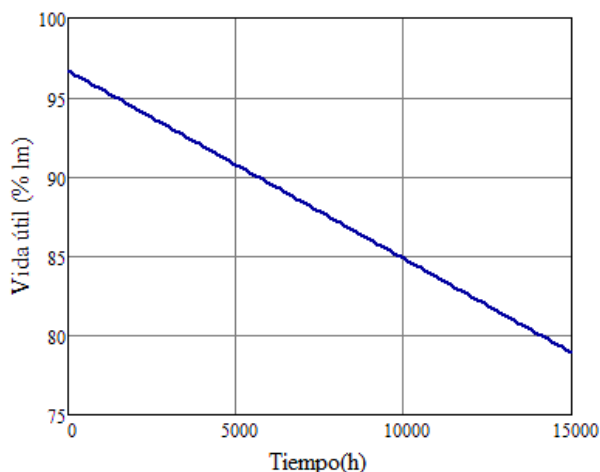


Fig. 5. Recta de la depreciación luminosa del LED bajo prueba.

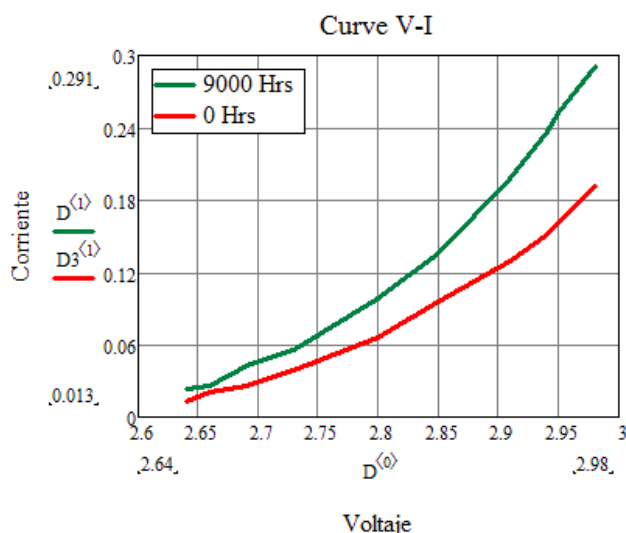


Fig. 6. Curva I.V de LED bajo pruebas a diferentes horas.

La resistencia estática en CD para 0.5W cambia, ya que para un estado inicial corresponde a 16.6Ω y al final de la vida útil a 11.88Ω , se deduce que durante el envejecimiento la resistencia en CD del LED disminuye.

IV. CONCLUSIONES

Hoy en día la adquisición de una esfera integradora puede representar una inversión demasiado elevada, sin embargo, es posible fabricar y diseñar una esfera de Ulbricht con materiales comerciales de fácil acceso y obtener buenos resultados, el ajuste se realiza mediante el promedio de diferentes fuentes verificadas en cantidades de lúmenes, obtenido un ajuste de k . Con dicha esfera se estableció el comportamiento de la vida útil de un LED de una potencia de 1W, a través de las pruebas realizadas durante 9000 h se observa un deterioro de un 11% del flujo luminoso emitido por el LED bajo prueba, mediante la condición de 85°C el fin de la útil del LED, de acuerdo a los establecido es de 14300 horas, dicha condición de temperatura reduce en un tercio la vida útil de la lámpara si esta se compara con una lámpara que opera a 25°C , sin embargo establecer estas condiciones resulta costoso, ya que implica el uso de un disipador de calor

voluminoso, también con el deterioro del LED se observa una disminución de la resistencia CD del LED.

REFERENCIAS

- [1] N. Rivero, A. Cardozo, Guuzmán Pérez y M. Sellanes, "Medida de flujo luminoso en esfera de Ulbricht. Estudio de incertidumbres. Intercomparación con cálculo por integración", Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 10. Montevideo, Uruguay, 2010.
- [2] Jingwei Wang, Xiaoning Li, Dong Hou, Feifei Feng, Yalong Liu, Xingsheng Liu, "Advances in bonding technology for high power diode laser bars," Proc. SPIE 9346, Components and Packaging for Laser Systems, 934605 (20 February 2015).
- [3] Dirección general de desarrollo minero, "Perfil de mercado de la barita", Secretaría de Economía. México. Diembre del 2018. [En línea] Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419280/Perfil_Barita_2018_T_.pdf.
- [4] Willem Dirk van Driel, Xuejun Fan, Guo Qi Zhang "Solid state lighting reliability. Part 2, Components to system" Springer (2018), Part 2, pp. 89.
- [5] OSRAM Opto Semiconductor, «Golden DRAGON datasheet version 1.1 LR W5SM,» EU RoHS compliant product, p. 10, 2014.

BIOGRAFÍAS

CRISTIAN JESÚS ROBLES AGUILAR Estudiante de licenciatura en ingeniería electrónica en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Actualmente se encuentra cursando el 9º semestre de la carrera antes mencionada, tuvo una participación en el 21º Verano de la Ciencia de la Región Centro en el periodo comprendido entre junio-agosto del 2019, dicha participación fue con la realización de un artículo reportado en dicho congreso titulado "Estudio y determinación de la vida útil de los LED de potencia en función de sus formas de onda de alimentación". Actualmente el estudiante realiza su tesis de licenciatura enfocada en la confiabilidad en sistemas de iluminación de estado sólido.

MARIO ALBERTO JUAREZ BALDERAS El Dr. Mario Alberto Juárez Balderas tiene el título de Ingeniero en Electrónica por parte del Instituto Tecnológico de Celaya. Tiene la Maestría en 2004 y un Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica con especialidad en Electrónica de Potencia por parte del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el 2011, sus áreas de interés son: Sistemas de Iluminación electrónica para lámparas HID y de estado sólido, Modelado de lámparas de descarga y LED, confiabilidad en sistemas de iluminación de estado sólido (LED).

GILBERTO MUÑOZ MORENO El Dr. Gilberto Muñoz Moreno nació en Salamanca, Gto., México. Obtuvo el grado de licenciatura como Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en el año de 1996 y el grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Instrumentación y Sistemas Digitales en el año 2004, ambos en Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato, campus Irapuato – Salamanca. Obtuvo el grado de doctor en el Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., en 2015. En el presente se encuentra adscrito a la Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI). Sus áreas de interés dentro de la investigación son procesamiento digital de señales; pruebas ópticas no destructivas, empleando Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado, Tomografía de Coherencia Óptica; aplicación de FPGA al procesamiento de señales.

ADOLFO RAFAEL LÓPEZ NÚÑEZ El Dr. Adolfo Rafael López Núñez nació en Valle de Santiago, Gto., México en 1985. Obtuvo el grado de licenciatura como Ingeniero en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya en el 2008, el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en el 2011 y el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en el 2017. Actualmente el Dr. Adolfo Rafael López Núñez se encuentra adscrito al Instituto Tecnológico Superior de Irapuato como profesor de tiempo completo.

Efecto del inóculo sobre el potencial metanogénico de la biomasa residual de la microalga *Dunaliella Tertiolecta*

KARLA DENISSE LUNA AVELAR¹, ANGEL VALDEZ ORTIZ¹, LOURDES JANETH GERMÁN BÁEZ¹, RAQUEL BARRENA², XAVIER FONT², ANTONI SÁNCHEZ², DAVID ULISES SANTOS BALLARDO³

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México

² Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España

³ Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

karlaluna.fcqb@uas.edu.mx

avaldez@uas.edu.mx

janeth_882@hotmail.com

raquel.barrena@gmail.com

antoni.sanchez@uab.cat

xavier.font@uab.cat

dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN La afinidad inóculo-sustrato es considerado uno de los parámetros importantes al generar energía en forma de metano, a través del proceso de digestión anaerobia. En esta investigación, se analizó el potencial metanogénico de la biomasa residual de microalga, generada durante el proceso de producción de biodiesel. Se emplearon dos inóculos colectados en diferentes localidades de Barcelona, España, en vista de determinar el de mayor afinidad al sustrato empleado. El análisis estadístico muestra que existen diferencias significativas en el PM al emplear ambos inóculos, alcanzando una producción acumulada de $65.8 \pm 8.06 \text{ LCH}_4\text{kg}^{-1}\text{SV}$ con el inóculo de Granollers y de $6.2 \pm 0.05 \text{ LCH}_4\text{kg}^{-1}\text{SV}$ con el inóculo de Sabadell. Dichos resultados muestran una alternativa para la generación de energía renovable a partir de microalgas, bajo un esquema de biorrefinería energética; además, exhibe a la relación C/N como área de oportunidad, al buscar estrategias de mejora del PM del sustrato en estudio.

PALABRAS CLAVE — Digestión anaerobia, potencial metanogénico, inóculo, biomasa residual de microalga.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de los principales retos a los que se enfrentan la ciencia y la sociedad, se han identificado i) el desarrollo de la población mundial, ii) la creciente demanda energética, iii) el agotamiento de los recursos fósiles y iv) el cambio climático, mismos que a su vez, contribuyen a un aumento en la demanda de materias primas que puedan emplearse como combustibles alternativos y sostenibles, cuyo principal objetivo es reemplazar a los combustibles convencionales para proveer la suficiente energía, sin afectar negativamente al medio ambiente, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. En este sentido, la búsqueda de estas alternativas ha llevado al descubrimiento de fuentes de energía renovables, sostenibles y ecológicas. Una de las fuentes más eficaces de producción de energía renovable, son las microalgas, debido a que alcanzan una alta tasa de crecimiento y son capaces de producir grandes cantidades de lípidos, con potencial aplicación en la producción de biocombustibles de tercera generación, como el biodiesel. Sin embargo, el proceso de elaboración de biocombustibles de microalgas presenta limitaciones, lo que se traduce en inviabilidad práctica a nivel económico [2, 3]. Consecuentemente, una estructura de biorrefinería de microalgas que implemente la producción de múltiples

productos, promovería la sostenibilidad de este proceso. Pues además de biocombustibles, se pueden generar productos de alto valor, tales como químicos, alimentos, fármacos y cosméticos, aprovechando las fracciones de aceite, minerales, carbohidratos, proteínas e incluso otros productos energéticos. Cabe mencionar que, durante los procesos de transformación de biocombustibles, se generan subproductos tales como la biomasa residual de microalga (BRM), la glicerina y el digestato, mismos que tienen el potencial de transformarse para obtener valor agregado [4]. Por ejemplo, Santos-Ballardo *et al.*, (2015), reportaron una forma alternativa de tratar los residuos derivados de la producción de biodiesel de la microalga *Tetraselmis suecica*, al someter a digestión anaerobia (DA) a la BRM con glicerol, similar al residual [5]. Aunado a esto, diversos autores han reportado que la biomasa de cualquier especie de microalgas o incluso la residual, puede emplearse en DA, ya sea como sustrato único o en co-digestión, sin importar su contenido lipídico, a diferencia de la producción de biodiesel, donde esta última característica es de gran importancia. Además, se ha demostrado que la generación de metano (CH_4) puede llegar a ser de mayor intensidad energética que la producción de biodiesel a base de microalgas. Asimismo, el empleo de la BRM brinda un concepto integral al utilizar la misma biomasa para la producción de biodiesel y biogás, puesto que

la BRM contiene proteínas y carbohidratos residuales biodisponibles para su degradación en biogás durante la DA [6]. Cabe señalar que es importante tomar en cuenta diversos parámetros durante el proceso anaeróbico, que asegure una buena conversión del sustrato en biogás con alto contenido de CH₄. Ejemplos de dichos parámetros son el pH, la relación C/N, la composición y cantidad del sustrato, así como la afinidad del inóculo a este último, asegurando la degradación de sus componentes por la actividad de los microorganismos presentes en el inóculo [7]. En la presente investigación, se determinó el potencial metanogénico (PM) de la BRM de la microalga *Dunaliella tertiolecta*, estudiada para la extracción de diversos compuestos de interés por el grupo de investigación. El PM se analizó empleando dos inóculos de diferente naturaleza en la búsqueda del más afín a dicho sustrato, lo que permitiría establecer un proceso viable para la generación de biocombustibles de tercera generación.

II. DESARROLLO

Este apartado comprende la información correspondiente a los materiales y metodología empleados para la realización de esta investigación, los resultados obtenidos, así como una breve discusión de los mismos.

A. MATERIAL Y MÉTODOS

1. Sustrato

La biomasa residual de microalga (BRM), de la especie *Dunaliella tertiolecta*, fue obtenida después del proceso de extracción de lípidos, se recolectó, secó (70 °C/12 h) y conservó en refrigeración a 4 °C para su posterior utilización como sustrato.

2. Inóculos

El proceso de DA se realizó empleando lodos activados como inóculos, colectados de digestores anaerobios localizados en dos puntos diferentes de la ciudad de Barcelona, España. El primer inóculo fue colectado del digestor mesofílico de la planta tratadora de la fracción orgánica de residuos municipales del ECOPARC en Granollers (ECO), y el segundo inóculo se colectó del digestor de recirculación mesofílico de la planta tratadora de aguas residuales en Sabadell, España (SAB).

3. Caracterización del sustrato e inóculos para la DA

Previo a las pruebas de DA, se caracterizaron la BRM y ambos inóculos (ECO y SAB) para determinar sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV); para ello, se pesaron tres muestras de 1 g ± 0.1 de BRM secas y tres muestras de 10 g ± 0.1 de cada inóculo. Las muestras fueron sometidas a 105 °C por 24 h y subsecuentemente se realizó la combustión de las mismas (550 °C por 4 h) [8].

4. Análisis elemental. Relación C/N

Inicialmente se pesaron 0.1 g de BRM y de cada uno de los inóculos previamente secado utilizando una microbalanza (MX5 Mettler Toledo). Posteriormente, la determinación de C, H, N y S, se llevó a cabo por combustión de las muestras

a 1200 °C en atmosfera de oxígeno empleando un analizador elemental CHNS (Thermo Scientific Flash 2000). Finalmente, se cuantificó mediante cromatografía de gases; una vez determinado el contenido de C y N, se estableció la relación C/N de cada uno de los materiales.

5. Análisis del potencial metanogénico de la BRM

La producción de CH₄ a partir de la BRM se determinó por triplicado mediante DA, empleando pruebas de potencial metanogénico por lotes. Previamente a la realización de los experimentos de DA, los inóculos se mantuvieron 5 días en inanición, a 37 ± 1 °C hasta que no se detectó producción de biogás endógena. Los experimentos se realizaron en botellas de vidrio selladas (250 mL), equipadas con un septo hermético para punción para la medición del volumen de biogás producido. Simultáneamente se desarrollaron pruebas de control negativo, que contenían inóculo solamente; los resultados de las pruebas control se utilizaron para corregir la producción de biogás residual. El volumen de biogás generado se analizó diariamente, éste se calculó utilizando el incremento de presión en el espacio de cabeza de los reactores, obtenido mediante un manómetro ISE30A (SMC corporation, Japan). La producción acumulada de biogás se calculó en litros por gramo de sólido volátil agregado a condiciones normales (1 atm, 273 K) [9]. Adicional y periódicamente, se tomaron muestras de biogás para analizar el contenido de metano mediante un cromatógrafo de gases (Hewlett Packard 5890A) equipado con un detector de conductividad térmica, la columna utilizada fue tipo Porapak Q3 m x 1/8" x 2.1 mm D.I. (Teknokroma, Barcelona, España), se utilizó Helio como gas acarreador con una presión de 338 kPa, la temperatura del horno se mantuvo a una temperatura constante de 70 °C por 8 min, las temperaturas del inyector y el detector fueron de 150 °C y 180 °C, respectivamente.

6. Análisis estadístico

Los resultados del volumen de CH₄ generado a partir de la DA de la BRM se analizaron mediante un ANOVA de 1 factor (tipo de inóculo). Al encontrarse diferencias significativas, se realizó, además, la comparación de medias mediante la prueba de rangos múltiples de Fisher (LSD, $p \leq 0.05$). A partir del análisis estadístico se determinó el inóculo que presentó mayor afinidad, en cuanto a la mayor producción de CH₄ generada.

B. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Caracterización de la BRM e inóculos

La [Tabla I](#) muestra los resultados obtenidos de la caracterización de la BRM y ambos sustratos. Es importante mencionar que los ST corresponden a aquellos sólidos sedimentables, sales y minerales disueltas, e incluso materia orgánica, donde a su vez se encuentra la fracción de SV, esta última es capaz de volatilizarse durante la incineración, al

igual que otros compuestos inorgánicos, durante la caracterización de la materia orgánica (MO) [8]. En cuanto a los bajos valores obtenidos de ST de ambos lodos activados, se puede señalar como una característica particular de éstos, debido a su naturaleza y a la alta cantidad de agua que presentan en su composición, en conjunto con pequeñas cantidades flóculos con material biológico [10]. Respecto al contenido de SV de ambos inóculos, Santos-Ballardo et al., (2015) emplearon los mismos materiales biológicos y presentaron valores muy similares a los de esta investigación (SAB 67.4 % y ECO 58.0 %). Es importante señalar que se ha reportado que un valor típico de SV en lodos activados, se puede presentar dentro de un rango de 60 a 80 % [11]. Por otra parte, dichos autores reportaron valores de ST = 83.4 % y SV = 54.4 % para la BRM de la especie *Tetraselmis suecica*, resultados ligeramente menores. Además, los resultados reportados por Ramos-Suárez and Carreras (2014), quienes caracterizaron la BRM de la especie *Scenedesmus*, se encuentran muy similares (ST = 90.0 % y SV = 64.4 %) a los obtenidos en el presente estudio. Estos resultados son importantes, ya que el contenido de SV puede ser usado como un indicador del potencial que presenta un sustrato para generar CH₄, puesto que este valor corresponde a la MO presente, capaz de ser convertida en biogás [11, 12].

Adicionalmente, el análisis elemental permitió establecer la relación C/N (Tabla I), reportándose valores muy bajos para de cada uno de los materiales, a excepción del inóculo ECO, que puede considerarse como adecuado para la DA. Sin embargo son comparables con lo reportado por otros autores quienes han empleado BRM en DA. Ehimen et al., (2009), reportó una C/N de 5.6 para la especie *Chlorella*, Ramos-Suárez and Carreras (2014) de 6.1 para la especie *Scenedesmus*, Santos-Ballardo et al., (2015) de 3.1 para la especie *Tetraselmis suecica*, y Lunprom et al., (2018) de 5.3 para *Chlorella* sp., siendo todas las mencionadas, microalgas verdes sometidas a la extracción de su fracción lipídica [5, 12, 13, 14]. Por otro lado, la C/N es parámetro importante, que puede ser empleado para controlar sistemas biológicos, como el proceso de DA. Puesto que cantidades insuficientes de C o N podrían limitar la función del proceso anaerobio, pues la población microbiana requiere un balance de nutrientes para su crecimiento y lograr una estabilidad del proceso. Debido a esto, el o los sustratos empleados deben proveer un balance de la C/N en un rango de 20 a 30 [15, 16].

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO E INÓCULOS.

Parámetro	BRM	ECO	SAB
ST (%)	90.9 ± 0.18	1.8 ± 0.03	2.5 ± 0.07
SV (% ST)	62.0 ± 1.48	55.8 ± 2.79	66.4 ± 0.29
C/N	5.3	12.5	6.5

Los valores representan el promedio de tres mediciones ± desviación estándar. BRM = Biomasa residual de microalga; ECO = Ecoparc; SAB = Sabadell; ST = Sólidos totales; SV = Sólidos volátiles.

2. Potencial metanogénico de la BRM

La tendencia de la producción acumulada de CH₄ generada por la BRM al emplear los dos inóculos (ECO y SAB) por separado se muestra en la Fig. 1; simultáneamente se señalan los parámetros de operación de cada reactor y los resultados obtenidos durante el proceso de DA en la Tabla II. Los resultados del PM de la BRM se analizaron estadísticamente, estos mostraron diferencias significativas al realizar la comparación de medias de los dos inóculos (ECO y SAB), siendo el inóculo del Ecoparc de Granollers el que mayor afinidad reveló al sustrato en estudio, a diferencia del inóculo de Sabadell, cuyo proceso anaeróbico permaneció aparentemente inhibido la mayor parte del tiempo de DA. Los resultados del PM en la presente investigación son muy inferiores a lo reportado por otros investigadores en condiciones mesofílicas. Por ejemplo, Santos-Ballardo et al., (2015) reportaron un valor CH₄ acumulado de 173.8 LCH₄kg⁻¹SV para la BRM de *Tetraselmis suecica*; Kinnunen et al., (2014) consiguieron una producción de 128 LCH₄kg⁻¹SV usando BRM de la especie *Nannochloropsis* sp.; mientras que Ramos-Suárez and Carreras (2014) reportaron 212.3 LCH₄kg⁻¹SV con BRM de *Scenedesmus*, además Park and Li (2012) consiguieron una producción de 133.0 LCH₄kg⁻¹SV para la BRM de *Nannochloropsis salina* [5, 12, 17, 18].

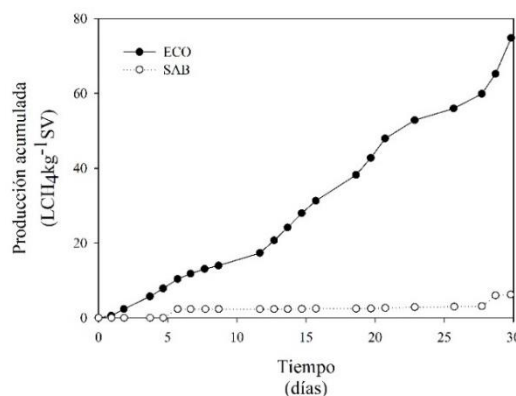


Fig. 1. Fig. Potencial metanogénico de la BRM empleando los inóculos ECO y SAB.

TABLA II. CONDICIONES DE OPERACIÓN Y RESULTADOS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA BRM.

Parámetro	ECO	SAB
Producción de metano acumulada (LCH ₄ kg ⁻¹ SV)	74.81 ± 2.80 ^a	6.23 ± 0.05 ^b
Temperatura (°C)	37 ± 1	37 ± 1
TRH (días)	30	30
pH	7.85	7.81

Los valores representan el promedio de tres mediciones ± desviación estándar. Letras superíndices diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre medias. ECO = Ecoparc; SAB = Sabadell; TRH = tiempo de retención hidráulica.

Sin embargo, la producción acumulada de CH_4 obtenida con el inóculo del Ecoparc se encuentra solo ligeramente por debajo de lo reportado por Suresh et al., (2013) quienes reportaron $92 \text{ LCH}_4\text{kg}^{-1}\text{SV}$ generado por la BRM *Ettlia* sp [19]. Es importante mencionar que, en cada uno de los estudios mencionados anteriormente, se emplearon diferentes métodos para el proceso de extracción de lípidos, lo cual podría influir en los valores de PM. Además, los resultados de la presente investigación podrían estar subestimados debido a la posible inhibición del proceso, particularmente al emplear el inóculo de Sabadell. Puesto que después de la extracción de lípidos se concentran los compuestos con alto contenido de nitrógeno, que podrían ocasionar que la producción de CH_4 se reduzca mientras que la liberación de amonio aumenta y, consecuentemente, la alta concentración de amonio puede limitar fuertemente la proceso anaerobio [20]; aunado a esto, la presencia de amoniaco en su forma libre en condiciones superiores a pH 7, como es el caso de los inóculos empleados en este estudio, podría provocar intoxicación de los microorganismos componentes de los mismos, debido a la presencia de amoniaco ionizado (NH_4^+) [21].

La liberación de nitrógeno también depende de la relación C/N, el cual es un parámetro de los digestores que influye en el rendimiento de biogás; cuando el valor C/N fluctúa con respecto a la relación óptima, se libera dicho compuesto, o bien, otros compuestos volátiles de naturaleza lipídica con alto contenido de amoniaco, ocasionando fallas en el sistema [22]. A pesar de que se recomienda una relación C/N de 20 – 30, en los procesos de DA que emplean biomasa de microalgas, tanto completa como residual, es casi imposible que esto se cumpla, pues son materiales caracterizados por presentar un alto contenido de N en su composición ($\text{C/N} < 9$) [23]. En este sentido, aumentar la relación C/N baja de la biomasa de microalgas, permitiría reducir el efecto inhibitor del amoníaco. Para lograr esa compensación, se recomienda la adición de sustratos ricos en carbono para su co-digestión [24]. Por ejemplo, el uso de glicerol se ha recomendado ampliamente, debido a su bajo precio y a su fácil obtención (al ser un sub-producto generado durante la producción de biodiesel) para incrementar la producción de CH_4 [5, 13].

III. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio han demostrado que es posible someter los residuos de microalgas, generados después de la extracción de lípidos, al proceso de digestión anaerobia para generar CH_4 ; sin embargo, las características analizadas de los inóculos empleados, en particular del inóculo colectado en Sabadell ($\text{C/N} = 6.5$), da lugar a una investigación más extensa, que permita i) el monitoreo de parámetros de operación (pH, relación C/N) para estabilizar el proceso de DA y ii) implementar procesos de co-digestión con sustratos de alto contenido de C para establecer un balance de nutrientes biodisponibles para la población anaerobia. Cabe señalar que la generación de energía a partir

de una fuente renovable como las microalgas, es una alternativa prometedora, sobre todo cuando lo que se pretende es mantener un esquema de biorrefinería energética, lo cual permitiría la generación de más de un producto de interés (biodiesel y biogás). Además, esta investigación da pauta al aprovechamiento de nuevas fuentes renovables, que en un futuro podrían brindar la estabilización del proceso de DA.

IV. REFERENCIAS

- [1] I. Hariskos and C. Posten. "Biorefinery of microalgae – opportunities and constraints for different production scenarios", *Biotechnol. J.* 9, 739–752, 2014. DOI: 10.1002/biot.201300142
- [2] M. K. Enamala, S. Enamalah, M. Chavalic, J. Donepudid, R. Yadavallie, B. Kolapallia, T. V. Aradhyulaf, J. Velpurig, C. Kuppanh. "Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae" *Renew Sust Energ Rev* 2018.
- [3] A. E. Hussian "The Role of Microalgae in Renewable Energy Production: Challenges and Opportunities" en *Marine Ecology - Biotic and Abiotic Interactions*, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.73573
- [4] K. W. Chew, J. Y. Yap, P. L. Show, N. H. Suan, J. C. Juan, T. C. Ling, S. J. Lee, J. S. Chang. "Microalgae biorefinery: high value products perspectives" *Bioresour. Technol*, 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.006.
- [5] D. U.Santos-Ballardo, X. Font-Segura, A. Sánchez-Ferrer, R. Barrena, S. Rossi, A. Valdez-Ortiz. "Valorisation of biodiesel production wastes: Anaerobic digestion of residual *Tetraselmis suecica* biomass and co-digestion with glycerol" 2015. *Waste Manag Res*, 2015 DOI: 10.1177/0734242X15572182.
- [6] H. M. Zabeed, S. Akter, J. Yun, G. Zhang, Y. Zhang, X. Qi. "Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities". *Renew Sust Energ Rev*, 117- 109503, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109503.
- [7] R. Ganesh, G. Kumar, R. Banu, A. Xia, S. Periyasamy, G. Dattatraya "A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and Co-digestion of biomass for enhanced methane generation". *Bioresour. Technol*, 2018. 10.1016/j.biortech.2018.03.030.
- [8] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. In *American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation* (20th ed.). Washington DC, USA. 1999.
- [9] I. Ferrer, S. Ponsá, F. Vázquez, X. Font. "Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion". *Biochem. Eng. J.*, 42, 186–192, 2008. DOI: 10.1016/j.bej.2008.06.020.
- [10] J. L. Inghram and C. Inghram. "Principios de microbiología" en *Introducción a la microbiología*. Garsi SA I.S.B.N.: 84-291-1871-3. 1997, Vol 13 – 4.
- [11] C. Liu, H. Li, Y. Zhang, C. Liu. "Bioresource Technology Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste". *Bioresource Technol.* 219, 252–260, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.07.130.
- [12] J. L. Ramos-suárez and N. Carreras. "Use of microalgae residues for biogas production". 242, 86–95, 2014. DOI:10.1016/j.cej.2013.12.053.
- [13] E. A. Ehimen, S. Connaughton, Z. Sun, G. Carrington. "Energy recovery from lipid extracted, transesterified and glycerol codigested microalgae biomass". *Glob Change Bio - Bioenergy*, 1, 371–381. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2009.01029.x
- [14] S. Lunprom, O. Phanduang, A. Salakkam, Q. Liao, T. Imai, A. Reungsang. Bio-hythane production from residual biomass of *Chlorella* sp. biomass through a two-stage anaerobic digestion". *Int. J. Hydrog. Energy*. 1-6, 2018. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.064
- [15] D. U. Santos-Ballardo, S. Rossi, C. Reyes-Moreno, A. Valdez-Ortiz "Microalgae potential as a biogas source: current status, restraints and future trends". *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2016. DOI: 10.1007/s11157-016-9392-z.

- [16] K. Stamatelatou, G. Antonopoulou, G. Lyberatos. "Production of biogas via anaerobic digestion", in: *Handbook Biofuels Prod.* Woodhead Publishing Limited, 2011: pp. 266–304
- [17] H. V. Kinnunen, P. E. P. Koskinen, J. Rintala, "Mesophilic and thermophilic anaerobic laboratory-scale digestion of Nannochloropsis microalga residues". *Bioresour Technol*, 155, 3144–322, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.12.115
- [18] S. Park and Y. Li. "Evaluation of methane production and macronutrient degradation in the anaerobic co-digestion of algae biomass residue and lipid waste". *Bioresour Technol*, 111, 42–48. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.01.16.
- [19] Suresh, C. Seo, H. N. Chang, Y. Kim. "Improved volatile fatty acid and biomethane production from lipid removed microalgal residue (LRIAR) through pretreatment". *Bioresour Technol* 149, 590–594, 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.09.123.
- [20] B. Sialve, N. Bernet, O. Bernard. "Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable". *Biotechnol Adv*, 27, 409–416, 2009. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2009.03.001
- [21] Y. Chen, J. J. Cheng, K. S. Creamer "Inhibition of anaerobic digestion process: A review". *Bioresour. Technol*, 99, 4044–4064, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.01.057.
- [22] G. F. Parkin and W. F. Owen. "Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *J Environ Eng*;112:867–920, 1986.
- [23] C. González-Fernández, B. Sialve, N. Bernet and J. P. Steyer. "Impact of microalgae characteristics on their conversion to biofuel. Part II: Focus on biomethane production". *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 6, 205–218, 2012. DOI: 10.1002/bbb.337.
- [24] E. Jankowska, A. K. Sahub, P. Oleskowicz-Popiel. "Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion". *Renew Sust Energy Rev*, 75, 692–709, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.045

BIOGRAFÍA

KARLA D. LUNA AVELAR Ingeniera biotecnóloga de profesión, Maestra en ciencia y tecnología de alimentos y actualmente estudiante de posgrado, en Doctorado con la misma acentuación. Ha realizado investigación en el área de los alimentos, particularmente en la generación de productos, tomando como protagonista principal a las microalgas e involucrando herramientas de Ingeniería Genética. Actualmente su investigación se mantiene en el área de los alimentos, se dirige al aprovechamiento de residuos que genera la industria alimentaria, buscando producir energías renovables, promoviendo la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de biocombustibles de segunda y tercera generación.



Sistema integral para el tratamiento de digestato, cultivo de algas y mejora del biogás

CRISTÓBAL NÚÑEZ SIERRA¹, JESÚS DANIEL ROSALEZ VARGAS¹, GRACIELA MA. DE LA LUZ RUIZ AGUILAR², CESAR ÁLVAREZ MEJIA¹, CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ RAZO¹, JUAN HUMBERTO MARTÍNEZ MARTÍNEZ¹.

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Abasolo.

² División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

AS16110190@tecabasolo.edu.mx

AS17110238@tecabasolo.edu.mx

juan.martinez@tecabasolo.edu.mx

RESUMEN Las microalgas han cobrado cierto interés para el tratamiento de aguas residuales, y el tratamiento de diversos efluentes, entre ellos el digestato de un digestor anaerobio. Sin embargo, en la actualidad los estudios particulares para el cultivo de algas considerando el digestato como una fuente de nutrientes, a escala piloto y en condiciones reales de operación, son muy escasos. La instalación de esta planta contribuye a la disminución de esa brecha y aportar los conocimientos adecuados para replicar estos procesos. El propósito de este trabajo es demostrar la factibilidad de operar una planta (reactor raceway) para el cultivo de microalga espirulina a bajo costo, alimentada con efluentes digeridos de un proceso de digestión anaerobia. A su vez, se da valor agregado al mejorar la calidad del biogás con un sistema de purificación que emplea microalgas. Adicionalmente, el proceso ofrece una alternativa para el tratamiento y purificación de agua.

PALABRAS CLAVE — Microalga, digestato, biogás.

I. INTRODUCCIÓN

Día a día se contempla el agotamiento de los recursos fósiles, aunada a un alza a la demanda energética en todo el planeta, lo cual ha traído el desarrollo de nuevas fuentes de energía para abastecer tal demanda. Una de estas alternativas, que ha mostrado interés desde hace algunos años, es el uso de microalgas para la producción de biocombustibles [1]. Sin embargo, a pesar del interés por el uso de las microalgas, aun no puede ser considerada como una opción disponible de manera comercial [2].

Existen diversos factores y aspectos a considerar para el cultivo de microalgas, entre ellos principalmente es la disponibilidad de agua y nutrientes requeridos para su crecimiento. Muchos estudios señalan que el cultivo de microalgas y su empleo como fuente para la producción de biocombustibles, es una alternativa prometedora cuando se le considera como un sistema acoplado, utilizando aguas residuales como fuente de agua y nutrientes requeridos para su crecimiento [3–5].

Considerando esta viabilidad, los efluentes digeridos procedentes de un biodigestor o también llamado digestato, puede ser considerado como una fuente de carbono y nutrientes requeridos en la producción de microalgas. Se ha reconocido que el carbono orgánico es rápidamente oxidado de forma biológica por las bacterias, posteriormente el dióxido de carbono producido durante la oxidación de las bacterias anaerobias es utilizado por las microalgas para la fotosíntesis [6]. De esta manera es posible combinar la

producción de biomasa algal con la digestión anaerobia de biomasa residual o algal, después de la obtención del biocombustible [7].

II. DESARROLLO

La digestión anaerobia, es una tecnología muy desarrollada y que se utiliza ampliamente en distintas aplicaciones, se considera como un tratamiento bioquímico que favorece el manejo alternativo de la biomasa con alto contenido de humedad, como residuos alimentarios, y se ha propuesto como tecnología rentable para obtención de energía renovable a partir de residuos [8].

La digestión anaerobia es un proceso de degradación biológica de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Los productos principales del proceso incluyen el biogás, constituido principalmente por una mezcla de metano (CH₄ en un 60 -70 % en volumen) y por dióxido de carbono (CO₂ en un 30 – 40 % en volumen), entre otros elementos en mucho menor cantidad, así como un efluente residual rico en nutrientes.

La digestión anaerobia ofrece ciertos beneficios, por ejemplo, la generación energía renovable en forma de biogás, que posteriormente, puede obtenerse biometano, la reducción de gases de efecto invernadero y el flujo de ingresos de los desechos de la digestión anaerobia como fertilizantes [9].

Este efluente o digestato anaeróbico, extraído de los biodigestores, es un líquido a una suspensión espesa que

contiene una cantidad significativa de sólidos [10]. Sus características y composición varían de acuerdo con diferentes factores, que incluyen las características del sustrato utilizado para la producción de biogás, así como el tipo de digestor y condiciones de operación de este.

No obstante, existe un desafío que implica el tratamiento y la misma reutilización de los efluentes del digestato anaeróbico [11]. De acuerdo a estudios recientes, existen tecnologías emergentes utilizadas para el manejo del digestato, las cuales incluyen: la oxidación anaeróbica de amonio, extracción de amoníaco, osmosis inversa, humedales artificiales, hidroponía y el cultivo de algas, cuya finalidad de estos procesos es reducir drásticamente, a eliminar los nutrientes en el digestato, obteniendo un agua limpia, que podría usarse como riego en áreas de sequía, como agua potable para los animales y como agua de proceso para ciertas industrias [10].

Entre los procesos mencionados, el tratamiento de digestato con algas, es potencialmente un sistema más eficiente, debido a la valorización del digestato a través de un amplio alcance para la aplicación de la biomasa algal, dichos sistemas pueden funcionar de manera autónoma, sin la necesidad de otros sistemas de apoyo [10]. A pesar del atractivo de esta solución, el efecto de las propiedades del digestato sobre el crecimiento de microalgas todavía está poco estudiado [7], por lo cual se requiere el desarrollo de más investigación.

Por otra parte, se debe considerar que las algas, específicamente las microalgas, pueden ser procariotas como las bacterias fotosintéticas (llamadas algas verdeazuladas), o pueden ser de naturaleza eucariotas, y debido a su estructura simple, crecen fijando el CO₂ de la atmósfera en biomasa orgánica por medio de la energía lumínica [12].

Como se mencionó el biogás es una mezcla rica de CH₄ y CO₂, de este último, se han desarrollado sistemas para su eliminación en la corriente de biogás, para la obtención de biometano. La utilización del CO₂ procedente de una corriente de biogás se considera como una opción, cuando se emplean microalgas para su fijación, además de reducir los costos de captura, almacenamiento y transporte por la cercanía de las plantas de microalgas, dentro de un sistema integrado, en comparación con otras tecnologías de captura [12]. La mejora de biogás empleando microalgas es un proceso real y estudiado [13]. Lo cual, un sistema acoplado para el cultivo de microalgas, utilizando digestato como nutrientes y las microalgas como un agente de mejora de biogás, es atractivo y presenta varias ventajas.

El metano es el elemento con mayor abundancia en el biogás (60 - 70 %), sin embargo, las microalgas no son conocidas por su absorción y asimilación de metano, además que la mayoría de las algas son tolerantes a altos niveles de metano en el biogás, por lo que pueden eliminar eficazmente CO₂ en presencia de metano [12].

Los sistemas de cultivo de algas pueden ser clasificados en sistemas abiertos, cerrados, híbridos de ambos y de biopelícula [10]. Los sistemas cerrados son los más ampliamente utilizados, se encuentran en interacción con el medio ambiente, lo que los hace susceptibles a las variabilidades de éste. Los sistemas cerrados son más fáciles de controlar, sin embargo, su grado de control y operación, los hace más costosos en comparación con un sistema cerrado.

Las microalgas utilizadas con mayor frecuencia en procesos de tratamientos de aguas residuales es la *Chlorella*. Para este estudio se considera microalga espirulina la cual ha reportado una factibilidad de crecimiento en efluentes de un biodigestor, además de obtener una alta calidad de biomasa algal [14]. De lo anterior este trabajo tiene como objetivo construir una planta piloto para el cultivo de microalgas (espirulina), mediante el uso simultáneo de las fuentes de carbono relacionadas con la digestión anaerobia: el líquido del digestato (efluente líquido de la digestión anaerobia) y el CO₂ contenido en el biogás, a partir de la digestión anaerobia de la excreta de ganado ovino y la co-digestión de excreta de ganado ovino y espirulina, en un biodigestor acoplado al sistema de cultivo de microalgas.

A. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

1. Disposición de la instalación.

La construcción de la planta se realizó en las inmediaciones del Instituto Tecnológico Superior de Abasolo. La Fig.1 muestra el diseño de la instalación de la planta piloto.

2. Posición de los reactores.

La orientación de los reactores no fue considerada, sin embargo, su orientación queda posicionada hacia el sur. No obstante, esta posición no es importante para sistemas de estanque de canalización *raceway*, porque la intensidad de la luz recibida es independiente de la orientación del reactor [15]. En la Fig. 2 se observa la disposición de la planta, al lado izquierdo se observa el biodigestor y al lado derecho se encuentra la ubicación del *raceway*.

B. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La Fig. 3 muestra el sistema para el cultivo de microalgas está constituido por un reactor tipo *raceway* (de canal abierto). Las ventajas de este sistema es que es simple de construir y operar, por lo que la mayor parte de biomasa algal disponible se produce en estanque con canales abiertos [16]. El sistema cuenta con un biodigestor tubular para la producción de biogás a partir de la digestión y co-digestión de excreta de ganado ovino, además, dos filtros tubulares por donde circulan microalgas para el mejoramiento de biogás.

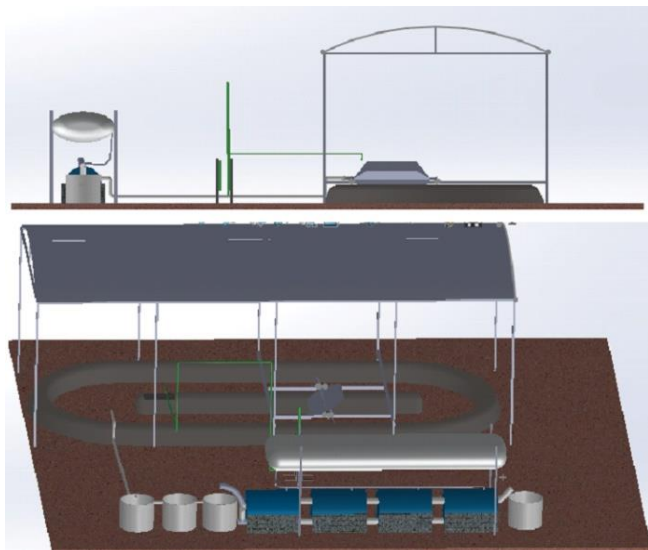


Fig. 1. Esquema de la planta piloto

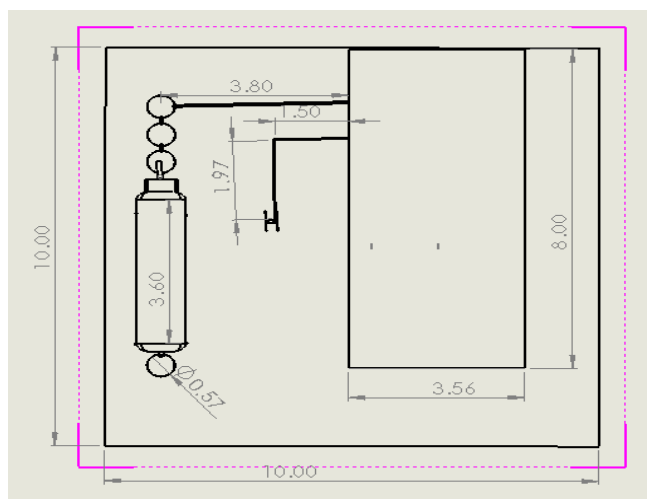


Fig. 2. Plano de la planta.



Fig. 3. Planta piloto.

Teniendo en cuenta que la eficiencia del proceso de pretratamiento ampliado podría no ser tan alta como la configuración como en un laboratorio, la planta se complementó con unidades adicionales para mejorar su rendimiento y operación.

Debidos a que es un sistema abierto, es propenso a la contaminación, la controlabilidad de las condiciones de cultivo es baja y su evaporación es alta, por lo que el *raceway* es protegido por un túnel de invernadero, lo cual se aprecia en la Fig. 4.

Adicionalmente, como el sistema es autónomo energéticamente, la planta cuenta con un sistema aislado de 2 paneles solares de 280 W, que abastecen la alimentación para la operación del motor eléctrico y las bombas del sistema, como se muestra en la Fig. 5.

1. Descripción del *raceway*.

Las dimensiones del estanque de la pista de rodadura son 3.5 x 8 m (W x L), una altura de 0.40 m, cuenta con una barrera central para crear un flujo de bucle / pista rodadura, como se observa en la Fig. 6.



Fig. 4. Túnel de invernadero, protección del *raceway*.



Fig. 5. Instalación del sistema fotovoltaico aislado.

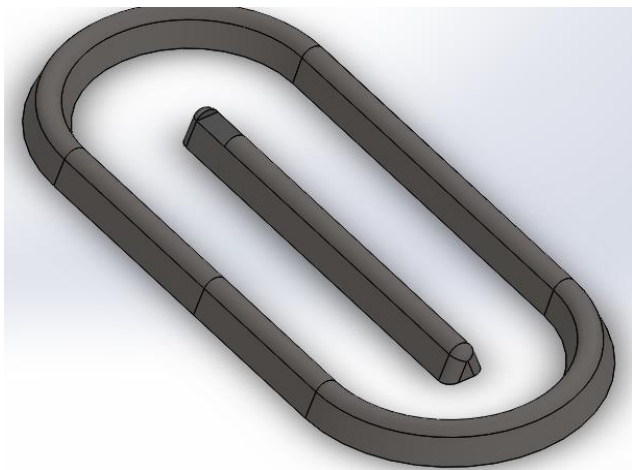


Fig. 6. Representación del canal abierto.

Como se observa en la Fig.7, tanto las paredes exteriores, como la pared central no son placas verticales, sino que se forman con el talud de amontonamiento de tierra, forrada con geomembrana de PVC, y evitar infiltraciones. El estanque de canalización opera con un nivel de líquido de 0.30 m lo que da como resultado de un volumen total de 2.5 m³.

La alimentación al reactor proviene de un dren directo de los tanques de almacenamiento de digestato del biodigestor.

Se construyó una rueda de 4 paletas (L 0.60m, W 0.30m), las palas se instalaron a 5 cm del fondo. Se utilizó un motor de corriente directa de 12 VCD, de 12 rpm, con un par suficiente para mover la cantidad de agua. Este, como se mencionó, se encuentra alimentado por el sistema fotovoltaico aislado. Adicionalmente el sistema cuenta con un sistema de aireación, de dos bombas de oxígeno solares. Las microalgas son contenidas en el canal abierto, Fig. 8.

2. Descripción del biodigestor.

El biodigestor instalado consta de 4 secciones o etapas, conformado por 4 contenedores cilíndricos con un volumen total de 1000 litros, el cual se observa en la Fig. 9. El biodigestor opera a un volumen de trabajo de 812 de forma semicontinua. Es alimentado diariamente con un volumen de carga de orgánica de 18 litros en una relación agua:sustrato de 2:1, el tiempo de retención hidráulico es de 45 días.

El biodigestor cuenta con un almacén para biogás externo de geomembrana de PVC, con un volumen de 1.6 m³. El cual a su vez se encuentra interconectado a los filtros de microalgas donde se lleva a cabo el proceso de mejoramiento de biogás.

De la misma manera, el efluente o digestato del biodigestor es almacenado en tres contenedores de 120 litros, los cuales se interconectar al reactor *raceway*, para ser suministrado.



Fig. 7. Raceway, cubierta de geomembrana.



Fig. 8. Raceway en operación



Fig. 9. Biodigestor.

III. CONCLUSIONES

Se logró obtener un sistema acoplado para el tratamiento de fluentes y cultivo de algas. El desarrollo y la instalación de esta planta mostrará una perspectiva prometedora en el tratamiento de digestato y su uso en el cultivo de microalgas con una alta estabilidad y rendimiento de biomasa, a un costo menor. La mejora de biogás mediante microalgas proporciona una tecnología superior en términos de impacto ambiental, comparado con los medios físico-químicos convencionales. Actualmente el sistema se encuentra en operación, con la finalidad de identificar los parámetros que favorezcan su operación. De esta manera la mejora de biogás y la valorización de la biomasa algal trae consigo un sinnúmero de beneficios tanto para el ecosistema, como el desarrollo de biocombustibles.

REFERENCIAS

- [1] R. Ganesan, S. Manigandan, M.S. Samuel, R. Shanmuganathan, K. Brindhadevi, N.T. Lan Chi, P.A. Duc, A. Pugazhendhi, A review on prospective production of biofuel from microalgae, *Biotechnology Reports*. vol. 27, pp. e00509, 2020. DOI: 10.1016/j.btre.2020.e00509
- [2] D. Chiamonti, M. Prussi, D. Casini, M.R. Tredici, L. Rodolfi, N. Bassi, G.C. Zittelli, P. Bondioli, Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible, *Applied Energy*. vol. 102, pp. 101–111, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.07.040
- [3] K. Li, Q. Liu, F. Fang, R. Luo, Q. Lu, W. Zhou, S. Huo, P. Cheng, J. Liu, M. Addy, P. Chen, D. Chen, R. Ruan, Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review, *Bioresource Technology*. vol. 291, pp. 121934, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121934.
- [4] K. Inoue, T. Uchida, Microalgae cultured by sewage and organic constituents, *Chemosphere*. vol. 93, pp. 1442–1445, 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.088.
- [5] R.K. Goswami, S. Mehariya, P. Verma, R. Lavecchia, A. Zorro, Microalgae-based biorefineries for sustainable resource recovery from wastewater, *Journal of Water Process Engineering*. 2020. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101747.
- [6] W.J. Oswald, H.B. Gotaas, Photosynthesis in sewage treatment, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* vol. 122, pp. 73–105, 1957.
- [7] E. Uggetti, B. Sialve, E. Latrille, J.-P. Steyer, Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: The role of ammonium concentration on the microalgae productivity, *Bioresource Technology*. vol. 152 pp. 437–443, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.11.036.
- [8] M.S. Romero-Güiza, J. Vila, J. Mata-Alvarez, J.M. Chimenos, S. Astals, The role of additives on anaerobic digestion: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 58, pp. 1486–1499, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.094.
- [9] J.P. Sheets, L. Yang, X. Ge, Z. Wang, Y. Li, Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste, *Waste Management*. vol. 44, pp. 94–115, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.07.037.
- [10] D. Chuka-ogwude, J. Ogbonna, N.R. Moheimani, A review on microalgal culture to treat anaerobic digestate food waste effluent, *Algal Research*. vol. 47, 2020. DOI: 10.1016/j.algal.2020.101841.
- [11] T. Rehl, J. Müller, Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies, *Resources, Conservation and Recycling*. vol. 56, pp. 92–104, 2011. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.08.007.
- [12] D. Nagarajan, D.-J. Lee, J.-S. Chang, Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading, *Bioresource Technology*. vol. 290, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121804.
- [13] D. Nagarajan, D.-J. Lee, J.-S. Chang, Biogas Upgrading by Microalgae: Strategies and Future Perspectives, in: Md.A. Alam, Z.

Wang (Eds.), *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*, Springer, Singapore, 2019: pp. 347–395. DOI: 10.1007/978-981-13-2264-8_15.

- [14] M. Hultberg, O. Lind, G. Birgersson, H. Asp, Use of the effluent from biogas production for cultivation of *Spirulina*, *Bioprocess Biosyst Eng.* vol. 40, pp. 625–631, 2017. DOI: 10.1007/s00449-016-1726-2.
- [15] R. Bosma, J.H. de Vree, P.M. Slegers, M. Janssen, R.H. Wijffels, M.J. Barbosa, Design and construction of the microalgal pilot facility AlgaePARC, *Algal Research*. vol. 6, pp. 160–169, 2014. DOI: 10.1016/j.algal.2014.10.006.
- [16] O. Pulz, W. Gross, Valuable products from biotechnology of microalgae, *Applied Microbiology and Biotechnology*. vol. 65, pp. 635–648, 2004. DOI: 10.1007/s00253-004-1647-x.

BIOGRAFÍAS



CRISTOBÁL NUÑEZ SIERRA Estudiante de Ingeniería en Energías Renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasolo. Se especializa en energía solar, certificado en la EC0586.01 Instalación de Sistemas Fotovoltaicos en Residencia, Comercio e Industria. Participante en el 21 Verano de la Ciencia de la Región Centro con colaboración en proyectos de producción y mejora de biocombustibles (bioetanol, biogás).



JESÚS DANIEL ROSALES VARGAS Estudiante de Ingeniería en Energías renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasolo. Se especializa en biocombustibles, técnico electromecánico.



GRACIELA M.L. RUIZ AGUILAR Doctora en Ciencias con especialidad en biotecnología ambiental. Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I y de la American Society of Agronomy y Soil Science Society of America. Su área de estudio está enfocada a la reducción de compuestos orgánicos tóxicos presentes en diferentes ambientes; así como a la producción de bioenergéticos a partir de diferentes fuentes agroindustriales. También está interesada en los procesos de enseñanza y aprendizaje en el área ambiental.



CÉSAR ÁLVAREZ MEJÍA Doctor en Ciencias Químico-biológicas área bioquímica y biología molecular. Ha realizado actualmente diversos proyectos ligados al medio ambiente, con meta a la determinación de contaminantes ambientales, su efecto en el ser humano y la remediación del mismo actualmente desarrolla proyectos para la detección de arsénico y la remediación del mismo, trabajando en colaboración con el Instituto Tecnológico superior de Irapuato y la Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salamanca.



DR. CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ RAZO profesor investigador del ITESA. Coordinador de la fase de campo sobre el “Diagnostico sobre el manejo actual de los residuos sólidos por parte de las Sociedades Concesionarias del Servicio de Recolección y Transporte de los RSU en el municipio de Morelia, Michoacán” que se llevó a cabo en el 2010. Investigación en el proyecto “Caracterización del Biogás en el Relleno de Tierra Controlado de Morelia, Michoacán” del 2008 al 2011. Este trabajo formó parte del proyecto doctoral, cuya función

es promover alternativas de minimización de gases de efecto invernadero a la atmósfera.



JUAN HUMBERTO MARTÍNEZ MARTÍNEZ

Profesor investigador del Instituto Tecnológico de Abasolo, profesor de tiempo parcial de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato. Maestro en Biociencias y egresado del Doctorado de Ingeniería Química de la Universidad de Guanajuato. Se especializa en la producción de biocombustibles (hidrógeno, metano, biodiesel y

alcoholes) a partir de residuos agroindustriales y diseño de biorreactores. Actualmente miembro de la Red Mexicana de Bioenergía.

Algoritmo para falla Cross Country en relevadores con inteligencia artificial en líneas paralelas de 400 kV

JONATHAN IVAN MONTEIRRUBIO PALACIOS¹, GASTON HERNANDEZ MARTINEZ¹

¹Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

¹Cd. Madero, Tamps, México.

G09071284@cdmadero.tecnm.mx

gaston.hm@cdmadero.tecnm.mx

RESUMEN En este trabajo se plantea una modificación y adaptación del algoritmo de simulación del trabajo previo “Implementación de Algoritmo de Protección de Distancia en Relevadores Siemens para fallas Cross Country, Conjugando dos Técnicas de Análisis utilizando Matlab”, para que sea capaz de clasificar el tipo de falla e identificar la línea de transmisión en la cual suceda (en alguna de las dos líneas idénticas en paralelo). Para esto se modela el circuito en el programa ATP EMTP llamado “TTE (Tres estrellas)”, en el cual que se utilizan dos líneas de transmisión idénticas en paralelo las cuales enlazan las subestaciones “Tres estrellas” a “Teotihuacán” además de modificar el algoritmo generado en el programa Matlab. Se utiliza un algoritmo basado en inteligencia artificial capaz de diferenciar en cuál de las dos líneas de transmisión está ocurriendo la falla, tipo de falla y localización de la misma.

PALABRAS CLAVE— red neuronal, falla cross country, relevador, onda viajera, EMTP.

I. INTRODUCCIÓN.

En los sistemas eléctricos de potencia la continuidad y calidad del servicio son dos requisitos que se deben cumplir para lograr un suministro satisfactorio de energía eléctrica. La continuidad hace referencia a que el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) debe garantizar que la energía producida en los centros de generación sea suministrada en forma ininterrumpida a los centros de consumo.

Los sistemas eléctricos pueden clasificarse por su nivel de voltaje de operación y utiliza la siguiente clasificación:

1. Baja tensión, sistemas de hasta 1000 V
2. Media tensión, sistemas hasta 36 kV, algunos consideran valores más altos (72.5 kV). El límite está en la diferente tecnología entre esta clase y la superior.
3. Alta tensión, sistemas hasta 245 kV - 300 kV.
4. Muy alta tensión, por encima de los 300 kV- 360 kV.

Otro aspecto importante en el sistema eléctrico es la calidad de la energía. Se enmarca dentro de una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctrica en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia. El término calidad de la energía debe considerarse por los tres principales sectores involucrados en un sistema eléctrico: el generador, el consumidor y el fabricante de equipos.

El estudio de la calidad de potencia eléctrica en instalaciones eléctricas y redes de distribución es un tema importante tanto para las empresas eléctricas como para los

usuarios, ya que permite identificar posibles problemas y adoptar las soluciones requeridas en cada caso.

Las cargas no lineales, las conmutaciones, las maniobras de cambio de carga o las propias averías de los equipos pueden ocasionar una mala calidad de la energía en el sistema eléctrico. Esta deficiencia no sólo implica un alto costo en términos de energía malgastada y tiempos de inactividad innecesarios, sino que también es peligrosa y aumenta el riesgo de fallas.

El requisito de calidad se refiere a que la energía debe suministrarse en determinadas condiciones, con el fin de garantizar que los distintos tipos de equipos conectados a la red operen en las condiciones en que han sido proyectados. Una de las causas más frecuentes por las que se puede incumplir con alguno de estos requisitos son las fallas en el sistema eléctrico; cuando esto ocurre, las magnitudes de corriente asociadas al SEP alcanzan valores situados fuera de sus rangos nominales de funcionamiento y determinadas áreas del sistema pueden operar en condiciones desequilibradas. En caso de no tomar ningún tipo de medida para corregir la falla, ésta se propaga a través de la red y sus efectos se irían extendiendo. El diseño de un SEP debe contemplar el hecho de que inevitablemente van a producirse fallas de manera aleatoria e inesperada. Por esta razón, los SEP incorporan un sistema de protección que tiene por objetivo minimizar los efectos derivados de los diferentes tipos de fallas que pueden producirse. Los primeros dispositivos automáticos que se emplearon para aislar fallas eléctricas en los sistemas de potencia fueron los

fusibles. Más adelante los dispositivos de protección dependían de acciones mecánicas y detectores muy elementales, en los cuales la velocidad de reacción dependía de un elemento mecánico, como un resorte. Posteriormente con la aplicación de las bobinas se eliminaron algunos elementos mecánicos y comenzaron a utilizarse los relevadores. Con el desarrollo de la electrónica fueron evolucionando hasta llegar a los sistemas de protección actuales, cuya operación es mucho más rápida y eficiente [1]. Sin embargo, éstos presentan problemas mucho más complejos; como el caso de las fallas tipo Cross Country que son un tipo de falla evolutiva que afecta la operatividad de los relevadores de protección de distancia; donde en ocasiones el tiempo de respuesta del relevador de protección es muy grande. Una propuesta de solución para este tipo de falla en una sola línea de transmisión se desarrolló en el proyecto de investigación titulado “Implementación de algoritmo de protección de distancia en relevadores SIEMENS para fallas Cross Country, conjugando dos técnicas de análisis utilizando Matlab” para solo una línea.

A. PRINCIPIO DE DETECCIÓN DE FALLAS USANDO ONDAS VIAJERAS

Actualmente los esquemas de protección de líneas de transmisión utilizan los cambios en las señales de voltaje y corriente a frecuencia fundamental para detectar la presencia de alguna falla en la línea protegida. Con el propósito de reducir los tiempos de detección de fallas, algunos investigadores han propuesto el uso de las señales transitorias de alta frecuencia generadas en el punto de aparición de la falla, ya que esas señales contienen toda la información de las características de la falla. La solución de D'Alembert de las ecuaciones de onda de voltaje, $v(x,t)$ y de corriente, $i(x,t)$, en una línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos y sin pérdidas, está expresada como:

$$v(x, t) = F1(x - ut) + F2(x + ut) \quad (1)$$

$$i(x, t) = [F1(x - ut) + F2(x + ut)]/Z_0 \quad (2)$$

Donde x es la posición a lo largo de la línea, t es el tiempo, u es la velocidad de propagación y Z_0 es la impedancia característica de la línea. Las funciones $F1$ y $F2$ dependen de las condiciones de frontera del caso que se esté analizando. En general, $F1$ representa una onda que se desplaza en la dirección positiva de x a una velocidad c (onda directa), mientras que $F2$ es una onda que se desplaza en la dirección negativa de x a la velocidad de la luz c (onda inversa); la relación entre el voltaje y la corriente en $F1$ es Z_0 y en $F2$ es $-Z_0$.

B. RED NEURONAL ARTIFICIAL

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son dispositivos o programas informáticos desarrollados a partir de los modelos y estructuras neuronales del cerebro humano utilizando neuronas o unidades de procesamiento; éstos son capaces de almacenar conocimiento por experiencia y hacerlo disponible para su uso. Entre las principales tareas y funciones que realizan las RNA se encuentran: la percepción, asociación, reconocimiento y clasificación de patrones, estimación de funciones, entre otras [2] [3].

C. FENÓMENOS TRANSITORIOS

El análisis de transitorios electromagnéticos en redes eléctricas contribuye a mejorar la confiabilidad del sistema de transmisión, permitiendo una correcta y oportuna operación en caso de energización de sus elementos sin llegar a niveles de voltajes y corrientes nocivos para estos elementos. Este análisis de las redes eléctricas, en la actualidad, se realiza mediante programas computacionales que permiten simulaciones de diversa índole para un posterior análisis e interpretación de los resultados. Interpretando los resultados se llega a tomar decisiones sobre la mejor manera de operar la red de energía principalmente las líneas de transmisión para evitar daños y futuras reparaciones; decisiones que los operadores del sistema eléctrico toman en consideración al momento de operar la red en tiempo real [4].

Los transitorios electromagnéticos deben ser tomados en cuenta para su estudio, con la misma importancia del análisis en estado estacionario. Pese a que el estado transitorio se produce en muy cortos períodos de tiempo, en comparación con el estado estable, su incidencia sobre los equipos es mucho mayor debido a los altos valores de voltaje y corriente a los cuales están sometidos, provocando grandes esfuerzos que en casos extremos pueden causar daños irreparables a los componentes del sistema eléctrico. Dependiendo el equipo involucrado puede afectar a plantas de generación, subestaciones, líneas de transmisión, e incluso dejar sin servicio eléctrico a toda una gran población.

Por estas razones es necesario tener una idea clara de los eventos que ocurren durante los períodos transitorios para poder hacer correctivos en el manejo de los sistemas de potencia tanto en estado estable como en el transitorio. En la operación de un interruptor, la corriente y voltaje se desfasan debido al efecto capacitivo e inductivo de los diferentes elementos asociados al interruptor, que provocan fenómenos transitorios llamados transitorios por maniobras a frecuencia industrial. Los transitorios electromagnéticos pueden ser originados por tres maneras: sobrevoltajes causados por descargas atmosféricas, sobrevoltajes temporales y sobrevoltajes por maniobra de interruptores, los cuales provocan una variación en la operación del

sistema debido a la propagación de la onda viajera. Se puede apreciar el comportamiento del sistema eléctrico al graficar el voltaje en estado estable en comparación a la generación de perturbaciones en la simulación del sistema Fig. 1 y Fig. 2.

D. FALLA TIPO CROSS COUNTRY

El termino falla Cross Country se utiliza para designar aquella falla que inicia siendo de un tipo y posteriormente evolucionan a otra rápidamente. En la Fig. 3 se aprecia una simulación de este comportamiento.

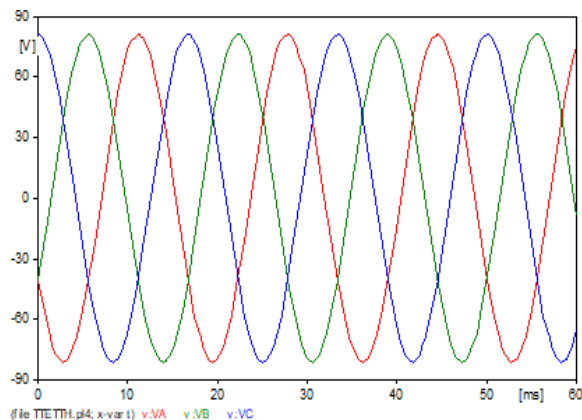


Fig. 1. Voltaje en la línea de transmisión de 400 kV sin falla.

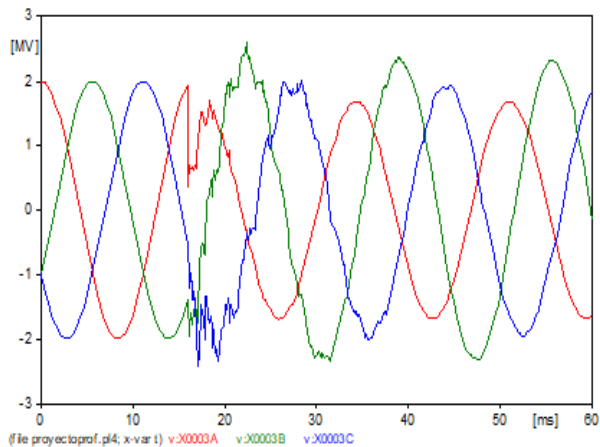


Fig. 2. Perturbación de voltaje con falla en una línea de 400 kV.

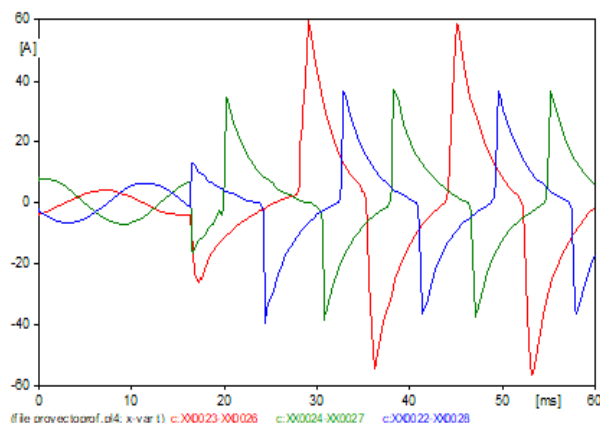


Fig. 3. Falla bifásica tipo evolutiva (Cross Country) en una línea de transmisión de 400 kV.

Una falla Cross Country se ejemplifica con una falla línea a tierra en cualquier lugar del alimentador de distribución. El voltaje en las dos líneas que no cuentan con falla aumenta a un valor cercano al voltaje fase-fase del sistema. El aumento de voltaje en las dos líneas sin falla puede causar falla en un desgastado pararrayos en el mismo o en diferente alimentador. La corriente de falla resultante es mayor que la corriente de falla que existe en una falla de línea a tierra. La corriente en una falla tipo Cross Country es normalmente menor que la corriente de falla asociada a un de corto circuito franco más cercana a la subestación alimentadora. En esta investigación se plantea la solución para fallas tipo Cross Country en dos líneas idénticas en paralelo. Este tipo de fallas son de tipo evolutivas ya que inician en una fase y afectan más fases después de un determinado tiempo de haberse presentado (aproximadamente 10 ms); por ejemplo: una falla de línea a tierra que cambie a una falla de doble línea a tierra [5].

II. DESARROLLO

El principal objetivo de este trabajo es complementar dicho algoritmo y simular en los programas Alternative Transients Program- Electromagnetic Transients Program y Matrix Laboratory (ATP-EMTP y Matlab) las dos líneas en paralelo idénticas, para permitir la correcta operación de la red neuronal del tipo probabilístico para la protección de líneas de transmisión en fallas tipo Cross Country. Debido a que, al presentarse una falla en alguna de ellas, ocurre un mal funcionamiento en la simulación del sistema eléctrico, debido a que ninguna de las dos líneas de transmisión es protegida al colocarse los relevadores basados en Inteligencia Artificial (IA) en paralelo, y en algunas ocasiones los dos sistemas de protección de relevadores operan al mismo tiempo haciendo así una interrupción innecesaria al sistema eléctrico interconectado.

Como se indicó en párrafos anteriores existe mal funcionamiento en la coordinación de protección basada en inteligencia artificial en el sistema eléctrico propuesto, así que se necesita realizar modificaciones a dicho algoritmo. Por este motivo es necesaria la implementación de algoritmos que sean capaces de realizar una mejor protección ante fallas tipo Cross Country al utilizarse en relevadores con inteligencia artificial específicamente en líneas paralelas.

Esta investigación se dirige únicamente a los relevadores de protección de distancia basados en inteligencia artificial para identificación de falla Cross Country y solo se realiza para dos líneas paralelas idénticas. Actualmente no es posible implementar relevadores con inteligencia artificial en sistemas eléctricos debido a que se encuentra en etapa de investigación y los relevadores actuales no permiten inteligencia artificial.

Durante el desarrollo de esta investigación fue necesario simular las fallas con las modificaciones nuevas al sistema. Teniendo así como primera etapa la identificación del problema, lo cual permite tener un panorama más claro en el desarrollo de la investigación. Como segunda etapa, se establece verificar por medio de la simulación del programa el mal funcionamiento presente en las dos líneas paralelas para posteriormente generar un algoritmo que permita la operación correcta durante un evento de falla sobre la línea en cuestión utilizando IA.

A. FALLA CROSS COUNTRY EN UNA LÍNEA DE 400 kV

El sistema eléctrico donde se realizan las pruebas de simulación de fallas es simulado en el programa denominado ATP-EMTP. En la sección donde se ubican las líneas de transmisión en paralelo idénticas denominadas Tres estrellas-Teotihuacán (ver Fig. 4). Se colocaron en estas líneas de transmisión los separadores de fase llamadas splitters; en ellas se colocaron los dispositivos de medición para poder analizar el voltaje y la corriente para posteriormente guardar estos valores obtenidos y cargarlos en el programa Matlab. Se realizaron simulaciones de los diferentes tipos de falla y se corrieron los resultados en el programa de Matlab y se comprobó la ubicación de la falla, tanto en la línea No. 1 como en línea No. 2, además se varió la ubicación del origen de la falla utilizando las tres zonas de ubicación de cada línea de transmisión.

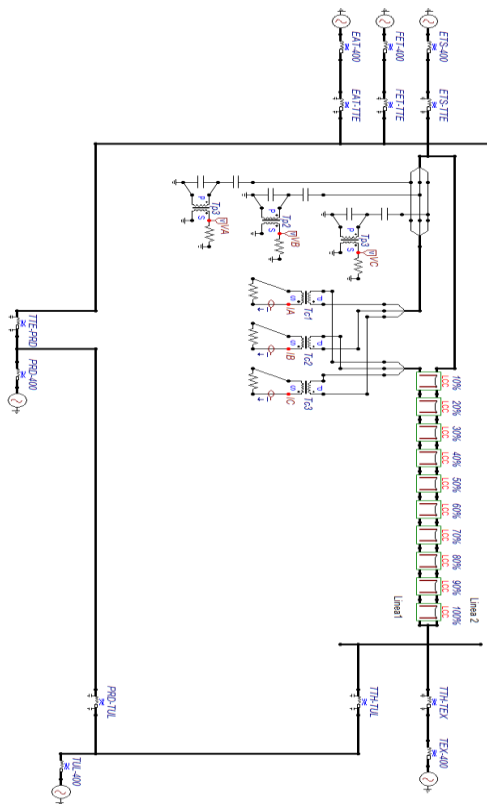


Fig. 4. Simulación de sistema eléctrico Tres estrellas-Teotihuacán en programa ATP.

Se verificó la capacidad de la red neuronal de identificar cuando no existe falla, principalmente para evitar disparos accidentales. El algoritmo compara los valores que ya se tenían cuando el sistema se encontraba en estado estable con valores nominales de operación, obteniendo así valores de corriente y voltaje muy similares a cuando no existía variaciones en el sistema dando así un aviso donde se menciona que no existe falla.

B. SIMULACIÓN DE ALGORITMO DE RELEVADOR DIGITAL PARA DETECCIÓN DE FALLA CROSS COUNTRY EN LÍNEAS DE 400 kV IDÉNTICAS EN PARALELO

Durante la simulación hecha de la red eléctrica llamada Tres Estrellas en el programa ATP-EMTP se realizaron modificaciones en este algoritmo, una de estas fue llevar un registro de los valores de voltaje y corriente de las líneas de transmisión cuando el sistema es estable (condiciones normales de operación) denominaron como línea No. 1 y la línea No. 2 a las líneas de transmisión en paralelo que van del bus Tres Estrellas a Teotihuacán para que la programación en Matlab tuviera la capacidad de diferenciar cuando la falla ocurriera en una línea de las dos que se encuentran conectadas en paralelo. El nuevo algoritmo permite que la IA tenga parámetros con valores proporcionales y así poder detectar mediante comparación estos valores. Otra variable que se le añadió fue permitir que cuando el sistema está en condiciones de operación normales la simulación arroja un aviso anunciando que no se encontró falla; si ocurre una falla el algoritmo de la red neuronal indica el lugar aproximado de la misma y su localización ya sea en la denominada línea No. 1 o la No. 2. Dentro de la programación original, se modificaron además 2 redes neuronales en Matlab llamadas “pnnlineas” y “pnnzonas”, las cuales son necesarias para poder utilizar el programa en Matlab ya que en ellas se encuentra ahora el algoritmo responsable de determinar en que línea y zona de protección se encuentra la falla.

En las Fig. 5, 6 y 7 se muestran algunos ejemplos de los resultados del programa Matlab.

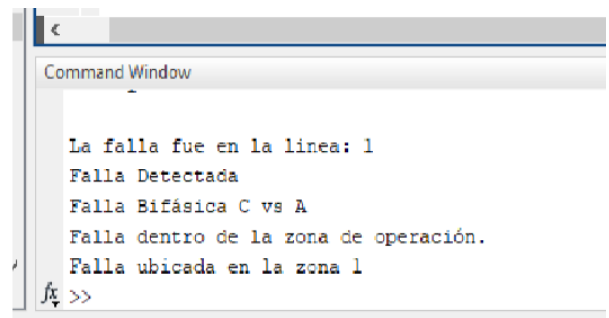


Fig. 5. Resultado de la simulación de una falla bifásica en la línea No. 1 entre las fases C y A.


```
Command Window

La falla fue en la linea: 2
Falla Detectada
Falla Monofásica A vs T
Falla dentro de la zona de operación.
```

Fig. 6. Resultado de la simulación de una falla monofásica en la línea No. 2 fase A.

```
Command Window

La falla fue en la linea: 1
Falla Detectada
Falla Trifásica
Falla fuera de la zona de operación.
Falla ubicada en la zona 2
```

Fig. 7. Resultado de la simulación de una falla trifásica en la línea No. 1

III. CONCLUSIONES

Se logró el objetivo de realizar la modificación del algoritmo a la red neuronal original para que se comuniquen los dos esquemas de relevadores que van en las líneas de transmisión paralelas de Tres Estrellas a Teotihuacán con el objetivo de detectar la falla en cualquiera de las dos líneas idénticas de 400 kV, específicamente la falla Cross Country. Fue posible desarrollar el código en el programa Matlab y desarrollar la simulación en ATP-EMTP para posteriormente probar la operación de la red neuronal del relevador. El nuevo código hace posible la interacción de las dos redes neuronales de los relevadores en dos líneas en paralelo idénticas cuando una de ellas es sometida a una falla.

IV. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Margil S. R Protección de sistemas eléctricos de potencia, Universidad Autónoma de Nuevo León ,p 4-10, Jul,2005.
- [2] Paloma Teresita G. R. Aplicación de la red neuronal probabilística para la clasificación de productos conforme a sus especificaciones, Instituto Tecnológico de Celaya,Cap 3,p 193-200 ,2013.
- [3] Vasana Chandrasekara 1, Chandima Tilakaratne 2 and Musa Mammadov 3 ,An Improved Probabilistic Neural Network Model for Directional Prediction of a Stock Market Index ,p.9-10,Dic,2019.

- [4] Allan Greenwood "Electrical Transients in Power Systems", Second Edition, British Virgin Islands, cap 6, p 126-149,1990.

- [5] Clemente C. G. "Implementación de algoritmo de protección de distancia en relevadores Siemens para fallas Cross Country, conjugando dos técnicas de análisis utilizando Matlab" ,Cd. Madero, Tamps., México , p 14-51,Mar,2015.

BIOGRAFÍAS

JONATHAN IVÁN MONTERRUBIO PALACIOS



Cursó la licenciatura en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico en 2014. Actualmente está por concluir los estudios de Maestría en especialidad de Ingeniería Eléctrica en el mismo Instituto.

GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ



Ingeniero Electromecánico, Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en 2008 por el Instituto Tecnológico de Morelia. Profesor en el Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Cd. Madero.