



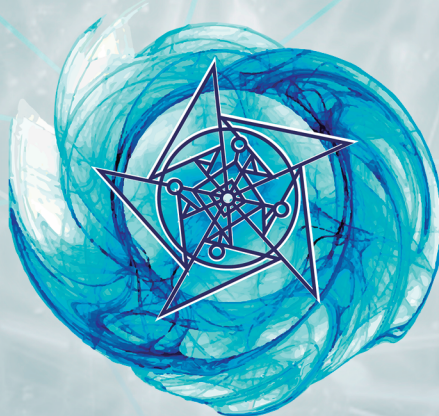
15
AÑOS



CINERGIA UG
Centro Interinstitucional de Energía
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

VIDA UG
Ecosistema
de
Vinculación, Innovación, Desarrollo y Aplicación
del conocimiento
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



CIENERGIA UG
Congreso Internacional de Energía UG

MEMORIAS

EDICIÓN 2022 / OCTUBRE 26-28

2022

PREFACIO

En la edición 2022 del Congreso Internacional de Energía de la Universidad de Guanajuato, CIENERGIA UG 2022, el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Guanajuato (UG) y el Comité Organizador 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:

1. *Conferencias magistrales.* 3 Conferencias impartidas por especialistas del área energética, representativos de Suiza, Canadá y Colombia.
2. *Presentación en sesión técnica.* 42 Sesiones impartidas por estudiantes, especialistas e investigadores del área energética y a fines.
3. *Exposición industrial.* Exposición de forma virtual por parte de 5 empresas del área energética, sobre sus productos y desarrollos más destacados.
4. *Taller.* Impartición de 2 Talleres:
 - 1) Conectividad en Sistemas IoT.
 - 2) Programación y Monitoreo de un PLC con conexión a la Nube.

El evento se llevó a cabo de manera híbrida por medio de una plataforma virtual y dentro de las instalaciones del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la DICIS - UG, del 26 al 27 de octubre de 2022, y se contó con alrededor de 200 participantes.

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

Área Académica

1. Universidad de Guanajuato.
2. Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich, Suiza.
3. Universidad de Medellín, Colombia.
4. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
5. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.
6. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Universidad Tecnológica de Manzanillo.
8. Universidad Incarnate Word.
9. Universidad Politécnica de Juventino Rosas.
10. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
11. Universidad Autónoma de Campeche.
12. Universidad Autónoma de Sinaloa.
13. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
14. Universidad de La Ciénega.
15. Universidad Autónoma de Nuevo León.
16. Universidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco.
17. Universidad del Istmo.
18. Universidad Politécnica de Sinaloa.
19. Universidad Politécnica de Tulancingo.
20. Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.
21. Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso.
22. Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.
23. Instituto Tecnológico Superior de San Andrés de Tuxtla.
24. Instituto Tecnológico de Morelia.
25. Instituto Everest de Sinaloa - Mazatlán.
26. Instituto Tecnológico de Celaya.
27. Complejo Educativo Leonardo Da Vinci.
28. CINVESTAV del IPN - Guadalajara.
29. Escuela Superior de Física y Matemáticas.

Área Industrial

1. Arms-Edge - PRO SOLUTIONS.
2. Caterpillar Company, Canadá.
3. Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).
4. Comisión Federal de Electricidad (CFE).
5. Consorcio ContruCoss, México.
6. Invercost UG, México.
7. INRUSH - High Power Control, México.
8. Keysight, México.
9. OutBack Power – EnerSys.
10. Petróleos Mexicanos.
11. SIEMENS, México.
12. Sigtronic, México.
13. Teknocontrol, México.
14. Zizé de México.

2022

COMITÉ DEL CONGRESO

Presidente

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

Coordinación General

Dra. Xiomara González Ramírez
PTC del DIE de la UG

Secretario General

Dr. Jesús Martínez Patiño
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 Vinculación

Dr. Luis Ramón Merchán Villalba
PTC del DIE de la UG

Coordinación de Diseño y Difusión

L.A.D Lucina Mosqueda Pérez
Departamento de Vinculación
CINERGIA UG

2022

Comité Técnico

Dr. Enrique Arnoldo Zamora Cárdenas
PTC del DIE de la UG

Dr. Adrián González Parada
PTC del DIE de la UG

Dr. Osvaldo Rodríguez Villalón
PTC del DIE de la UG

Dr. Miguel Ángel Gómez Martínez
PTC del DIE de la UG

Dr. J. Juan Rosales García
PTC del DIE de la UG

Dr. Héctor Javier Estrada García
PTC del DIE de la UG

Dr. Víctor Javier Gutiérrez Martínez
PTC del DIE de la UG

Dr. David Aarón Rodríguez Alejandro
PTC del DIM de la UG

Dr. Néstor Daniel Galán Hernández
PTC de Ing. en Energía de la UPSIN

Mtra. Elena del Rocío Dávila Álvarez
DIE de la UG

Mtro. Irving Willihado Reyes Buenfil
DIE de la UG

ÍNDICE

Selección de la capacidad de un banco de capacitores para evitar la resonancia en las redes de subtransmisión de 115 y 69 kV

Camilo Narvaez Pérez, Dante Aristóteles García Conejo, Manuel Alejandro Torres Ahumada.

Centro Nacional de Control de Energía.

Universidad Abierta a Distancia de México.

Comisión Federal de Electricidad Transmisión.

11

Estudio de los Convertidores Bidireccionales SEPIC y Cuk con Aplicación a Vehículos Eléctricos

Diana Geraldine Castañeda Rubalcaba, José Miguel Sosa Zúñiga, Gerardo Vázquez Guzmán.

Tecnológico Nacional de México.

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.

17

Diseño e Implementación de una Fuente de Corriente basada en Transistores GaN

Juan Manuel Cano Gallardo, Miguel Ángel Juárez Requena, José Merced Lozano García, Luis Ramón Merchán Villalba.

Universidad de Guanajuato.

24

Implementación y simulación de un filtro activo de potencia

José Antonio Ortega Martínez, Luis Fernando Vázquez Moreno, Arnulfo Calderón Salas, Elisa Monserrat Ramírez Hernández, José Merced Lozano García, Luis Ramón Merchán Villalba.

Universidad de Guanajuato.

31

Diseño y Simulación de un Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Miguel Angel Puga Ortega, Marco Antonio Meza Razo, Erick Ivan Lopez Garcia, Diego Raúl Fuerte Aguilar, Alejandro Pizano Martínez, Luis Ramón Merchán Villalba.

Universidad de Guanajuato.

38

Módulo para el monitoreo y optimización de controladores de carga fotovoltaicos

Gustavo Cerda Villafaña, Jose Luis Hernández Camacho.

Universidad de Guanajuato.

45

Reutilización de tubo de vacío en una cocina solar

Yair García Morán, Joel Salome Baylon, Adrián Tintos Gómez, Marco Pérez González.

Universidad Tecnológica de Manzanillo.

Universidad de Colima.

49

Dimensionamiento óptimo de micro-red para la DICIS - Sede Salamanca

Melanny Julisa Ramírez Lara, José Merced Lozano García, Xiomara González Ramírez.

Universidad de Guanajuato.

54

Análisis de fallas trifásicas balanceadas considerando la integración del CSCT en el sistema de potencia

José Miguel García Guzmán, Iris Consuelo Najjar Santillán, Juan Pablo Razón González, María Del Refugio González Ponce.

Tecnológico Nacional de México.

61

Factibilidad económica de un sistema fotovoltaico interconectado para una Pyme

Amanda Enriqueta Violante Gavira, Matilde Calderón Merino, María Mercedes León Sánchez.

Universidad de Guanajuato.

68

Análisis del DAP en municipios del estado de Guanajuato: Comportamiento de facturación, recaudación y déficit

Jesús Martínez Patiño, José Merced Lozano Garcia, Iván Abel Hernández Robles, Alejandra Mora Romero.

Universidad de Guanajuato.

75

Diagnóstico energético en la Facultad de Ingeniería de la UACAM para verificar el cumplimiento del Código de Red

María Zarái Rejón Corzo, Francisco Román Lezama Zárraga,
Jorge De Jesús Chan González, Meng Yen Shih, Ricardo Rubén
Salazar Uitz, Felipe Noh Pat.
Universidad Autónoma de Campeche.

81

Clasificación automática de documentos: el papel de la similitud entre clases

Claudio Isaac Soriano Burgos, Misael López Ramírez, Rafael
Guzmán Cabrera.
Universidad de Guanajuato.

87

Análisis del potencial de Ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) como fuente de biorrefinerías

Mara Fernanda Juárez Cota, Dulce Libna Ambriz Pérez,
María Guadalupe Soto Ávila, Mario Armando Gómez Favela,
Stefany Serna Toro, David Ulises Santos Ballardo.
Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, México.
Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Michoacán, México.
Universidad Politécnica del Mar y la Sierra, La Cruz, Sinaloa, México.
Universidad del Quindío, Armenia, Quindío, Colombia.

93

Extracción de aceite de semilla de girasol para potencial fuente de biodiesel

Mario Reyes Vargas, Jessica Jatziri López Picos, Jesús Antonio
Oliva Gallardo, Jesús Alberto Calvillo Beltrán, David Ulises Santos
Ballardo.
Universidad Politécnica de Sinaloa.

100

Efecto de Pretratamiento Térmico en la Producción de Bioetanol a partir de Biomasa Residual de Mango

Gabriel Armando Gonzalez Barrios, Mara Fernanda Juárez Cota,
Dulce Libna Ambriz Pérez, David Ulises Santos Ballardo.
Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, México.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
Universidad del Quindío, Armenia, Quindío, Colombia.

105

Potencial de residuos agroindustriales de chile poblano (*Capsicum annuum* var. *annuum* 'Poblano') como materia prima para biorrefinería

María del Carmen Peña Loza, Yoshlin Montserrat Aguilera Hernández, Mara Fernanda Juárez Cota, Dulce Libna Ambriz Pérez, Brandon Armenta Medel, Stefany Serna Toro, David Ulises Santos Ballardo.

Universidad Politécnica de Sinaloa.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Universidad del Quindío.

110

Selección de la capacidad de un banco de capacitores para evitar la resonancia en las redes de subtransmisión de 115 y 69 kV

CAMILO NARVAEZ PÉREZ^{1,2}, HUGO HUMBERTO MORENO LÓPEZ¹, DANTE ARISTÓTELES GARCÍA CONEJO³, MANUEL ALEJANDRO TORRES AHUMADA¹.

¹Centro Nacional de Control de Energía.

²Universidad Abierta a Distancia de México.

³Comisión Federal de Electricidad Transmisión.

camilo.narvaez@cenace.gob.mx

hugo.moreno@cenace.gob.mx

manuel.torres@cenace.gob.mx

camilo.np@nube.unadmexico.mx

dante.garcia@dt.cfe.mx

RESUMEN La selección adecuada del equipo primario coadyuva, eléctrica y económicamente a los sistemas de subtransmisión, ya que se evitan problemas como la resonancia electromagnética en la red. De forma que antes de instalar un banco de capacitores específico, se requiere asegurar que no presentará dicha problemática. En este escrito se analizan algunas de las condiciones de resonancia, como la capacidad del banco, la longitud de la línea de transmisión, la tensión y potencia reactiva de resonancia. Se analizan tensiones, corrientes y potencias reactivas en la energización en vacío, de una línea de subtransmisión que interconecta dos subestaciones y un capacitor conectado. Así, al estudiar las condiciones de resonancia, sólo se deben evitar dichas condiciones para la selección apropiada del banco a instalar. Las simulaciones son realizadas en ATP (Alternative Transient Program). Se pretende utilizar la metodología para evitar daño a aislamientos, equipo de medición, fallas, colapsos regionales.

PALABRAS CLAVE - Resonancia, ferorresonancia, banco de capacitores, transitorios.

I. INTRODUCCIÓN

En las características de los equipos primarios en sistemas de subtransmisión, el término ferro resonancia también es denominado resonancia de salto, y se puede presentar en cualquier circuito que contenga inductancias no lineales (con núcleo ferromagnético y saturable), capacitancias y bajas pérdidas [1].

Los sistemas de potencia pueden presentar condiciones ideales para la ocurrencia de este fenómeno. Cualquier evento transitorio en estos sistemas puede iniciar estos comportamientos, siendo de gran importancia las condiciones del sistema previas al evento que desencadena la ferorresonancia. De manera que, si alguna parte de la red eléctrica cumple con las condiciones para experimentar este tipo de fenómeno [2], se puede pasar de un estado estable generalmente sinusoidal, a otro estado estable que presenta deformación de las ondas de voltaje y corriente presentando sobretensiones y sobrecorrientes que pueden dañar los equipos involucrados.

Otra característica muy importante es que se pueden presentar diferentes estados estables para la misma configuración del circuito y con un mismo juego de parámetros. Esto depende del estado de las variables eléctricas en sus componentes y del momento en que se presenta el evento que activa el comportamiento ferro resonante.

Descripción de la ferorresonancia. Suponga un circuito LC como el mostrado en la Fig. 1, en el cual el capacitor tiene un voltaje inicial [3].

Al cerrar el interruptor, S, la corriente fluye hacia el inductor con una frecuencia angular $\omega = 1/\sqrt{LC}$. En el tiempo t_1 de la Fig. 2, la tensión V comienza a disminuir rápidamente y el flujo ϕ satura la bobina $\phi > \phi_{sat}$ cambiando su inductancia a L_s , como se muestra en la Fig. 1. Como esta inductancia es mucho menor que la inductancia inicial L, el capacitor se descarga bruscamente cambiando su polaridad con una frecuencia de oscilación $\omega = 1/\sqrt{L_s C}$. La corriente y el flujo son máximos cuando el voltaje en el capacitor es cero y la mitad de la energía del capacitor ha pasado a la bobina.

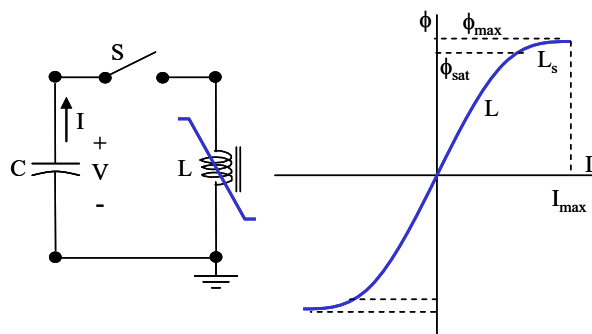


Fig. 1. Circuito LC y su curva ϕ -I asociada.

En el instante t_2 el flujo regresa a un valor igual a $\phi \leq \phi_{\text{sat}}$ y la inductancia regresa a un valor de L . Como en el circuito se han despreciado las pérdidas, el voltaje V alcanza su valor máximo pero negativo. Hasta ese momento ha transcurrido medio ciclo de oscilación comenzando nuevamente la otra mitad del ciclo con una tensión $V = -V_1$. La frecuencia de oscilación del circuito estará entre:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (1)$$

Cuando las pérdidas en el circuito son suministradas por la fuente, si la frecuencia de oscilación inicial es mayor a la frecuencia de la fuente; la frecuencia final se parecerá a ésta última. Y si es menor; la frecuencia final será un submúltiplo de la de la fuente.

De manera que se tiene un amplio rango de parámetros del circuito en los cuales se puede presentar la ferresonancia.

En la Fig. 3 se muestra un circuito RLC ferro resonante serie.

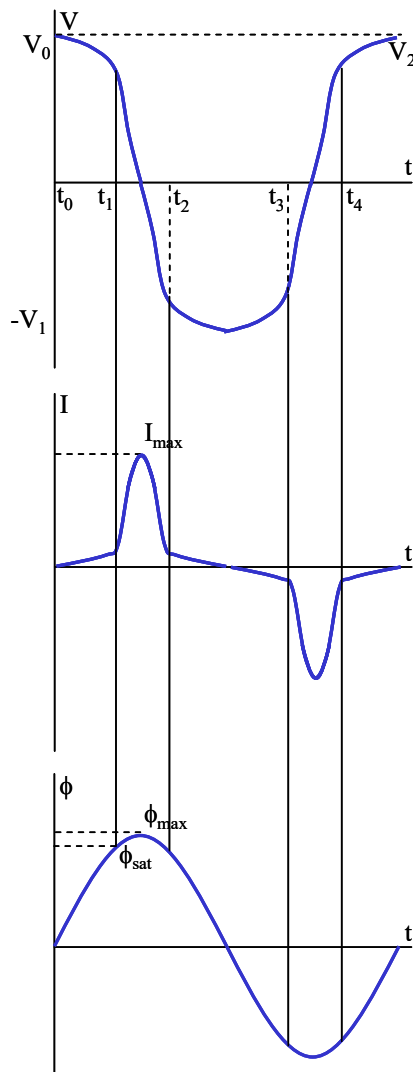


Fig.2. Tensión, corriente y flujo en un circuito ferresonante serie.

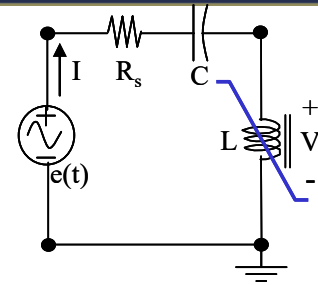


Fig. 3. Circuito ferro resonante RLC serie.

Las características de sensibilidad a los parámetros y de las condiciones iniciales se pueden resumir en las Fig. 4 y 5. La Fig. 4 es un diagrama de bifurcación [4], con doble punto de inflexión donde se representa la magnitud de la tensión en la inductancia en función de la magnitud de la tensión de la fuente. Es decir; si la tensión de la fuente $e(t)$ se comienza a incrementar gradualmente desde E_1 hasta E_4 , se tendrá una tensión V_L en la inductancia definido por los puntos M_1 hasta M_4 . Si se incrementase más la tensión de la fuente hasta E_5 , la tensión saltará al punto M_{44} y continuará hasta M_5 . Ahora, si se comienza a reducir el voltaje $e(t)$, la tensión V_L comenzará a reducirse siguiendo la trayectoria M_5 hasta M_{22} saltando nuevamente a M_2 y siguiendo la trayectoria de baja tensión en la parte inferior de la figura.

La Fig. 5 muestra la dependencia del comportamiento del sistema a las condiciones iniciales. Las trayectorias desde el punto inicial hasta el punto final dependen de la ubicación de la curva límite o frontera B. Para una tensión de la fuente E_3 y dependiendo de unas condiciones iniciales de flujo residual en la inductancia, M_{01} ó M_{02} , ó una tensión en el capacitor, v_C , la tensión en la inductancia convergerá a los puntos M_3 o M_{33} , respectivamente. Cualquier condición inicial cercana a la frontera es muy sensible a condiciones iniciales.

La clasificación de la ferresonancia es de acuerdo con las formas de onda de voltajes o corrientes de estado estable que se tienen en el sistema una vez que el transitorio producido por algún evento ya ha desaparecido. También se puede identificar con mediciones instantáneas de tensión y corriente separadas por un período de tiempo de la frecuencia fundamental y graficadas en un plano V-I. Se han clasificado cuatro tipos de ferro resonancia los cuales se muestran en la Fig. 6.:

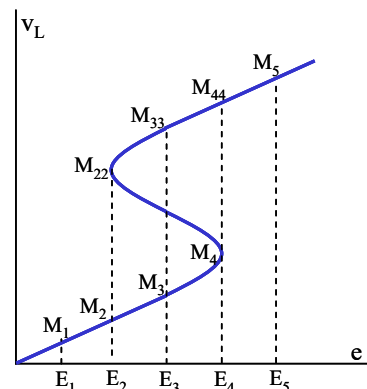


Fig. 4. Diagrama de bifurcación.

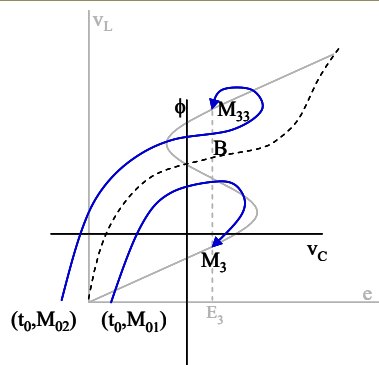


Fig. 5. Dependencia, de la tensión en la bobina, de sus condiciones iniciales.

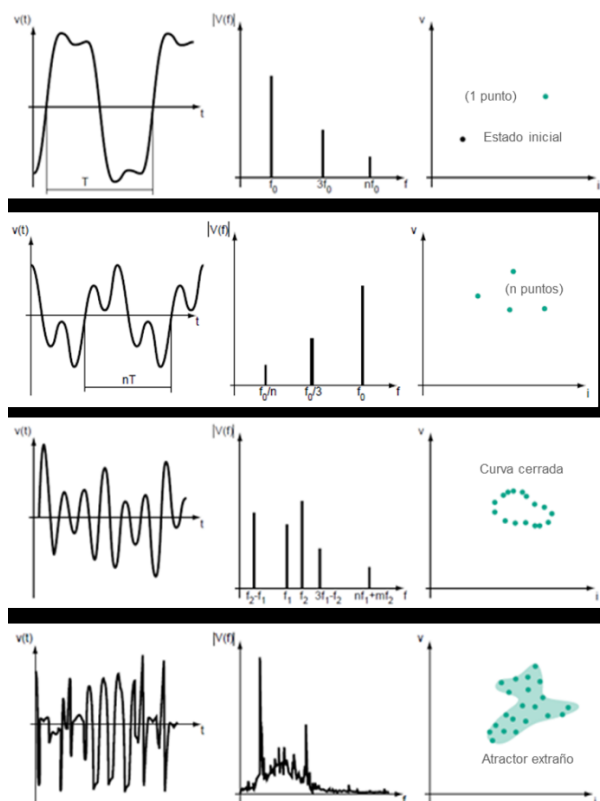


Fig. 6. Tipos de resonancia.

Modo fundamental: en este modo las tensiones y corrientes tienen la frecuencia fundamental f_0 y pueden contener una variedad de armónicos ($2f_0, 3f_0, \dots$). En el plano V-I se grafica como un punto movido del estado normal.

Modo subarmónico: en este modo las señales son periódicas con periodo nT , el cual es un múltiplo del periodo de la fuente y generalmente de orden impar. También se conoce como subarmónico n o armónico $1/n$ donde n es un entero. En el plano V-I aparecen n puntos separados.

Modo cuasi-periódico: este modo no es periódico (llamado también pseudo-periódico). Las tensiones y corrientes tienen frecuencias expresadas en la forma

$nf_1 + mf_2$ donde n y m son enteros y f_1/f_2 es un número racional. En el plano V-I aparecen puntos formando una trayectoria cerrada [5, 6].

Modo caótico: en este modo las tensiones y corrientes no se cancelan para alguna frecuencia. En el plano V-I aparecen n puntos formando una trayectoria cerrada; estos puntos están dentro de un área llamada atractor extraño.

II. LA RESONANCIA Y SUS EFECTOS, MODELO UTILIZADO

Los diferentes estados estables o incluso los transitorios previos al establecimiento de la ferresonancia que contienen un alto grado de armónicas, sobretensiones y sobrecorrientes representan un alto riesgo para el equipo eléctrico. Existen una gran cantidad de evidencias para la detección del fenómeno ferro resonante, entre las más comunes son las sobretensiones y sobrecorrientes con formas de onda muy distorsionadas. Las consecuencias son calentamientos o ruido fuerte en elementos con material ferromagnético, conocido como magnetostricción, daño en equipo eléctrico por aislamiento muy deteriorado y destrucción del devanado primario de **transformadores de potencial, TP**, dejando los devanados secundarios intactos. De manera que para comenzar un análisis de este fenómeno es necesario determinar si en los circuitos están presentes capacitancias con inductancias no lineales.

En el modelo utilizado se considera una línea que se cierra primero en el lado de la subestación receptora (donde está instalado el **banco de capacitores, CP**) y posteriormente se cierra en el lado de la subestación emisora (sin CP), el nivel de tensión considerado es de 115 kV, con una línea con $5n$ km de longitud, siendo n un número natural. Se pretende determinar si es conveniente ó no que el CP esté cerrado ante la energización de la línea de transmisión revisando sus efectos a nivel de transitorios electromagnéticos; ya que debe prevenirse la resonancia del CP con el sistema. Para ello, se analizan los transitorios electromagnéticos, por medio del ATP/EMTP, resultantes de la simulación de la energización de un CP instalado en 115 kV y determinar el impacto en las barras, en cuanto a variación de tensión se trata. Se considera que en el extremo receptor (donde se conecta el CP) no se conecta alguna otra carga más. El sistema se deja correr 2.0 segundos para que se estabilice antes de probar la energización.

La **línea de transmisión, LT**, posee las características siguientes, calibre 477 kCM ACSR:

- El modelo circuital correspondiente es el siguiente:

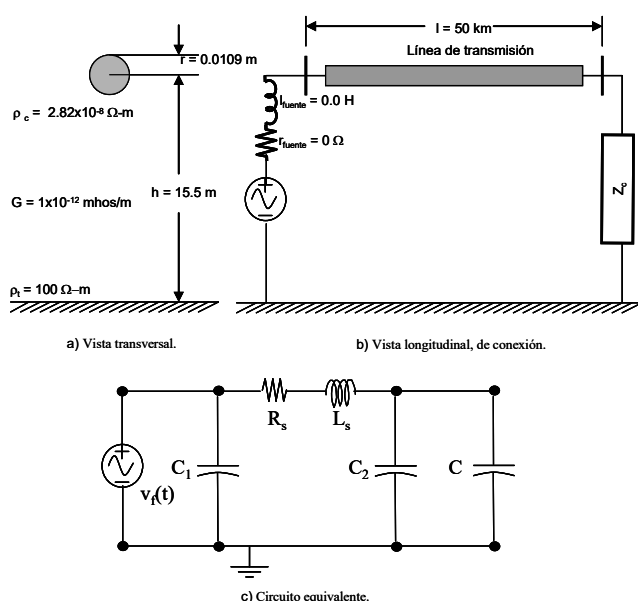


Fig. 7. Topología de la subestación LYE 400 kV.

Para dicho modelo se considera: a) La medición de la tensión de las barras extremas de la línea (fuente emisora y receptora con capacitor); b) La medición de la potencia reactiva en el condensador. La LT y sus parámetros, calculados por el ATP-EMTP son, por ejemplo:

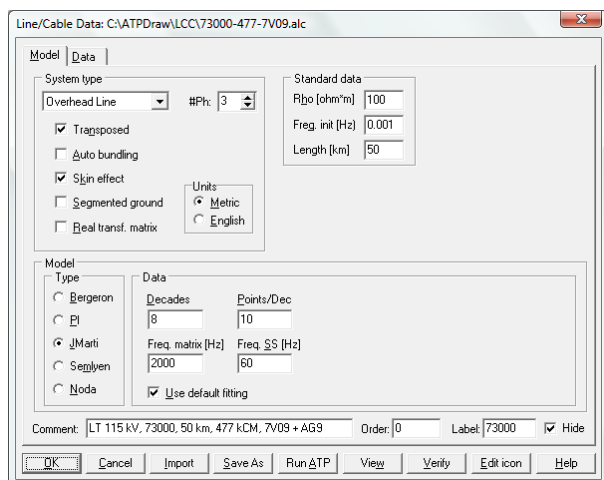


Fig. 8. Parámetros eléctricos de una LT de 115 kV.

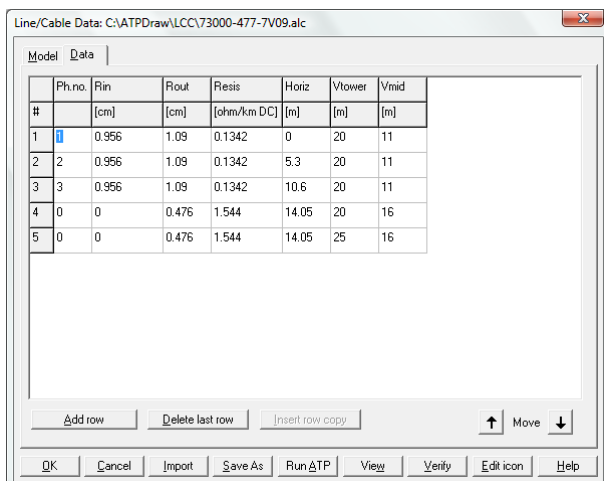


Fig. 9. Parámetros geométricos de una LT de 115 kV.

- La R = 3.7776 Ω , X = 29.9715 Ω e Y = 0.1317 mS, a 60 Hz.

III. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

El mantenimiento de los equipos que conforman la red requiere de una gran coordinación entre diferentes entes de la **Comisión Federal de Electricidad, CFE**, y cuando el equipo es una LT, se implican a las gerencias de generación, transformación y transmisión e inclusive la gerencia de distribución, todos ellos coordinados mediante el **Centro Nacional de Control de Energía, CENACE**. Con las simulaciones del ATP/EMTP se obtiene la sobretensión al instante de cierre de sus interruptores del lado emisor. Se observa una tensión máxima de 123.7 kV. Se aprecia una atenuación a 122.8 kV, cerca de los 60 ms (4 ciclos, aproximadamente).

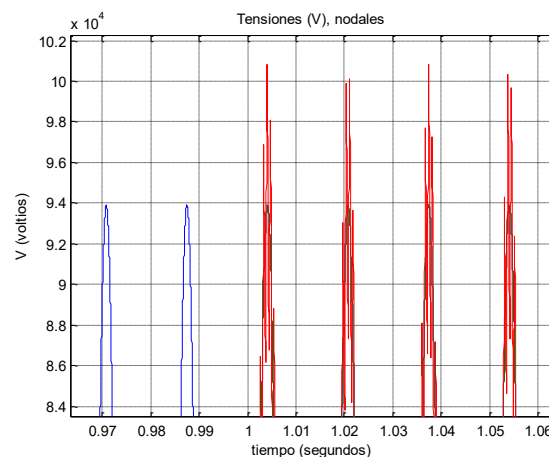


Fig. 10. Tensiones al conectar el banco de capacitores.

Cabe señalar que los valores de tensión son instantáneos, por ello deben dividirse entre $\sqrt{2}$ para obtener el valor eficaz del voltaje de fase y posteriormente se debe multiplicar por $\sqrt{3}$ para obtener la tensión de línea.

Y al no presentarse la resonancia, se busca el valor del capacitor a instalar para que se presente dicho fenómeno, y evitar de forma práctica, la instalación de un banco con este valor. La inductancia de la línea simulada es de 0.22202 pu, (Tabla I, 0.0795 H ó 29.9715 Ω).

En la [Tabla I](#) se observa que dicho valor (para los 50 km) es en el calibre 4/0, aproximadamente (considerando que: $Q = 3V_{FI} = 3^{1/2}V_{LI}$).

TABLA I. REACTANCIAS “TÍPICAS” DE LT DE SUBTRANSMISIÓN, EN PU.

[illegible]

Lo anterior implica que al instalar un banco de capacitores de 742 MVAR (Tabla II, 86 μF), se presentará la resonancia. Dado que:

$$\omega_{\text{resonancia}} = \frac{1}{\sqrt{L_{LT} C_{SE}}} \Rightarrow C_{SE} = \frac{1}{L_{LT} \omega_{\text{resonancia}}^2} \quad (2)$$

con:

$$Q_{\text{oscilación}} = 3X_{\text{oscilación}} V_F^2 = 3\omega_{\text{oscilación}} C_{SE} V_F^2 = \frac{3}{L_{LT} \omega_{\text{oscilación}}} V_F^2 \quad (3)$$

según se observa en la tabla siguiente:

TABLA II. POTENCIA DE OSCILACIÓN DEL BANCO.

		Q _{oscilación} (MVAR), capacidad del capacitor requerido a conectar para provocar la oscilación										
Calibre (kCM)	kV _{base}	ω (rad/s)	5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km	35 km	40 km	45 km	50 km
115 kV	900	115 376.992	9769	4880	3248	2431	1939	1610	1375	1197	1058	947
	795	115 376.992	9849	4920	3275	2451	1955	1624	1386	1207	1067	955
	477	115 376.992	9602	4786	3192	2389	1905	1582	1350	1176	1039	929
	397	115 376.992	10046	5019	3341	2500	1995	1657	1415	1232	1090	975
	336	115 376.992	9153	4572	3042	2276	1815	1506	1285	1116	988	883
	266	115 376.992	8923	4456	2965	2218	1768	1468	1252	1089	962	859
	410	115 376.992	7787	3893	2589	1935	1541	1277	1088	944	832	742
	310	115 376.992	7503	3746	2490	1861	1451	1227	1044	906	798	711
	795	69 376.992	3971	1974	1304	965	758	618	516	437	374	322
	477	69 376.992	3837	1907	1258	930	730	594	495	418	357	306
69 kV	336	69 376.992	3721	1849	1219	900	706	573	476	402	342	293
	266	69 376.992	3204	1588	1043	766	596	480	394	327	273	228
	410	69 376.992	3112	1542	1012	742	576	463	379	313	260	216
	310	69 376.992	2691	1329	868	631	485	384	308	249	200	159
	110	69 376.992	3240	1606	1055	775	604	486	399	332	278	233

En caso de considerar el efecto capacitivo de las líneas, por medio de su circuito pi, se deberá considerar que:

$$\omega_{\text{resonancia}} = \frac{1}{\sqrt{L_{LT} (C_{SE} + C_{LT})}} \Rightarrow C_{SE} = \frac{1}{L_{LT} \omega_{\text{resonancia}}^2} - C_{LT} \quad (4)$$

$$C_{SE} = \frac{1}{L_{LT} \omega_{\text{resonancia}}^2} - \frac{1}{X_{C_{LT}} \omega_{\text{resonancia}}} \quad (5)$$

$$C_{SE} = \frac{Q_{\text{oscilación}}}{3\omega_{\text{oscilación}} V_F^2} \quad (6)$$

Y al realizar otra corrida con dichos valores (0.0795 H y 86 μF) se observa que el fenómeno de resonancia se cumple con dichos valores. La tensión en las terminales del condensador crecerá sostenidamente, ver Fig. 11 y 12.

La potencia que se transfiere entre el capacitor instalado en la subestación y la inductancia de la línea será monótonamente creciente (lo cual confirma la resonancia) [7, 8, 9]. Los valores de bancos de capacitores, citados en la Tabla II, no son reales. Por ello, al cambiar de enfoque, al proceder de manera inversa, es decir, al pretender instalar un banco de capacitores ¿qué valor de reactancia inductiva conectada con dicho banco, provocará la resonancia?

Para responder dicha incógnita se requerirá hacer uso del concepto del equivalente de Thévenin, y por ende de la capacidad de cortocircuito de la subestación en cuestión, ya que con ésta se calculará la inductancia de acoplamiento que provocará la resonancia. Y explicado llanamente será: qué valor de capacitor (en MVAR) no debe instalarse para la subestación que posea cierto nivel de robustez ó de su nivel de cortocircuito (en MVA ó A, Tabla III) [10, 11].

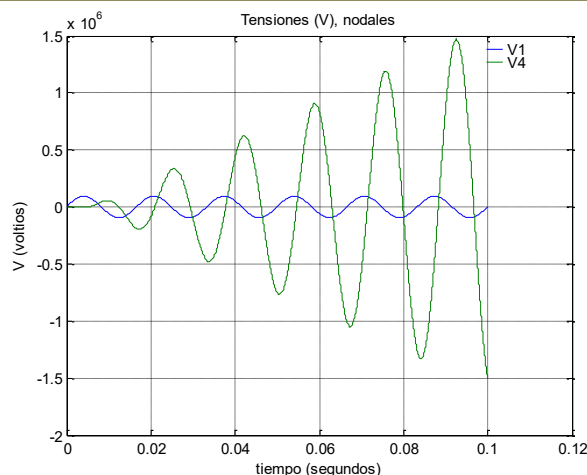


Fig. 11. Tensión nominal (V1) y resonante (V4).

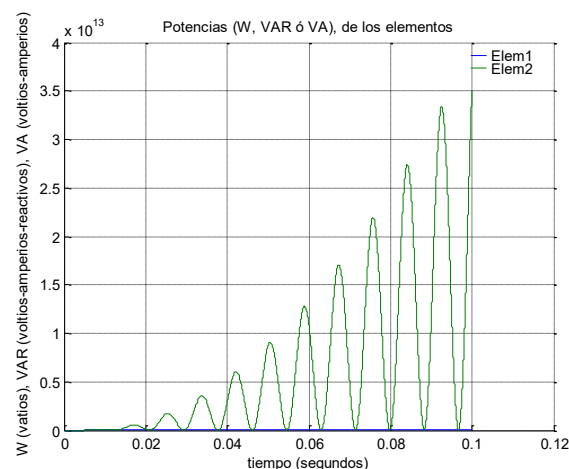


Fig. 12. Potencia resonante demandada a la red.

Tabla III. CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO "RESONANTE" (MVAR).

		S _{cortocircuito} (MVAR), capacidad de cortocircuito que provocará la oscilación si se conecta un CP=50 MVAR										
Calibre (kCM)	kV _{base}	ω (rad/s)	5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km	35 km	40 km	45 km	50 km
115 kV	900	115 376.992	9719	4830	3198	2381	1889	1560	1325	1147	1008	897
	795	115 376.992	9799	4870	3225	2401	1905	1574	1336	1157	1017	905
	477	115 376.992	9552	4746	3142	2339	1855	1532	1300	1126	989	879
	397	115 376.992	9996	4969	3291	2450	1945	1607	1365	1182	1040	925
	336	115 376.992	9103	4522	2992	2226	1765	1456	1235	1068	938	833
	266	115 376.992	8873	4406	2915	2168	1718	1418	1202	1039	912	809
	410	115 376.992	7747	3843	2539	1885	1481	1227	1038	894	782	692
	310	115 376.992	7453	3696	2440	1811	1431	1177	994	856	748	661
	795	69 376.992	3921	1924	1254	915	708	568	466	387	324	272
	477	69 376.992	3787	1857	1208	880	680	544	445	368	307	256
69 kV	336	69 376.992	3671	1799	1169	850	656	523	426	352	292	243
	266	69 376.992	3154	1538	993	716	546	430	344	277	223	178
	410	69 376.992	3062	1482	962	692	526	415	329	263	210	166
	310	69 376.992	2641	1279	818	581	435	334	258	199	150	109
	110	69 376.992	3190	1556	1005	725	554	436	349	282	228	183

Para una subestación (de 115 kV) con un valor de 692 MVA ó 3473 A de cortocircuito, no deberá instalarse el condensador de 15 MVAR, y dado que dicha subestación se conecta al sistema con una línea de transmisión de 50 km. Ya que si se cumplen estas premisas, se tendrá una probabilidad muy alta de resonancia, lo cual dañará, a la postre, los fusibles o al mismo banco de capacitores, además de perjudicar a la red adyacente. Si se desea considerar el efecto capacitivo de las líneas, por medio de su circuito pi, y la impedancia de la carga conectada, ahora se requiere considerar que:

$$Z_{Th} = \frac{1}{j\omega C_{LT} + \frac{1}{R_{LT} + jX_{LT}} + \frac{1}{R_C + jX_C}} \quad (11)$$

$$Z_{th} = \frac{\left(\frac{R_{LT}}{R_{LT}^2 + X_{LT}^2} + \frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2} \right) - j \left(\omega C_{LT} - \frac{X_{LT}}{R_{LT}^2 + X_{LT}^2} - \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} \right)}{\left(\frac{R_{LT}}{R_{LT}^2 + X_{LT}^2} + \frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2} \right)^2 + \left(\omega C_{LT} - \frac{X_{LT}}{R_{LT}^2 + X_{LT}^2} - \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} \right)^2} \quad (12)$$

$$C_{SE} = \frac{1}{L\omega_{resonancia}^2} = \frac{1}{\left(\omega C_{LT} - \frac{X_{LT}}{R_{LT}^2 + X_{LT}^2} - \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} \right)^2 + \left(\frac{R_{LT}}{R_{LT}^2 + X_{LT}^2} + \frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2} \right)^2} \omega_{resonancia}^2 \quad (13)$$

El modelo circuital considera una carga conectada en paralelo con el banco de capacitores ilustrado en la Fig. 7.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio electromagnético aquí presentado, ayuda a proponer varias tablas con valores que consideran diversos aspectos: 1) Dada una longitud de línea de transmisión a un nivel de tensión, qué valor de Q (MVAR) de un banco de capacitores no se debe conectar; 2) El cierre de un banco de capacitores es perjudicial a la subestación donde se conecte y a la red adyacente, si se cumplen ciertos valores de la reactancia de conexión con dicha subestación.

Todo ello coadyuva a reducir los gastos por planeación, mantenimientos y fallas, tanto de los mismos bancos de capacitores como de los equipos asociados a la red en se conecte.

Para llegar a una recomendación, se han presentado valores sobre corrientes, potencias y reactancias para diversas condiciones de longitud de líneas y capacidades de bancos de capacitores, para dar mayor confiabilidad y certeza a los equipos a interconectar. El calibrar los relevadores para cuando se presente la condición de “resonancia” prevendría tal situación. Además, en caso de presentarse un apagón regional por la resonancia, se pueden cuantificar los montos implicados en éste, para poder equiparar los costos del apagón con los costos relacionados a los mantenimientos del CP y con ello decidir en que, condiciones es más conveniente dar el mantenimiento; y la cuantía económica a soportar en caso de presentarse un apagón [12].

REFERENCIAS

- [1] Glenn W. Swift, An analytical approach to ferroresonance, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. pas-88, No. 1, January 1969.
- [2] E. J. Dolan, D. A. Gillies and E. W. Kimbark, Ferroresonance in a transformer switched with an EHV line, IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Ore., July 18-23, 1971.
- [3] P. Ferracci Cahier technique n° 190 Ferroresonance, ECT190, first issued March 1998.
- [4] B. C. Lesieutre, J. A. Mohamed, A. M. Stankovid Analysis of ferroresonance in three-phase transformers, IEEE 2000.
- [5] R. Gagnon, P. Viarouge, G. Sybille, E. Tourkhani, Identification of ferroresonance as the cause of SVC instability in a degraded series compensated network, IEEE 2000.
- [6] R. García Kasusky, Reproducción del fenómeno de ferroresonancia en la subestación Santa Cruz en 230 kV, 1ª. Semana de la Ingeniería, Guadalajara, Jalisco, México, CENACE-CFE, p 1-7, octubre 2012.

- [7] Camilo Narvaez Pérez, Análisis de transitorios electromagnéticos en redes eléctricas utilizando modelos tipo EMTP, 3er. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-9, septiembre 2005, SP-88.
- [8] Camilo Narvaez Pérez, Análisis de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión multiconductoras en el dominio de la frecuencia. Parte I: Teoría, 4o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-10, octubre 2006. IE58i47.
- [9] Camilo Narvaez Pérez, Análisis de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión multiconductoras en el dominio de la frecuencia. Parte II: Aplicación, 4o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-10, octubre 2006. IE216i04.
- [10] Camilo Narvaez Pérez Modelos de ondas viajeras para el análisis de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión, Tesis de maestría, CINVESTAV, Unidad Guadalajara, p 59-63, 92-94, febrero 2001.
- [11] Camilo Narvaez Pérez, Sistema de cálculo de cargabilidad de líneas de transmisión en sistemas eléctricos de potencia, 6o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-10, octubre 2008.
- [12] Camilo Narvaez Pérez, Dante Aristóteles García Conejo, Patricia Ramírez Peredo y César Eduardo Blanco Gómez, Disparos trifásicos y de recierre monopolar en la red troncal de 400 kV del área de control occidental, CFE, y su probabilidad normal de ocurrencia, 10o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-6, marzo 2013.

BIOGRAFÍAS



CAMILO NARVAEZ PÉREZ egresado de la Universidad de Guadalajara como Ingeniero Mecánico Electricista (1997), Maestro en Ciencias en el área de Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV Unidad Guadalajara (2000). Licenciado en Matemáticas (2022) en la UnADM. Ha laborado desde el 2002 labora en el Centro Nacional de Control de Energía, CENACE, como analista de redes eléctricas, aplicaciones de potencia y jefe de evaluación y estadística, además ser profesor de ingeniería en diversas universidades. Su área de interés es sobre los transitorios electromagnéticos, pronóstico de carga y la generación alternativa de energía eléctrica (MHD, eólica y solar, principalmente).



DANTE A. GARCÍA CONEJO Es egresado como Ing. Mecánico Electricista (IME); del ITESM, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Energética (MIE); ITESM, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. Desde el año 2006 labora como analista de redes eléctricas en el CENACE, Centro Nacional de Control de Energía, Área de Control Occidental, de la CFE Comisión Federal de Electricidad.

HUGO H. MORENO LÓPEZ egresado de la Tecnológico Regional de León (1992), Maestro en Ingeniería Especialidad Alta Tensión en la FIMME UG (1997) y obtiene el PhD en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Paris IX & Supélec (école supérieure d'électricité) en 2005. Actualmente labora en la Subgerencia de Planeación y Estrategia Operativa (GCROC-CENACE). Interés sobre optimizaciones, estudios dinámicos de estabilidad transitoria y pequeña señal.



MANUEL ALEJANDRO TORRES AHUMADA es egresado del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Campus Guadalajara, como Ingeniero en Mecatrónica (2009), Maestro en Administración Empresarial (2014) del ITESM, Campus Virtual. Desde el año 2021 es el Gerente de la Gerencia de Control Regional Occidental del Centro Nacional de Control de Energía, responsable del control de la energía en los estados de Guanajuato, Querétaro, Aguascalientes, Michoacán, Colima, Zacatecas, San Luis Potosí, Hidalgo, Nayarit y Jalisco.

Estudio de los Convertidores Bidireccionales SEPIC y Cuk con Aplicación a Vehículos Eléctricos

DIANA GERALDINE CASTAÑEDA RUBALCABA, JOSÉ MIGUEL SOSA ZÚÑIGA, GERARDO VÁZQUEZ GUZMÁN.

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.
gery.rubalcaba@gmail.com
jose.sz@irapuato.tecnm.mx
gerardo.vg1@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN Los convertidores CD-CD bidireccionales son topologías de electrónica de potencia capaces de transferir energía entre dos fuentes de CD, en cualquier dirección. Se utilizan cada vez más en sistemas que tienen almacenamiento de energía eléctrica y su uso es cada vez más relevante en vehículos eléctricos o híbridos. En este documento se analiza el funcionamiento de los convertidores CD-CD bidireccionales basados en los convertidores SEPIC y Cuk, en lazo abierto y en modo de conducción continua, mediante simulación numérica. Estos convertidores presentan semejanzas en su composición y funcionamiento ya que tienen el mismo tipo y número de elementos, pueden reducir o elevar el voltaje de salida y presentan corrientes de entrada y salida continuas.

PALABRAS CLAVE - Convertidor bidireccional, electrónica de potencia, SEPIC, Cuk.

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores CD-CD bidireccionales son capaces de transferir energía entre dos fuentes de CD, en cualquier dirección. Se utilizan cada vez más en aplicaciones como vehículos eléctricos o híbridos [1], [2], fuentes de alimentación ininterrumpida [3], aplicaciones aeroespaciales [4], sistemas de energías renovables [5]-[8] y redes inteligentes [9]. Las topologías bidireccionales sustituyen a dos convertidores unidireccionales para lograr un flujo de potencia directo e inverso, lo que simplifica la estructura del sistema, reduce tamaño, el peso y el costo, y mejora la eficiencia y el rendimiento [10], [11].

Los convertidores bidireccionales se pueden clasificar en no aislados y aislados. Las topologías aisladas se utilizan cuando se requiere aislamiento galvánico para aumentar la seguridad en los sistemas eléctricos y son adecuadas para aplicaciones con amplios rangos de voltaje de entrada [11]. Generalmente estas topologías incorporan un transformador y se puede lograr una alta relación de conversión ajustando su relación de vueltas. Sin embargo, en comparación con las topologías no aisladas, estas topologías pueden ser complejas, costosas y tener un mayor número de interruptores [12]. Muchas topologías aisladas son el resultado de adaptaciones a topologías resonantes de modo conmutado [13]. Una topología bidireccional no aislada generalmente se obtiene agregando un diodo antiparalelo al interruptor activo y agregando un interruptor controlable a un diodo de una topología de convertidor unidireccional. Se pueden derivar topologías no aisladas básicas a partir de los convertidores unidireccionales elevador, reductor-elevador, SEPIC y Cuk [14]. Estas topologías son simples, utilizan sólo dos interruptores activos y no sufren interferencias magnéticas. Sin embargo, las desventajas son la limitación en

la relación de conversión y la operación en conmutación dura [12]. En la Fig. 1 se muestra la estructura general de los convertidores CD-CD bidireccionales. La principal característica de los convertidores bidireccionales es el flujo de potencia en ambas direcciones. En los extremos del convertidor, denominados Puerto 1 y Puerto 2, se conectan fuentes de voltaje receptivas o cargas eléctricas que también pueden actuar como generadores.

Los vehículos eléctricos dependen de la energía eléctrica almacenada en baterías para la tracción y el funcionamiento. La batería se carga desde el suministro de CA, pero alternativamente se utiliza el frenado regenerativo para recuperar la energía cinética del vehículo en energía eléctrica almacenada en la batería. Los convertidores bidireccionales juegan un papel vital en el control de tracción y las operaciones de frenado regenerativo y contribuyen a la mejora del rendimiento del accionamiento del motor [10]. En otros casos, la energía de la batería también se puede inyectar a la red eléctrica de CA. Esto último con el objetivo de lograr balance de cargas, inyección de potencia reactiva, regulación de potencia activa y la gestión de los recursos de energías renovables [15].

Entre los convertidores CD-CD bidireccionales no aislados están las topologías SEPIC [16] y Cuk [11], [12], [14], [10].

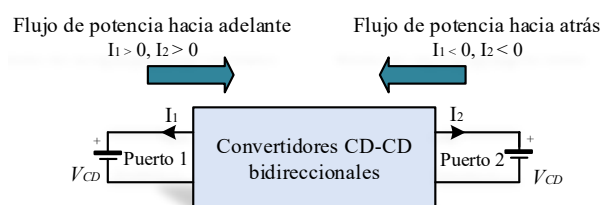


Fig. 1. Estructura general de los convertidores CD-CD bidireccionales.

Estos convertidores presentan similitudes en el tipo y número de elementos que las componen, y en la relación de conversión de voltaje determinada en función del ciclo de trabajo. Sin embargo, existen diferencias en las polaridades de los voltajes en los puertos, las magnitudes máximas de voltajes y corrientes soportadas por sus elementos y en los comportamientos dinámicos de los estados del convertidor como las corrientes de los inductores y los voltajes de los capacitores.

En general, los cargadores para vehículos eléctricos están diseñados a partir de estándares según el país en el que sean instalados y el uso público o doméstico que tengan. En este documento se presenta un análisis de los convertidores bidireccionales SEPIC y Cuk, en lazo abierto y en modo de conducción continua, con aplicación en vehículos eléctricos. Se presentan resultados de simulación numérica con parámetros que ilustran su aplicación en una etapa de un cargador de vehículo eléctrico de nivel 1 de acuerdo a la norma SAE J1772.

En la Sección II se describen los cargadores de vehículos eléctricos y las normas SAE J1772 e IEC 61851 que establecen características eléctricas de voltaje, corriente y potencia de los sistemas de carga de batería de vehículos eléctricos. En la Sección III se presenta el funcionamiento de los convertidores CD no aislados SEPIC y Cuk, mostrando los circuitos equivalentes en un periodo de conmutación. En la Sección IV se presentan los parámetros de estado estacionario de los convertidores y se establecen las características de los convertidores en la simulación numérica realizada. En la Sección V se muestran y discuten los resultados de la simulación numérica y finalmente en la Sección VI se presentan las conclusiones de este trabajo.

II. CARGADORES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Debido a la demanda de los vehículos eléctricos, el estudio y diseño de los cargadores de baterías conectados a la red eléctrica ha tenido un impulso en las dos últimas décadas. Los cargadores de vehículos eléctricos se diseñan considerando el tiempo total de la carga de las baterías del vehículo eléctrico, y también la vida útil de las baterías. Existen cargadores de vehículos eléctricos aislados y no aislados. Otra clasificación sobre los cargadores de vehículos eléctricos es considerando la dirección del flujo de potencia, ya que estos pueden ser unidireccionales o bidireccionales. En los cargadores unidireccionales de vehículos eléctricos, la batería del vehículo eléctrico tiene únicamente el propósito de servir como carga. Mientras que, en el segundo tipo, los vehículos eléctricos son capaces de servir como carga y también de transferir potencia a la red eléctrica, lo que se le conoce como sistemas de vehículo a red (V2G) y vehículo a casa (V2H). Algunos cargadores de batería bidireccionales son capaces de proporcionar la potencia pico que consume un hogar que se encuentra entre los 10 y 20 kW, [15], [17].

Algunas de las empresas pioneras en la industria de los vehículos eléctricos son Tesla, Hyundai y Nissan, que tienen sus propias patentes de cargadores de vehículos eléctricos. La

empresa Tesla desarrolló el cargador Wall Connector® de uso doméstico. Las características eléctricas de este cargador son una toma de corriente alterna monofásica de 200-240 V RMS, corriente nominal de salida de 12-48 A y un rango de potencia de 2.8-11.5 kW, y cumple las normas SAE J1772 para Estados Unidos y IEC 61851 para Europa y China. Las características del cargador Wall Connector® hace posible su uso en la carga de los vehículos de Tesla Model S, Model 3, Model X, Model Y. Por su parte, la empresa Nissan desarrolló un cargador basado en la norma SAE J1772 de uso doméstico para el vehículo Nissan Leaf con una toma de corriente alterna monofásica de 120 o 240 V RMS, corriente máxima de 30 A y potencia de 1.8 kW [15].

A. NORMA SAE J1772 Y NORMA IEC 61851

SAE J1772 es una norma creada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) en donde se establecen las características físicas y eléctricas del conector y de la toma eléctrica del vehículo. Además, indica los niveles de voltaje y flujo de potencia a partir de tres clasificaciones; nivel 1, nivel 2 y nivel 3. Esta norma es usada Estados Unidos. Para Europa y China se usa la norma IEC 61851 que es un estándar análogo a SAE J1772 adaptado a los voltajes de línea de CA europeos y asiáticos y nombrando tres modos; modo 1, modo 2 y modo 3. En la [Tabla I](#) se muestran las características eléctricas de ambas normas [15], [17].

III. CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES SEPIC Y CUK

Entre las estructuras bidireccionales no aisladas se tienen los convertidores SEPIC (Convertidor de Inductor Primario de un Solo Extremo) y Cuk. Ambos surgen del remplazo de los interruptores de potencia unidireccionales por interruptores de potencia bidireccionales.

Estas dos topologías son capaces de presentar corrientes de entrada y de salida continuas. Además, el voltaje de cada uno de los puertos puede ser mayor o menor con respecto al otro puerto. Sin embargo, se diferencian entre sí por la polaridad del voltaje en el Puerto 2, ya que en el caso del convertidor Cuk el voltaje en el Puerto 2 tiene la polaridad invertida con respecto al voltaje del Puerto 1.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS EN SAE J1772 E IEC 61851 [15]-[17].

	Clasificación	Toma de corriente	Potencia	Tiempo de carga
S A J 1 7 7	Nivel 1: 120 V RMS 60 Hz	Monofásica	1.4 kW (12 A) 1.9 kW (20 A)	4 a 11 h 11 a 36 h
	Nivel 2: 240 V RMS 60 Hz	Monofásica, trifásica	4 kW (17 A) 8 kW (32 A) 19.8 kW (80 A)	1 a 4 h 2 a 6 h 2 a 3 h
	Nivel 3: > 480 V RMS 60 Hz	Trifásica	50 kW 100 kW	0.4 a 1 h 0.2 a 0.5 h
I E C 6 1 8 5 1	Modo 1: 250 V RMS 50 Hz	Monofásica	1.4 kW (12 A) 1.9 kW (20 A)	4 a 11 h 11 a 36 h
	Modo 2: 400 V RMS 50 Hz	Monofásica, trifásica	4 kW (17 A) 8 kW (32 A) 19.8 kW (80 A)	1 a 4 h 2 a 6 h 2 a 3 h
	Modo 3: 208-600 V RMS 50 Hz	Trifásica	50 kW 100 kW	0.4 a 1 h 0.2 a 0.5 h

Por su parte, el convertidor SEPIC mantiene la misma polaridad del voltaje en ambos puertos. La diferencia polaridad de voltaje en los puertos de ambos convertidores es debida a la posición del interruptor de potencia S_2 y el inductor denotado como L_2 , ya que como se observa en la Fig. 2 y Fig. 3, ambos elementos eléctricos invierten sus posiciones en las configuraciones mostradas.

A. CIRCUITOS EQUIVALENTES DURANTE LA CONMUTACIÓN PARA LOS CONVERTIDORES

Los convertidores CD-CD bidireccionales SEPIC y Cuk están compuestos por dos inductores, dos capacitores y dos interruptores de potencia; MOSFETs, tal como se muestra en la Fig. 2 y Fig. 3. El principio de operación de los convertidores bidireccionales SEPIC y Cuk es a partir del accionamiento simultáneo y complementario de los interruptores de potencia S_1 y S_2 en un periodo de conmutación, T_s , y que genera dos diferentes circuitos equivalentes. En el primer caso; la corriente fluye del Puerto 1 al Puerto 2. Por lo que S_1 será el interruptor principal y se utiliza el diodo en antiparalelo del interruptor S_2 denotado como d_2 . Considerando los tiempos de conducción kT_s y $(1-k)T_s$ del MOSFET S_1 , con $0 < k < 1$, se obtienen los circuitos equivalentes mostrados en la Fig. 4(a) y Fig. 4(b) y en la Fig. 5(a) y Fig. 5(b). En este caso de operación, el comportamiento del convertidor bidireccional SEPIC será análogo a la estructura unidireccional del convertidor SEPIC. El segundo caso de operación es cuando el flujo de corriente se invierte. Por lo que ahora el interruptor principal será S_2 , utilizándose el diodo en antiparalelo de S_1 denotado como d_1 . En un tiempo de conmutación kT_s , el diagrama equivalente se observa en la Fig. 4(c) y Fig. 5(c) para ambos convertidores. En la Fig. 4(d) y Fig. 5(d) se muestran los diagramas equivalentes durante el periodo de tiempo $(1-k)T_s$, de los convertidores SEPIC y Cuk respectivamente. En este último caso de operación el convertidor bidireccional SEPIC funciona como un convertidor Zeta unidireccional. En la Tabla II se muestra una comparativa de las características eléctricas de los convertidores bidireccionales SEPIC y Cuk.

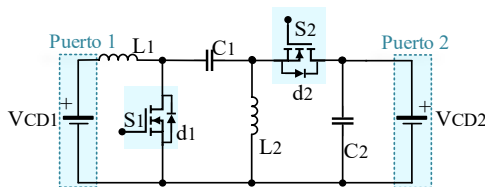


Fig. 2. Convertidor CD-CD bidireccional SEPIC.

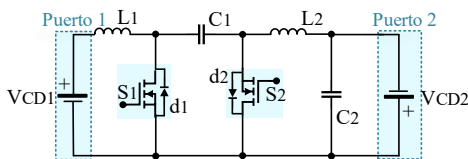


Fig. 3. Convertidor CD-CD bidireccional Cuk.

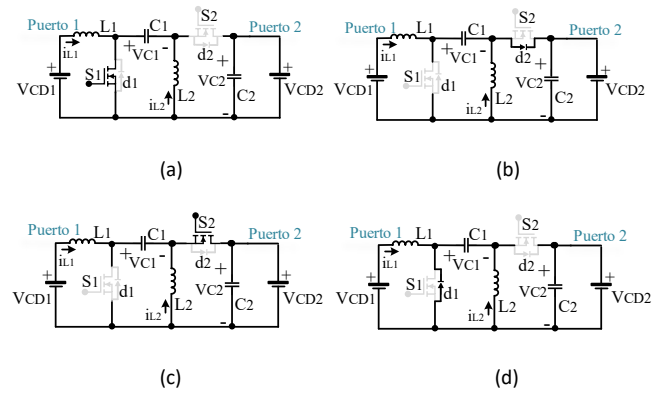


Fig. 4. Circuitos del SEPIC con potencia del Puerto 1 al Puerto 2 en (a) y (b) y viceversa en (c) y (d). Durante (a) kT_s , (b) $(1-k)T_s$, (c) kT_s y (d) $(1-k)T_s$.

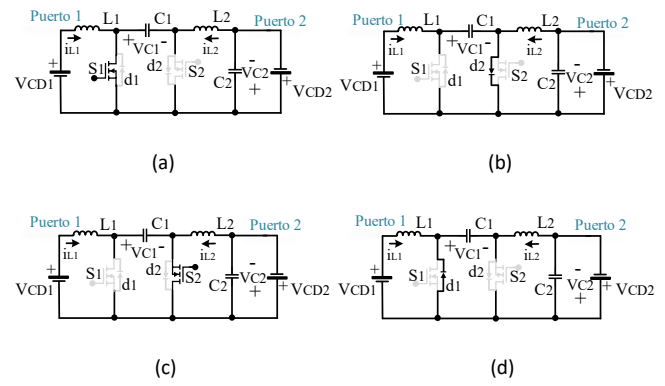


Fig. 5. Circuitos del SEPIC con potencia del Puerto 2 al Puerto 1 en (a) y (b) y viceversa en (c) y (d). Durante (a) kT_s , (b) $(1-k)T_s$, (c) kT_s y (d) $(1-k)T_s$.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES.

Características	Topología	
	SEPIC	Cuk
Relación de conversión de voltaje	$\frac{V_{CD2}}{V_{CD1}}$	$\frac{k}{1-k}$
	$\frac{V_{CD1}}{V_{CD2}}$	$\frac{1-k}{k}$
	$\frac{V_{CD1}}{V_{CD2}}$	$\frac{1-k}{k}$
	$\frac{V_{CD2}}{V_{CD1}}$	$\frac{k}{1-k}$
I_{prom} (A)	L_1	$\frac{P_{Puerto 2} k}{V_{CD2}(1-k)}$
	L_2	$\frac{P_{Puerto 1}(1-k)}{V_{CD1}k}$
V_{prom} (V)	C_1	V_{CD1}
	C_2	V_{CD2}
P_{prom} (W)	$P_{Puerto 1}$	$V_{CD1} I_{L1}$
	$P_{Puerto 2}$	$V_{CD2} I_{L2}$
ΔI_L (A)	L_1	$\frac{V_{DC1} k}{L_1 f}$
	L_2	$\frac{V_{DC1} k}{L_2 f}$
ΔV_C (V)	C_1	$\frac{I_{L2} k}{C_1 f}$
	C_2	$\frac{I_{L2} k}{C_2 f}$

IV. SIMULACIÓN DE LOS CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES SEPIC Y CUK

En esta sección se establecen los parámetros utilizados para la realización de la simulación numérica de los convertidores bidireccionales SEPIC y Cuk. Se considera que ambos convertidores operan en lazo abierto y en modo de conducción continua.

Los parámetros utilizados muestran una posible aplicación de los convertidores en una etapa de un cargador de vehículo eléctrico de nivel 1 de acuerdo con la norma SAE J1772. La potencia se establece de 1.5 kW, uno de los puertos se establece como una fuente de CD de 180 V y emula el bus de CD de un rectificador monofásico alimentado con 127 V RMS. En el otro de los puertos establece un voltaje de 350 V y emula el bus de CD de un vehículo eléctrico.

Para la operación de cualquiera de los convertidores bidireccionales considerados, es decir, SEPIC o Cuk, con un flujo de potencia del Puerto 1 al Puerto 2, el Puerto 1 se conecta a un bus de CD de 180 V y en el Puerto 2 se establece en 350 V mediante el ciclo de trabajo. El Puerto 2 está conectado a una resistencia cuyo valor determina la potencia de convertidor en 1.5 kW. Para la operación de cualquiera de los convertidores considerados, con un flujo de potencia del Puerto 2 al Puerto 1, el Puerto 2 se conecta a un bus de CD de 350 V y el voltaje del Puerto 1 se establece en 180 V mediante el ciclo de trabajo. Ahora el Puerto 1 está conectado a una resistencia cuyo valor determina la potencia de convertidor de 1.5 kW. Esto se presenta en la Fig. 6. En la Tabla III se muestran los parámetros de los convertidores utilizados bajo las suposiciones de operación antes mencionadas. Se indican los valores de los elementos pasivos, voltajes en los puertos y frecuencia de conmutación utilizados.

En la Tabla IV se obtienen los valores promedios de corrientes en inductores y voltajes en capacitores, así como los valores de rizo de corrientes en inductores y rizados de voltajes en capacitores en estado estacionario.

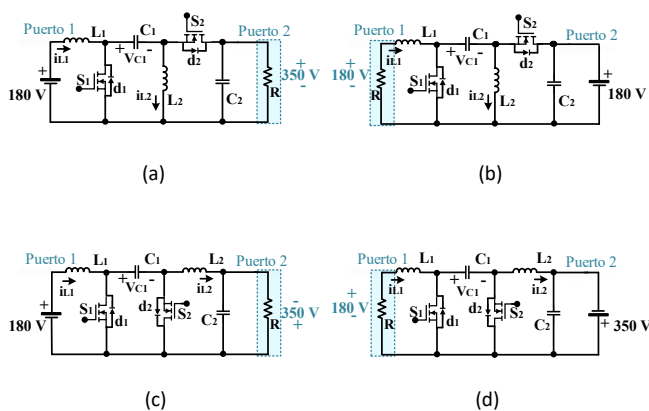


Fig. 6. Flujo de potencia del Puerto 1 al Puerto 2: (a) SEPIC, (c) Cuk. Flujo de potencia del Puerto 2 al Puerto 1: (b) SEPIC y (d) Cuk.

TABLA III. PARÁMETROS DE LOS CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES.

Elemento	Convertidor SEPIC	Convertidor Cuk
Inductor L_1	5.94 mH	5.94 mH
Inductor L_2	2.97 mH	2.97 mH
Capacitor C_1	5.7 μ F	5.7 μ F
Capacitor C_2	11.5 μ F	396 nF
Frecuencia de conmutación f_s	50 kHz	50 kHz
Fuente de voltaje de CD V_{CD1}	180 V	180 V
Fuente de voltaje de CD V_{CD2}	350 V	-350 V
Resistencia de carga Puerto 1 R	21.25 Ω	21.25 Ω
Resistencia de carga Puerto 2 R	80.35 Ω	80.35 Ω

TABLA IV. RIZO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE LOS CONVERTIDORES.

SEPIC		Cuk	
Valor promedio	Rizado en las variables	Valor promedio	Rizado en las variables
$I_{L1} = 8.47$ A	$\Delta I_{L1} = 400$ mA (4.72%)	$I_{L1} = 8.47$ A	$\Delta I_{L1} = 400$ mA (4.72%)
$I_{L2} = 4.35$ A	$\Delta I_{L2} = 800$ mA (18.4%)	$I_{L2} = 4.35$ A	$\Delta I_{L2} = 800$ mA (18.4%)
$V_{C1} = 180$ V	$\Delta V_{C1} = 10$ V (5.5%)	$V_{C1} = 350$ V	$\Delta V_{C1} = 10$ V (5.5%)
$V_{C2} = 180$ V	$\Delta V_{C2} = 5$ V (2.75%)	$V_{C2} = 180$ V	$\Delta V_{C2} = 5$ V (0.94%)

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas realizadas de los convertidores bidireccionales SEPIC y Cuk mediante las gráficas de las variables de corriente, voltaje y potencia con respecto al tiempo. Los convertidores fueron simulados con los parámetros de la Tabla III. Desde la Fig. 7 y hasta la Fig. 13, se muestran los resultados cuando la potencia eléctrica se transfiere del Puerto 1 al Puerto 2. Por otra parte, desde la Fig. 14 y hasta la Fig. 20 se muestran los resultados al invertir dicha transferencia de potencia. Para facilitar la comparación de las variables, tanto en el convertidor Cuk como en el SEPIC, se grafica la corriente en el Puerto 2 como positiva cuando la transferencia de potencia es del Puerto 1 al Puerto 2. La Fig. 7 muestra la corriente a través del inductor L_1 en ambos convertidores. Se observa que convergen al mismo valor en estado estacionario y que tienen características similares de respuesta transitoria, aunque el SEPIC tiene el menor sobretiro y oscilaciones que se amortiguan más lentamente. La Fig. 8 muestra el rizo de corriente del inductor L_1 en ambos convertidores. Se observa que las magnitudes del rizo son semejantes.

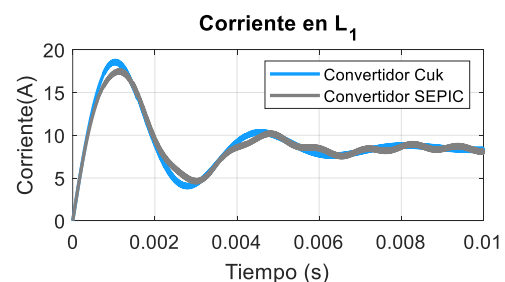


Fig. 7. Corrientes a través del inductor L_1 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 1 al Puerto 2.

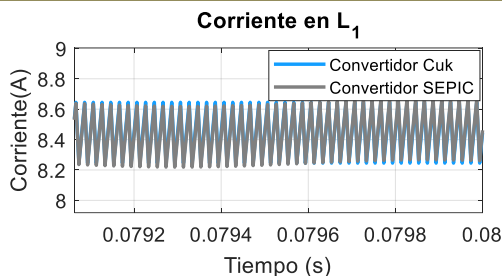


Fig. 8. Acercamiento de las corrientes del inductor L_1 , en los convertidores SEPIC y Cuk, con transferencia de potencia del Puerto 1 al Puerto 2.

La Fig. 9 muestra la corriente a través del inductor L_2 en ambos convertidores. También se observa que convergen al mismo valor en estado estacionario, sin embargo, en el convertidor Cuk hay un sobretiro menor y en el SEPIC oscilaciones sostenidas. Ya que los convertidores operan en lazo abierto estas oscilaciones son producidas por redes RLC formadas durante la operación del convertidor. La Fig. 10 muestra el rizo de corriente en la corriente a través del inductor L_2 en ambos convertidores. Se observa que las magnitudes del rizo son semejantes.

La Fig. 11 muestra el voltaje a través del capacitor C_1 en ambos convertidores. Se observa que el valor de estado estacionario en el SEPIC es menor que en el convertidor Cuk. En el convertidor SEPIC el voltaje del capacitor C_1 es igual al voltaje del Puerto 1, mientras que, en el convertidor Cuk, el voltaje a través del capacitor es la suma de los voltajes de ambos puertos de alimentación. En el SEPIC observamos oscilaciones periódicas persistentes. La Fig. 12 muestra el voltaje en el Puerto 2 en ambos convertidores y se observa un comportamiento semejante entre ambos convertidores. La Fig. 13 muestra la potencia de ambos convertidores en el Puerto 2, mostrando que en estado estacionario converge a 1.5 kW, aunque en el SEPIC la potencia tiene oscilaciones sostenidas alrededor del valor de estado estacionario.

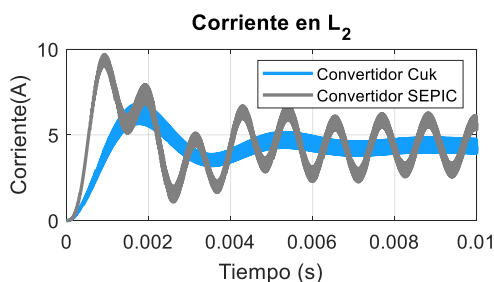


Fig. 9. Corrientes a través del inductor L_2 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 1 al Puerto 2.

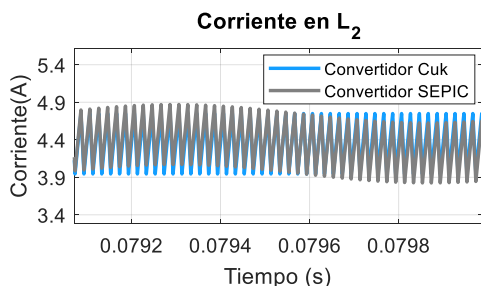


Fig. 10. Acercamiento de las corrientes en el inductor L_2 , en SEPIC y Cuk, con transferencia de potencia del Puerto 1 al Puerto 2.

La Fig. 14 muestra la corriente a través del inductor L_1 en ambos convertidores. Se observa que convergen al mismo valor en estado estacionario y que existen oscilaciones amortiguadas, aunque en el SEPIC son de menor amplitud. La Fig. 15 muestra el rizo de corriente en la corriente a través del inductor L_1 en ambos convertidores. Se observa que las magnitudes de los rizos son semejantes.

La Fig. 16 muestra la corriente a través del inductor L_2 en ambos convertidores. También se observa que convergen al mismo valor en estado estacionario, sin embargo, hay oscilaciones amortiguadas y que en el convertidor SEPIC son de menor amplitud. La Fig. 17 muestra el rizo de corriente en la corriente a través del inductor L_2 en ambos convertidores. Se observa que las magnitudes del rizo son semejantes.

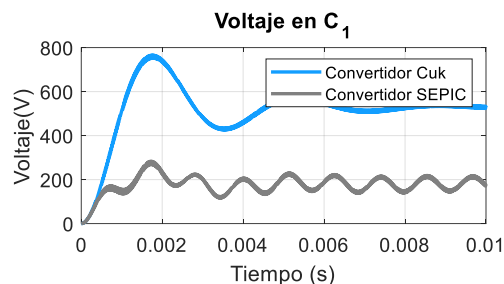


Fig. 11. Voltajes a través del capacitor C_1 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 1 al Puerto 2.

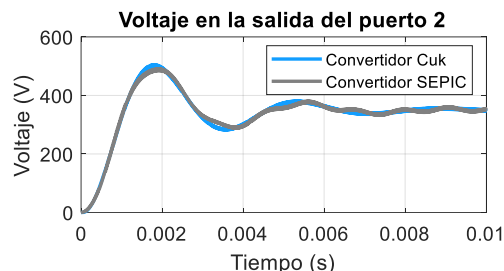


Fig. 12. Voltaje en el Puerto 2 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 1 al Puerto 2.

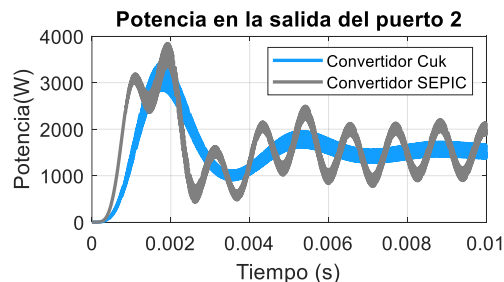


Fig. 13. Potencia del convertidor, medida en el Puerto 2, en SEPIC y Cuk cuando la transferencia de potencia es del Puerto 1 al Puerto 2.

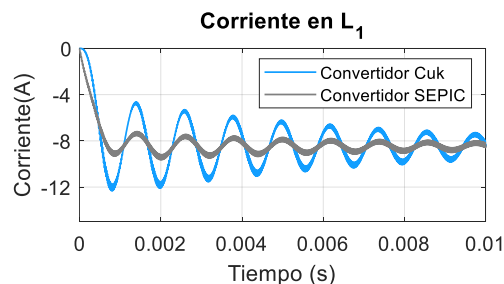


Fig. 14. Corrientes a través del inductor L_1 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 2 al Puerto 1.

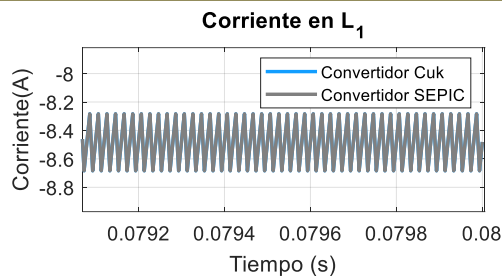


Fig. 15. Acercamiento de las corrientes en el inductor L_1 , en SEPIC y Cuk, con transferencia de potencia del Puerto 2 al Puerto 1.

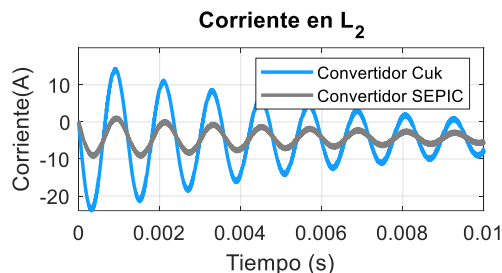


Fig. 16. Corrientes a través del inductor L_2 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 2 al Puerto 1.

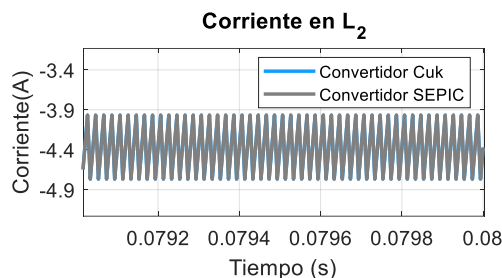


Fig. 17. Acercamiento de las corrientes en el inductor L_2 , en SEPIC y Cuk, con transferencia de potencia del Puerto 2 al Puerto 1.

La Fig. 18 muestra el voltaje a través del capacitor C_1 en ambos convertidores. Se observa que el valor de estado estacionario en el SEPIC es menor que en el convertidor Cuk. En ambas respuestas observamos oscilaciones amortiguadas. La Fig. 19 muestra el voltaje en el Puerto 2 en ambos convertidores y se observa la convergencia al mismo valor de estado estacionario, pero con oscilaciones más amortiguadas en el SEPIC. La Fig. 20 muestra la potencia de ambos convertidores en el Puerto 1, mostrando que en estado estacionario converge a -1.5 kW.

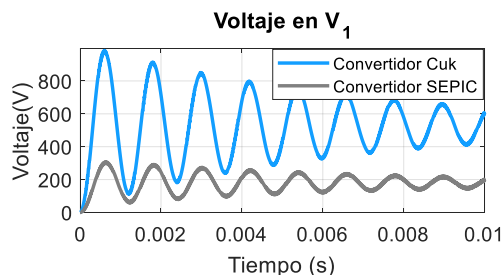


Fig. 18. Voltajes a través de los capacitores C_1 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 2 al Puerto 1.

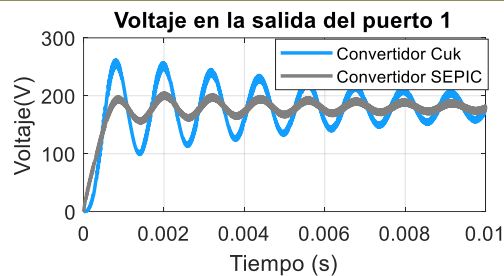


Fig. 19. Voltaje en el Puerto 1 en los convertidores SEPIC y Cuk con transferencia de potencia del Puerto 2 al Puerto 1.

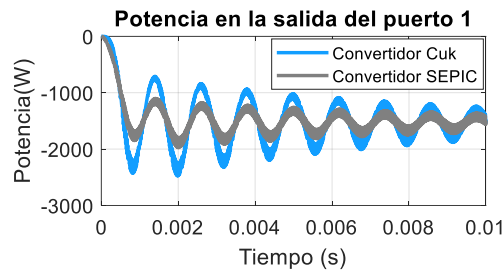


Fig. 20. Potencia del convertidor, medida en el Puerto 1, en SEPIC y Cuk cuando la transferencia de potencia es del Puerto 2 al Puerto 1.

VI. CONCLUSIONES

En este documento se presentó un análisis de los convertidores CD-CD bidireccionales SEPIC y Cuk en lazo abierto mediante simulación numérica. Los parámetros de estos convertidores se establecieron para mostrar la aplicación en una etapa de un cargador de vehículo eléctrico de nivel 1 con base en la norma SAE J1772. Una característica del convertidor SEPIC es que las terminales negativas de los voltajes de ambos puertos tienen una conexión galvánica, mientras que, en el convertidor Cuk esta conexión está invertida. De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que el voltaje promedio que soporta el capacitor intermedio en el convertidor Cuk es mayor en comparación con el voltaje promedio del capacitor intermedio en el convertidor SEPIC. Debido a esto, este capacitor en el convertidor Cuk debe ser sobredimensionado en comparación con el convertidor SEPIC. El comportamiento en estado estacionario de ambos convertidores es el mismo tanto en valores promedio como en rizados de conmutación de corrientes de inductores y voltajes de capacitores, excepto para el capacitor intermedio de los convertidores. Con respecto al comportamiento transitorio, la corriente del Puerto 1 tiene menor sobretiro al arranque para el convertidor SEPIC, y el voltaje de C_1 , tiene mayores sobretiros en el convertidor Cuk, para ambas direcciones de transferencia de potencia. Sin embargo, dependiendo de la dirección de transferencia de potencia, se presentan comportamientos oscilatorios persistentes o poco amortiguados en algunas de las variables eléctricas. Por ejemplo, con transferencia de potencia del Puerto 1 al Puerto 2, la corriente en L_1 y el voltaje en C_1 , en estado estacionario muestran oscilaciones persistentes para el convertidor SEPIC. Además, con transferencia de potencia del Puerto 2 al Puerto 1, la corriente en L_2 y el voltaje en C_1 muestran oscilaciones poco amortiguadas con excusiones amplias.

Estos comportamientos oscilatorios se deben a redes RLC que se forman durante la operación del convertidor en lazo abierto y que se podrían mitigar en lazo cerrado con un convertidor adecuadamente diseñado o mediante amortiguamiento pasivo.

REFERENCIAS

- [1] O. C. Onar, J. Kobayashi, D. C. Erb and A. Khaligh, "A Bidirectional High-Power-Quality Grid Interface With a Novel Bidirectional Noninverted Buck-Boost Converter for PHEVs," en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 5, pp. 2018-2032, Junio 2012.
- [2] P. K. Maroti, S. Padmanaban, M. S. Bhaskar, V. K. Ramachandaramurthy, F. Blaabjerg, "The state-of-the-art of power electronics converters configurations in electric vehicle technologies," en *Power Electronic Devices and Components*, Vol. 1, 2022.
- [3] L. -R. Chen, N. -Y. Chu, C. -S. Wang and R. -H. Liang, "Design of a Reflex-Based Bidirectional Converter With the Energy Recovery Function," en *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 8, pp. 3022-3029, Ago. 2008.
- [4] R. T. Naayagi, A. J. Forsyth and R. Shuttleworth, "High-Power Bidirectional DC-DC Converter for Aerospace Applications," en *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4366-4379, Nov. 2012.
- [5] K.-H. Chao, C.-H. Huang, "Bidirectional DC-DC soft-switching converter for stand-alone photovoltaic power generation systems," en *IET Power Electronics*, 7: 1557-1565, 2014.
- [6] K. Jin, M. Yang, X. Ruan and M. Xu, "Three-Level Bidirectional Converter for Fuel-Cell/Battery Hybrid Power System," en *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 6, pp. 1976-1986, Junio 2010.
- [7] Mangu, S. Akshatha, D. Suryanarayana and B. G. Fernandes, "Grid-Connected PV-Wind-Battery-Based Multi-Input Transformer-Coupled Bidirectional DC-DC Converter for Household Applications," en *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 1086-1095, Sept. 2016.
- [8] J. Ning, J. Zeng and X. Du, "A Four-port Bidirectional DC-DC Converter for Renewable Energy-Battery-DC Microgrid System," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 6722-6727.
- [9] Z. Zhang and K. -T. Chau, "Pulse-Width-Modulation-Based Electromagnetic Interference Mitigation of Bidirectional Grid-Connected Converters for Electric Vehicles," en *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2803-2812, Nov. 2017.
- [10] D. Kim, S. -H. Paeng, J. -W. Ahn, E. -C. Nho and J. -S. Ko, "New Bidirectional ZVS PWM Sepic/Zeta DC-DC Converter," 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007, pp. 555-560.
- [11] S. A. Gorji, H. G. Sahebi, M. Ektesabi and A. B. Rad, "Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC-DC Power Converters: An Overview," en *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117997-118019, 2019.
- [12] M. P. Hirth, R. Gules and C. H. Illa Font, "A Wide Conversion Ratio Bidirectional Modified SEPIC Converter With Nondissipative Current Snubber," en *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 1350-1360, Abril 2021.
- [13] Bournier, "Bidirectional DC-DC Converter Systems: Sustaining Power Component Design Methodology to Achieve Critical Power Conditioning," en *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 66-71, Junio 2018.
- [14] M. R. Mohammadi and H. Farzanehfard, "A new bidirectional ZVS-PWM Cuk converter with active clamp," 2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2011, pp. 1-6.
- [15] S. Habib, M. M. Khan, K. Hashmi, M. Ali and H. Tang, "A Comparative Study of Electric Vehicles Concerning Charging Infrastructure and Power Levels," 2017 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT), 2017, pp. 327-332.
- [16] Song, Min-Sup, Son, Young-Dong, and Lee, Kwang-Hyun, "Non-isolated Bidirectional Soft-switching SEPIC/ZETA Converter with Reduced Ripple Currents," *Journal of Power Electronics*, vol. 14, no. 4, pp. 649-660, Jul. 2014.
- [17] J. Wang *et al.*, "Nonisolated Electric Vehicle Chargers: Their Current Status and Future Challenges," en *IEEE Electrification Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 23-33, June 2021.

BIOGRAFÍAS



bidireccionales con aplicaciones a energías renovables.

DIANA GERALDINE CASTAÑEDA es estudiante adscrita al programa de Licenciatura de Ingeniería de Electrónica en la especialidad de Electrónica de Potencia y Energías Renovables del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, ITESI. Actualmente se encuentra cursando noveno semestre. Sus intereses son el análisis y diseño de los convertidores CD-CD



convertidores de electrónica de potencia aplicados a la mejora de la calidad de la energía eléctrica y la conversión de la energía eléctrica de fuentes no convencionales.

JOSE MIGUEL SOSA ZUÑIGA es profesor titular del Tecnológico de México, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, TecNM-ITESI. Actualmente está asociado a los programas de Licenciatura y Maestría en Ingeniería Electrónica de dicho instituto. Sus intereses de investigación se enfocan en el área de control y aplicaciones a electrónica de potencia e incluyen el control, modelado y diseño de controladores para



investigación incluyen el análisis y diseño de convertidores de electrónica de potencia, sistemas de energías renovables y convertidores conectados a la red.

GERARDO VÁZQUEZ GUZMÁN recibió el Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cataluña, en 2013. En 2009, fue profesor visitante en la Universidad de Aalborg, Aalborg, Dinamarca. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI-2) de CONACyT, México. Desde 2012, se encuentra adscrito al del Tecnológico de México, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Sus intereses de

Diseño e Implementación de una Fuente de Corriente basada en Transistores GaN

JUAN MANUEL CANO GALLARDO, MIGUEL ÁNGEL JUÁREZ REQUENA, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA, LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA.

Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica

jm.canogallardo@ugto.mx

majuarez@ugto.mx

jm.lozano@ugto.mx

lr.merchan@ugto.mx

RESUMEN En este documento se presenta el diseño, control e implementación de una fuente de corriente eléctrica de corriente alterna, con la cual se podrá realizar pruebas a los relevadores de protecciones eléctricas, fundamentada en el funcionamiento de inversores y en el filtrado de armónicas por medio de un filtro LCL. La generación de las señales se da mediante el envío de datos desde una computadora en tiempo real por medio de un modelo desarrollado en Simulink®, el cual está configurado para enviar datos a la tarjeta sin saturar a la misma por medio de una transformación de Park con la cual se obtienen los valores referidos a un sistema dq0.

PALABRAS CLAVE - Fuente de corriente, protecciones, transformada de Park.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en la industria, día a día se utiliza una gran cantidad de energía para llevar a cabo los procesos de producción de las grandes, medianas y pequeñas empresas. La potencia eléctrica juega en un papel fundamental en estas empresas, ya que, sin este tipo de energía las empresas no podrían manufacturar sus productos u ofrecer sus servicios. Para tener una mejor noción del consumo de la energía eléctrica en la industria, según cifras de 'ABB' (acrónimo de Asea Brown Boveri), empresa internacional líder en tecnología, el sector industrial consume un 40% de la energía eléctrica generada a nivel mundial [1].

Para poner en contexto, en México, el sector industrial en su generalidad está conectado a la red eléctrica con tensiones del orden de media y alta tensión, dependiendo el giro de la empresa, consumiendo así una gran cantidad de energía.

Como se ha mencionado antes, las empresas del sector industrial consumen una alta cantidad de energía, un consumo energético alto la mayoría de las veces va de la mano con altos niveles de corriente eléctrica, tener valores altos de corriente implica un riesgo no solo para las personas, si no, también para los equipos eléctricos ya que una falla a estos niveles de corriente puede ser fatal para los dispositivos eléctricos conectados en el circuito donde ocurre la falla, es imposible evitar que en algún determinado momento exista una falla eléctrica de cualquier magnitud y es por esto que las empresas deben estar preparadas para este tipo de siniestros los cuales van desde una sobre carga hasta un cortocircuito. La manera en que las empresas pueden proteger la integridad de sus trabajadores y del equipo eléctrico que poseen es con protecciones eléctricas, en este caso se trata de relevadores los cuales tienen la capacidad de desconectar una o varias secciones del circuito cuando detectan una anomalía en el

sistema al cual están protegiendo, estos relevadores son configurados manualmente por personal capacitado para dicha actividad, a este proceso se le conoce como 'coordinación de protecciones', sin embargo, cuando se realiza una mala coordinación pueden ocurrir siniestros que no son controlados aun cuando se cuentan con las protecciones, debido a esto, es importante que las personas encargadas de realizar la coordinación de protecciones tengan un dominio del tema y una forma de lograrlo es que desde su formación tengan acceso a los dispositivos que van a configurar y tener las herramientas necesarias para emular el funcionamiento que tendrían en la industria. Según el IEEE Std 242-2001 los objetivos de la protección y coordinación del sistema eléctrico son [2]:

- Limitar el alcance y la duración de la interrupción del servicio cuando falla el equipo, error humano o eventos naturales adversos ocurren en cualquier parte del sistema.
- Minimizar el daño a los componentes del sistema involucrados en la falla.

Un equipo importante en la validación de los sistemas de protección son los generadores de corriente, que tienen la capacidad de inyectar corrientes en un relevador ante las cuales éste debe operar, esto bajo un entorno completamente controlado que permite verificar la fiabilidad en la operación de los relevadores. Dentro de las tecnologías de sistemas de generación de corrientes existen varias opciones comerciales donde se tienen equipos de un alto costo [3], [4], por lo cual se han realizado propuestas que puedan desarrollar esta labor a un bajo costo. En [5] proponen un sistema de generación de corriente lineal, con una buena calidad de señal pero con baja eficiencia de operación. En [6] presentan una topología basada en un sistema de electrónica de potencia con transistores IGBT que contempla un inversor de medio

puente, donde se puede operar con buena eficiencia pero con baja calidad en las señales debido a una no tan elevada frecuencia de conmutación. En [7] presentan un sistema que incorpora tanto un sistema lineal como uno de electrónica de potencia para poder mejorar calidad de las señales corriente como la eficiencia. Cabe resaltar que el avance en nuevas tecnologías de semiconductores ha permitido el desarrollo de nuevos dispositivos que mejoran aspectos operativos de soluciones anteriores, donde los transistores de nitruro de galio (GaN) presentan mejoradas características en lo que respecta a las frecuencias de operación y eficiencia en la operación. En Fig. 1. Se presentan como las soluciones GaN se incorporan en aplicaciones de potencia junto con las frecuencias de operación, mientras que en Fig. 2 se presentan características de eficiencia, los transistores de GaN tienen un intervalo más amplio de eficiencia ante corrientes de aplicaciones de potencia en comparación con otros dispositivos, y Fig. 3 tiempos de respuesta, en la cual se muestra una respuesta transitoria más corta ante la conmutación del estado de los transistores, [8] respecto de la tecnología de Carburo de Silicio (SiC).

Ante este panorama, en este trabajo se presenta en desarrollo de una fuente de corriente basada en transistores tipo GaN, mediante los cuales se pueden tener un sistema de electrónica de potencia que opera con frecuencias suficientemente altas para poder tener buena calidad en las señales de corriente de baja frecuencia, al mismo tiempo que los elementos de filtrado pueden tener valores bajos [9].

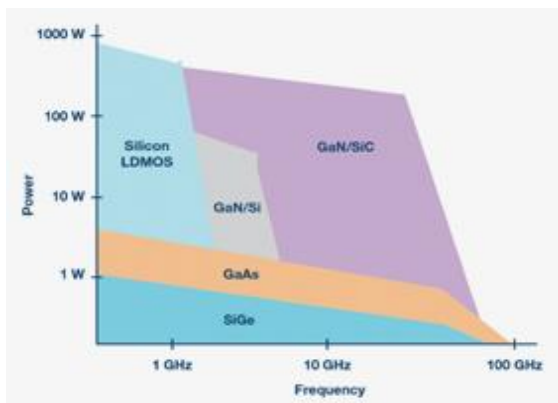


Fig. 1. Curva de potencia vs frecuencia en transistores.

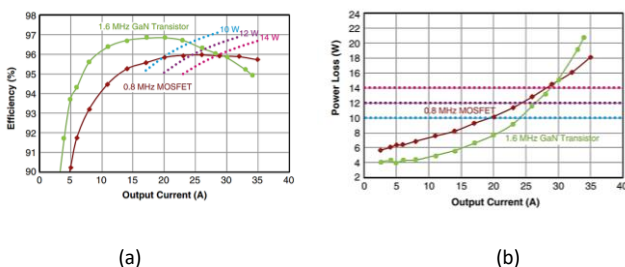


Fig. 2. Comparación entre $f_{sw} = 1.6$ MHz transistor de GaN y $f_{sw} = 800$ kHz MOSFET basado en Si $V_{IN}=48$ V, $V_{OUT}=12$ V, convertidor de bus resonante (a) A vs %eff (b) A vs w.

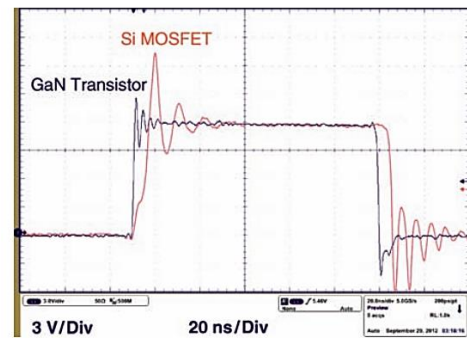


Fig. 3. Comparación de velocidad de conmutación entre un transistor GaN (EPC2015) y un MOSFET (BSZ040N04) en un convertidor reductor conmutando a 1 MHz con $V_{IN} = 12$ V, $V_{OUT} = 1,2$ V, $I_{OUT} = 20$ A.

II. GENERADOR DE CORRIENTE

El generador de corriente propuesto contempla un sistema de electrónica de potencia que incorpora un inversor con transistores tipo GaN trifásico de dos niveles, junto con un sistema de control basado en un microcontrolador de altas prestaciones, además de una etapa de filtrado con la topología LCL y una carga sobre la cual se hacen fluir las corrientes. El sistema de control consta de dos elementos principales. Por un lado, se tiene el software que ejecuta el microcontrolador, el cual se desarrolla en Simulink haciendo uso de la paquetería 'Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors' [10], la cual permite compilar algoritmos de Simulink y ser programados directamente en la tarjeta, permitiendo una fácil implementación de algoritmos dentro del microcontrolador. Dentro del microcontrolador se hace uso de la transformación de park (dq) para crear las señales de corriente generando la fase de esta de forma interna, requiriendo, así como señal de corriente de entrada las componentes en dq de las corrientes que se quieren generar. Por otro lado, se maneja la generación de las señales de corriente desde un computador, el cual se comunica con el microcontrolador mediante comunicación serie para indicar las señales que se deben generar mediante sus componentes en dq. Esta generación de señales también se desarrolla en Simulink, pero en este caso los algoritmos se ejecutan desde una computadora haciendo uso de la herramienta de ejecución en tiempo real para poder generar las señales de forma indicada. Estos elementos se describen en detalle a continuación.

A. SISTEMA DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

El sistema utilizado como inversor eléctrico es mostrado en Fig.4 el cual cuenta con transistores de GaN. Este elemento se controla por medio de la tarjeta de desarrollo mostrada en Fig.5 que hace uso del microcontrolador TMS320F28379D, ambos dispositivos son de la marca Texas Instruments. La programación de la tarjeta de desarrollo es realizada a través de Simulink®. Gracias a las posibilidades que ofrecen los transistores GaN, la frecuencia de conmutación está configurada a 50 KHz.



Fig.4. Inversor Texas Instruments BOOSTXL-3PHGANINV [11].

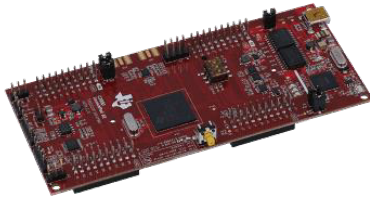


Fig.5. Tarjeta de desarrollo de bajo costo Texas instruments LAUNCHPAD-F28379D [12].

El control del inversor se da mediante modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) haciendo uso de periféricos dentro del microcontrolador destinados para este fin.

B. FILTRO DE SALIDA

Como se mencionó anteriormente, el filtro utilizado es una topología LCL como el de Fig. 6 en el cual fueron incluidas las resistencias internas de cada elemento del filtro para efecto de considerar las corrientes parásitas en ellos y tener una respuesta más exacta de los valores de corriente esperados. Se optó por esta configuración ya que permite reducir de manera considerables las armónicas generadas por la conmutación de los transistores ubicados en el inversor. En Fig. 7 se muestra la respuesta del sistema trifásico modelado en dq que tiene el filtro ante una señal tipo escalón en donde se puede observar que la respuesta transitoria es suave y tiene un tiempo corto de duración esto tiene un impacto positivo en la señal sinusoidal ya que cuando se hace un cambio de valor en la corriente de salida, la señal no deforma su forma.

La frecuencia de corte del filtro propuesto en este trabajo está definida por la Ec. (1) [15].

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 * L_2 * C}} \quad (1)$$

Considerando lo anterior, la frecuencia de corte del filtro propuesto es de 8.64Khz, dado esto, la frecuencia de conmutación es aproximadamente 5.78 veces la frecuencia de corte. Esta frecuencia de corte permite eliminar las armónicas de alta frecuencia ocasionadas por la conmutación de los transistores.

Los elementos que conforman el filtro LCL cuentan con los valores nominales y de resistencia interna mostrados en la Tabla. 1.

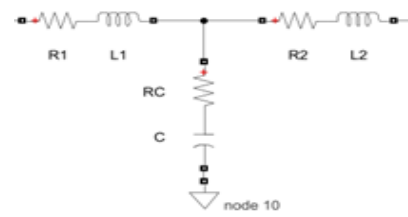


Fig. 6. Esquema de filtro LCL monofásico.

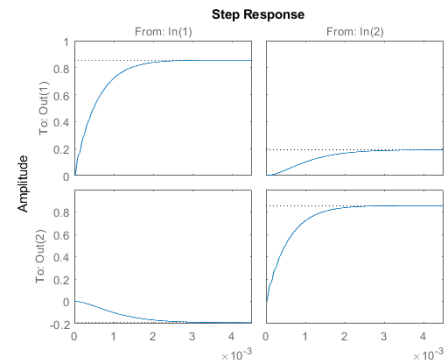


Fig. 7. Respuesta de filtro LCL a señal escalón.

TABLA I. VALORES DE COMPONENTES DE FILTRO.

Parámetros	Valor nominal	Resistencia interna
Inductor 1	560 mH	90 m Ω
Inductor 2	100 mH	32 m Ω
Capacitor	4 μ F	80 m Ω

Además, se utilizaron 2 resistencias por fase conectadas en paralelo cuyo valor individual es de 2.2 Ω , por lo tanto, el valor resultante de la conexión teóricamente es de 1.1 Ω . Cabe destacar que cada resistencia tiene una capacidad de disipación de 25 W, esto es así considerando la corriente que pasa a través de sus terminales.

C. MODELO DEL GENERADOR

El algoritmo de control del sistema de generación de corriente consta del uso de la transformación dq como elemento principal, de modo que señal de referencia a crear pueda tener un valor constante en el tiempo, y no variable como lo sería en el marco abc. El algoritmo de control se presenta en Fig. 8, donde se recibe un dato por el puerto serial el cual luego se toma como el valor de corriente en dq a generar, que ingresa a la transformación dq a abc para generar las señales en abc que son indicadas a las entradas de los módulos pwm del microcontrolador, donde se generan los disparos para el control del inversor, operando en lazo abierto. Cabe resaltar que la señal de fase para la transformación dq se genera internamente mediante una señal triangular con frecuencia de 60 Hz y valor pico de 2π .

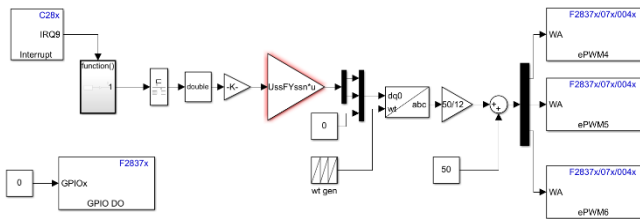


Fig. 8. Algoritmo microcontrolador.

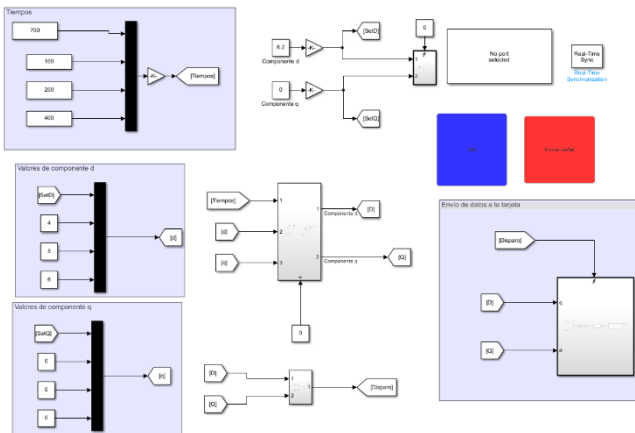


Fig. 9. Algoritmo generación de referencias de corriente.

La generación de las señales de referencia se hace desde una computadora donde se indican los valores de las corrientes a generar y son enviadas al microcontrolador por el puerto serie. Dentro de las características de este algoritmo, se establece que si un dato a enviar es igual al que le precede este no es enviado para no sobrecargar la computadora y poder mantener su operación en tiempo real. De esta forma, en la computadora se indica una serie de valores de corriente a generarse, y mediante el uso de los botones de control se indica cuando enviar los valores de corriente. Una vez se tiene todo el sistema configurado se procede a la validación de la propuesta mediante la simulación y montaje experimental como se presenta a continuación.

III. RESULTADOS

Inicialmente se desarrollan simulaciones para validar que los algoritmos a implementar operan de forma adecuada, por lo cual se desarrolla el sistema presentado en Fig. 10, donde éste recibe señales en dq y genera en la salida las respectivas corrientes en abc. El sistema tiene una fuente de 24[V] y hace uso de dos capacitores en serie para generar un punto medio de voltaje que se usa como neutro del filtro LCL. En la simulación se le requiere al sistema corrientes con valores de 2[Arms], 4[Arms] y 6[Arms] durante tiempos de 100[ms], 200[ms] y 300[ms] respectivamente. Los resultados de la simulación se pueden observar en Fig. 11 (a), donde se aprecian los voltajes de conmutación y las señales de corrientes obtenidas. En Fig. 11 (b) la duración de las magnitudes de corriente, así como la duración de estas

magnitudes, coincide con los datos mostrados en la Fig. 9 que fueron enviados a la tarjeta.

Para los resultados experimentales se realizó la programación de la tarjeta y se adecuaron los respectivos elementos físicos, cuyo montaje se presenta en Fig. 12.

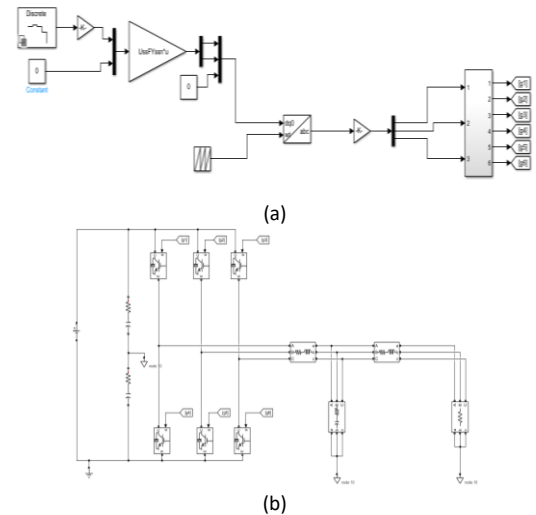


Fig.10. (a) Conversión de sistema ABC a DQ y generación de disparos para transistores, (b) Esquema del generador de corriente alterna.

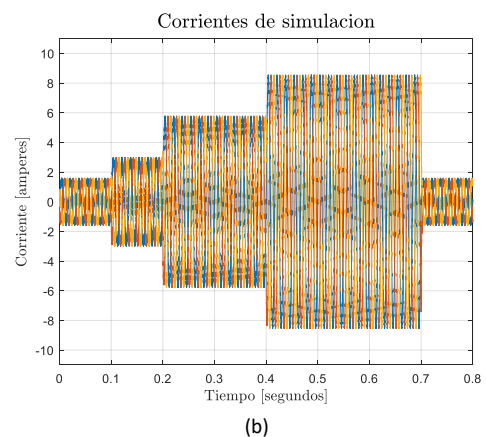
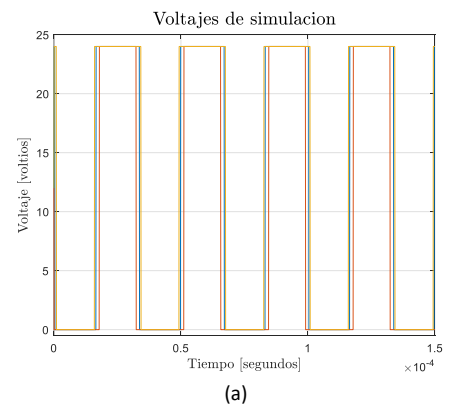


Fig.11. a) Señales de voltaje de la simulación, b) Corrientes resultantes de la simulación.

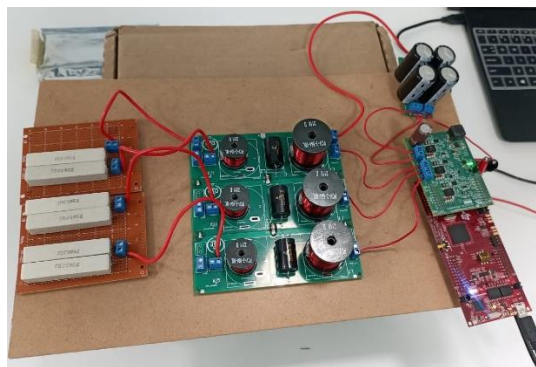


Fig.12. Generador de corriente montado.

Como primera prueba se operó el sistema de generación de corrientes y se obtuvieron las señales mediante el uso de un osciloscopio KEYSIGHT TECHNOLOGIES DSOX2014A el cual cuenta con 4 canales. En Fig. 13 se muestran estas señales de voltaje de conmutación en donde se puede observar que cada señal monofásica tiene un periodo de 20[μs], correspondiente a la frecuencia de operación de 50[kHz].

Con la finalidad de generar distintas magnitudes de corriente, se enviaron a la tarjeta los mismos valores utilizados durante la simulación, teniendo los resultados mostrados en Fig. 14, donde se puede observar que las señales experimentales son similares a las obtenidas en simulación, demostrando además que el sistema opera en tiempo real.

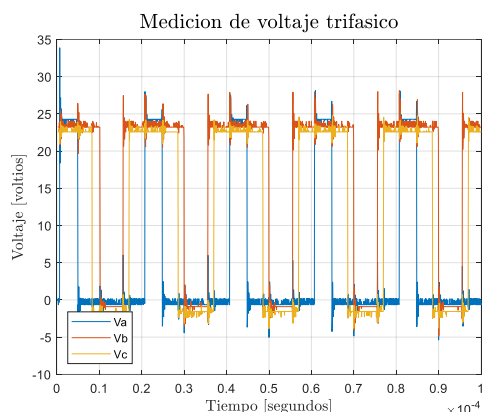


Fig.13. Señales de voltaje del generador.

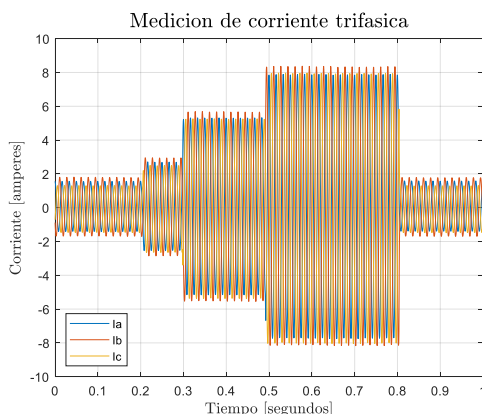


Fig.14. Medición de distintos valores de corriente solicitados al generador de corriente.

Fue tomada una muestra de la señal de corriente para analizarla mediante el sistema de medición de calidad de la energía Hioki PQ3198 [13], en dicha señal se esperaba una corriente con una magnitud de 2[Arms]. En la Fig. 15 se pueden observar las 3 fases.

Para fines de estudio de calidad de las señales generadas se obtuvieron los datos de las armónicas contenidas en la señal mediante el mismo aparato de medición, como se puede apreciar en la Fig. 16, la componente de orden 1 es la que sobresale de entre las demás, es la que tiene el valor más alto y corresponde con la frecuencia fundamental de 60 Hz. Se obtuvo el THD de las señales, teniendo como máximo en las fases b y c con un valor de 0.38%, está dentro de los lineamientos marcados por la CFE respecto a la calidad de las señales de corriente [14].

En Fig. 17 se observa la medición de corriente tomada en el neutro, esta corriente tiene una magnitud muy pequeña y es causada por un desbalance entre fases, en Fig. 18 se muestra la medición de desbalance la cual tiene un valor de 1.08%. Este desbalance tiene su origen en el porcentaje de error en los valores de los componentes del filtro, así como en el valor de las resistencias. A su vez, el desbalance en las magnitudes de corriente y los armónicos residuales del filtro tiene como resultado una corriente de baja magnitud que circula por el neutro del sistema.

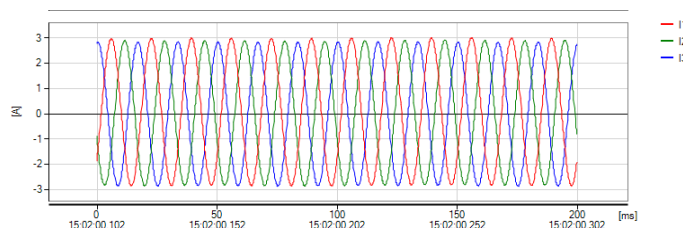


Fig.15. Señal de corriente trifásica.

Order	I1	I2	I3
THD	0.33%	0.38%	0.38%
0	3.85%	1.78%	-0.13%
1	100.00%	100.00%	100.00%
2	0.08%	0.04%	0.05%
3	0.20%	0.24%	0.30%
4	0.03%	0.02%	0.03%
5	0.05%	0.17%	0.09%
6	0.03%	0.03%	0.03%
7	0.09%	0.09%	0.06%
8	0.04%	0.03%	0.03%
9	0.07%	0.09%	0.03%
10	0.03%	0.03%	0.02%
11	0.06%	0.03%	0.05%
12	0.04%	0.03%	0.02%
13	0.04%	0.07%	0.05%
14	0.06%	0.03%	0.03%
15	0.04%	0.03%	0.03%
16	0.03%	0.03%	0.04%
17	0.06%	0.03%	0.02%
18	0.02%	0.04%	0.02%
19	0.03%	0.03%	0.05%
20	0.04%	0.03%	0.03%
21	0.02%	0.05%	0.02%

Fig.16. contenido armónico de la señal de corriente trifásica.

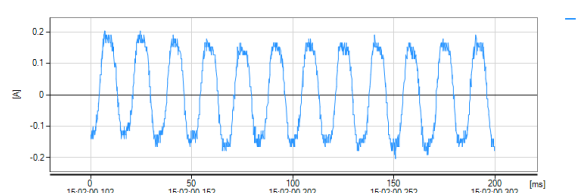


Fig.17. Señal de corriente en el neutro.

I1 H1	2.056A	-41.53°
I2 H1	2.023A	-161.35°
I3 H1	2.005A	79.44°
Iunb	1.08%	
I4 H1		

Fig.18. Magnitud, fase y desbalance de las señales de corriente.

En Fig. 19 se muestra de una sola fase de la señal de corriente mostrada de la Fig. 14 con la finalidad de apreciar los pulsos de corriente con distintos valores que fueron entregados por el generador. Se esperaba obtener pulsos de 2 A rms, 4 A rms y 6 A rms con una duración de 100 ms, 200 ms y 300ms, las magnitudes de las corrientes fueron las esperadas y el tiempo que duraron los pulsos de corriente solo se aproximó al valor esperado, esto se puede apreciar tomando como referencia el eje x del gráfico de Fig. 19.

En Fig. 20 se muestra un acercamiento de la Fig. 14 en el momento en que cambia la magnitud de corriente entregada por el generador, como puede observarse, el transitorio ocurrido en este cambio de magnitud tiene una duración muy pequeña en la cual la forma de onda no llega a tener una distorsión que pueda afectar la calidad de la señal.

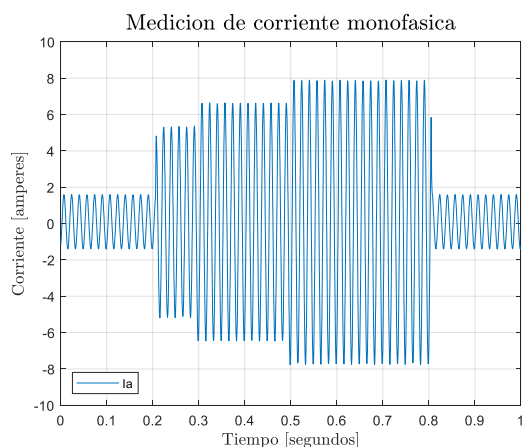


Fig.19. Pulso de distintos valores de corriente.

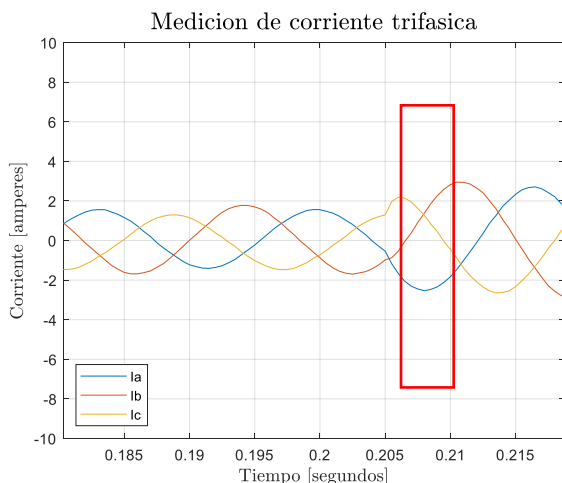


Fig.20. Transición entre magnitudes de corriente solicitadas al generador.

IV. CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de generación de corriente trifásico mediante el uso de un inversor basado en transistores tipo GaN, operando con una frecuencia de conmutación de 50[kHz], verificando que es posible generar una señal de corriente alterna trifásica a partir de elementos de bajo costo. La implementación de la tecnología de los transistores de GaN juegan un papel fundamental en el desarrollo de este proyecto ya que permiten trabajar con una frecuencia de conmutación de una magnitud del orden de los Khz lo cual la convierten en la opción ideal para obtener el resultado buscado ya que con una mayor frecuencia de conmutación es posible tener ondas sinusoidales de mejor calidad, si bien la misma frecuencia de conmutación introduce armónicos en la señal, es posible limpiar la señal con el filtro propuesto. El generador puede tener un desarrollo más profundo, sin embargo, con el resultado obtenido pueden hacerse pruebas a relevadores, específicamente la prueba a la protección de corto retardo (ANSI 51). Se plantea la elaboración de un lazo de control con la finalidad de disminuir el desbalance en las corrientes de salida y obtener señales de corriente de mayor calidad.

REFERENCIAS

- [1] ABB, "El gasto energético en la industria | ABB." [Online]. Available: <https://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica/gasto-energetico-industria>. [Accessed: 12-Sep-2022].
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers., IEEE Industry Applications Society, Industrial and Commercial Power Systems Department., IEEE Standards Board., and American National Standards Institute., "IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book]: IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book).," 2001.
- [3] Megger, "FREJA543." [Online]. Available: <https://megger.com/relay-test-system-freja543>. [Accessed: 12-Sep-2022].
- [4] OMICRON, "CMC 356 - Equipo universal de prueba de relés y herramienta de puesta en servicio - OMICRON." [Online]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/productos/cmc-356/#contact-menu-open>. [Accessed: 12-Sep-2022].
- [5] B. Liu, X. Fang, and Y. Chen, "The design and simulation analysis of current amplifier circuit of relay test," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 466–467, pp. 966–970, 2012.
- [6] K. S. Ling, A. M. Gole, P. G. McLaren, and R. Wachal, "A PWM current amplifier for testing protective relay," in *IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373)*, 2002, vol. 1, pp. 218–223.
- [7] Z. Stanisic, "High efficiency, linear current amplifier for testing protective relays," *ENERGYCON 2014 - IEEE Int. Energy Conf.*, pp. 544–549, 2014.
- [8] A. Lidow, M. de Rooij, J. Strydom, D. Reusch, and J. Glaser, "GaN Transistors for Efficient Power Conversion," *GaN Transistors Effic. Power Convers.*, Sep. 2019.
- [9] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL-

filter-based three-phase active rectifier," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291, 2005.

- [10] "Embedded Coder Support Package for TI C2000 - Hardware Support - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/hardware-support/ti-c2000-embedded-coder.html>. [Accessed: 17-Feb-2022].
- [11] "BOOSTXL-3PHGANINV Daughter card | TI.com." [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/BOOSTXL-3PHGANINV>. [Accessed: 12-Sep-2022].
- [12] "LAUNCHXL-F28379D Development kit | TI.com." [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>. [Accessed: 17-Mar-2022].
- [13] "POWER QUALITY ANALYZER PQ3198 - Hioki USA." [Online]. Available: <https://hiokiusa.com/es/producto/power-quality-analyzer-pq3198/>. [Accessed: 12-Sep-2022].
- [14] "MÉXICO CALIDAD DE LA ENERGÍA: CARACTERÍSTICAS Y LÍMITES DE LAS PERTURBACIONES DE LOS PARÁMETROS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA GUÍA CFE L0000-70," 2009.
- [15] "Diseño, modelado e implementación de inversor conectado a la red eléctrica a partir de fuentes renovables "[Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v16n32/v16n32a02.pdf> [Accessed: 21-Oct-2022]



LUIS RAMON MERCHÁN VILLALBA Realizó sus estudios de pregrado en la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga Colombia obteniendo el título de Ingeniero Electrónico en 2013. En 2015 obtiene su título de Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, mismo lugar donde en el año 2020 obtiene su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, implementación de sistemas electrónicos analógicos-digitales, sistemas eléctricos inteligentes, micro redes, dispositivos FACTS, entre otros.

BIOGRAFÍAS



JUAN MANUEL CANO GALLARDO Actualmente se encuentra realizando su trabajo de tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista en la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la electrónica de potencia, las energías renovables, las microrredes y el diseño de máquinas eléctricas.



MIGUEL ÁNGEL JUÁREZ REQUENA Es egresado de la Universidad de Guanajuato FIMEE como Ing. Electricista. Maestría en Alta Tensión, Maestría en Administración por IEU. Laboralmente 8 años en LAPEM en Sistemas Eléctricos y desde 1999 a la fecha experto consultor para Schneider Electric.



JOSÉ M. LOZANO GARCÍA Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes

Implementación y simulación de un filtro activo de potencia

JOSÉ ANTONIO ORTEGA MARTÍNEZ, LUIS FERNANDO VÁZQUEZ MORENO, ARNULFO CALDERÓN SALAS, ELISA MONSERRAT RAMÍREZ HERNÁNDEZ, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA, LUIS RAMON MERCHÁN VILLALBA.

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca.

ja.ortegamartinez@ugto.mx

lf.vazquezmoreno@ugto.mx

a.calderonsalas@ugto.mx

em.ramirezherandez@ugto.mx

jm.lozano@ugto.mx

lr.merchan@ugto.mx

RESUMEN La calidad de la energía eléctrica es un tópico muy importante en los sistemas eléctricos actuales, por lo cual se establecen límites regulatorios ante la presencia fenómenos de este tipo en las instalaciones eléctricas, al mismo tiempo que se hace uso de diversas tecnologías para poder mejorar índices de calidad de la energía, siendo una de las tecnologías relevantes de compensación los filtros activos de potencia, que abordan problemas asociados a la presencia de corrientes armónicas en las redes eléctricas. En este trabajo se presenta la implementación y simulación de un filtro activo de potencia haciendo uso del software Simulink. Para validar el filtro activo de potencia se contempla en la simulación su operación dentro de un sistema eléctrico industrial con una carga no lineal y un bajo factor de potencia, teniendo como resultados una notoria mejora en los índices de calidad de la energía y factor de potencia.

PALABRAS CLAVE - Armónicos, Compensación, Calidad de la energía.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía es el termino general que se le da a un grupo de indicadores que expresan la magnitud del efecto de operación de los equipos en un sistema interconectado. Consiste en el grado de calidad de señales tanto de tensión como de corriente eléctrica (forma de onda, frecuencia y magnitud) [1]. Esta calidad está en términos de continuidad del servicio evitando interrupciones, sobrevoltajes, deformaciones por armónicos en la red y variaciones de voltaje. Las categorías y características típicas de los fenómenos que pueden afectar la calidad de la energía se basan en su duración, magnitud y frecuencia como se puede observar en la [Tabla I](#).

TABLA I. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE FENOMENOS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA [2].

Categorías	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de voltaje típica
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 µs de elevación	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 - 500 kHz	20 ns	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 µs	0 - 4 pu
2.0 Variaciones de Corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Interrupción		0.5 - 30 ciclos	< 0.1 pu
2.1.2 Sag (dip)		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
2.1.3 Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		30 ciclos - 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag (dip)		30 ciclos - 3 s	0.1 - 0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos - 3 s	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag (dip)		3 seg - 1 min	0.1 - 0.9 pu
2.3.3 Swell		3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajos voltajes		> 1 min	0.8 - 0.9 pu
3.3 Sobrevoltajes		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
4.0 Desbalance en el voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
5.0 Distorsión de la forma de Onda			
5.1 Componente de directa (DC offset)		Estado Estable	0 - 0.1%
5.2 Armónicas	De la armónica 0 a la armónica 100	Estado Estable	0 - 20%
5.3 Interarmónicas	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
5.4 Muestras en el voltaje (notching)		Estado Estable	
5.5 Ruido	Bandas anchas	Estado Estable	0 - 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
7.0 Variaciones de la frecuencia		< 10s	

Todos estos disturbios pueden ser ocasionados por la operación de la misma red ante eventos como:

- Fallas eléctricas.
- Operación y re cierre de interruptores.
- Conexión y desconexión de grandes cargas.
- Apertura y cierre de bancos de capacitores.
- Descargas atmosféricas.
- Operación de hornos de arco eléctrico.
- Operación de equipo de electrónica de potencia.

Para este trabajo se realizará un análisis sobre el fenómeno conocido como armónicos. La distorsión armónica se presenta tanto en curvas de tensión, así como también en curvas de corriente donde hay presencia de componentes frecuenciales múltiplos de la frecuencia fundamental, y pueden ser generadas por dispositivos electrónicos de potencia, saturación en los transformadores, equipos de uso doméstico, lámparas ahorradoras de energía, etc. [3]. Algunos efectos causados por armónicos son: calentamiento de motores y transformadores, calentamiento de cables, bajo factor de potencia, resonancias entre otros. Para evitar los problemas asociados a la presencia de armónicos en la red eléctrica existen algunas tecnologías que se pueden usar para disminuir la presencia de estos, entre ellas se pueden encontrar: filtros sintonizados, filtros activos, conexión de transformadores, entre otros.

Pero en este artículo, se hará énfasis de manera especial en el uso del Filtro activo de potencia para la compensación de armónicos de corriente [4], además de tener la capacidad

de mejorar el factor de potencia. El filtro activo de potencia de desarrollará en Simulink [5] con el objetivo de implementar los algoritmos de control necesarios para su control, y su respectiva evaluación ante un sistema de potencia con presencia de problemas de calidad de la energía.

II. FILTRO ACTIVO DE POTENCIA

Un Filtro Activo de Potencia, tienen como principal cometido la reducción de los armónicos en las redes de distribución de energía eléctrica mediante la compensación sobre las señales de corrientes [6].

Las cargas no lineales conectadas a la red consumen corrientes que no son senoidales, y pueden tener un contenido considerable de armónicos. Estas mismas aplicadas a una red eléctrica de impedancia no nula, producen una distorsión en la forma de la tensión en los puntos de conexión de los equipos a la red [7].

El propósito de un filtro activo es el de reducir el flujo de corrientes armónicas por la red, de tal forma que la corriente que circule por ésta sea senoidal y que la tensión aplicada a las cargas también lo sea. Para cumplir este objetivo el filtro activo inyecta las corrientes que sean necesarias para que el sistema eléctrico vea señales que corresponden a cargas lineales (ver Fig. 1.). A continuación, se presenta la descripción de los elementos presentes en la operación de un filtro activo de potencia.

A. Señales de compensación

En la operación del Filtro Activo de Potencia para un sistema que tiene una carga no lineal, se debe tener la medición de los voltajes y corrientes trifásicos para poder identificar las componentes que se deben compensar. En este trabajo, se hace uso de la teoría de la potencia instantánea para poder evaluar las componentes a ser compensadas. Con las señales transformadas al dominio de Clarke ($\alpha\beta$) se procede a calcular la potencia real e imaginaria instantánea tal como se indica en Fig. 2. Teniendo la potencia real (p) que corresponde a la potencia activa y la potencia imaginaria (q) asociada a la potencia reactiva, éstas se pueden separar en un valor medio y un valor oscilatorio ($p = \bar{p} + \tilde{p}$) ($q = \bar{q} + \tilde{q}$), donde los valores medios corresponden a componentes de potencia a frecuencia fundamental, y los elementos oscilatorios a la presencia de distorsión en el sistema eléctrico.

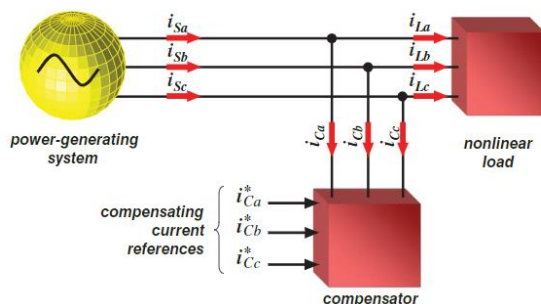


Fig. 1. Compensación de un filtro activo de potencia [8].

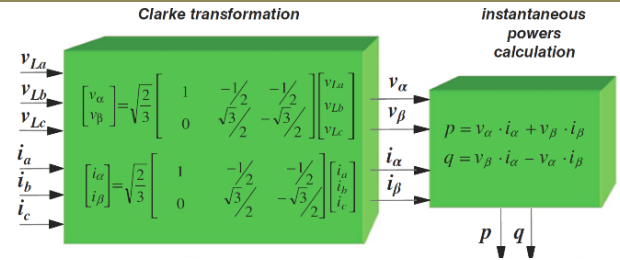


Fig. 2. Cálculo potencia instantánea [8].

De esta forma, en un sistema ideal lineal con factor de potencia unitario la red eléctrica solo debería ver la componente $\bar{p}$, y los demás deben ser compensados, en este caso por el filtro activo de potencia. Así, el flujo de las componentes de potencia en un sistema con compensación quedaría tal como se presenta en Fig. 3.

Una vez se tienen identificadas las potencias a ser compensadas, se deben asignar las señales de corriente correspondientes que ante la presencia del voltaje en la red eléctrica dan como resultados las potencias compensadas. Este cálculo de las corrientes hace uso de los algoritmos presentados en la Fig. 4. Una vez se tienen las señales de corriente a compensar, estas se deben inyectar a la red eléctrica mediante un sistema de electrónica de potencia tal como se describe a continuación.

B. Generador de corriente

La inyección de las señales de corriente está dada por un inversor trifásico de dos niveles operando bajo un esquema de control por histéresis. El inversor tiene en el lado de directa un capacitor, el cual se debe mantener en un nivel de voltaje ante el uso de una pequeña cantidad de potencia activa. La topología del convertidor se presenta en Fig. 5, mientras que el esquema de control por histéresis se muestra en Fig. 6, donde se puede apreciar que ante una variación entre la señal de referencia y señal medida de corriente se opera el convertidor para minimizar el error presente.

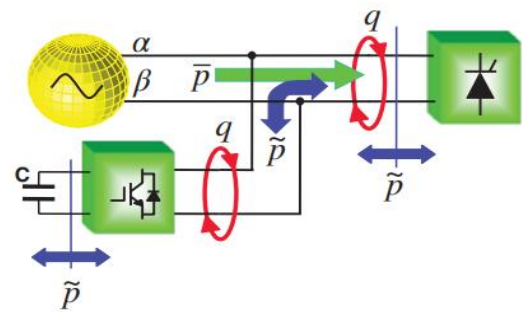


Fig. 3. Potencias instantáneas en un sistema compensado [8].

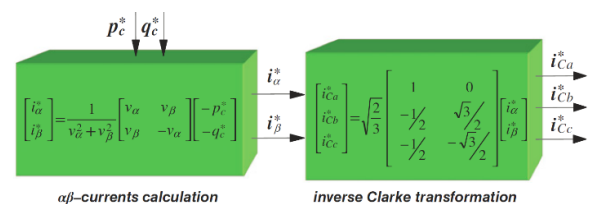


Fig. 4. Corrientes de compensación [8].

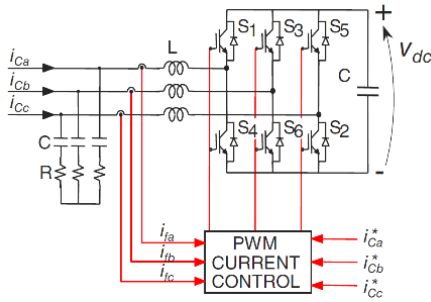


Fig. 5. Convertidor controlado por histéresis [8].

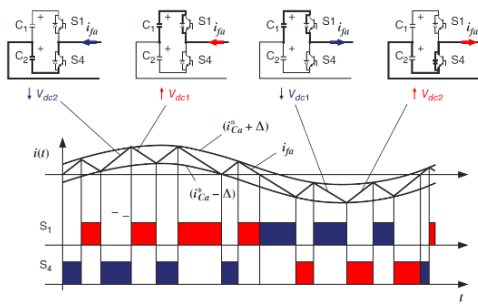


Fig. 6. Esquema de control por histéresis [8].

De esta forma el filtro activo de potencia hace uso de los algoritmos presentados en Fig. 7.

III. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK

Para la implementación el sistema en Simulink, es importante tener en cuenta los importantes conceptos de los diferentes algoritmos mencionados anteriormente que se van a desarrollar. Teniendo como base la estructura mostrada en Fig. 8, se tiene que la red eléctrica debe de entregar Potencia Activa (P) y Potencia Reactiva (Q) a la carga, considerando que las corrientes armónicas no deben de ser entregadas a la carga, por lo cual el compensador debe de entregarlas para poderlas eliminar.

El algoritmo de control del filtro activo de potencia implementado en Simulink se presenta en Fig. 9, el cual se describe a continuación. El primer elemento del algoritmo corresponde al cálculo de las potencias instantáneas y voltaje de Clarke, tal como lo presenta Fig. 10, donde el cálculo del voltaje Clarke hace uso del algoritmo presentado en Fig. 11 y el cálculo de las potencias instantáneas se implementa como se presenta en la Fig. 12. Para obtener el valor medio se hace uso de un bloque que calcula el promedio de la señal de entrada, y para hallar la potencia oscilatoria se resta de la potencia instantánea el valor de potencia media.

Con las señales de potencia evaluadas, se procede a calcular las corrientes de compensación, para lo cual se hace uso del elemento que se presenta en Fig. 13, donde se establece que las componentes de potencia a eliminar son $\bar{q} + \bar{q}$ y $\bar{p}$, además se agregar un valor $\bar{p}$ que permite regular el voltaje en el capacitor, el cual se establece en 1200[V]. Este valor se considera para que el inversor pueda operar de forma adecuada cumpliendo que $V_{dc}/2$ (600[V]) sea mayor al

voltaje pico monofásico de la red eléctrica. En este caso se hará uso de un voltaje de línea de 400[Vrms], correspondiente a un valor pico de 326.59 [V].

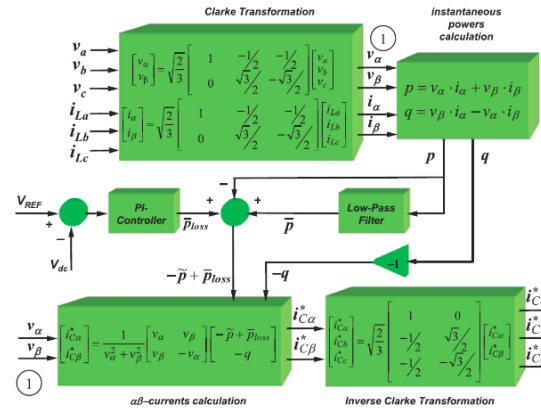


Fig. 7. Esquema de control general del filtro activo de potencia [8].

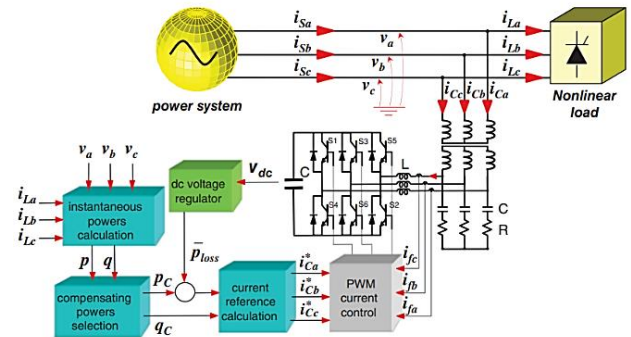


Fig. 8. Esquema de general del filtro activo de potencia en la red eléctrica [8].

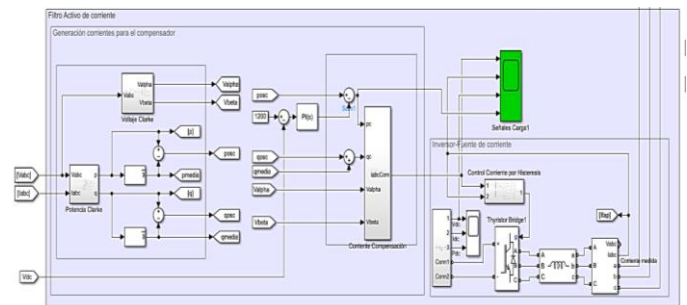


Fig. 9. Esquema de general del filtro activo de potencia en la red eléctrica.

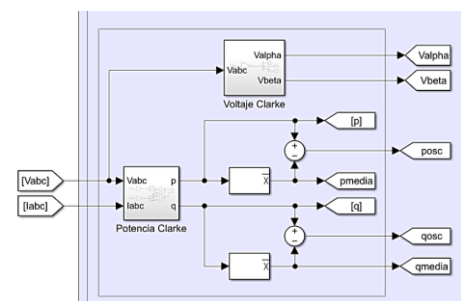


Fig. 10. Implementación de cálculo de potencias y voltajes en Clarke.

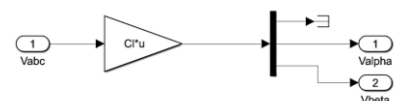


Fig. 11. Algoritmos de Simulink bloque Voltaje Clarke.

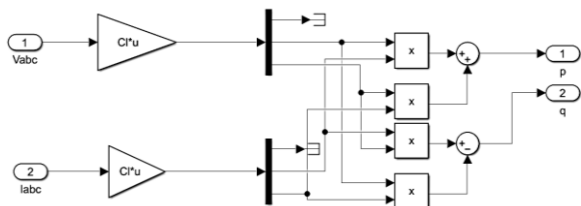


Fig. 12. Algoritmos de Simulink bloque Potencia Clarke.

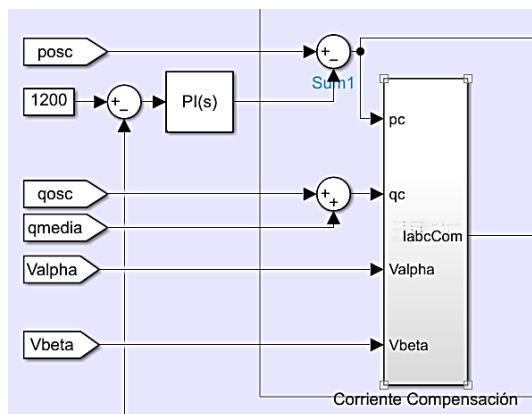


Fig. 13. Generación de señales de referencia.

El sistema que inyecta la corriente en la red corresponde a los elementos que se presentan en la Fig. 14, donde se tiene el inversor trifásico operado por el control por histéresis (Ver Fig. 15). En el lado de directa del inversor se tiene el capacitor, cuyo voltaje es regulado a un valor de 1200[V] (Ver Fig. 16).

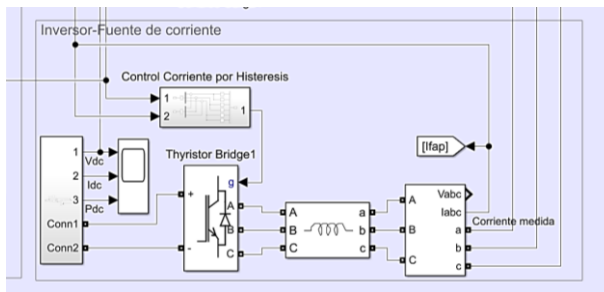


Fig. 14. Inversor operando como fuente de corriente.

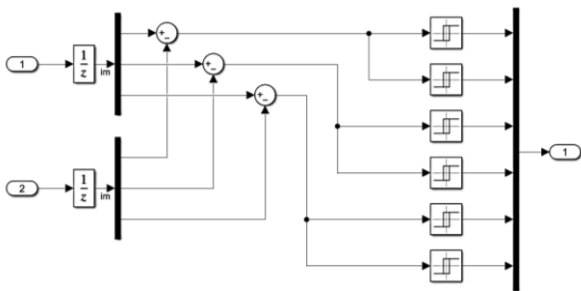


Fig. 15. Algoritmos de Simulink de control por histéresis.

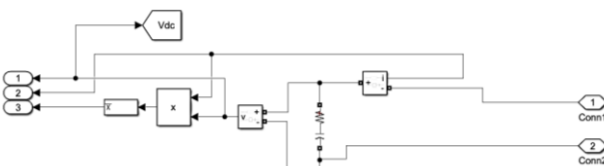


Fig. 16. Capacitor implementado en Simulink.

IV. RESULTADOS

Para validar el funcionamiento del filtro activo de potencia, se implementó un sistema de potencia industrial que representa una carga compuesta por una no lineal y una lineal, la cual se conecta a la red eléctrica que posee una impedancia. La carga no lineal corresponde a un rectificador de tiristores controlado, y la carga lineal a un elemento resistencia-inductancia. Entre la carga y la red eléctrica se ubica el filtro activo de potencia para realizar la compensación tanto de armónicos como de factor de potencia. El sistema de prueba se presenta en Fig. 17. El sistema opera con un voltaje de 400 Vrms de línea a línea con una resistencia e inductancia de fuente de $1e-3[\Omega]$ y $1e-5[H]$ respectivamente. Hacia la carga no lineal se contempla una inductancia de $1.2e-3[H]$, y su demanda esta dada por un resistencia e inductancia de $15[\Omega]$ y $50e-3[H]$. La carga lineal consume 10[kW] y 10[kVAR] al voltaje nominal de la red.

En Fig. 18 se presenta la corriente de la carga ante la operación del sistema considerando las siguientes condiciones de trabajo: En el tiempo de 0 a 0.3 [s] la carga no lineal tiene un ángulo de control de 40° resultando en una corriente con valor pico de 48 amperes. En el tiempo de 0.3 a 0.45 [s] la carga no lineal tiene un ángulo de 80° resultando en una disminución en la potencia consumida y teniendo una corriente pico de 12.8 [A]. En el tiempo 0.45 a 0.55 [s] se entra en funcionamiento la carga lineal y hay un aumento en la corriente a un valor pico de 29.5 [A]. Después de 0.55 s la carga lineal se desconecta.

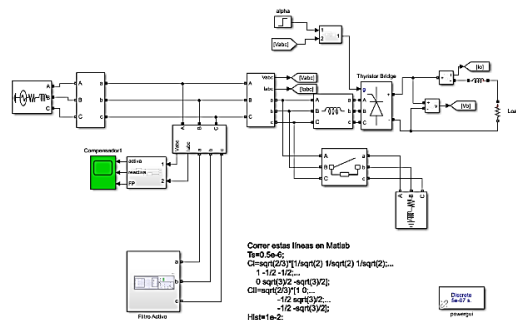


Fig. 17. Sistema de prueba.

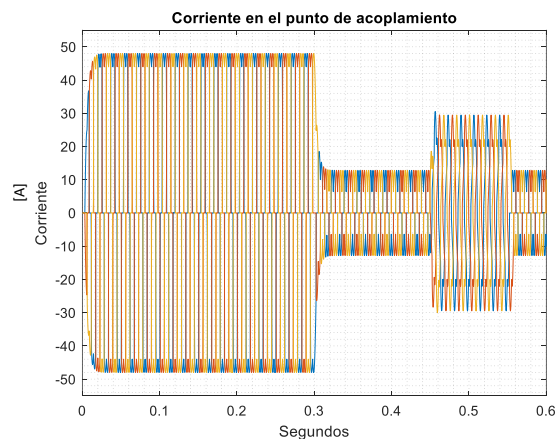


Fig. 18. Corriente de la carga.

El filtro activo de potencia inyecta las corrientes presentadas en Fig. 19 para mejorar los índices de calidad de la energía en función a los algoritmos presentados en la secciones anteriores, teniendo como resultado las corrientes presentes en Fig. 20, donde se presentan las corrientes de la fase A, y puede notar como la corriente que ve la red eléctrica mejora notablemente respecto de la corriente demandada por la carga.

Para mantener el voltaje de 1200[V] en el capacitor del filtro activo de potencia el sistema requiere de una cantidad de potencia activa. En Fig. 21 se presenta el voltaje del capacitor y la potencia activa demandada para mantener el voltaje del capacitor.

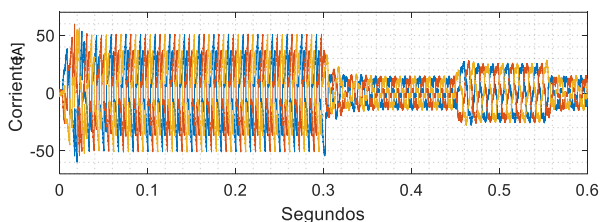


Fig. 19. Corriente de compensación.

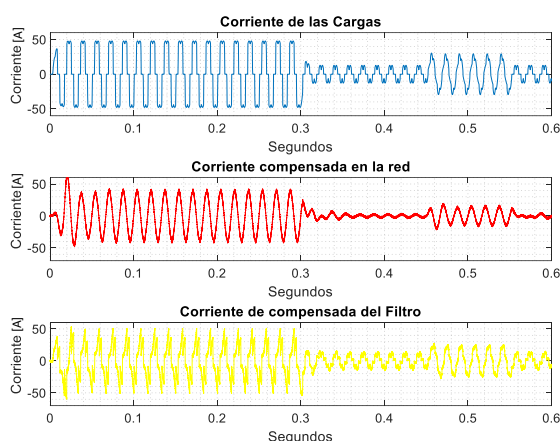


Fig. 20. Señales de corriente.

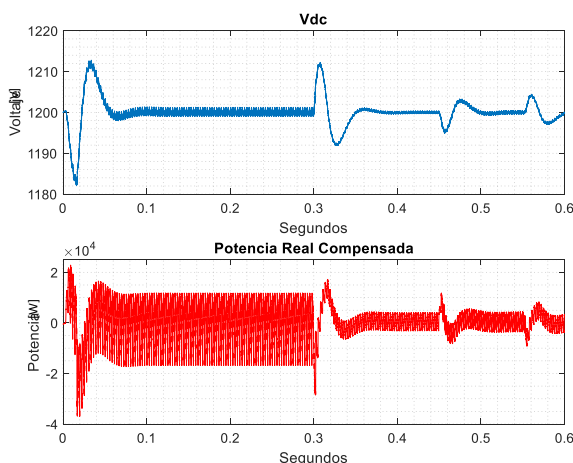


Fig. 21. Señales en el capacitor, voltaje y potencia instantánea.

Para visualizar el grado de mitigación, en las siguientes figuras se mostrará la corriente de carga en diferentes tiempos vs la corriente compensada en la red debido al filtro implementado. Además, se tendrá la medición del THD de las señales haciendo uso de la herramienta “FFT Analysis” de Simulink. En la Fig. 22 se puede apreciar que el porcentaje de THD en la corriente de las cargas, en el tiempo de 0.1 s a 2 ciclos es de 29.27% que baja con la implementación del filtro a 3.24%. En la Fig. 23, el porcentaje de THD en la corriente de carga en 0.5[s] durante 2 ciclos es de 14.78%, que baja con la implementación del filtro a 6.32%.

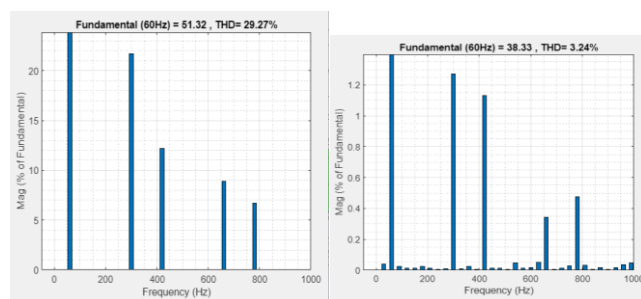
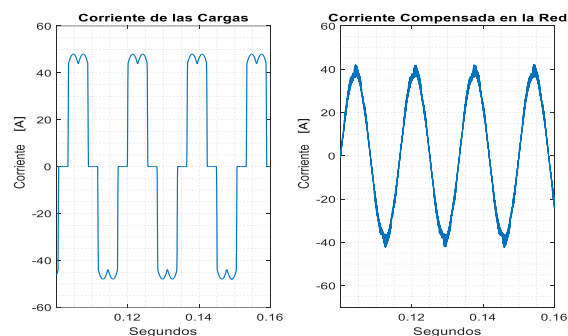


Fig. 22. Porcentaje de THD en la corriente de las cargas de 0.1[s] en 2 ciclos.

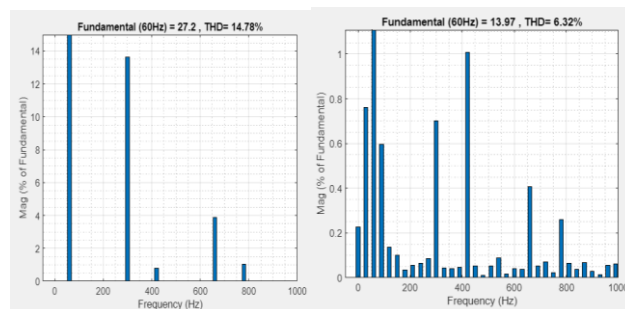
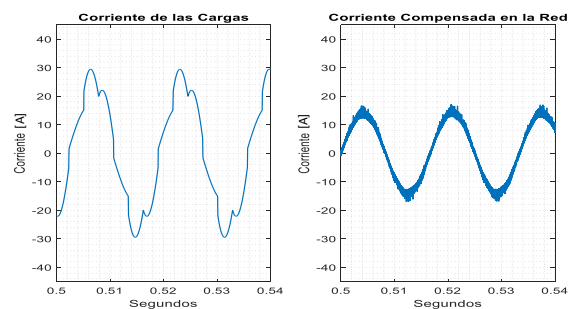


Fig. 23. Porcentaje de THD en la corriente de las cargas de 0.5[s] en 2 ciclos.

Además, se tiene que el filtro tiene la funcionalidad de mejorar el factor de potencia, por lo cual también se evalúa la capacidad de compensación de potencia reactiva.

Las cargas tienen el consumo de potencia presentado en la Fig. 24, donde se puede apreciar como varía el consumo de energía, al mismo que tiempo que lo hace el consumo de potencia reactiva, teniendo un mal factor de potencia.

En la Fig. 25 se presenta la potencia vista desde la red eléctrica bajo la compensación del filtro activo de potencia, donde se aprecia que el factor de potencia mejoró notablemente al estar siempre en la unidad, con excepción en condiciones transitorias donde la medición de este parámetro no es precisa.

En la Fig. 26 se presentan las potencias demandadas por el filtro activo de potencia, donde se tiene un flujo de potencia activa necesario para mantener el voltaje del capacitor, con lo que tiene que este valor solo se presenta ante cambios en la operación del sistema. Además, se ve que la potencia reactiva puede ser inyectada sin problemas por el filtro activo.

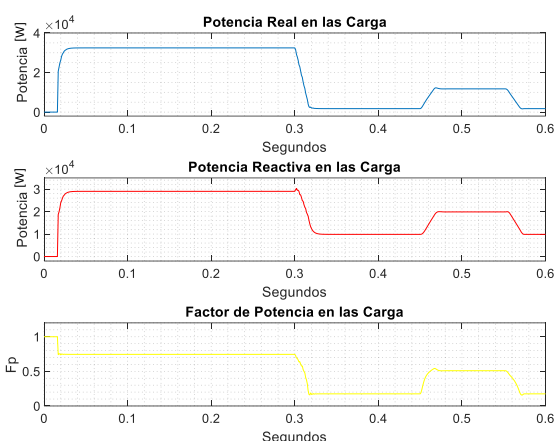


Fig. 24. Potencia activa, reactiva y factor de potencia visto desde la carga.

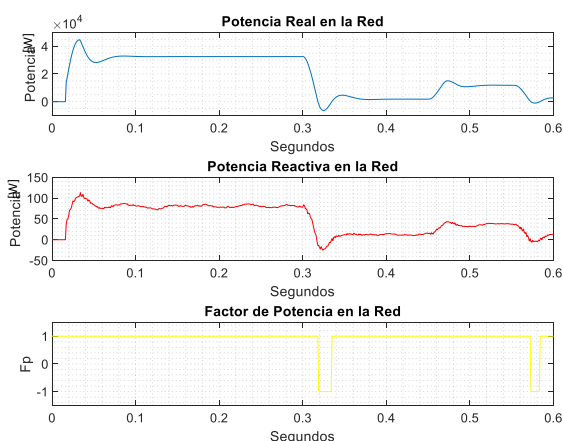


Fig. 25. Potencia activa, reactiva y factor de potencia visto desde la red.

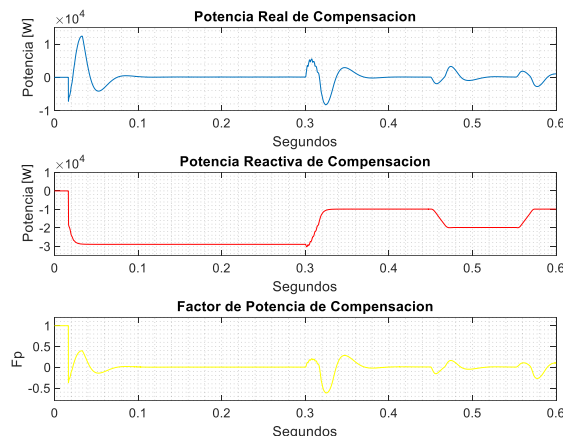


Fig. 26. Potencia activa, reactiva y factor de potencia visto desde el filtro.

V. CONCLUSIONES

Este artículo presenta la implementación de un filtro activo de potencia cuya función es mitigar problemas de calidad de la energía, especialmente los armónicos de corriente y el factor de potencia. Se implementó un filtro activo de potencia mediante Simulink para poder desarrollar simulaciones de transitorios electromagnéticos y poder determinar condiciones de calidad de la energía. Para validar el comportamiento del sistema desarrollado, se implementó un sistema de prueba con la presencia de cargas lineales y no lineales, donde bajo la operación del filtro activo de potencia se pudieron mejorar los índices de calidad de la energía considerablemente.

REFERENCIAS

- [1] T. J. Browne and G. T. Heydt, "Power quality as an educational opportunity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 814–815, 2008.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.*, vol. 2009, no. June, 2009.
- [3] D. M. F. G. Roger, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std. 519-2014*, vol. 2014, 2014.
- [4] H. Akagi, "New Trends in Active Filters for Improving Power Quality," *Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. Ind. Growth*, vol. 1, pp. 417–425, 1996.
- [5] R. H. G. Tan and V. K. Ramachandaramurthy, "A Comprehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using MATLAB / SIMULINK," in *Power Quality Issues in Distributed Generation*, 2015, pp. 84–107.
- [6] H. Akagi, A. Nabae, and S. Atoh, "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-22, no. 3, pp. 460–465, 1986.
- [7] M. Y. Lada, I. Bugis, and M. H. N. Talib, "Simulation a shunt active power filter using MATLAB/Simulink," in *2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2010, no. June, pp. 371–375.
- [8] H. Akagi, E. Hirokazu, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2007.

BIOGRAFÍAS



JOSÉ ANTONIO ORTEGA MARTÍNEZ Estudiante del programa de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, en proceso de titulación, con interés en las áreas de Fuentes renovables de energía, calidad de la energía, diseño y mantenimiento de subestaciones eléctricas.



LUIS FERNANDO VÁZQUEZ MORENO Actualmente se encuentra cursando su último semestre en la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la calidad de la energía y mantenimiento a equipos eléctrico



ARNULFO CALDERÓN SALAS Actualmente se encuentra cursando su último semestre de Ingeniería Eléctrica en la universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son las pruebas eléctricas en media y alta tensión, protecciones de equipos eléctricos en media y alta tensión y el diseño de maquinas eléctricas.



ELISA MONSERRAT RAMÍREZ HERNÁNDEZ

Actualmente se encuentra cursando su último semestre de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son las pruebas eléctricas en media y alta tensión, protecciones de equipos eléctricos en media y alta tensión, el diseño de Máquinas Eléctricas y las fuentes renovables de energía eléctrica.



JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes



LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA realizó sus estudios de pregrado en la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga Colombia obteniendo el título de Ingeniero Electrónico en 2013. En 2015 obtiene su título de Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, mismo lugar donde en el año 2020 obtiene su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, implementación de sistemas electrónicos analógicos-digitales, sistemas eléctricos inteligentes, micro redes, dispositivos FACTS, entre otros.

Diseño y Simulación de un Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

MIGUEL ANGEL PUGA ORTEGA, MARCO ANTONIO MEZA RAZO, ERICK IVAN LOPEZ GARCIA, DIEGO RAUL FUERTE AGUILAR, ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ, LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías campus Irapuato-Salamanca.

ma.pugaortega@ugto.mx

ma.mezarazo@ugto.mx

ei.lopezgarcia@ugto.mx

dr.fuerteagUILAR@ugto.mx

apizano@ugto.mx

lr.merchan@ugto.mx

RESUMEN El avance tecnológico ha permitido encontrar formas eficaces de solucionar problemas de regulación de voltaje y corrección del factor de potencia a través de la implementación de dispositivos FACTS, más específicamente mediante el STATCOM o compensador síncrono estático. En este artículo se presenta un diseño de un STATCOM que integra sus componentes estructurales fundamentales, así como los algoritmos de control requeridos para su correcta operación. Al final se verifica como es la respuesta del STATCOM ante la variación de distintas cargas para compensar la potencia reactiva que demanda.

PALABRAS CLAVE - Potencia reactiva, compensación, controlador, STATCOM, inversor.

I. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo se han ido incrementando las perturbaciones que afectan la calidad de la energía, haciendo más complicado para el suministrador de energía eléctrica entregar al consumidor la calidad idónea que requieren para el buen funcionamiento de sus equipos. Pero al ir introduciéndose más y más equipos de forma desmedida, de cargas no lineales y del aumento de equipos en las industrias, comercios y hogares, muchas veces vuelven esta tarea cada vez más difícil. Además, estas cargas y equipos suelen ser cada vez más sensibles debido a que contienen componentes electrónicos que fácilmente pueden ser dañados por estas perturbaciones, por lo que es indispensable manejar una buena calidad de la energía y una alta confiabilidad del suministro de electricidad para evitar grandes pérdidas económicas y técnicas [1].

Para que se logre un funcionamiento adecuado del sistema eléctrico se necesita corregir o lograr evitar la presencia de armónicos que lo que perjudican en cuanto al correcto funcionamiento es que sea difícil mantener tanto voltajes como frecuencia fundamental en valores constantes.

Otro aspecto importante tiene que ver con el factor de potencia, que en pocas palabras lo que indica es que tanta potencia activa se está logrando aprovechar. Y es que el tener un factor de potencia bajo por la acumulación de cargas inductivas trae consigo el aumento del coste de la electricidad debido a penalizaciones por parte del suministrador eléctrico, ya que el suministrador no solo cobra por la potencia activa sino también por la potencia activa intercambiada con la red de transmisión de AC (corriente alterna) [2].

Por nombrar otra de las situaciones que se enfrenta en la red eléctrica, se puede hablar de las caídas de voltaje que se producen en la línea de transmisión de AC, y que deben compensarse continuamente para mantener el voltaje del lado del consumidor igual a la tensión del lado del suministrador [3].

Estas situaciones normalmente se logran controlar o bajar su nivel de daño al sistema eléctrico mediante el uso de filtros activos, de bancos de capacitores, restauradores dinámicos de voltaje, entre otras opciones, algunos de estos con limitantes que impiden tener una buena calidad de la energía en el sistema.

Con el fin de mejorar el comportamiento del sistema eléctrico se introducen a la red los dispositivos FACTS (sistemas de transmisión flexibles en AC), por sus siglas en inglés, *Flexible AC Transmission Systems*. Estos dispositivos incorporan sistemas de control que se aplican a convertidores de estado sólido que utilizan diodos, tiristores, IGBT's (transistor bipolar de puerta aislada), etcétera.

Dentro de los FACTS se encuentra al STATCOM, por sus siglas en inglés, *Static Synchronous Compensator*. Este dispositivo permite regular los niveles de voltaje, corrección del factor de potencia, reducir el porcentaje de THD (distorsión armónica total) y ayudar al balanceo de cargas [4]. Puede que cumpla con más o menos funciones dependiendo su topología y de eso dependerá también que tanto se eleva su costo.

El diseño del STATCOM a presentar estará compuesto por un inversor PWM (modulación del ancho de pulso), filtros RL, un capacitor y la parte de control, que estará conectado a la red eléctrica y a las cargas. Para este diseño de

STATCOM su objetivo se enfocará a realizar la regulación de voltaje mediante la compensación de potencia reactiva a la red eléctrica. En [5], se puede encontrar una topología muy similar a la que se utilizara en este artículo, ya que cuentan con el filtro RL, con el capacitor como fuente de DC (corriente directa), a excepción de que su convertidor utiliza mosfets (transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor) en lugar de igt's, y su diseño de la parte de control lleva más componentes. En cuanto a su diseño su objetivo únicamente tiene corregir el factor de potencia, entonces dependiendo la aplicación que se le quiera dar al STATCOM la topología del circuito y el diseño de la parte de control se puede ir haciendo más o menos compleja para ajustarse a los objetivos del STATCOM.

II. EL STATCOM

STATCOM es el acrónimo de Compensadores Síncronos Estáticos (Static Synchronous Compensators), forman parte de los dispositivos de Sistemas de Transmisión Flexibles de corriente alterna (FACTS). Su principal propósito es suministrar con respuesta rápida, precisa y ajustable magnitudes de potencia reactiva al sistema de potencia de AC al que se conecta, consiguiéndose, ajustando la magnitud y fase de la componente reactiva de la corriente a través de su lado de corriente alterna. Esto le permite al STATCOMs controlar la cantidad y dirección del flujo de potencia reactiva intercambiado con la red.

Dentro de sus facultades, se encuentra la compensación de voltaje de líneas de transmisión reemplazando bancos de capacitores en derivación, ofreciendo más ventajas como un control de voltaje más robusto, incrementando la estabilidad durante variaciones de la carga. También son usados como correctores dinámicos del factor de potencia que poseen grandes picos aleatorios de demanda de potencia reactiva, reduciendo los costos de operación por los picos de demanda de potencia. Los STATCOMs comúnmente, se conforman de un inversor PWM trifásico que, funciona como un convertidor del voltaje-fuente para transformar de DC a AC, variando la amplitud y fase de las corrientes trifásicas de AC, compensando dinámicamente la demanda de potencia reactiva del sistema pudiendo aplicarse para mantener el valor nominal de voltaje de la línea de transmisión, o asegurar un determinado valor de factor de potencia.

El STATCOM logra la corrección de factor de potencia o compensación de voltaje por medio del control de la potencia reactiva. Esto, de manera que cuando la corriente del sistema adelanta al voltaje, el STATCOM se comportará como un inductor, atrasando a la corriente hasta por 90° consumiendo potencia reactiva; mientras que para el caso en que la corriente se encuentre en atraso con respecto al voltaje, ahora el STATCOM se comportará como un capacitor suministrando potencia reactiva al sistema eléctrico que se conecta.

Y como se muestra en Fig. 1, se conforma el STATCOM inversor/rectificador trifásicos, siendo este último el que integra un puente trifásico de tiristores, su controlador e inductores en serie. Además, se implementa un capacitor que funge como fuente de DC para alimentar al rectificador/inversor PWM.

Profundizando más en el capacitor y su funcionamiento; se requiere de un capacitor de gran capacidad en el que el voltaje de sus terminales debe permanecer a un valor lo suficientemente alto como para permitir al STATCOM el intercambio de potencia reactiva (descargar el capacitor para suministrar potencia a la red eléctrica). Cuando el voltaje en el capacitor requiere elevarse, el control del STATCOM realiza los ajustes necesarios en la magnitud y polaridad de la componente activa (Potencia Real) de modo que la red eléctrica cargue al capacitor. De manera contraria, cuando el voltaje en las terminales del capacitor requiere disminuir, el control del STATCOM ajusta la magnitud y polaridad de la componente activa de la corriente que se conduce por el lado de AC, retornándose al sistema, descargando al capacitor y entregando así potencia.

A. INVERSOR

Para el caso de este trabajo se utilizará un inversor trifásico que trabajará mediante la modulación de ancho de pulso PWM como el que se muestra en la Fig. 2.

Se tiene 6 IGBT que forman una conexión de puente trifásico. Para generar la frecuencia a la que conmutaran los IGBT's se usara un generador de PWM, este valor de frecuencia al que se operara el inversor será calculado mediante el sistema de control. Entre cada par de los IGBT's salen las terminales de las líneas que irán a la red eléctrica.

Por otra parte, también se debe hacer mención que el dispositivo que aporta voltaje de DC al inversor es un capacitor, este valor de voltaje debe mantenerse constante en todo momento, este trabajo lo hace la potencia activa del sistema, que mantiene cargado el capacitor en todo momento.

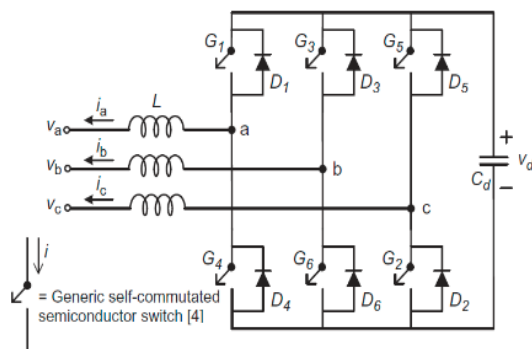


Fig. 1. Diagrama de la configuración estándar de un STATCOM [6].

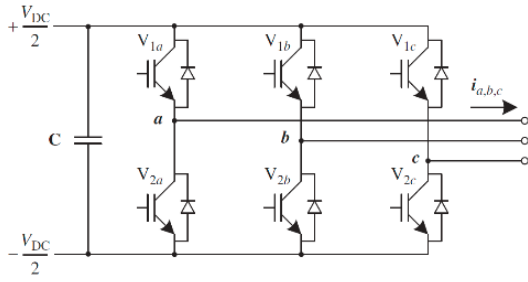


Fig. 2. Modelo de inversor utilizado en la simulación [7].

B. SISTEMA DE CONTROL

La transformación de Park o dq0 convierte las componentes de un sistema trifásico *abc* (valores senoidales ver Fig. 3) a sistema de referencia *dq* (valores constantes ver Fig. 4) bajo una operación a frecuencia constante. Implementar esta transformada simplifica cálculos, al convertir la forma de onda de la corriente y la tensión de AC en señales de DC.

Se presenta un sistema trifásico compuesto por la red eléctrica y un inversor conectados a través de una resistencia y una inductancia mediante un sistema monofásico equivalente en el plano *dq* en la Fig. 5. Las mediciones serán tomadas en el lado de la red eléctrica tanto en voltaje como en corriente en sus parámetros *d* y *q*.

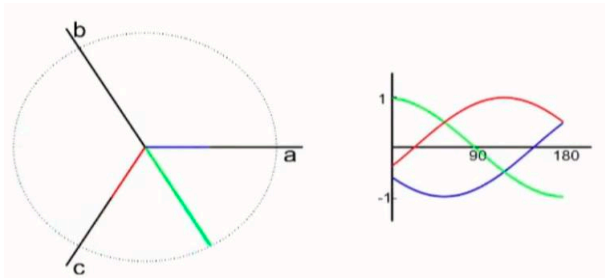


Fig. 3. Componentes *abc* de un sistema trifásico [8].

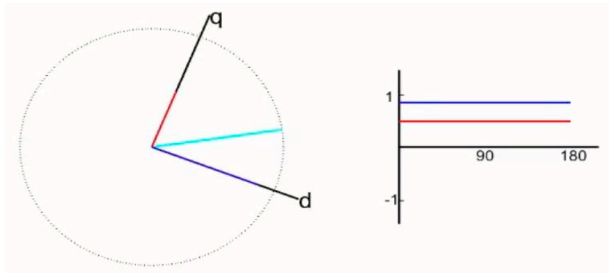


Fig. 4. Componentes en el dominio *dq* [8].

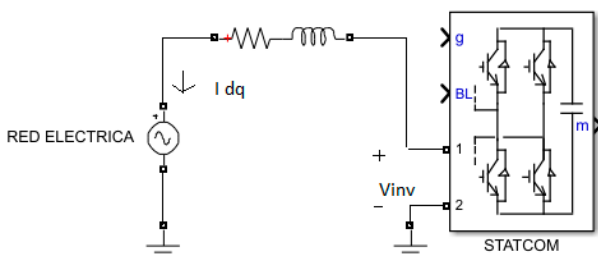


Fig. 5. Circuito base para el sistema de control.

Haciendo la transformación de Park contemplando su fase como el ángulo del voltaje de la red, se tiene la representación de las señales presentadas en Fig. 6. El voltaje en *q* es cero si se toma como referencia que el voltaje de la red, cuya magnitud se presenta únicamente sobre el eje *d*, por otra parte, se tiene un voltaje en el inversor, el cual se controla completamente en el sistema en sus parámetros *d* y *q*, este voltaje forma un ángulo con respecto al voltaje de la red. Considerando lo anterior, se tienen los siguientes valores de voltaje en la red y corriente. Ec. (1). hasta Ec. (4).

$$V_{red}d \rightarrow \text{Voltaje medido de la red} \quad (1)$$

$$V_{red}q = 0 \quad (2)$$

$$V_{inv}d \rightarrow \text{control en el eje } d \quad (3)$$

$$V_{inv}q \rightarrow \text{control en el eje } q \quad (4)$$

Ahora, los voltajes del inversor son controlados por las corrientes de éste mismo. En este análisis se plantearán 2 aspectos principales para la operación del STATCOM, la primera es que la potencia activa del sistema no es compensada y se necesita un poco de esta potencia únicamente para mantener cargado el capacitor a un voltaje constante, el cual sería el voltaje del inversor; la segunda, que es la principal, es la compensación de potencia reactiva a la red. Tomando en base esto se tienen las siguientes ecuaciones de potencia activa y reactiva en función del plano *d* y *q*.

$$P = V_{red}d * Id + V_{red}q * Iq \quad (5)$$

$$Q = -V_{red}q * Id + V_{red}d * Iq \quad (6)$$

De Ec. (5). $V_{red}q$ es igual a 0 y se llega a que la potencia activa depende únicamente de la componente *d*, Ec. (7). y la potencia reactiva depende de la componente *q*, Ec. (6). y Ec. (8).

$$P = V_{red}d * Id \quad (7)$$

$$Q = V_{red}d * Iq \quad (8)$$

Por último, se dejará el cálculo de la corriente *Iq*, Ec. (8), en términos de la potencia reactiva, Ec. (9).

$$Iq = Q/V_{red}d \quad (9)$$

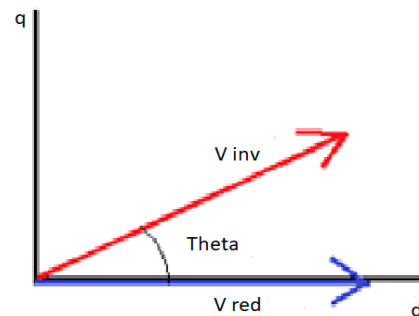


Fig. 6. Plano *dq* de referencia para sistema de control.

III. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK

A partir de los conceptos anteriormente descritos, los cuales forman parte del funcionamiento del STATCOM, en este apartado se mostrará de forma detallada la implementación de cada uno en el software de Matlab Simulink.

Para empezar, se toman las medidas de los voltajes y corrientes de las fases de la red. posteriormente se extrae la fase del sistema mediante el uso de un PLL (lazo de seguimiento de fase) trifásico Fig. 7, y luego, se aplica la transformación de Park en las corrientes para llevarlas a su plano d y q .

Ahora, en el capacitor se tomará un voltaje como referencia y otro, que es el medido en el inversor, ambos a través de una retroalimentación Fig. 8, con la finalidad de controlar el voltaje en el inversor.

Posteriormente esta señal pasará a un controlador PI (proporcional e integral), después tendrá otra retroalimentación con la corriente I_d obtenida previamente de la transformación de Park y lo obtenido será la componente d de corriente deseada para la tener la potencia activa que pueda mantener al capacitor a un voltaje constante. Fig. 9.

En la parte reactiva, como el objetivo es compensar potencia reactiva al sistema, la Ec. (9) se toma como base para dejar la expresión en términos de la potencia reactiva, entonces De tal manera que se calcule I_q .

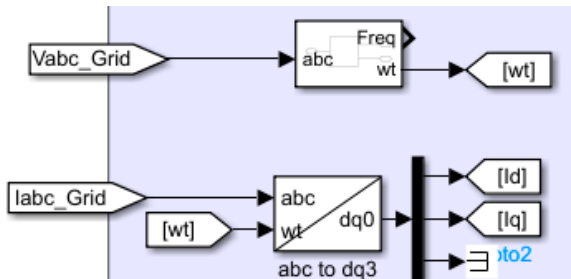


Fig. 7. Extracción de fase y medición en la red eléctrica.

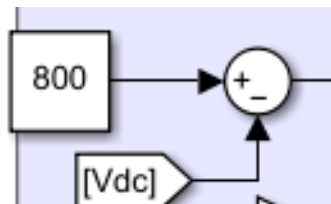


Fig. 8. Control en el eje d. parte 1.

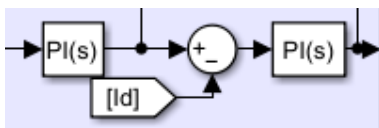


Fig. 9. Control en el eje d. parte 2.

Esta I_q de referencia hará una retroalimentación con respecto a la I_q medida en la red y la señal obtenida pasará a otro controlador PI Fig. 10. Con esto ya se obtuvo las componentes I_d e I_q de referencia para la operación del sistema. Estas dos señales se les aplicará una transformada inversa de Park para que regresen al plano abc y, finalmente, se dirigirán a un generador PWM, el cual determinará la frecuencia de conmutación del inversor Fig. 11.

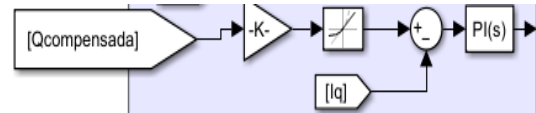


Fig. 10. Control en el eje q.

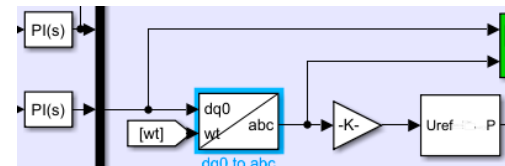


Fig. 11. Generador de pulsos PWM.

El sistema completo orientado a la parte de control queda mostrado en la Fig. 12. La parte de generador PWM ira conectado al STATCOM.

Después de esto, en las terminales de la parte de corriente continua viene un capacitor, el cual, como ya se mencionó antes, tiene como función mantener en funcionamiento el inversor y solo ocupa una pequeña cantidad de potencia activa para que este cargado en todo momento.

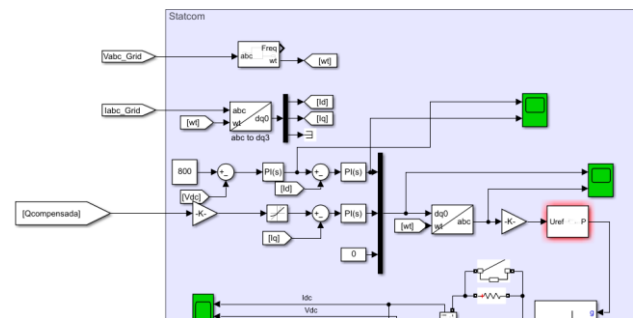


Fig. 12. Sistema de control implementado en Simulink.

A continuación, viene el banco de capacitores mediante el cual se realiza la compensación de potencia reactiva, a través de la conmutación de diversos valores de capacitancia con la activación y desactivación de contactores.

En la Fig. 13, se puede apreciar la implementación del capacitor, resistencias y el interruptor, que, a su vez, se conectan a un inversor PWM que desarrollará la función de STATCOM, ya que aquí es en donde se incorpora el sistema de control mencionado con anterioridad, dicho inversor, también llamado convertidor de estado sólido utiliza diodos e IGBT's, para el control. En este punto también se efectúa la conexión a la red eléctrica para intercambiar potencia reactiva mediante el ajuste de la magnitud y fase del voltaje de salida del convertidor electrónico del compensador.

A la salida del inversor se agrega un filtro trifásico con valores pequeños de resistencia e inductancia en serie, dicho filtro tiene el propósito de disminuir el contenido armónico introducido por el STATCOM y de esta forma no perturbar las señales en la red eléctrica, en Fig. 14 se puede ver la implementación del filtro en la simulación realizada.

Enseguida del filtro se encuentra la “red eléctrica” del sistema, a la que se conectan bloques trifásicos RLC que permiten establecer la potencia activa y reactiva que se consume, simulando el efecto de las cargas conectadas al sistema, además se agrega una carga dinámica con un interruptor que permite hacerla variante, lo cual es más apegado a la realidad, ya que no hay cargas constantes, esto sirve para ver si el STATCOM responde de manera correcta compensando la potencia reactiva y mantener constante el voltaje. Lo mencionado anteriormente se muestra en Fig. 15 en la que se aprecia como se conecta la carga dinámica a la red, estableciendo un consumo de 10 [kW] y 5 [kVA].

Como último elemento se agrega una fuente de voltaje trifásica que simula la red eléctrica y que tiene un valor de 269.44[V], en la Fig. 16 se muestra el diagrama de la simulación completa con cada una de las partes descritas, así como los *scopes* (visualizador de señales) que permiten observar las señales deseadas para ver el comportamiento del sistema.

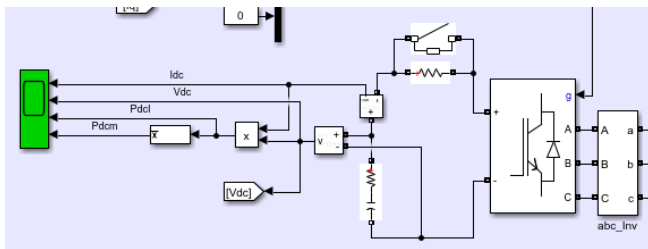


Fig. 13. inversor PWM implementado en Simulink.

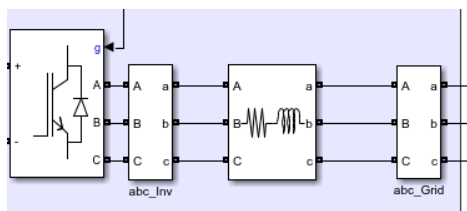


Fig. 14. Filtro trifásico RL implementados en Simulink.

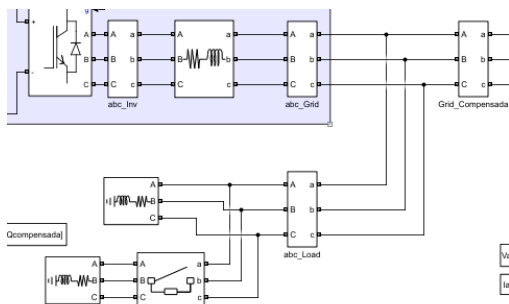


Fig. 15. Carga dinámica implementada en Simulink.

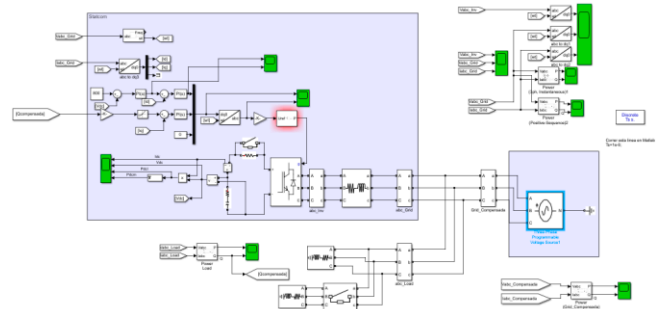


Fig. 16. STATCOM implementado en Simulink.

IV. RESULTADOS

Se procede a desarrollar la simulación del sistema. Entre los datos generales se encuentran los siguientes en la parte de generación Tabla I.

De esta sección se tomarán de los voltajes y corrientes que estén presentes para después calcular su potencia en a la red eléctrica. Dentro del sistema como se mencionó anteriormente, se encuentran 2 cargas trifásicas, la carga 1 estará en funcionamiento todo el tiempo de la simulación y la carga 2 tendrá operación únicamente entre los 0.5 y 1 segundos. Ambas tienen los mismos parámetros de potencia, los cuales se encuentran en las Tabla II. Cabe mencionar que la potencia reactiva es puramente inductiva en ambas cargas.

Otro de los elementos utilizados fue el filtro inductivo, el cual se muestra en la Fig. 16 junto con las cargas implementadas, en la Tabla III se muestran estos parámetros que son una carga trifásica RL en serie con el STATCOM.

Finalmente se procede dar inicio la simulación, el tiempo total será de 2.5 segundos en la cual la carga 2 estará únicamente en operación de 0.5 a 1 segundos, el objetivo principal es que STATCOM tenga la capacidad de compensar la potencia reactiva que se demande en la red eléctrica. A continuación, se muestra los resultados obtenidos.

TABLA I. PARAMETROS RED ELÉCTRICA

Parámetros	Valores
V nominal RMS	220 V
Frecuencia	60 Hz

TABLA II. PARAMETROS EN CARGA 1 Y CARGA 2

Parámetros	Valores
Potencia activa	10 kW
Potencia reactiva	5 kVAr

TABLA III. PARAMETROS FILTRO INDUCTIVO

Parámetros	Valores
Resistencia	0.01 Ω
Inductancia	0.003 H

En la Fig. 17 se nota el comportamiento inicial de la carga, en un lapso de 0 a 0.5 segundos hay una demanda de 10 kW, en cuanto entra en operación la carga 2 se incrementa la demanda llegando a 20 kW, después de 0.5 segundos la demanda disminuye y vuelve a la demanda inicial que era de 10 kW. Este comportamiento se ve presente de manera análoga en la parte de la potencia reactiva, Fig. 18, la demanda inicial es de 5 kVar y posteriormente aumenta a 10 kVar cuando entra en operación la carga 2.

Esta demanda de potencia reactiva la detecta el STATCOM y en automático comienza la compensación de esta potencia en el sistema Fig. 19 otorgando una demanda de la magnitud de esta potencia para contrarrestarla en la red, análogo al funcionamiento de un banco de capacitores. Por otra parte, la potencia activa del STATCOM Fig. 19 es cero en todo momento debido a que solo se ocupa una cantidad muy pequeña de esta para mantener al capacitor del inversor cargado.

En la Fig. 20 se puede apreciar el comportamiento de la potencia en el STATCOM de forma instantánea, de esta forma se puede apreciar que no es necesaria la potencia activa para el funcionamiento del inversor, el cual únicamente necesita una cantidad pequeña para que se mantenga operando, como se había mencionado previamente. La Fig. 21 muestra de manera más cercana este comportamiento, tomando un tramo en la Fig. 22.

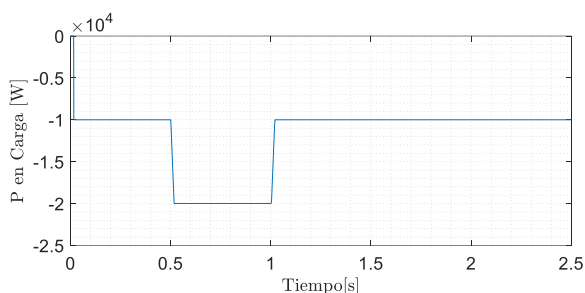


Fig. 17. Potencia activa que demanda la carga.

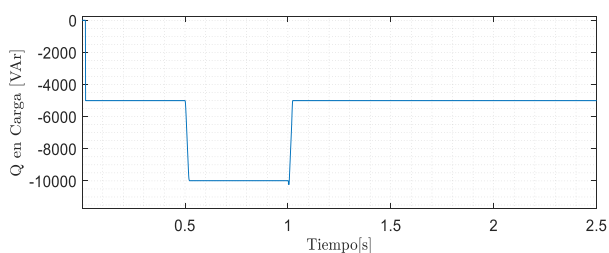


Fig. 18. Potencia reactiva que demanda la carga.

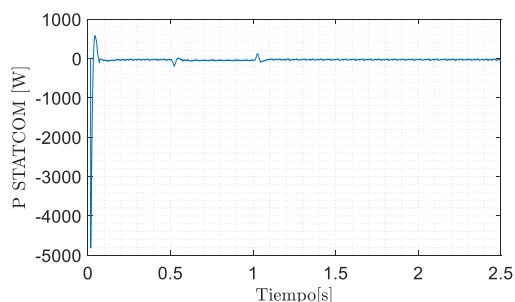


Fig. 19. Potencia activa en el STATCOM.

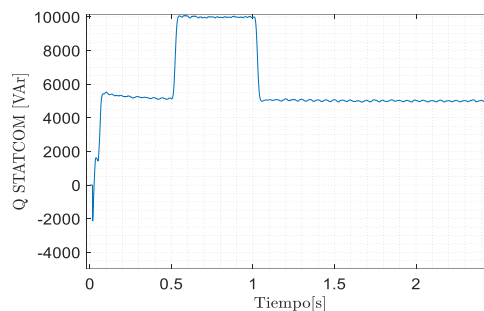


Fig. 20. Potencia reactiva en el STATCOM.

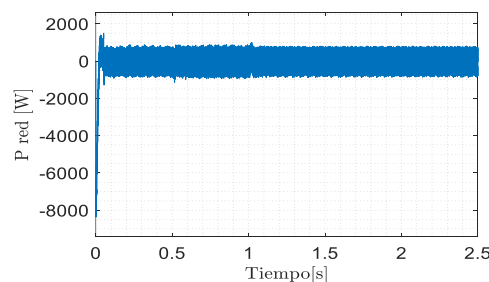


Fig. 21. Potencia activa instantánea en el STATCOM.

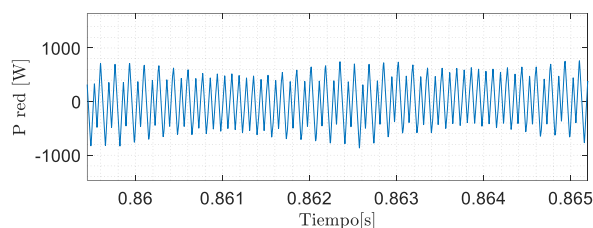


Fig. 22. Potencia activa instantánea en el STATCOM entre un tiempo de 0 a 0.865 segundos.

Finalmente, se tomarán las medidas directamente en la red eléctrica. La Fig. 23 muestra la potencia reactiva obtenida, se puede apreciar que desde un principio se mantiene en un valor promedio 0. En 0.5 segundo, que es cuando se pone en marcha la carga 2, hay un pequeño pico de demanda pero que rápidamente se estabiliza y vuelve de a su valor de 0; para cuando se llega a los 1 segundos, se vuelve a presentar otro pico, pero ahora en dirección opuesta, esto es debido a que en este momento la carga 2 se quita la operación y solo que mantiene la carga 1 conectada, entonces como el STATCOM se acopla a la compensación de las dos cargas durante 0.5 segundos, al momento de quitar una de las cargas, éste da ese extra de potencia reactiva por fracciones de segundos en lo que el controlador trabaja para compensar la nueva potencia reactiva requerida.

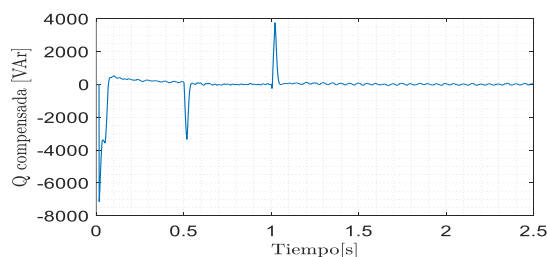


Fig. 23. Potencia reactiva en la red.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se llevó a cabo el diseño y simulación de un STATCOM cuya configuración consta de un capacitor, filtro RL, un inversor trifásico de dos niveles, además de la componente encargada de desarrollar las labores de control. Éste STATCOM opera conectado a una red eléctrica trifásica. Mediante la implementación del STATCOM y la adecuada operación bajo los sistemas de control se pudo cumplir el objetivo de compensar la potencia reactiva de un sistema de prueba, teniendo la capacidad de detectar la cantidad necesaria a compensar con el objetivo de operar bajo un factor de potencia unitario.

Hoy en día, la aplicación de estos dispositivos es muy importante sobre todo en el desarrollo de las fuentes energía renovable, ya que como bien se mencionó, ayuda a que la red a la que está conectado el compensador síncrono estático mantenga valores de voltaje constantes, así como, cancelar la mayor cantidad posible de armónicos que dichas fuentes de energía renovable puedan ocasionar a la red donde se conecta

REFERENCIAS

- [1] M. A. Mantilla, J.F. Petit, "Compensadores estáticos de potencia: Visión general y revisión del estado del arte," *UIS ingenierías*, vol. 6, no. 1, pp. 9-21, Jun., 2010.
- [2] J. Lopez (2016). Estudio y simulación de un STATCOM conectado a una red (pp. 13–17). Leganés. Recuperado de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27011/TFG_Jesus_Lopez_Merino_2016.pdf.
- [3] Festo, "Static Synchronous Compensator(STATCOM)," Jan. 2015. [Online] Available: https://labvolt.festo.com/downloads/86371_F0.pdf
- [4] O. Morfin y F. Ornelas, "Compensación de potencia reactiva mediante el control robusto de un STATCOM en un sistema de potencia," *Ingeniería Investigación y Tecnología* número 3, 1-13, Abr, 2020. Consultado en: Ago, 23, 2022, DOI: 10.1109.XXX.123456, [Online].
- [5] J. C. Mendoza, E. A. Caicedo, L. D. Pabon, A. Pardo, "Control sincrónico de potencia de un D-STATCOM de bajo costo," *Aibi.*, vol. 8, no. 3, pp. 108–117, Dic, 2020.
- [6] M. H. Rashid, *Power Electronic handbook*. Elsevier, 2018. ISBN: 978-0-12-811407-0
- [7] S. M. Sharkh, M. A. Abu-Sara, G. I. Orfanoudakis, and B. Hussain, *Power Electronic Converters for Microgrids*. John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-0-470-82403-0
- [8] Transformadas de Clarke y Park, Mathworks.com, 2022. <https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/clarke-and-park-transforms.html> (Accesado Oct. 21, 2022).

BIOGRAFÍAS



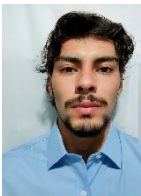
MIGUEL ANGEL PUGA ORTEGA Actualmente se encuentra estudiando el noveno semestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la electrónica de potencia, el control de sistemas eléctricos y las energías renovables.



DIEGO RAUL FUERTE AGUILAR Actualmente se encuentra realizando prácticas como parte de sus últimos semestres de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la detección de fallas en equipo eléctrico, la coordinación de protecciones y alta tensión.



ERICK IVAN LOPEZ GARCIA Actualmente se encuentra estudiando el noveno semestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la coordinación de protecciones, calidad de la energía y las fuentes de energía renovables.



MARCO ANTONIO MEZA RAZO Actualmente se encuentra estudiando el noveno semestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son el diseño de máquinas, detección de fallas en máquinas eléctricas y las microrredes.



ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, Colima, México, en el 2001, y el grado de Maestro en Ingeniería y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2004 y 2010, respectivamente. Actualmente es Profesor de tiempo completo en la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación versan en tópicos de redes eléctricas modernas.



LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA Realizó sus estudios de pregrado en la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga Colombia obteniendo el título de Ingeniero Electrónico en 2013. En 2015 obtiene su título de Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, mismo lugar donde en el año 2020 obtiene su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, implementación de sistemas electrónicos analógicos-digitales, sistemas eléctricos inteligentes, micro redes, dispositivos FACTS, entre otros.

Módulo para el monitoreo y optimización de controladores de carga fotovoltaicos

GUSTAVO CERDA-VILLAFAÑA, JOSE LUIS HERNÁNDEZ CAMACHO.

Universidad de Guanajuato
gcerdav@ugto.mx
jl.hernandezcamacho@ugto.mx

RESUMEN Este trabajo presenta un módulo para optimizar la operación de controladores de carga de baterías mediante paneles solares. El módulo busca optimizar el funcionamiento de los sistemas de paneles fotovoltaicos con baterías como el medio de almacenamiento de la energía. Al operar estos sistemas se tiene el riesgo de que, por diversas circunstancias, como varios días continuos de baja irradiancia, los paneles solares no recarguen la batería o baterías lo suficiente para la demanda a la que son sometidas. O también, que se subestimen las pérdidas asociadas a la carga conectada a las baterías, requiriendo más energía de la que las baterías pueden suministrar y, por lo tanto, reduciendo su tiempo de vida.

PALABRAS CLAVE - Controlador de carga, Paneles fotovoltaicos, Banco de baterías, Eficiencia.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe en el mercado una gran variedad de sistemas de control de carga de baterías para aplicaciones fotovoltaicas. Hay algunos controladores que solo recargan baterías buscando optimizar la energía captada por el panel o paneles fotovoltaicos, mediante diferentes estrategias, como la búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés) [1]. Hay otros controladores de carga que además de optimizar la energía captada por los paneles fotovoltaicos, permiten utilizar la carga almacenada durante ciertas horas, usualmente después de que se oculta el sol o antes de que amanezca. Pero es el usuario el responsable de determinar el tiempo que puede utilizar la carga almacenada en función de la capacidad nominal de los paneles y la energía utilizada por los dispositivos que van a ser alimentados. Este tipo de arreglos permite un margen de mejora para optimizar el ciclo carga/descarga, aprovechando lo más posible la energía generada y, también, evitar la descarga profunda de las baterías, alargando el tiempo de vida de estas [2, 3, 4, 5].

La Fig. 1 presenta un ejemplo del ciclo de vida de baterías de plomo-acido en función de la profundidad de la descarga a la que son sometidas. Esta gráfica es presentada por un fabricante con relación a sus productos, pero el punto a observar es la importancia de considerar la profundidad de descarga de las baterías con relación a prolongar su tiempo de vida.

II. DESARROLLO

Se presenta un módulo, basado en un microcontrolador, que realiza las siguientes funciones:

- Medición de la corriente y voltaje generados por el panel fotovoltaico.
- Medición de la corriente y voltaje utilizados para recargar el banco de baterías.

- Medición de la corriente y voltaje proporcionados por el banco de baterías cuando alimenta la carga.
- Control sobre la apertura/cierre de la conexión a la carga.
- Almacenamiento de los valores de corriente/voltaje en una memoria SD para su posterior análisis.
- Conexión inalámbrica a un teléfono celular para la configuración de los parámetros del módulo.

Cada una de las funciones se describe a continuación.

A. Medición de la corriente y voltaje generados por el panel fotovoltaico

La medición de corriente se realiza mediante el sensor ACS714. Este sensor tiene varias presentaciones de acuerdo con la corriente que se va a medir, desde 5A, hasta 50 A. El voltaje se determina mediante un divisor de voltaje ajustable para alimentar el convertidor analógico-digital del microcontrolador que tiene un rango máximo de conversión de 0 a 5V. El usuario del módulo puede ajustar el periodo de muestreo de las mediciones y éstas son almacenadas en una memoria SD que se puede conectar al módulo.

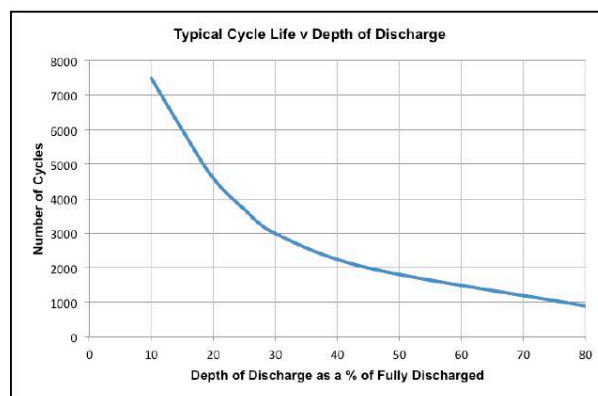


Fig. 1. Ciclo de vida vs porcentaje de descarga (por Bluebox batteries).

B. Medición de la corriente y voltaje utilizados para recargar el banco de baterías

Esta medición se realiza igualmente con el sensor de corriente ACS714 y el voltaje con un divisor de voltaje basado en un potenciómetro para poder ajustar el voltaje de entrada al rango de medición del convertidor analógico digital. Pero estas mediciones, además de poder ser almacenadas en una memoria SD, son utilizadas por el módulo para determinar la cantidad de energía que, en el transcurso del día, es transferida desde los paneles solares al banco de baterías y, de esta forma determinar la energía disponible a ser utilizada por la carga.

C. Medición de la corriente y voltaje proporcionados por el banco de baterías.

Esta medición se realiza con los mismos sensores que las mediciones previas. También se guardan los valores en la tarjeta SD para su posterior análisis. Pero esta medición permite interrumpir el flujo de energía a la carga cuando se cumpla alguna de las siguientes condiciones:

1. Se alcance un porcentaje E de la energía recibida por la batería. Ese porcentaje está establecido por default en 80%, pero el usuario puede establecerlo a cualquier valor entre 0 y 100 desde su teléfono inteligente conectándolo al módulo inalámbricamente mediante Bluetooth.
2. Si el voltaje de la batería cae más de un 5% con respecto al voltaje en carga máxima. Aunque este valor también lo puede establecer el usuario desde un teléfono inteligente y podría seleccionar entre un valor de 5 a 10%, no es lo recomendable, pues se recomienda que los bancos de baterías para aplicaciones solares no se descarguen más del 50% de su carga para un mayor tiempo de vida de estos. Y se considera que, en una instalación de paneles solares con banco de baterías, se realizan los cálculos para que dicho banco no llegue a niveles de descarga mayores.

D. Control de la apertura/cierre de la conexión a la carga.

El módulo cuenta con un relevador para abrir o cerrar el circuito de conexión entre el banco de baterías y la carga. De esta forma, el módulo optimiza la operación del sistema fotovoltaico para proteger el banco de baterías y, al mismo tiempo utilizar la energía máxima obtenida por los paneles fotovoltaicos, tanto en días despejados y de alta irradiancia, como en días nublados o cuando el sol no pasa verticalmente sobre los paneles.

E. Almacenamiento de los valores de corriente/voltaje en una memoria SD para su posterior análisis.

El usuario puede determinar el tiempo de muestreo que desee para guardar los valores de corriente y voltaje de los tres puntos de medición indicados anteriormente. Los datos se guardan como columnas en un archivo de texto que puede ser leído por cualquier procesador de texto, hoja de cálculo o software avanzado como Matlab [6]. Con los valores almacenados, al ser analizados, se pueden determinar, entre otros parámetros, la energía total suministrada por los paneles fotovoltaicos y por el controlador de carga, la eficiencia del controlador de carga para encontrar el punto de máxima potencia, el nivel del estado de salud del banco de baterías, la energía total suministrada por el banco de baterías a la carga, la caída de la energía suministrada por los paneles en condiciones de nubosidad o, si los paneles solares están sucios y requieren ser limpiados.

F. Conexión inalámbrica a un teléfono celular para la configuración de los parámetros del módulo.

El módulo cuenta con conexión inalámbrica mediante el protocolo Bluetooth. Esta conexión permite configurar diversos parámetros de la operación del módulo. No se tiene todavía una aplicación específica, por lo que se puede utilizar cualquier aplicación que permita el envío y recepción de datos a través de conexión por Bluetooth. Los comandos que se tienen activados se presentan en la [Tabla I](#).

Al recibir alguno de estos comandos el módulo responde enviando el texto OK y el mismo comando que recibió como confirmación.

TABLA I. COMANDOS DE CONFIGURACIÓN.

Comando	Acción
E1...E100	Valor de la eficiencia del banco de baterías.
C5...C10	Caída en el nivel de voltaje del banco de baterías para abrir la conexión a la carga.
T1...T500	Tiempo de muestreo en segundos para guardar las mediciones en la tarjeta SD.
C5...50	Es el valor del sensor de corriente utilizado (5, 20, 30, 50).
VP5...150	Voltaje máximo que recibirá de los paneles solares.
VC5...60	Voltaje máximo de carga del banco de baterías.
VB5...60	Voltaje máximo suministrado a la carga.

III. DISEÑO DE LA TARJETA PCB

La tarjeta PCB donde se montó el módulo se realizó respetando las normas IPC 2221A, IPC2220 y UL 60950 de diseño de circuitos PCB [7, 8, 9]. Las restricciones del ancho de pista, separación entre pistas, tamaños de circuitos

y dimensiones de los conectores determinaron que el tamaño final de la tarjeta fuera de 15 x 10 cm. Aunque sigue siendo un tamaño compacto y conveniente para un prototipo, se puede reducir significativamente, hasta un 40%, si se utiliza una placa PCB doble cara y componentes de montaje superficial o más compactos, como son los resistores, potenciómetro, microcontrolador y si se utiliza un socket para tarjeta microSD en lugar del socket utilizado en este prototipo que es para tarjeta SD.

La alimentación se realizó utilizando la energía proveniente del banco de baterías, utilizando un regulador L4940V5, que soporta un voltaje máximo de 150V, por lo que permite ser alimentado por arreglos de baterías con diversos niveles de voltaje.

IV. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

El microcontrolador fue programado utilizando el lenguaje de programación XC8. Las únicas consideraciones que se deben tener con esta versión de C son el manejo de los registros específicos del microcontrolador a utilizar y algunas funciones básicas relacionadas con la operación de dicho microcontrolador [10].

El código utiliza librerías específicas para la operación de la tarjeta SD. El funcionamiento básico manda llamar las funciones de mediciones de los valores de corriente y voltaje de los paneles fotovoltaicos y del controlador de carga. Si se cumple la condición de que ya no hay voltaje ni corriente de los paneles fotovoltaicos y el banco de baterías se ha cargado, se activa el relevador. La activación del relevador es independiente de la activación, por parte del controlador de carga, del suministro de energía a la carga. Se leen los valores de corriente y voltaje del banco de baterías. Con los datos de este último determina si se cumple alguna de las dos condiciones establecidas en la subsección C de la Sección II. En tal caso se desactiva el relevador, abriendo el circuito que alimenta a la carga. Esto también se realiza de forma independiente a la operación por parte del controlador de carga.

El siguiente proceso consiste en guardar los datos obtenidos en el archivo de texto dentro de la memoria SD. Después de esto manda llamar a la función de retardo y, al salir de esta función, regresa al inicio para comenzar una nueva secuencia de muestreo de los valores de corriente y voltaje. Toda la secuencia descrita se muestra en la Fig. 2.

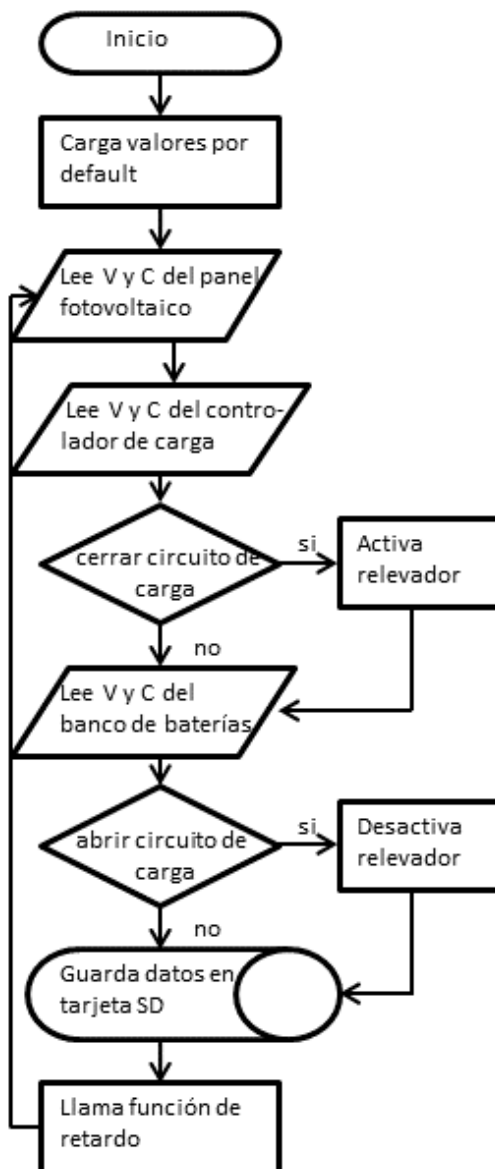


Fig. 2. Diagrama de flujo de programa principal.

La sección que maneja la configuración de los parámetros descritos en la Tabla I, subsección F, Sección II, se presenta en la Fig. 3. Este proceso se realiza mediante una función de interrupción que se activa cada que le llega un nuevo dato al puerto de comunicación serial asíncrona proveniente del módulo Bluetooth.

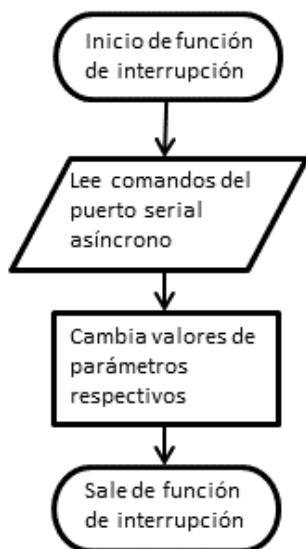


Fig. 3. Diagrama de flujo de función de interrupción.

V. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas se hicieron conectando el módulo a un controlador de carga de la marca PHOCOS, el modelo CX10 de 20A. El control de carga de las baterías se realiza por modulación por ancho de pulso (PWM) y la referencia a tierra es mediante el polo positivo. El controlador de carga está conectado a un panel fotovoltaico policristalino de 150W. La batería es de plomo-acido de ciclo profundo y 100A.

Se tomaron muestras cada 3.5 minutos desde las 8:30 de la mañana hasta que se observó la caída de la irradiancia. Una vez que el nivel de corriente y voltaje cayeron completamente, se activó el relevador del módulo, de acuerdo a como se programó el microcontrolador.

El módulo funcionó de acuerdo con su diseño y programa. En la Fig. 4 se muestran los valores de las mediciones de corriente y voltaje provenientes del panel fotovoltaico para un día de pruebas.

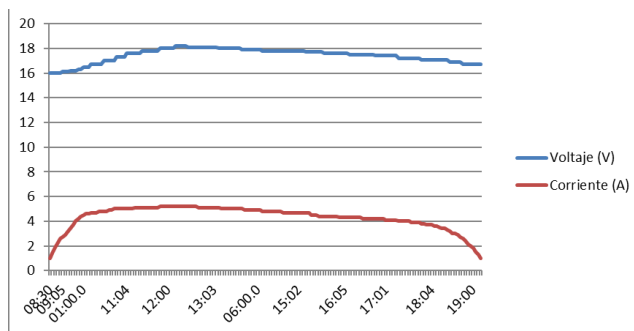


Fig. 4. Datos de corriente y voltaje del panel solar.

Es necesario realizar pruebas de robustez tanto para el hardware como para el software del microcontrolador, lo que se planea hacer dejando el módulo conectado al sistema fotovoltaico por un periodo de varios meses.

REFERENCIAS

- [1] U. Yilmaza, A. Kircay, & S. Borecki, (2018). *PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 81, part 1, pp. 994-1001
- [2] Adam Idzkowski, Katarzyna Leoniuk, Wojciech Walendziuk, and Lukasz Budzynski (2015) *Monitoring and control system of charging batteries connected to a photovoltaic panel*, Proc. SPIE 9662, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015, 96620I; <https://doi.org/10.1117/12.2205237>
- [3] G. Spagnuolo, G. Petrone, B. Lehman, C. A. Ramos Paja, Y. Zhao and M. L. Orozco Gutierrez, *Control of Photovoltaic Arrays: Dynamical Reconfiguration for Fighting Mismatched Conditions and Meeting Load Requests*. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 62-76, March 2015, doi: 10.1109/MIE.2014.2360721.
- [4] B. V. E. Bakolas, P. Bauer and D. Prins, *Testing of Smart Charging Controller for dynamic charging from solar panels*, 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ITEC.2014.6861810.
- [5] S. Armstrong, M. E. Glavin and W. G. Hurley, "Comparison of battery charging algorithms for stand alone photovoltaic systems," *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1469-1475, doi: 10.1109/PESC.2008.4592143.
- [6] D. Ibrahim. SD Card Projects Using the PIC Microcontroller. Newnes, 1st 2010
- [7] IPC Task Group, Standard for Determining Current-Carrying Capacity In Printed Board Design IPC2152
- [8] J. Balcells. Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos. Marcombo, 2005
- [9] M.I. Montrose, M. I. EMC and the Printed Circuit Board. Design, Theory and Layout. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, primera edición.1997
- [10] A. Subero. Programming PIC Microcontrollers with Xc8, Apres, 2017

Reutilización de tubo de vacío en una cocina solar

YAIR GARCÍA MORÁN¹, JOEL SALOME BAYLON¹, ADRIÁN TINTOS GÓMEZ¹, MARCO PÉREZ GONZÁLEZ^{1,2}

¹Universidad Tecnológica de Manzanillo

²Universidad de Colima

a20190040@utem.edu.mx

joel-salome@utem.edu.mx

adrian-tintos@utem.edu.mx

marco-perez@utem.edu.mx

RESUMEN En este trabajo se presenta el diseño y construcción de una cocina solar tipo concentrador parabólico con materiales reciclados. Se reutiliza un tubo de vacío para almacenar el calor, para ello se diseñó una parábola que refleja los rayos del sol al tubo de vacío. Para sostener la parábola reflectante, se diseñaron tres piezas de madera curvadas, así como dos piezas de madera en forma de cubos para fijar el tubo de vacío por encima de la parábola. El sistema diseñado alcanzó una temperatura máxima de 240 °C, la cual fue suficiente para hornear una galleta.

PALABRAS CLAVE - Cocina solar, reutilización, tubo de vacío.

I. INTRODUCCIÓN

La cocina solar es un dispositivo que utiliza la luz solar que se transforma en energía calorífica que se usa para calentar y cocinar los alimentos. En las condiciones adecuadas, las cocinas solares concentran y absorben los rayos UV del sol, transformándolos en calor obteniendo suficiente cantidad como para cocinar los alimentos. Existen tres tipos básicos de cocinas solares que se pueden encontrar en el mercado comercial: cocinas solares con horno de caja, cocinas solares de panel y cocinas solares parabólicas. Una cocina solar parabólica refleja la luz del sol en un punto focal donde se coloca un recipiente de cocción, los rayos UV concentrados alcanzan temperaturas extremadamente altas de 500 °F (260 °C) a 700 °F (371 °C). La cocina solar basada en tubo de vacío como recipiente de cocción tiene las siguientes características:

- El tubo de vacío puede funcionar bien incluso en climas fríos.
- La pérdida de calor se reduce.
- Bajo tiempo de precalentamiento.
- Bajas pérdidas por reflexión.
- Sin necesidad de atención constante del usuario.
- Se pueden realizar varias cocciones [1] [2].

Estas características hacen que esta cocina tenga un bajo costo de fabricación, sea simple de operar y pueda cocinar casi cualquier alimento.

Por otro lado, empresas dedicadas a la reparación de calentadores solares, reciben a diario consultas sobre alguna falla en estos dispositivos. Las fallas más comunes que les reportan los clientes son: goteo en los tubos, goteo en el tanque y fractura o tubos rotos. Cuando los tubos son remplazados, estos son depositados en la basura, despreciando una utilidad más allá de su ciclo comercial. Una de las características del trabajo presentado que busca impactar positivamente al medio ambiente es el de procurar cuando sea posible el empleo de materiales reciclados, por lo

que se propone la reutilización de tubos evacuados dañados, como cocinas solares.

II. DESARROLLO

A. SISTEMA DISEÑADO

Los principales componentes para la fabricación de la cocina solar basada en tubo de vacío son: la estructura para dar rigidez al sistema, el reflector cilíndrico - parabólico cuya función es concentrar la radiación solar en un tubo absorbente, el tubo de vacío donde en su interior se calienta la comida y la bandeja de comida en la cual es colocado el alimento, el cual es introducido o extraído del tubo. Estos elementos se muestran en la Fig. 1.

B. TUBO DE VACIO

El tubo de vacío es un colector solar, este se compone de 2 tubos concéntricos con vacío en medio de ellos, la capa interna está recubierta con una capa altamente conductora de calor que también es respetuosa con el medio ambiente (Fig. 2) [3].

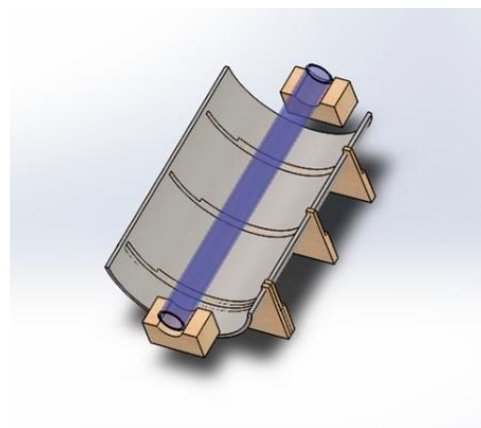


Fig. 1. Cocina solar basada en tubo de vacío.



Fig. 2. Partes de un tubo de vacío.

Debido al vacío, se obtienen bajas pérdidas de calor resultando una eficiencia superior al 80% (Fig. 3) [1][4].

Para el prototipo desarrollado en esta contribución, los tubos al vacío recolectados son cortados mediante un mini taladro con un disco de diamante, posteriormente son unidos mediante silicón de alta temperatura, se agrega una válvula de servicio pivote para refrigeración, la cual mediante una bomba de vacío externa sirve para crear un vacío parcial. También se agrega una tapa de madera al otro lado del tubo (Fig. 4).

Los tubos de vacío que se utilizan son los que sufrieron alguna falla (fractura o ruptura) en un colector solar comercial, con lo cual se extiende su vida útil, ya que comúnmente se depositan en la basura. Las medidas del tubo se observan en la Fig. 5.

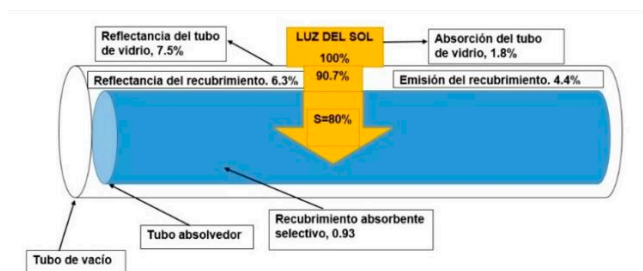


Fig. 3. Eficiencia en tubo de vacío.



Fig. 4. Tubo de vacío reutilizado.

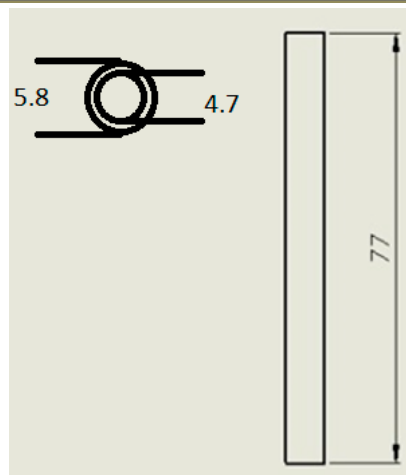


Fig. 5. Plano del tubo de vacío.

C. ESTRUCTURA

El colector cilindro-parabólico es una de la tecnología de concentración más madura que puede llegar a una eficiencia óptica del 75 % [5][6], razón por la cual se utiliza este diseño. El diseño geométrico del canal parabólico obedeció básicamente a los siguientes aspectos: a) Involucramiento de los alumnos en la manufactura directa de prototipos y b) Capacidad térmica suficiente para cocinar alimentos sin sobrepasar una temperatura máxima que pudiera afectar de forma negativa la consistencia y sabor (evitar alimentos quemados). Normalmente el diseño se realiza utilizando la idea de maximizar la potencia térmica de entrada que se calcula como $Q_s = \pi IR^2$, es decir es el producto de la irradiancia por el cuadrado del círculo de apertura del colector (el que se forma de manera inscrita dentro de los límites de la pared de la parábola y la altura del foco), es decir esta capacidad térmica es directamente proporcional al radio del círculo de apertura R del colector, por lo que a medida que se eleva el foco del vértice, R se incrementa. Dado el enfoque de facilitar la elaboración artesanal y cuidar una temperatura máxima que no quemara la masa de la preparación, se decidió establecer valor del foco en 5 cm, lo que en la práctica redujo en una temperatura máxima adecuada de alrededor de 200°C. Por lo que la ecuación del perfil utilizado es: $4py = x^2$ con $p = 5$ por lo que $y = \frac{1}{20}x^2$. Este perfil se muestra en la Fig. 6.

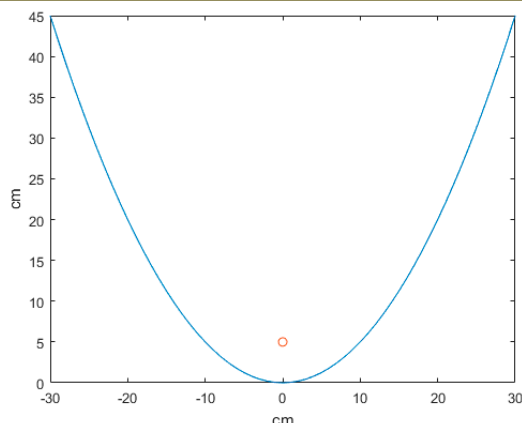


Fig. 6. Perfil parabólico.

El perfil propuesto es plasmado en 3 maderas de 20 cm de alto, 42 cm de ancho y 1.5 cm de grosor, las cuales sostienen la lámina reflejante. En la Fig. 7 se muestra una madera después de ser cortada y pintada.

D. REFLECTOR

Como reflector se utiliza una lámina cuadrada de aluminio acabado espejo de 62.8 cm de lado, su diseño se muestra en la Fig. 8. Esta lamina es montada sobre las maderas mediante pijas como se muestra en la Fig. 9.

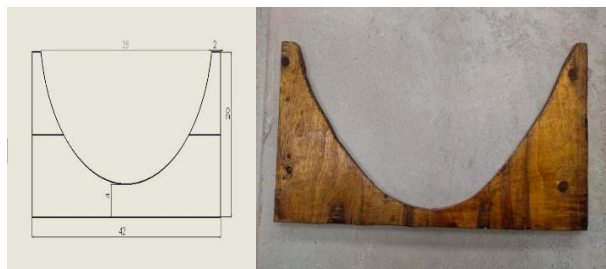


Fig. 7. Plano y soporte de madera.

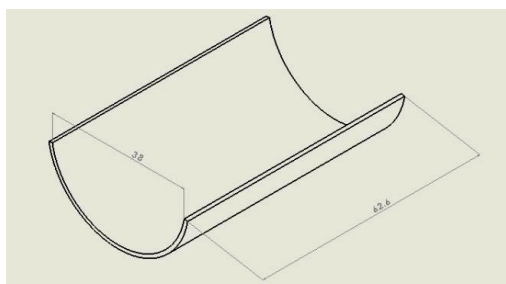


Fig. 8. Plano del cilindro parabólico.



Fig. 9. Prototipo parcial integrando el canal y sus soportes.

La lamina puede ser sustituida por cartón o papel cascaron cubiertos por mylar.

E. BANDEJA DE COMIDA

Para hornear galletas se usa papel aluminio como bandeja como se muestra en la Fig. 10. Versiones posteriores del prototipo incluirán un recipiente más rígido que permita su uso repetitivo.

F. SISTEMA CONSTRUIDO

Se agrega una base para sostener el tubo de vacío y de esta manera obtener la cocina solar final (Fig. 11).



Fig. 10. Papel aluminio como bandeja.

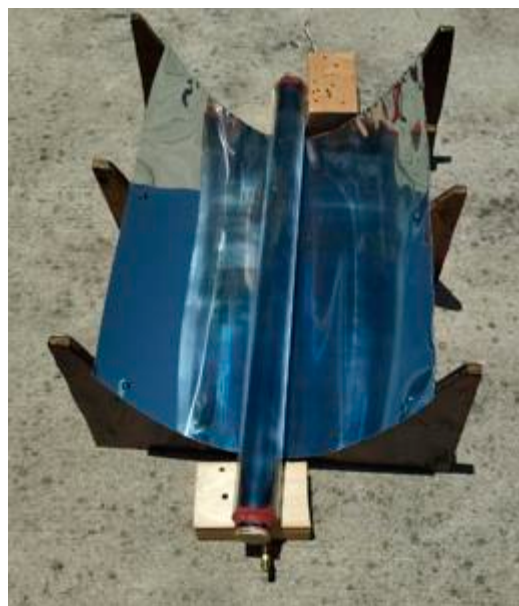


Fig. 11. Cocina solar.

III. RESULTADOS

Para medir la temperatura al interior del tubo de vacío se utiliza el voltamperímetro avalu térmico VA-266 C, el cual tiene su rango de medición de 0 a 750 °C con una exactitud el 1%. Se realiza la medición de temperatura en un tubo de vacío en perfectas condiciones, registrando una temperatura de 206 °C a las 12:40 horas del día 19 de julio del 2022 (Fig. 12).

Al mismo tiempo se realiza otra medición con otro tubo de vacío en perfectas condiciones, pero insertado en la cocina solar. Se registra una medición de temperatura de 339 °C (Fig. 13), obteniendo un incremento de temperatura de 133 °C debido a la cocina solar.



Fig. 12. Medición de temperatura en tubo de vacío en perfectas condiciones.



Fig. 13. Medición de temperatura en tubo de vacío en perfectas condiciones en cocina solar.

El 4 de agosto del 2022 a las 12:40 h se lleva a cabo la medición de temperatura en la cocina solar con el tubo de vacío reutilizado, obteniéndose una temperatura de 240 °C (Fig. 14), la cual es suficiente para hornear galletas, requiriéndose 180 °C para esta actividad.



Fig. 14. Medición de temperatura en cocina solar con tubo de vacío reutilizado.

Para resumir el proceso de pruebas iniciales, se muestran las Figs. 15 y 16, que en conjunto dan una idea de la relación entre las condiciones ambientales (un día soleado, cálido, propio del trópico del pacífico mexicano) y el desempeño del prototipo propuesto contra otros dos diseños construidos por este mismo grupo y que no son mostrados en este trabajo (de plato parabólico y una réplica de una cocina parabólica comercial Haines® [7]).

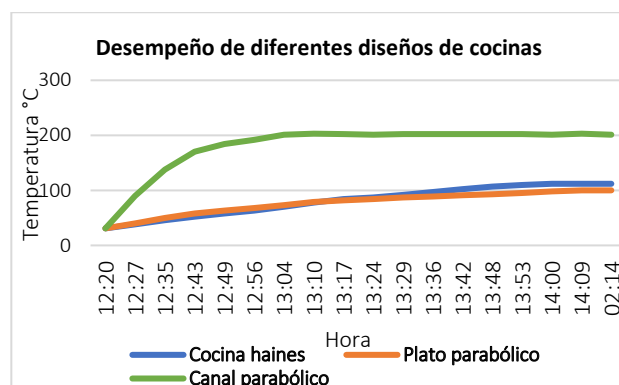


Fig. 15. Medición de temperatura en cocina solar comparada contra otros dos prototipos propios.

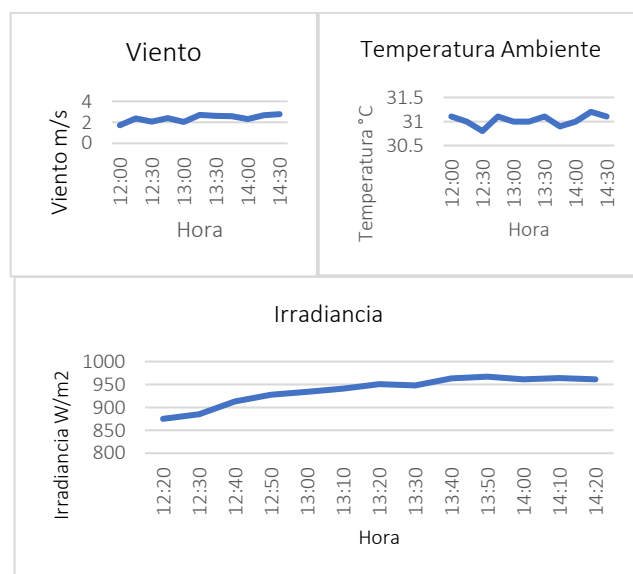


Fig. 16. Condiciones medio ambientales en las que se realizan las pruebas comunes.

Como prueba final que valide la funcionalidad de la propuesta, se hornea una galleta hecha de masa de trigo y se compara contra el proceso hecho en un horno convencional (Figs. 17 y 18). El tiempo de cocción de la galleta en un horno convencional a 180 °C es de 15 minutos, mientras que para la cocina solar a 230 °C es de 30 minutos. Esta prueba se realizó el 28 de agosto del 2022, en días posteriores se repite el experimento, obteniéndose los mismos resultados.

IV. CONCLUSIONES

Se ha presentado un prototipo de cocina solar, amigable con el medio ambiente que reutiliza materiales especializados reciclados. El desempeño térmico es aceptable comparado contra otros prototipos desarrollados en situaciones comparables. El desempeño del horno es también adecuado a partir de la consistencia y sabor del alimento cocinado, una galleta de trigo. Se ha probado que, aunque el tiempo de cocción es mayor comparado contra una opción convencional, el uso de estos prototipos son una opción real en situaciones donde utilizar combustibles fósiles resulta o muy caro o difícil de conseguir. El desarrollo y exposición de esta propuesta ha permitido por otro lado trabajo en equipo entre alumnos que se integran por primera vez a un proyecto de difusión como este; así como la generación de experiencia práctica y de conocimiento a detalle de aspectos técnicos específicos.



Fig. 17. Cocción de galleta en cocina solar.



Fig. 18. Galleta obtenida.

REFERENCIAS

- [1] MESTRY, M. P., et al. REVIEW OF EVACUATED TUBE BASED SOLAR OVEN. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2021. P. 807-810..
- [2] OMARA, Adil AM, et al. Improving solar cooker performance using phase change materials: A comprehensive review. Solar Energy, 2020, vol. 207, p. 539-563.
- [3] SABIHA, M. A., et al. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 51, p. 1038-1054.
- [4] HEBBAR, Gautama, et al. Design of solar cooker using evacuated tube solar collector with phase change material. Materials Today: Proceedings, 2021, vol. 46, p. 2888-2893
- [5] VIJAYAKUMAR, P., et al. Development of Solar Oven employed with Parabolic Concentrator. En IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. p. 012009..
- [6] BELLOS, Evangelos; TZIVANIDIS, Christos. Alternative designs of parabolic trough solar collectors. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, vol. 71, p. 81-117.
- [7] HAINES COOKERS <https://hainessolarcookers.com/products/haines-2-solar-cooker> recuperado en 15 gosto – 2022.

BIOGRAFÍAS



YAIR GARCÍA MORÁN Estudiante de Ingeniería en Energías Renovables, desarrolla proyectos relacionados con los sistemas de Solidworks y Autocad.



ADRIÁN TINTOS GÓMEZ Profesor Investigador, Oceanólogo Químico, Maestro en Acuicultura y Dr. En Biología Marina y Acuicultura. Se le conoce por sus actividades de extensionismo acuícola y fomentar el Desarrollo Regional Sustentable y sus investigaciones en el área de acuicultura y ecotoxicología. Se desempeñó en la Universidad de Colima como profesor investigador titular en la Facultad de Ciencias Marinas (pensionado). Actualmente es PTC Titular C en la Universidad Tecnológica de Manzanillo y miembro del CA: Ingeniería y Desarrollo Tecnológico. Es Profesor Honorífico en la Universidad de Guadalajara y miembro del Núcleo Académico Básico del Programa de doctorado BEMARENA. Pertenecer al SNI nivel I.



JOEL SALOME BAYLON Profesor en Energías Renovables, Dr. en Ingeniería Eléctrica y Maestro en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización. Ha desarrollado diversos proyectos con la industria y publicado diversos trabajos en diferentes áreas, como la eléctrica, robótica, instrumentación, control, energías renovables y acuicultura.



MARCO PEREZ GONZALEZ Maestro en Ciencias por el CINESTAV (2001). Profesor por asignatura en la Universidad Tecnológica de Manzanillo desde 2010. Sus intereses académicos son el análisis y simulación del control y operación de sistemas eléctricos de potencia. La instrumentación virtual y el empleo de herramientas TICS para el desarrollo de recursos digitales de enseñanza de las ciencias básicas en programas de pregrado de ingenierías.

Dimensionamiento óptimo de micro-red para la DICIS - Sede Salamanca

MELANNY JULISA RAMIREZ LARA, JOSÉ MERCED LOZANO GARCIA, XIOMARA GONZÁLEZ RAMÍREZ

Ingeniería Eléctrica, DICIS, Universidad de Guanajuato.

mj.ramirezlara@ugto.mx

jm.lozano@ugto.mx

x.gonzalez@ugto.mx

RESUMEN Actualmente, el cambio climático es el mayor problema de la naturaleza que afecta a todos los habitantes del planeta desde cualquier región, y se manifiesta en un sinnúmero de desastres naturales de acuerdo con las condiciones climatológicas de cada lugar. Uno de los principales causantes de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es el crecimiento de la población mundial y con ello, la demanda de energía eléctrica para su propio consumo, dichos factores influyen de manera importante en el calentamiento global. Dicho esto, se propone el diseño de una micro-red mediante el software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), para modelar el abastecimiento del consumo de energía en la División de Ingenierías del Campus Irapuato – Salamanca (DICIS). HOMER es una de las herramientas más empleadas para el dimensionamiento óptimo y el análisis técnico – económico de generación con fuentes de energía renovables.

PALABRAS CLAVE - Micro-red, modelado, energías renovables, HOMER.

I. INTRODUCCIÓN

En el siglo XX se trabajó con energías contaminantes tales como el petróleo, el gas o el carbón. En el siglo XXI se abren las puertas a las energías renovables, que además de limpias son inagotables, y se perfilan como la gran solución para un mundo donde el consumo de energía es indispensable. En general, los objetivos primordiales de las naciones en cuanto a recursos energéticos radican en abastecer de energía a todas sus comunidades con precios competitivos, calidad y eficiencia a lo largo de la cadena productiva, por lo que se hace necesario promover el uso eficiente de la energía, así como el desarrollo y aprovechamiento eficiente de fuentes de energías renovables. En particular, México estableció el compromiso ante la Convención Marco de las Naciones Unidas de reducir en un 25% sus emisiones de GEI para el 2030 [1]. Esta meta aspiracional implica retos que no son fáciles de alcanzar, pero sin duda constituye una excelente oportunidad para que desde todos los ámbitos de actuación se desarrollen iniciativas de carácter innovador, incluyentes, replicables y sobre todo sustentables que contribuyan a la protección y preservación del planeta. Uno de esos ámbitos es el energético, en el que ya se vienen desarrollando importantes programas y reformas en el país; de los cuales se abarcan no solo el uso de tecnologías renovables sino también la implementación de programas y medidas de eficiencia energética [2].

Uno de los desarrollos energéticos en auge por su innovación, que permiten la generación de energía limpia con fuentes inagotables, son las micro-redes, las cuales son pequeñas redes, o circuitos capaces de generar energía, y que, además, también pueden funcionar de manera autónoma. Hoy en día, las micro-redes están llamadas a jugar un papel importantísimo en un futuro cercano. No solo sirven para

optimizar esa generación de energía o llevarla a lugares de difícil acceso, sino que también son una pieza importante para un futuro más sostenible. Las micro-redes, pueden operar a la red eléctrica, es decir, interconectadas a la red, pero también pueden funcionar por sí solas, aisladas de la red general. Por lo tanto, si hay un corte en el servicio o una avería de cualquier tipo, la micro-red puede seguir generando electricidad.

Las micro-redes se conectan a la red general a través de un punto que mantiene el voltaje al mismo nivel, pero si detecta problemas, se puede desconectar y no verse afectada. Las fuentes de energía que van a suministrar a las micro-redes, pueden recibir energía de paneles solares, baterías o generadores distribuidos [3].

Durante la última década se han realizado numerosos estudios, que modelan la operación de diferentes sistemas energéticos renovables, siendo el software HOMER uno de los más empleados. Entre dichos estudios se encuentran el estudio de factibilidad de un sistema híbrido eólico donde se puede evaluar la influencia de la velocidad del viento, del costo fotovoltaico y del precio del diésel en soluciones óptimas [3]. El simulador HOMER también se ha usado para realizar el análisis económico de un sistema híbrido eólico-diésel autónomo y se ha comparado con la opción de utilizar sólo la red eléctrica convencional [4]. En otro estudio, se han evaluado las condiciones bajo las cuales los sistemas fotovoltaicos distribuidos con sistema de almacenamiento competirían con la red eléctrica convencional [5], o qué tanto se podría sustituir con ellos el suministro de electricidad proveniente de la red [6]. Actualmente los softwares para simular la integración de fuentes renovables de energía dentro de Sistemas Eléctricos de Potencia ofrecen diversas herramientas para diseñar, simular y analizar el

comportamiento completo del sistema resultante; no obstante, el software es una herramienta muy completa para estudios relacionados con el dimensionamiento óptimo de micro-redes basadas en energía renovables. Por esta razón en el presente trabajo se ha optado por la utilización del software HOMER en su versión Pro para el análisis y diseño de una micro-red para la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) de la Universidad de Guanajuato.

Un estudio de este tipo implicaría determinar la influencia de variables como costos capitales, reemplazamiento de los módulos fotovoltaicos, precio de la electricidad comprada a CFE (Comisión Federal de Electricidad), tasa de interés anual, carga promedio de consumo y radiación solar promedio diaria. El llegar a implementar un proyecto de esta magnitud, coadyuva con el cumplimiento de las metas nacionales en materia energética, además de que, contribuiría con la reducción de emisiones contaminantes a nivel local.

Por tanto, conociendo las bondades que tiene el software HOMER se buscará representar las características del consumo del Sistema Eléctrico de la DICIS, además de condiciones tarifarias que se tienen contratadas, con el objetivo de analizar la configuración óptima para la red de suministro eléctrico de acuerdo con las herramientas que ofrece el software HOMER. Las actividades principales que se realizan en la División de Ingenierías son actividades académicas, de investigación y administrativas.

En relación con el tema energético y su constante uso y/o necesidad, el sistema eléctrico de toda esta infraestructura tiene un uso aproximado de 12 horas diarias, incluyendo equipos e instrumentos de los edificios y laboratorios. Por esta razón, y al ser una verdadera necesidad para el desarrollo de actividades académicas, de investigación y administrativas, tanto para alumnos y docentes, como para personal administrativo, se considera muy importante hacer un estudio de gestión energética para esta División. Para tal propósito, dentro del problema de dimensionamiento óptimo de la micro-red se deberán tomar en cuenta los siguientes aspectos: *predicción de las condiciones climatológicas en la zona de instalación, condiciones de operación, topología de la red convencional, tipo de tarifa eléctrica contratada, datos de consumos*, entre otros. Finalmente, mediante la simulación del sistema eléctrico, en términos de su consumo energético a lo largo del día, y de las condiciones meteorológicas locales, se obtendrán diferentes topologías para la micro-red, capaces de abastecer en su totalidad la demanda energética. A partir de estas configuraciones se analizará la más conveniente desde el punto de vista económico, ambiental y operativo.

II. DESARROLLO

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) son claves para el bienestar y el progreso de la sociedad moderna. Estos

sistemas proporcionan el suministro de energía eléctrica con la calidad adecuada para operar los sistemas industriales, residenciales, comerciales, entre otros, además de suministrar energía a los sistemas de telecomunicaciones y cómputo. El punto de inicio de los sistemas eléctricos son las plantas generadoras que generalmente convierten la energía mecánica a energía eléctrica; esta energía es entonces transmitida a través de grandes distancias hacia los centros de consumo mediante sistemas de transmisión, para finalmente ser entregada a los usuarios a través de las redes de distribución [7].

A. ANÁLISIS DE LA TARIFA ELÉCTRICA

Debido a que en este trabajo de tesis se propone como caso de estudio el dimensionamiento de una micro-red interconectada a la red, esto implica que, el suministrador de energía eléctrica, CFE en este caso, seguirá abasteciendo o compensando la demanda de energía que la micro-red no cubra en su totalidad. Por esa razón, en esta subsección se expone el análisis de consumo y costo tarifario contratado para la División de Ingenierías Campus Irapuato – Salamanca, ya que esta información será fundamental para que el software HOMER Pro determine la configuración óptima para la micro-red que se propondrá para la DICIS.

Los sistemas de Transmisión regional o Distribución local se clasifican por niveles, en función de la tensión nominal de operación. En la [Tabla I](#), se muestran los distintos niveles de tensión eléctrica.

De acuerdo con la información de la CFE, existen 12 categorías tarifarias, las cuales están clasificadas en dos grandes rubros, *tarifas específicas* y *tarifas generales*. Dentro de las *tarifas específicas* se encuentran tarifas para servicio doméstico, servicio público, agrícolas, temporal y acuícola, mientras que dentro de las *tarifas generales* están las tarifas para baja, media y alta tensión, y de servicio de respaldo e interrumpible.

A continuación, se define la aplicación de las tarifas en media tensión ya que la carga conectada en el estudio pertenece a este grupo tarifario, específicamente en la tarifa H-M (Media Tensión Horaria) de acuerdo con el esquema tarifario anterior y nombrada como GDMTH (Gran Demanda Media Tensión Horaria) en el actual esquema:

TABLA I. NIVELES DE TENSIÓN ELÉCTRICA [8].

Tipo	Valor [kV]
Baja tensión	$V \leq 1$
Media tensión	$1 < V \leq 35$
Alta tensión a nivel subtransmisión	$35 < V \leq 220$
Alta tensión a nivel transmisión	$V \geq 220$

- **Tarifa H-M** (Media Tensión Horaria): esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda menor de 100 [kW] o más.

- **Tarifa H-MC** (Media Tensión Horaria Baja California): esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen energía a cualquier uso, suministrados en media tensión en la región Baja California, con una demanda de 100 kilowatts o más, y que, por las características de utilización de su demanda, soliciten inscribirse en este servicio, el cual tendrá vigencia mínima de un año.

B. ESTUDIO TARIFARIO

La tarifa contratada por la Universidad de Guanajuato para la DICIS es la tarifa GDMTH ante el suministrador de energía, que en este caso se trata de la CFE. La tarifa GDMTH, se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda igual o mayor a 100 kW. En este caso la División de Ingenierías tiene una demanda de carga contratada de 645 kW, por lo tanto, se examinará la tarifa correspondiente aplicada a la región Sur, zona geográfica a la que pertenece todo el estado de Guanajuato.

El desglose de costos correspondientes a la tarifa GDMTH, para el mes de febrero del año 2020, se muestran en la [Tabla II](#), en la que se puede observar que particularmente, y como se mencionó anteriormente, esta tarifa cuenta con tres costos de energía variable: tarifa base, intermedia y punta. La *tarifa base* es fácil de identificar, y está caracterizada de acuerdo por los horarios de consumo estipulados por CFE. La *tarifa intermedia*, su precio es un poco más alto que el de la *tarifa base*, y se aplica en el horario intermedio que indica CFE. La *tarifa punta* es la más costosa, debido a que corresponde al horario de mayor consumo. Generalmente, en los estudios de eficiencia energética se busca minimizar, en la medida de lo posible, el consumo en el horario punta, para tener un mayor ahorro económico respecto a las tarifas mencionadas.

TABLA II. COSTOS UNITARIOS PARA LA TARIFA GDMTH.

Int. Horario	Cargo	Unidades	Feb 2020
-	Fijo	\$/mes	464.57
Base	Variable (Energía)	\$/kWh	0.7523
Intermedia	Variable (Energía)	\$/kWh	1.4680
Punta	Variable (Energía)	\$/kWh	1.6962
-	Distribución	\$/kW	95.87
-	Capacidad	\$/kW	342.60
-	Transmisión	\$/kWh	0.1679
-	CENACE*	\$/kWh	0.0080
-	ScnMEM(*)**	\$/kWh	0.0056

*Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).

**Servicios Conexos no incluidos en el Mercado Eléctrico Mayorista (ScnMEM).

Para comprender los cargos asociados con la tarifa por concepto del suministro básico de energía eléctrica, descritos en este apartado, y que corresponden a la integración de los cargos por Transmisión, Distribución, Operación del CENACE, Operación del Suministrador Básico, Servicios Conexos no incluidos en el MEM (Mercado Eléctrico Mayorista), Energía y Capacidad, a continuación se describen algunos conceptos que son considerados al momento de hacer el análisis de consumo dentro de la tarifa GDMTH [9]-[10]:

- **Mínimo mensual:** El importe que resulta de aplicar el cargo por la operación del Suministrador de Servicios Básicos correspondiente a esta categoría tarifaria.
- **Demanda contratada:** La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, ni menor de 100 kW o la capacidad del mayor motor o aparato instalado. En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.
- **Horarios:** Para los efectos de la aplicación de esta tarifa, se utilizarán los horarios locales oficialmente establecidos. Por días festivos se entenderán aquellos de descanso obligatorio, establecidos en el artículo 74 de la Ley Federal del Trabajo, a excepción de la fracción IX, así como los que se establezcan por Acuerdo Presidencial.
- **Periodos de punta, intermedio y base:** Estos periodos se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año, como se describe en el apartado 3.3.4 del Anexo Único del Acuerdo A/064/2018 [10].

Los horarios establecidos para los costos de consumo en tarifa base, intermedia y punta, de acuerdo con la zona Bajío estipulados por CFE son de suma importancia para poder realizar un estudio tarifario adecuado, estos se pueden consultar en [8].

Es importante mencionar que el consumo en [kW] que se tenga medido y registrado en la lectura del horario punta, es el consumo que será considerado para calcular el cobro de la demanda que se tenga para el mes facturado, ahora conocida como demanda [kW Máx Año Móvil], anteriormente conocida como Demanda Facturable, la cual se determina con la [Ec. \(1\)](#).

Demanda máxima - Criterios para el cobro por Capacidad y Distribución.

- **Cargo por Capacidad:** la demanda máxima a la que se deberá aplicar los cargos por capacidad expresados en \$/kW-mes, será la mínima entre los valores que se definan a continuación:

$$\min \left\{ D_{max,punta} \left[\frac{Q_{mensual}}{24 * d * F.C.} \right] \right\} \quad (1)$$

Donde: $D_{max,punta}$ es la demanda máxima coincidente con el periodo horario de punta medida en kW; $Q_{mensual}$ es el consumo mensual registrado en el mes de facturación en kWh, d días del periodo de facturación, y $F.C.$ es el factor de carga correspondiente, tomado del apartado 3.3.1 del Anexo Único del Acuerdo A/064/2018 [10].

- **Factor de carga (F.C):** es la relación entre la demanda promedio de un grupo, y la demanda máxima del mismo.

Las consideraciones para calcular el cargo por capacidad como indica CFE establecen que: la demanda máxima a la que se deberá aplicar los cargos por capacidad expresados en \$/kW-mes, para los usuarios suministrados en baja y media tensión cuya demanda no se mide, será la obtenida por la Ec. (2), como se ilustra a continuación:

$$\begin{aligned} Demanda_{max,punta} &= \frac{Q_{mensual}}{24 * d * F.C} = \\ &= \frac{37,278}{24 * 29 * 0.57} = 94 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2)$$

Para comenzar el análisis de este estudio tarifario del recibo emitido por la CFE para DICIS, se observan en la Tabla III, las mediciones obtenidas para el periodo de facturación comprendido por 29 días. En esta tabla se muestra que el consumo en la tarifa punta es de 88 kW (periodo de consumo con mayor costo), este valor es menor al calculado en la Ec. (2), por lo tanto, el suministrador de energía utilizará este valor para calcular el costo por concepto de demanda, ya que siempre tomará el valor menor que dé como resultado en dicha ecuación.

TABLA III. COSTO DE LA DEMANDA (\$/KWH-MES).

LECTURA ACTUAL	
CONCEPTO	
kWh Base	8,973
kWh Intermedia	24,262
kWh Punta	4,043
Total:	37,278
kW Base	70
kW Intermedia	162
<u>kW Punta</u>	<u>88</u>
kW Max	94
kV Arh (kVA reactivo-hora)	11,697
Factor de Potencia (F.P) %	95.41

En la Tabla IV, se muestran a manera de resumen algunos datos relevantes y que serán considerados para realizar el estudio tarifario correspondiente a la DICIS.

En las Tablas V y VI, se presenta el desglose de costos de la energía en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), esta información es necesaria para realizar los cálculos asociados con el cobro por concepto de consumo eléctrico correspondiente a la demanda contratada por usuarios dentro de la tarifa de media tensión horaria, como en el presente caso de estudio.

TABLA IV. RESUMEN DEL CONSUMO DEL PERIODO FACTURADO.

Consumo total Feb 2020 (kW)	118
Consumo total Feb 2020 (kWh)	32,278
Factor de potencia %	94.14
Factor de carga %	37
Demanda contratada (kW)	645
Carga conectada (kW)	645

TABLA V. COSTOS DE LA ENERGÍA EN EL MERCADO ELECTRICO MAYORISTA.

Concepto	\$	\$/kW	\$/kWh	Importe [MXN]
Suministro	464.57	0	0	464.57
Distribución	0	9,011.78	0	9,011.78
Transmisión	0	0	6,258.98	6,258.98
CENACE	0	0	298.22	298.22
Generación Base	0	0	6,750.39	6,750.39
Generación Intermedio	0	0	35,616.62	35,616.62
Generación Punta	0	0	6,857.74	6,857.74
Capacidad	0	30,148.80	0	30,148.80
ScnMEM(')	0	0	208.76	208.76
Total	464.57	39,160.58	55,990.71	95,615.86

TABLA VI. DESGLOSE DEL IMPORTE A PAGAR.

Concepto	Importe [MXN]
Cargo Fijo	464.57
Energía	95,615.86
Bonificación Factor de Potencia	1,338.62
Subtotal	94,227.24
IVA 16%	15,084.35
Facturación del Periodo	109,361.59
Derecho de Alumbrado Público	1,921.45
Adeudo Anterior	96,763.26
Su pago	96,763.00
Total	111,283.04

Al comprender el concepto de costos y cargos, y realizando el análisis tarifario del mes de febrero del año 2020 para la tarifa de Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH) contratada para la DICIS de la Universidad de Guanajuato, se tendrá un criterio más amplio para la evaluación de este trabajo, ya que esta información se utilizará en el software HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), herramienta utilizada para el dimensionamiento óptimo de la micro-red propuesta para la División de Ingenierías.

C. SOFTWARE HOMER PRO

Este software de optimización cuenta con las herramientas y componentes necesarios para la realización de proyectos de dimensionamiento óptimo de micro-redes que los usuarios pudieran llegar a requerir. A su vez, el software permite hacer un análisis económico del proyecto, lo cual es un punto esencial por analizar en cualquier caso de estudio, pues esto permitirá determinar su dimensión y conocer los beneficios que se obtendrán con la micro-red antes de implementarla.

La optimización es una herramienta importante en la ciencia para la toma de decisiones y en el análisis de sistemas físicos. Para utilizarla, primero se debe identificar algún objetivo, es decir, una medida cuantitativa del rendimiento del sistema bajo estudio. Este objetivo podría ser ganancia, tiempo, energía potencial o cualquier cantidad o combinación de cantidades que pueda representar un número. El objetivo depende de ciertas características del sistema, llamadas variables o incógnitas. La finalidad es encontrar valores de las variables que optimizan el objetivo. El proceso de identificación de objetivos, variables y restricciones para un problema dado se conoce como modelado. La construcción de un modelo apropiado es el paso más importante en el proceso de optimización.

HOMER Pro cuenta con un optimizador económico que busca la mejor combinación y dimensión de los distintos componentes que conforman la micro-red, resultando el dimensionamiento óptimo con base en el costo actual neto del proyecto NPC (por sus siglas en inglés, Net Present Cost) considerando toda su vida útil [4]. Esta herramienta permite, además, realizar un análisis económico y energético profundo de las cantidades de energía generada, consumida y desaprovechada por cada componente del sistema a fin de facilitar el diseño (o mejora) de la micro-red estudiada. Los principales parámetros económicos que se deben ingresar son: la tasa de inflación y la tasa de descuento nominal, que se utilizan para calcular el costo total del proyecto referido al presente (NPC). Se deben ingresar también costos de cada componente de la micro-red, costos de reemplazamiento, costos de operación y mantenimiento, precio de combustible, etc. Para las restricciones operativas, se destacan los siguientes parámetros: porcentaje mínimo de generación

renovable, máxima capacidad anual de corte (%), cantidad anual de energía comprada y vendida a la red, las penalizaciones por emisiones de gases de efecto invernadero y por exceso de consumo de energía de la red. La Fig. 1, muestra un diagrama conceptual del funcionamiento del algoritmo de optimización del software HOMER Pro.

D. MODELADO Y SIMULACIÓN

Se presenta el desarrollo del dimensionamiento óptimo de la micro-red para la DICIS, con las herramientas encontradas en el software de optimización HOMER Pro. Dado que el software permite hacer un análisis de la relación costo-beneficio obtenido para el sistema modelado y, lo compara con las diferentes propuestas de diseño que HOMER Pro va creando de manera automática, mostrando diferentes configuraciones para la misma micro-red, la selección de la configuración de micro-red más adecuada para la DICIS, se realiza bajo este criterio y buscando el mayor beneficio económico.

Al ingresar al programa, lo primero que se tiene que hacer es configurar la ubicación del lugar donde se llevará a cabo la implementación del proyecto. En el marco económico, desde la primera ventana, se le permite al usuario ingresar la tasa de interés y la tasa de inflación, para este caso de estudio se consideraron los valores de 7% y 6.70%, respectivamente (Fig. 2). El periodo de vida útil del proyecto es de 20 años, dato que también se ingresa en este primer paso.

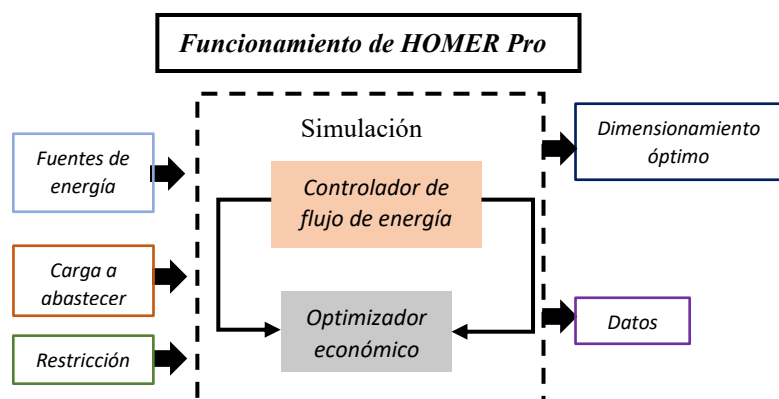


Fig. 1. Diagrama del funcionamiento básico del algoritmo de optimización de HOMER.

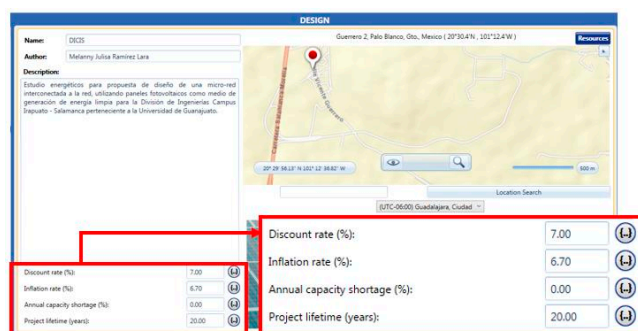


Fig. 2. Ventana para crear un Nuevo Proyecto, donde se ingresan parámetros económicos.

Una vez ubicado el proyecto, se procede a añadir los datos del perfil de carga eléctrica, en este caso se seleccionó un perfil de carga ‘Industrial’ debido a que el campus se encuentra conectado a una demanda de 645 kW a la red de CFE. Para este perfil de carga industrial, el nivel máximo de potencia es de 1,000 kW, esto se muestra en la Fig. 3. Es importante mencionar que los datos de carga que se ingresaron para obtener el diagrama de la Fig. 3, se consultaron con un recibo emitido por CFE según el contrato con la DICIS, por lo tanto, el software genera una tabla de datos que corresponden a la carga eléctrica durante 24 horas, para cada día de la semana y fines de semana de cada mes y a lo largo de un año.

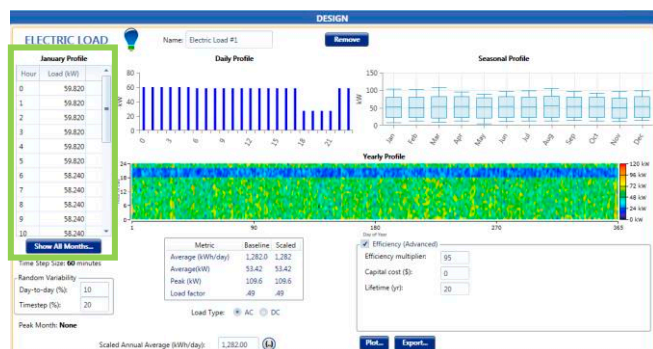


Fig. 3. Diagrama del comportamiento de la carga eléctrica a lo largo de un año.

Por otro lado, esta propuesta de diseño consiste en un sistema no aislado, por lo que se le tiene que agregar y considerar una conexión a la red convencional. En este caso, se hace un contrato con la CFE que es la encargada de suministrar energía eléctrica a esta institución. Se selecciona la opción ‘GRID’ de la barra de componentes de HOMER Pro para agregar la configuración de la red al diseño propuesto.

La Fig. 4 presenta la configuración para la demanda de energía que se tiene durante el mes facturado, es decir, HOMER Pro pide al usuario ingresar el costo por kW durante un mes.

Finalmente, al tener claros los parámetros de demanda, Fig. 5, carga y costos para cada tarifa de acuerdo con los horarios estipulados por el suministrador de energía, se agrega la configuración de todos los componentes de la micro-red (paneles fotovoltaicos, inversores, generador diesel y un banco de baterías). Una vez terminado el diseño de la micro-red, en el que se incluyen los requerimientos de carga y todos los parámetros de configuración para cada uno de los componentes, se obtiene el diagrama esquemático mostrado en la Fig. 6. HOMER Pro nos genera un resumen de resultados dentro y fuera del software, es decir, se puede generar un reporte en formato .pdf diseñado y explicado por dicho software.

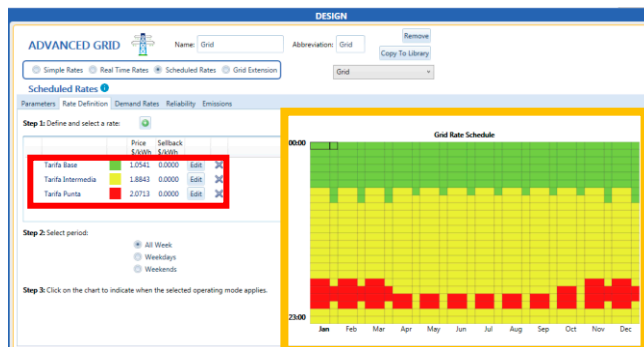


Fig. 4. Configuración de los costos para cada tarifa de acuerdo con el horario de consumo durante un año.

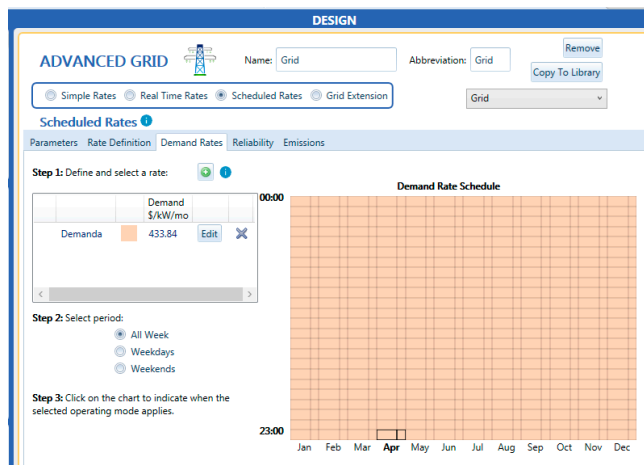


Fig. 5. Parámetros de entrada de acuerdo con el costo de la demanda contratada durante las 24 horas del día en un año.

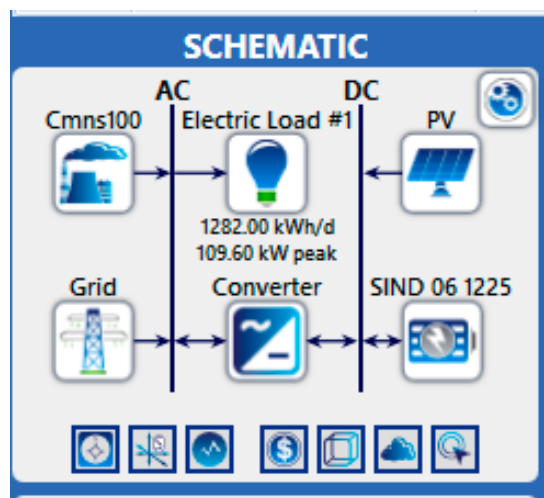


Fig. 6. Diagrama esquemático del diseño de la micro-red en HOMER Pro.

III. RESULTADOS

Inicialmente, para el sistema bajo estudio se presentó la dificultad de determinar una solución óptima, ya que el algoritmo de optimización de HOMER Pro no considera algunas comisiones y cargos de energía tales como concepto de Transmisión, comisión a CENACE y SnMEM’, así como el IVA del 16%. Para solucionar este problema, a cada tarifa con costo variable se le agregaron estos cargos, logrando obtener un mayor acercamiento a los cargos reales facturados

por el suministrador. También es importante mencionar que, para este trabajo, los horarios estipulados por CFE para el consumo de la tarifa base, intermedia y punta se adecuaron al algoritmo de HOMER Pro, es decir, se consideraron solamente meses completos y no por semanas como lo estipula el suministrador, además de considerar el fin de semana como un solo día. Por esta razón, se tuvo una variación de los resultados obtenido con HOMER Pro en el costo de la energía al compararlo con los resultados del recibo de CFE.

Una vez ejecutada la simulación, el software HOMER Pro determina una serie de configuraciones la micro-red propuesta. Cada una de las configuraciones varían en componentes y capacidad instalada lo que afecta parámetros económicos como la inversión inicial, el costo presente neto, el costo de operación y el costo de la energía, criterios a partir de los cuales se determina la opción óptima. Para el caso de estudio analizado, la DICIS, el software HOMER Pro determina una configuración de micro- red no aislada, conformada por paneles fotovoltaicos, inversores, un banco de baterías, y la red eléctrica.

IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la funcionalidad de una herramienta computacional muy completa para el desarrollo de proyectos de dimensionamiento óptimo de micro-redes, como lo es el software HOMER Pro, con la cual es posible implementar cualquier proyecto en diferentes niveles de tensión, ya sea residencial, comercial e industrial, por las facilidades de simulación que este software proporciona al usuario. No obstante, resulta evidente que no es suficiente con solo conocer el procedimiento que se debe seguir para utilizar el software, sino que además de los estudios previos que se requieren para configurar de manera adecuada la simulación, de tal forma que los resultados sean los más precisos posibles, es necesario tener la capacidad de análisis para dar la interpretación adecuada a los resultados obtenidos a fin de tomar las mejores decisiones sobre el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2018. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI). Tomado de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>.
- [2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2015. México comunica a ONU sus compromisos de mitigación y adaptación al cambio climático para el periodo 2020-2030. Tomado de: <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/mexico-comunica-a-onu-sus-compromisos-de-mitigacion-y-adaptacion-al-cambio-climatico-para-el-periodo-2020-2030>
- [3] <https://www.energyavm.es/que-son-las-micro-redes-y-por-que-seran-importantes>.
- [4] Homer Energy. 2020. <https://www.homerenergy.com/>
- [5] Getachew Bekele, Björn Palm. Feasibility study for a standalone solar-wind-based hybrid energy system for application in Ethiopia. *Applied Energy* [en línea], vol. 87, num. 2, 2010, pp. 487-495.

doi:10.1016/j.apenergy.2009.06.006. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy.

- [6] D. Saheb-Koussa, M. Koussa, M. Belhamel, M. Haddadi. Economic and environmental analysis for grid-connected hybrid photovoltaic-wind power system in the arid region. *Energy Procedia* [en línea], vol. 6, abril 2011, pp. 361-370. doi:10.1016/j.egypro.2011.05.042. Available online at www.sciencedirect.com.
- [7] Peter Bronski, Jon Creyts, Leila Guccione, Maite Madrazo, James Mandel, Bodhi Rader, and Dan Seif, Peter Lilienthal, John Glassmire, and Jeffrey Abromowitz, Mark Crowdis, John Richardson, Evan Schmitt, Helen Tocco. The economics of grid defection: when and where distributed solar generation plus storage competes with traditional utility service. Rocky Mountain Institute, Boulder, Colorado, 2014. Disponible en http://www.rmi.org/electricity_grid_defection.
- [8] <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx> Consulta: 13/01/2021
- [9] Anexo Único del Acuerdo A/058/2017, Comisión Federal de Electricidad.
- [10] Anexo Único del Acuerdo A/064/2018, Comisión Federal de Electricidad
- [11] J. M. Pearce, "Photovoltaics a path to sustainable futures," *Futures*, vol. 34, no. 7, pp. 663-674, 2002.
- [12] S. Tamseel and M. Parvez, "A review of solar powered generation by photovoltaic technology," *Invertis Journal of Renewable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 17-28, 2017.
- [13] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625-1636, 2011.
- [14] K. W. Boer, *Survey of semiconductor physics*. Wiley New York, 2002.
- [15] Y. Tutira Cáceres, "Metodología para el Diseño Óptimo de Micro-redes Eléctricas en Instalaciones Industriales", Tesis de Maestría, DICIS, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto, 2018.

BIOGRAFÍAS



MELANNY JULISA RAMÍREZ LARA Ingeniera Electricista, egresada de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México. Ejerce y forma parte del grupo Invercost UG y actualmente se ha postulado como aspirante para realizar sus estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato para especializarse en el área de instrumentación y continuar en proyectos y líneas de investigación sobre micro-redes, generación de energías limpias, así como análisis y ejecución de dichos proyectos a nivel industrial.



JOSÉ M. LOZANO-GARCÍA recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, micro-redes y redes inteligentes.



XIOMARA GONZÁLEZ RAMÍREZ obtuvo el grado de Ingeniera Electricista en la Universidad del Valle (Cali, Colombia) en 2008; obtuvo el grado de Maestría en 2010 y el grado de Doctorado en 2015 en Ingeniería Eléctrica en la especialidad de Sistemas Eléctricos de Potencia en el CINVESTAV-Guadalajara. Ha trabajado en el campo de sustentabilidad energética con CONACYT y la Secretaría de Energía. En la actualidad es profesora en la Universidad de Guanajuato en el Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Análisis de fallas trifásicas considerando la integración del Compensador Serie Controlado por Tiristores en el sistema de potencia

JOSÉ MIGUEL GARCÍA GUZMÁN, IRIS CONSUELO NAJAR SANTILLÁN, JUAN PABLO RAZÓN GONZÁLEZ, MARÍA DEL REFUGIO GONZÁLEZ PONCE

Tecnológico Nacional de México – Campus Irapuato.

jose.gg@irapuato.tecnm.mx

LIS18110098@irapuato.tecnm.mx

juan.rg@irapuato.tecnm.mx

mariadelrefugio.gp@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN En este trabajo se presenta un análisis de fallas trifásicas balanceadas considerando la integración del Compensador Serie Controlador por Tiristores (CSCT) en el sistema eléctrico de potencia. En tal sentido, el modelo del CSCT se integra al sistema de potencia para controlar el flujo de potencia activa a un valor especificado, entonces se lleva a cabo un estudio de fallas balanceadas para calcular la matriz de impedancia de bus y posteriormente determinar la corriente de cortocircuito en los nodos y en los elementos de transmisión, así como la capacidad de cortocircuito del sistema de potencia. Diversos casos de estudio con el sistema de potencia de 5 y 39 nodos son llevados a cabo. Los resultados muestran que cuando el CSCT realiza su acción de control la capacidad y corriente de falla se incrementan de manera considerable en los nodos cercanos a la línea donde se conecta el dispositivo.

PALABRAS CLAVE - CSCT, corriente de cortocircuito, capacidad de cortocircuito.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la potencia demandada hace necesario un aumento de la capacidad de generación y transmisión del sistema de potencia. Sin embargo, debido a las restricciones medioambientales y económicas, la construcción de nuevas líneas no puede mantener el ritmo de crecimiento de la capacidad de transmisión requerida por el sistema de potencia (García, 2011). De este modo, las compañías suministradoras buscan diversas formas para utilizar de manera eficiente las líneas existentes que permitan satisfacer los requerimientos de transmisión de potencia. En las últimas décadas los dispositivos conocidos como Sistemas Flexibles de Transmisión en CA (SIFLETCA) se han convertido en una forma útil para retrasar la construcción de líneas nuevas mediante el aumento de la capacidad de transmisión de potencia de las líneas existentes. El CSCT es uno de los dispositivos SIFLETCA más utilizados para mejorar la operación de los sistemas de potencia mediante la compensación reactiva de la impedancia serie de las líneas de transmisión, lo que permite controlar el flujo de potencia activa a través de una línea a un valor especificado (García, 2011; Hingorani, 1994, IEEE PES, 1996). El esquema general del CSCT consiste de un banco de capacitores conectado en paralelo con un Reactor Controlado por Tiristores (RCT) [5, 6], el cual puede ser representado mediante un modelo de reactancia controlable o un modelo de ángulo de disparo. El CSCT es un controlador que puede aumentar o disminuir de forma rápida y continua la

impedancia serie de la línea de transmisión, por lo que, lleva a cabo una compensación en forma capacitiva o inductiva serie en un amplio rango de condiciones de operación [7, 8].

Gracias a la electrónica de potencia el CSCT puede variar su impedancia equivalente de forma casi instantánea, lo que le permite reducir la corriente de falla en la primera mitad del ciclo [9] y responder de forma rápida a transitorios ocurridos en el sistema de potencia. Además de utilizar el CSCT para controlar el flujo de potencia activa, muchos estudios, meramente teóricos, han demostrado que el CSCT puede utilizarse como un dispositivo limitador de corriente de cortocircuito [10, 11, 12, 13, 14], pero hasta el momento en la revisión del estado del arte no se ha reportado el uso de este controlador serie en una operación de doble propósito, en la que el compensador controle el flujo de potencia activa en una línea y, a su vez, sea capaz de limitar la corriente de cortocircuito ante la ocurrencia de una falla en el sistema. Es importante mencionar que los dispositivos SIFLETCA tienen diversas restricciones para ser utilizados en aplicaciones de limitación de corriente de cortocircuito, ya que se requieren dispositivos de control y componentes sofisticados que puedan responder con rapidez y al mismo tiempo soportar la corriente de falla, lo que hace que tengan un alto costo de inversión [15, 16]. Por lo que, la aplicación de estos dispositivos generalmente se restringe al control de parámetros eléctricos del sistema de potencia, utilizando dispositivos externos para efectos de limitación de corriente de cortocircuito.

Las aplicaciones prácticas más comunes del CSCT consisten en incrementar: a) el flujo de potencia activa a través de una línea, b) los límites de estabilidad estáticos de las líneas y c) la capacidad de transmisión de potencia. En las aplicaciones mencionadas, el dispositivo debe operar en forma capacitiva para disminuir la impedancia serie de la línea donde se conecta. Con la disminución de esta impedancia la topología del sistema de potencia cambia, lo que hace que los valores de la impedancia equivalente de Thevenin vista desde los nodos de la red también disminuyan, causando un incremento, en muchas ocasiones significativo, de la capacidad de cortocircuito (C_{cc}) y la corriente de cortocircuito (I_{fk}) del sistema de potencia. Se ha demostrado que la integración del CSCT en el sistema de potencia puede provocar problemas en el sistema de protección, especialmente en la protección de distancia [17,18, 19]. Es claro que con los incrementos de la I_{fk} y de la C_{cc} se debe llevar a cabo un redimensionamiento de los equipos primarios de las subestaciones, una recalibración y reajuste de los relevadores de sobrecorriente, así como un nuevo estudio de coordinación de protecciones. Por esta razón, es necesario llevar a cabo un estudio de fallas para conocer los valores de la C_{cc} y la I_{fk} en las subestaciones del sistema, así como las corrientes que fluyen en los elementos de transmisión durante la falla.

En el contexto antes mencionado y teniendo en cuenta el aumento en las restricciones de seguridad y confiabilidad de los sistemas de potencia alrededor del mundo, en este trabajo se lleva a cabo un análisis de fallas trifásicas balanceadas y de capacidad de cortocircuito considerando la integración del CSCT en el sistema de potencia. La estructura del artículo es como sigue: en la Sección II se presenta el modelado del dispositivo CSCT. La formulación general para el análisis de fallas balanceadas y la capacidad de cortocircuito sin considerar y teniendo en cuenta el CSCT se describen en la Sección III y IV, respectivamente, mientras que en la Sección V se presentan los resultados de los casos de estudio. Finalmente, en la Sección VI se muestran las conclusiones obtenidas de este trabajo.

II. MODELADO DEL COMPENSADOR SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES

El CSCT ajusta el valor de su reactancia equivalente para controlar el flujo de potencia activa a través de una línea de transmisión a un valor especificado. En este sentido y desde una perspectiva de teoría de circuitos, el dispositivo CSCT puede ser representado mediante un modelo de ángulo de disparo y un modelo de reactancia controlable. Este último modelo es el utilizado en este trabajo para llevar a cabo el estudio de fallas trifásicas balanceadas considerando la operación del compensador serie.

A. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL CSCT

Una representación esquemática del circuito equivalente del CSCT es presentada en la Fig. 1. En la figura se observa que este dispositivo consiste en un banco de capacitores en paralelo con un Reactor Controlado, el cual consiste de un reactor conectado en serie con dos tiristores en anti-paralelo. Estos últimos son los elementos de control del CSCT [3, 20].

B. MODELO DE REACTANCIA CONTROLABLE DEL CSCT

Como se mencionó el modelo de reactancia controlable es el utilizado en este trabajo. La razón de ello, obedece a la región de resonancia del dispositivo que se presenta con el modelo de ángulo de disparo, en la cual no es posible obtener resultados por problemas de convergencia, de modo que el modelo de reactancia controlable, al no presentar región de resonancia [21], resulta más adecuado para llevar a cabo el análisis planteado en este trabajo. La variable de estado de este modelo del CSCT es la reactancia controlable X_{CSCT} , la cual se ajusta a un determinado valor, tal que permita variar la impedancia serie de la línea y controlar el flujo de potencia activa a un valor especificado [2]. Las ecuaciones de potencia inyectada del CSCT en el nodo k de la Fig. 1 para este modelo son dadas por las Ec. (1) y (2) como sigue,

$$P_i = \frac{V_i V_j}{X_{CSCT}} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{V_i^2}{X_{CSCT}} - \frac{V_i V_j}{X_{CSCT}} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (2)$$

Las ecuaciones para la inyección de potencia en el nodo m se obtienen intercambiando los subíndices k por m en las anteriores ecuaciones.

C. ECUACIÓN DE CONTROL DE FLUJO DE POTENCIA ACTIVA DEL CSCT

La finalidad del dispositivo CSCT es controlar a un valor especificado P_{sh} el flujo de potencia activa P_{ij} a través de la línea de transmisión conectada entre los nodos $i-j$. El CSCT se conecta entre los nodos $k-m$, como se muestra en la Fig. 2, para poder llevar la acción de control de potencia activa dada por la Ec. (3).

$$P_{ij} - P_{esp} = 0 \quad (3)$$

Donde el flujo de potencia P_{ij} corresponde a la potencia inyectada por el CSCT, dada por la Ec. (1), la cual depende de la reactancia del X_{CSCT} .

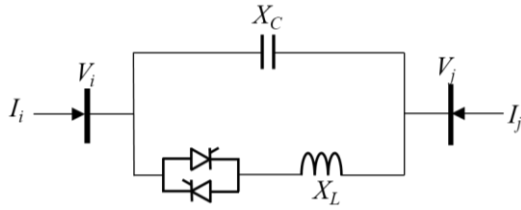


Fig. 1. Circuito equivalente del CSCT.

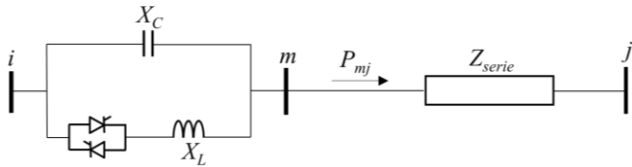


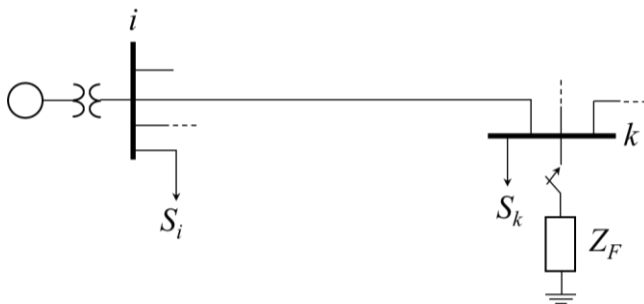
Fig. 2. Línea de transmisión compensada por el CSCT.

III. ANÁLISIS DE FALLAS TRIFÁSICAS BALANCEADAS

El análisis de fallas consiste en determinar los voltajes de bus para posteriormente calcular el nivel de cortocircuito nodal y las corrientes de las líneas de transmisión durante la falla, así como la capacidad de cortocircuito del sistema. La información obtenida de estos estudios sirve para ajustar los relevadores de los sistemas de protección y realizar el estudio de coordinación de protecciones.

A. ANÁLISIS DE FALLAS TRIFÁSICAS BALANCEADAS UTILIZANDO LA MATRIZ DE IMPEDANCIA DE BUS

El análisis de fallas se realiza de manera relativamente sencilla con el uso de la matriz de impedancia de bus. Considere un sistema de potencia de n -nodos como el mostrado en la Fig. 3 [22]. Cada generador es representado por una fuente de voltaje constante con sus reactancias adecuadas, las cuales pueden ser X_d'' , X_d' o X_d . Las líneas de transmisión se representan por su circuito equivalente π y todas las impedancias son expresadas en por unidad en una base común de MVA. Una falla trifásica balanceada se aplica en el nodo k a través de la impedancia de falla Z_F . Los voltajes de prefalla pueden obtenerse de un estudio de flujos de potencia o se definen iguales a 1 pu, que corresponde al valor nominal.


 Fig. 3. Aplicación de una falla trifásica balanceada en un sistema de potencia de n -nodos.

A partir del sistema de potencia anterior, es posible obtener la Ec. (4) mediante la cual se calculan los voltajes nodales durante la falla.

$$V_{F,bus} = V_{0,bus} + Z_{bus} I_{F,bus} \quad (4)$$

Donde $V_{F,bus}$ y $V_{0,bus}$ es el vector de voltajes nodales durante la falla y de prefalla, respectivamente. Z_{bus} es la matriz de impedancia de bus que contiene la topología del sistema de potencia e $I_{F,bus}$ corresponde al vector de las corrientes de falla que se presentan en cada nodo. En forma matricial la Ec. (4) se escribe como sigue,

$$\begin{bmatrix} V_{F1} \\ \vdots \\ V_{Fk} \\ \vdots \\ V_{Fn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{01} \\ \vdots \\ V_{0k} \\ \vdots \\ V_{0n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1k} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1} & \cdots & Z_{kk} & \cdots & Z_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nk} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_{Fk} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

En la Ec. (5) n es el número total de buses del sistema. Es importante notar que en el vector $I_{F,bus}$ todos los valores son cero, excepto en el nodo fallado y para una falla sólida el $V_{Fk}=0$. De este modo, es posible expresar la corriente de cortocircuito en el nodo k mediante la Ec. (6).

$$I_{Fk} = \frac{V_{0k}}{Z_{kk} + Z_F} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Una vez que se conoce el nivel de cortocircuito, es posible calcular el resto de los valores del vector $V_{F,bus}$, el cual contiene los voltajes nodales del sistema de potencia que se tienen durante la falla. Conocidos los voltajes nodales durante la falla se puede calcular la corriente que fluye a través de los elementos de transmisión I_{Fij} mediante la Ec. (7).

$$I_{Fij} = \frac{V_{Fi} - V_{Fj}}{Z_{ij}} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad i \neq j \quad (7)$$

En la Ec. (7) el término Z_{ij} representa la impedancia serie de los elementos de transmisión.

B. CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO DEL SISTEMA DE POTENCIA

La capacidad de cortocircuito es utilizada para dimensionar los equipos primarios de las subestaciones y para definir la capacidad interruptiva de los interruptores. La capacidad de cortocircuito en un bus k es una medida común de la robustez de un bus, se mide en MVA y se determina como el producto de las magnitudes del voltaje nominal y la corriente de falla, tal como se muestra en la Ec. (8) [22].

$$C_{CC} = \sqrt{3} V_{Lk} I_{Fk} \times 10^{-3} \text{ MVA} \quad (8)$$

Donde el voltaje línea-línea V_{Lk} se expresa en kV y la corriente de cortocircuito I_{Fk} en amperes.

En términos de la reactancia de bus X_{kk} , la capacidad de cortocircuito se determina de una manera más sencilla mediante la Ec. (9).

$$C_{CC} = \frac{S_B}{X_{kk}} \text{ MVA } i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Donde $X_{kk} = \text{re}\{Z_{bus, kk}\}$ es el vector que contiene la parte imaginaria de los elementos de la diagonal principal de la matriz de impedancia de barra.

IV. ANÁLISIS DE FALLAS TRIFÁSICAS BALANCEADAS CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DEL CSCT

Cuando se integra el modelo del CSCT al sistema de potencia la topología de la red se modifica como se muestra en la Fig. 4. El nodo m es un nodo “ficticio” que se adiciona al sistema y la impedancia equivalente de la línea donde se conecta el dispositivo cambia, ya que el compensador debe modificar su reactancia para llevar a cabo el control del flujo de potencia activa. Con ello, se presenta un cambio en la corriente de falla y la capacidad de cortocircuito en los nodos, así como en la corriente que fluye durante la falla en los elementos de transmisión.

Una falla trifásica balanceada se aplica en el nodo k a través de la impedancia de falla Z_F . Con la integración del CSCT los voltajes nodales que se tienen durante la falla trifásica se determinan como sigue,

$$\begin{bmatrix} V_{F1} \\ \vdots \\ V_{Fk} \\ \vdots \\ V_{Fn} \\ V_{Fm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{01} \\ \vdots \\ V_{0k} \\ \vdots \\ V_{0n} \\ V_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} & Z_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} & Z_{km} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} & Z_{nm} \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mk} & \dots & Z_{mn} & Z_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_{Fk} \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

En la Ec. (10) el subíndice m representa el nodo ficticio donde se conecta el controlador CSCT con la línea de transmisión compensada. Es importante mencionar que en la matriz Z_{bus} los elementos Z_{im} y Z_{mj} no representan, en forma respectiva, las impedancias mutuas entre los nodos $i-m$ y $m-j$, tampoco el elemento Z_{mm} representa la impedancia propia del nodo m . Estos elementos representan la impedancia que resulta de adicionar un nuevo nodo al sistema de potencia y que causa que la matriz de impedancia de bus aumente su tamaño a $(n+1) \times (n+1)$. Al respecto cabe hacer mención que, para llevar a cabo el análisis presentado en este trabajo, un algoritmo computacional fue implementado para formar la Z_{bus} considerando la topología del sistema, la cual es modificada por la adición de un nodo nuevo y por la impedancia de la línea compensada por el CSCT. Los parámetros de falla I_{Fk} , I_{Fij} y C_{CC} se calculan utilizando la Ec. (6), (7) y (9), respectivamente, ya que no se considera el cálculo de estos en el nodo “ficticio” m donde se conecta el CSCT.

V. CASOS DE ESTUDIO

En esta sección se presentan diversos casos de estudio que permiten analizar el efecto que tiene la integración del CSCT en el estudio de fallas trifásicas balanceadas. Los casos de estudio se llevan a cabo utilizando el sistema de potencia de 5 nodos y el sistema de Nueva Inglaterra de 39 nodos. En los casos de estudio se calcula la corriente de falla en los nodos y en los elementos de transmisión, así como la capacidad de cortocircuito en cada nodo del sistema de potencia.

A. CASO DE ESTUDIO CON EL SISTEMA DE POTENCIA DE 5 NODOS

El sistema de potencia de 5 nodos consiste de dos generadores y siete líneas de transmisión [23]. Las reactancias que se consideraron en los generadores 1 y 2 son de $j0.2$ pu y $j0.4$ pu, respectivamente. La condición inicial de la X_{CSCT} es 0.002 pu y la tolerancia de convergencia utilizada es 1×10^{-9} . En este caso de estudio se escoge la línea 4-3 para ser compensada, ya que es la línea de transmisión que transmite menor cantidad de potencia activa. El CSCT se utiliza para incrementar el flujo de potencia activa de 6.6 MW a 8 MW. Para realizar esta acción de control el CSCT modifica su reactancia de 0.002 pu a -0.0860 pu. Claramente, el signo negativo indica que el dispositivo realiza una compensación del tipo capacitiva, lo que hace que la reactancia equivalente de la línea compensada disminuya. Una vez que se compensa la línea de transmisión se calcula la matriz de impedancia de bus y se extrae la Z_{kk} y la X_{kk} para calcular el nivel y la capacidad de cortocircuito del sistema. Una comparación de la corriente de falla nodal, I_{Fk} , con y sin compensación del CSCT se presenta en la Tabla I, mientras que en la Tabla II se presenta una comparación de la capacidad de cortocircuito, C_{CC} , con y sin compensación serie reactiva.

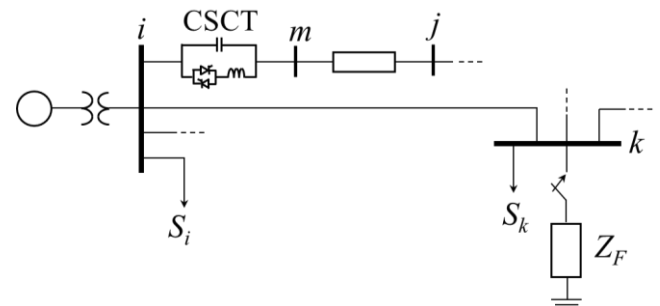


Fig. 4. Aplicación de una falla trifásica balanceada en un sistema de potencia de n-nodos considerando la integración del dispositivo CSCT.

TABLA I. COMPARACIÓN DE LA CORRIENTE DE FALLA CON Y SIN EL CSCT.

Nodo	Corriente de falla sin el CSCT	Corriente de falla con el CSCT
1	7.653 pu	7.653 pu
2	6.491 pu	6.492 pu
3	4.099 pu	4.292 pu
4	4.768 pu	4.835 pu
5	4.881 pu	4.921 pu

TABLA II. COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO CON Y SIN EL CSCT.

Nodo	Capacidad de cortocircuito sin el CSCT (MVA)	Capacidad de cortocircuito con el CSCT (MVA)
1	721.940	721.983
2	649.088	649.227
3	421.823	438.554
4	484.509	491.271
5	494.355	498.457

De acuerdo a los resultados mostrados es posible observar que al compensar la línea 4-3 se provoca un aumento en la C_{cc} de cada nodo del SEP. También es claro que se presenta un incremento en la I_{fk} nodal. El aumento más notorio de los parámetros mencionados se presenta en el nodo 3, debido a que es el más susceptible a una falla.

B. CASO DE ESTUDIO CON EL SISTEMA DE POTENCIA DE 39 NODOS

El sistema de potencia de Nueva Inglaterra consiste de 39 nodos, 10 generadores y 34 líneas de transmisión [24]. Igual que el caso de estudio anterior, en este caso la condición inicial de la X_{CSCT} es 0.002 pu y la tolerancia de convergencia utilizada en las simulaciones es de 1×10^{-9} . En este caso de estudio se escoge la línea conectada entre los nodos 17-18 para incrementar su flujo de potencia activa de 213.25 MW a 250 MW y 280 MW. Se decide seleccionar un incremento del flujo de potencia activa en las líneas, ya que el CSCT normalmente se utiliza para este fin y no para lo contrario. La reactancia final que tiene el dispositivo para controlar el flujo de potencia en la línea a 250 MW y 280 MW, es -0.0090 pu y -0.0147 pu, respectivamente. Ambas reactancias son negativas, de modo que el CSCT realiza compensación capacitiva, no obstante, se debe notar que se tiene una mayor reactancia capacitiva cuando el dispositivo controla el flujo de potencia activa al valor mayor. La Fig. 5 y Fig. 6 muestran una comparación gráfica de la capacidad de cortocircuito y de la corriente de falla en los buses del sistema cuando se controla el flujo de potencia a 250 MW y 280 MW, en forma respectiva. Se escogen dos incrementos de control de flujo de potencia activa para visualizar de forma clara la tendencia que se tiene en el valor de la C_{cc} y de la I_{fk} en el sistema cuando se lleva a cabo dicho control.

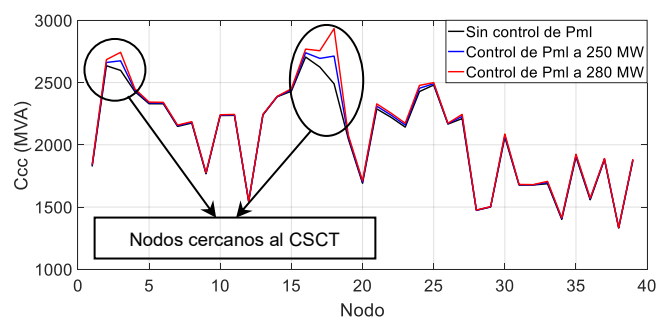


Fig. 5. Perfil de la capacidad de cortocircuito en los buses del sistema de 39 nodos con y sin compensación por el CSCT.

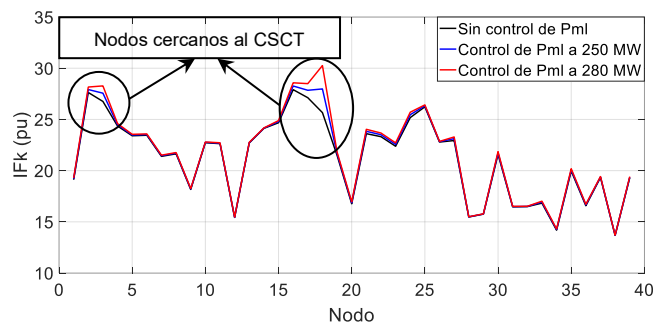


Fig. 6. Perfil de la corriente de cortocircuito en los buses del sistema de 39 nodos con y sin compensación por el CSCT.

Las figuras muestran que cuando el CSCT lleva a cabo su acción de control se presenta un aumento tanto en la capacidad de corto circuito como de la corriente de falla en los nodos del sistema. Este incremento es muy ligero en la mayoría de los nodos, sin embargo, si es muy significativo en los nodos cercanos donde se conecta la línea de transmisión con el CSCT. Algo similar ocurre con la corriente de falla que fluye a través de los elementos de transmisión, ya que también ocurre un aumento de dicha corriente en los elementos cercanos al nodo fallado y a la línea donde se conecta el controlador. Por ejemplo, para una falla en el nodo 27, la corriente de falla en la línea 17-18 sin compensación es 3.9879 pu, mientras que para una compensación de 250 MW y 280 MW es 4.9077 pu y 5.6001 pu, respectivamente.

Los resultados anteriores muestran que el CSCT tiene un impacto directo en la operación segura del sistema de potencia, ya que en las zonas eléctricas cercanas a la línea donde se conecta el dispositivo SIFLECTA se presenta un incremento significativo de la C_{cc} y la I_{fk} del sistema. El aumento de la C_{cc} hace necesario el redimensionamiento y sustitución de buses y equipos primarios de las subestaciones de potencia, mientras que con el cambio de la I_{fk} será necesario renovar los interruptores actuales por aquellos cuya capacidad interruptiva sea acorde con el nivel de falla calculado. Además, con el aumento de la corriente de falla en los elementos de transmisión será necesario reajustar la protección de distancia en todas las líneas del sistema y realizar un nuevo esquema de coordinación de protecciones, esto con la intención de garantizar la correcta operación por zonas del sistema de protección. A pesar de que el CSCT puede ser utilizado para limitar la corriente de cortocircuito, no es viable utilizarlo, ya que resultaría muy costoso disponer de un dispositivo basado en electrónica de potencia capaz de soportar los enormes niveles de corriente de cortocircuito que se presentan durante la ocurrencia de una falla.

Los resultados sugieren que la sustitución de los equipos primarios y de protección debe realizarse solo en los nodos cercanos a la línea donde conecta el CSCT, ya que se esperaría que el sobredimensionamiento de los equipos cumpla en aquellos nodos donde se presentan pequeños

incrementos de la capacidad y nivel de cortocircuito. A pesar de ello, la inversión requerida para llevar a cabo la sustitución de los equipos que garantice la operación segura y confiable del sistema de potencia será considerable.

VI. CONCLUSIONES

Un análisis de fallas trifásicas balanceadas considerando la integración del CSCT en el sistema de potencia se ha presentado. Los resultados de los casos de estudio muestran que cuando el CSCT lleva a cabo el control del flujo de potencia activa, a un valor mayor del que se tiene en la línea donde se conecta, se presenta un aumento significativo de la capacidad y corriente de cortocircuito en los nodos cercanos a la línea compensada. De igual manera, se presenta un aumento en la corriente de falla en los elementos de transmisión, principalmente en aquellos elementos cercanos al nodo fallado y a la línea compensada. Lo anterior sugiere un redimensionamiento de los equipos primarios de las subestaciones de potencia, así como un reajuste de los relevadores de protección y de un nuevo estudio de coordinación de protecciones.

De esta manera se puede concluir que la integración del CSCT trae consigo afectaciones considerables en la seguridad del sistema de potencia, de modo que las compañías suministradoras de energía eléctrica, además de la inversión asociada con el CSCT, deberán invertir en una adaptación del sistema de protección que permita garantizar la operación segura del sistema con la operación del dispositivo SIFLECTA. Esta situación no solo se presenta con el dispositivo considerado en este trabajo, sino en todo aquel equipo que manipule parámetros del sistema de potencia.

REFERENCIAS

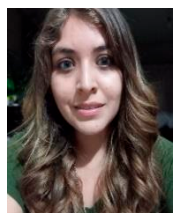
- [1] J.M. García-Guzmán, et al., "Integration of TCSC and SVC Models into a OPF Matlab-based Analysis", ISIT, Lima, Perú, 2011.
- [2] J.M. García-Guzmán, et al., "Implementation of TCSC Power Flow Controller Models into a OPF Matlab-based Approach", ROPEC, Morelia, Mich., México, 2011.
- [3] Hingorani N.G., "Flexible AC Transmission Systems", *IEEE Spectrum*, April 1993, pp. 40-45.
- [4] IEEE Power Engineering Society, "FACTS Applications", *Special Issue, 96TP116-0*, IEEE Service Center, Piscataway, N.J., 1996.
- [5] Gyugyi L., "Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 483-494, April 1988.
- [6] Christl N., Hedin R., Sadek K., Lützelberger P., Krause P.E., McKenna S.M., Montoya A.H. and Togerson D., "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor Controlled Impedance", CIGRÉ, Paris, French, 1992.
- [7] Christl N., Hedin R., Johnson R., Krause P. and Montoya A., "Power system studies and Modelling for the Kayenta 230 kV Substation Advance Series Compensation", *Proceedings of the IEEE 5th ICACDCPT*, London, England, 1991, pp. 33-37.
- [8] Gama C., Salomao J.C.S., Gribel J.B. and Ping W., "Brazilian North-South Interconnection-Application of Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) to Damp Inter-area Oscillation Mode", EPRI Conference, California, USA, 1997.

- [9] A. H. Jahin et al., "Electrical Power Flow Improvement by Reducing Fault Current using FACTS devices", 18th IMCSE-IEEE, Charlottetown, Canadá, 2021.
- [10] A. R. M. Tenorio and N. Jenkins, "Investigation of the TCSC as a Fault Current Limiter", IPST'97, Seattle, USA, 1997, pp. 345-350.
- [11] A. Gannavarapu and D. Raju, "Power Flow Control/Limiting Short Circuit Current Using TCSC", *Innovative Systems Design and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 13-28, 2012.
- [12] A. Harb, S. El-Safty and A. Lotfy, "Analysis of Thyristor Controlled Series Capacitor Application in Fault Current Limiter Mode", *Port Said Engineering Research Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 191-197, 2016.
- [13] Y. Yamazaki, et al., "Development of TCSC Application to Fault Current Limiters", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 140, No. 3, pp. 514-519, 2002.
- [14] Bu-IlKang and Jae-DoPark, "Application of thyristor-controlled series reactor for fault current limitation and power system stability enhancement", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 236-245, 2014.
- [15] J. Khazaei et al., "Fault Current Limitation and Contraction of Voltage Dips Thanks to D-FACTS and FACTS Cooperation", 7th ICEEE, Bursa, Turkey, 2011.
- [16] Deepak M. Divan et al., "A distributed Static Series compensator system for Realizing Active Power Flow Control on Existing Power Lines", *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 22, pp. 642-649, 2007.
- [17] R. M. Ahmed, S. Hebatallah and I. Doaa, "Enhancing Distance Protection of Long Transmission Lines Compensated With TCSC and Connected With Wind Power", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 46717-46730, 2021.
- [18] M. Khederzadeh and T. Sidhu, "Impact of TCSC on the Protection on Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 1, 2006.
- [19] A. Kasemi, S. Jamali and H. Shateri, "Distance Relay Over-Response due to TCSC Presence on Second Circuit of Double Circuit Line", *MELECON 2008*, 2008, pp. 738-743.
- [20] Ambriz, Pérez H., Tesis doctoral: "Flexible AC Transmission Systems Modelling in Optimal Power Flows Using Newton's Method", Universidad de Glasgow, 1998.
- [21] Fuerte-Esquivel C.R. and Acha E., "A Newton-Type Algorithm for the control of Power Flow in Electrical Power Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 1474-1480, 1997.
- [22] H. Saadat, "Power Systems Analysis", USA: PSA Publishing, 2010.
- [23] G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", New York, USA: McGraw-Hill, 1968.
- [24] M. A. Pai, "Energy Function Analysis for Power System Stability", Kluwer, New York, USA: Springer, 1989.

BIOGRAFÍAS



JOSÉ MIGUEL GARCÍA GUZMÁN Recibió el título de Licenciatura en Ingeniería Electromecánica y el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI) en 2007 y 2012, respectivamente. Se ha desempeñado como ingeniero de diseño y mantenimiento eléctrico en empresas del ramo eléctrico, tales como Siemens, Prolec-General Electric y EES. Actualmente es profesor en la Coordinación de Ingeniería Electromecánica en el ITESI y cuenta con el Reconocimiento como Profesor con Perfil Deseable por parte del PRODEP.



IRIS CONSUELO NAJAR SANTILLÁN Nació en Irapuato, Guanajuato. Estudió el bachillerato en Sistema Avanzado de Bachillerato y Educación Superior (SABES), con especialidad en Humanidades. Actualmente cursa el noveno semestre de la carrera de Ingeniería Electromecánica en la Especialidad de Sistemas Eléctricos en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), donde ha participado en distintos Veranos Regionales de Investigación.



JUAN PABLO RAZÓN GONZÁLEZ Graduado como Ingeniero Mecánico por la Universidad Autónoma de Nayarit en 2007 y obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica con especialidad en Diseño Mecánico por parte del Instituto Tecnológico de Celaya en 2010. Tiene experiencia como ingeniero de diseño en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), así como en el sector privado y consultorías del área de diseño mecánico. Desde el 2008 se desempeña como Profesor Asociado C en el Departamento de Ingeniería Electromecánica en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato y cuenta con el de esfuerzos, como Profesor con Perfil Deseable por parte del PRODEP. Dentro de los principales intereses de investigación se encuentra el análisis el método de elementos finitos, automatización electroneumática, diseño mecánico en sus vertientes de fatiga y diseño conceptual.



MARÍA DEL REFUGIO GONZÁLEZ PONCE actualmente se desempeña como docente de la Coordinación de Ingeniería Bioquímica en el Instituto Tecnológico superior de Irapuato, ha realizado trabajos de investigación y proyectos enfocados al área de la ingeniería de los bioprocesos y el área ambiental. Cuenta con experiencia industrial en análisis microbiológicos y fisicoquímicos de los alimentos.

Factibilidad económica de un sistema fotovoltaico interconectado para una Pyme

AMANDA ENRIQUETA VIOLANTE GAVIRA¹, MATILDE CALDERÓN MERINO², MARÍA MERCEDES LEÓN SÁNCHEZ³

¹Ingeniería Mecánica DICIS. Universidad de Guanajuato.

²ENMS Salamanca. CNMS. Universidad de Guanajuato.

³Arte y Empresa. DICIS. Universidad de Guanajuato.

amanda@ugto.mx

m.calderonmerino@ugto.mx

mleon@ugto.mx

RESUMEN La migración de la generación de electricidad a partir de la utilización de combustibles fósiles a energías limpias es uno de los temas más estudiados por la comunidad científica desde las perspectivas ambiental y de salud pública. Se propone metodología de factibilidad financiera en la implementación de un Sistema Fotovoltaico Interconectado a la red (SFI) para un invernadero ubicado en Silao Gto., cuyas características lo posicionan como una Pequeña y mediana empresa (Pyme). Dicha herramienta es útil para la toma de decisiones en la instalación de este tipo de proyectos. Incluye una parte técnica (cotización del proyecto.); dimensionamiento de los elementos del sistema a partir de los softwares Global SOLAR Atlas y Solar App, para la tecnología óptima disponible en el mercado mejor evaluada en cuanto a eficiencia, temperatura de operación y costo. Incluye además una parte financiera con base en indicadores de: solvencia, endeudamiento, apalancamiento, tiempo de retorno y beneficios económicos. Los resultados muestran que el sistema es factible financieramente ya que arroja un indicador de Ratio de Solvencia de 1.06, un Endeudamiento del Patrimonio Neto de 93.95% y un Grado de Apalancamiento Financiero positivo de 6.04%. El tiempo de retorno de la inversión es de 47 meses, con beneficios económicos de \$288, 000, durante la vida útil del SFI. La realización del proyecto ayuda a la Pyme a enfrentar los efectos de la inflación, ya que se está produciendo electricidad de manera limpia y bajo costo.

PALABRAS CLAVE - Electricidad, sistema fotovoltaico interconectado, irradiación solar, indicadores financieros.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la crisis energética y los estragos del irracional consumo de los combustibles fósiles en la satisfacción de las necesidades de desarrollo de la sociedad moderna, organismos internacionales y la comunidad científica han alertado al mundo de la importancia de emprender acciones urgentes para emigrar a la aplicación de energías renovables como la eólica, biomasa y solar entre otras, con la finalidad de disminuir las emisiones de CO₂ y los contaminantes atmosféricos que dañan severamente nuestra salud y la del planeta [1].

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio de factibilidad financiera en la implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red (SFI) para un invernadero, considerado como una pequeña y mediana empresa (Pyme).

Algunos trabajos sobre factibilidad económica para la implementación de sistemas fotovoltaicos consideran la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VAN) como los indicadores de referencia [4], [5] y [6]. Sin embargo, en este trabajo se presenta una propuesta que da un mayor soporte a la toma de decisiones para la aplicación de este tipo de proyectos, ya que provee a la empresa de información que le permite detectar de forma oportuna problemas de

financiamiento antes de solicitar un crédito para instalar un SFI.

A. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Las tecnologías de aprovechamiento de energías renovables se han convertido en una atractiva oportunidad de negocio verde, así como de atención a la problemática ambiental que genera el consumo de combustibles fósiles, debido a su factibilidad económica, con mínimos impactos en el medio ambiente [2]. Esto es congruente con la responsabilidad de los gobiernos de intentar reducir las emisiones de CO₂, compromiso pactado en los acuerdos de los protocolos ambientales internacionales. Por lo anterior, la generación eléctrica se ha incluido en la estrategia energética en la Unión Europea, de modo que se han creado políticas que estimulan el consumo de energías renovables en los distintos sectores de la población [1]; lo que resulta importante porque motiva a otros países a igualar esta visión ambiental y a innovar en la tecnología aplicable.

B. LA ENERGÍA SOLAR

El sol posee una masa aproximada de 330.000 veces mayor a la masa de la Tierra, se comporta como un reactor nuclear que transforma la energía nuclear en energía de

radiación, por tanto, es una energía renovable. No toda la energía que se produce en el Sol llega a la superficie terrestre, una parte se pierde por la absorción, difusión y reflexión y por la acción algunos gases, como el vapor de agua y partículas en suspensión de la atmósfera [3].

La cantidad de radiación solar que llega a nuestro planeta depende también de otros factores como la distancia entre la Tierra y el Sol, la dirección o el ángulo en que estas radiaciones entran a la atmósfera y los movimientos de rotación y traslación que normalmente tiene la Tierra [4]. La radiación que nuestro planeta recibe del Sol se divide en: radiación directa (ésta atraviesa la atmósfera sin sufrir ningún cambio en su dirección); radiación dispersa o difusa (la que recibimos después de los fenómenos de reflexión y difusión); radiación reflejada (la radiación que refleja la superficie terrestre y depende del coeficiente de reflexión de la superficie) y, finalmente, la radiación global (la suma de las radiaciones directa y difusa del total de radiación que procede del Sol) [4].

El territorio mexicano tiene condiciones geográficas que le otorgan una privilegiada irradiación solar, lo que favorece la instalación de sistemas fotovoltaicos como se aprecia en la Fig. 1.

El ángulo zenit es el ángulo entre un punto de interés y el zenit (el punto directamente arriba). Para un sistema de coordenadas (x, y, z), el zenit es el eje perpendicular al plano horizontal. La irradiación en un sitio en específico tiene distintos valores de irradiancia para un periodo de tiempo definido (horas) [5]. Para obtener un solo valor por unidad de área, se suman los valores que integran todo un día y se expresan en unidades de energía por unidad de área. La irradiación para sistemas fotovoltaicos se expresa en unidad de kWh/m² [6].

C. LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos (SF) corresponden a la categoría de sistemas no convencionales de energía, su función es aprovechar la energía del sol y transformarla en electricidad. El proceso se lleva a cabo mediante el efecto fotovoltaico, fenómeno que ocurre cuando los fotones de luz tienen la suficiente energía para impulsar los electrones desprendidos del material semiconductor a través de un circuito exterior y, por lo tanto, de transformar esta luz en energía eléctrica [7]. Actualmente existen en el mercado tres tipos de SF: autónomos (SFA), interconectados (SFI) e híbridos (SH) [4]. La producción de electricidad es intermitente, en función de la irradiación diaria que reciben. Un sistema fotovoltaico autónomo (SFA) produce energía eléctrica para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los periodos en los que la generación es inferior al consumo. En el caso particular de los sistemas fotovoltaicos interconectados (SFI) una parte de

la electricidad se aprovecha en la satisfacción de una demanda en particular y otra se inyecta a la red convencional, por lo que la producción debe ser técnicamente adecuada. De acuerdo con [8], estos sistemas representan una alternativa confiable, económica y de menor impacto ambiental para disminuir el consumo de electricidad de la red. Finalmente, los sistemas fotovoltaicos híbridos (SH), combinan las funciones de los SFA y los SFI [4].

La Secretaría de Energía (SENER) de México reporta el crecimiento de la energía fotovoltaica en los últimos 5 años [9]. Ver [Tabla I](#).

Cabe destacar que la SENER clasifica la energía de acuerdo con las tecnologías aplicadas en nuestro país como sigue: convencional (ciclo combinado, termoeléctrica convencional, carboeléctrica, turbogás, combustión interna, lecho fluidizado), limpia (renovable: hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar fotovoltaica y termosolar) y otras (nucleoeléctrica y bioenergía) [9]. El desarrollo de energías renovables requiere fortalecer la investigación destinada a optimizar las tecnologías de generación limpia y vencer las fallas en la intermitencia, cortes de energía, variaciones en la frecuencia por desajustes en la potencia e indagación sobre los parámetros eléctricos de los SF [10] y [11]; estudios de factibilidad económica [12] y [13] como el presente trabajo y otros estudios de generación de energías limpias híbridas [14] y [15].

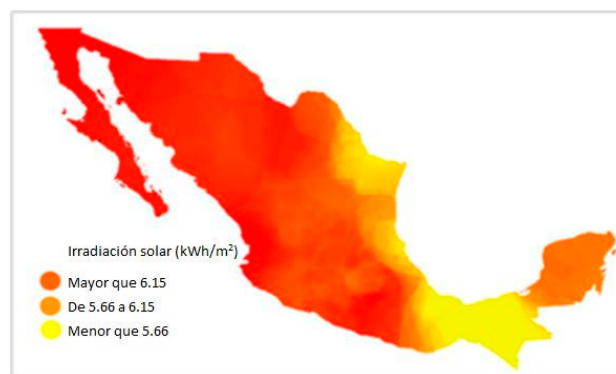


Fig. 1. Representación gráfica de la producción energética anual.

TABLA I. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA EN MÉXICO.

Año	Fotovoltaica	Convencional	Renovable
	Potencia instalada (MW)		
2018	1,971	54,492	20,453
2019	4,426	58,244	24,638
2020	5,630	56,066	27,348
2021	7,555	56,231	29,992
2022	7,755	57,471	32,561

Los principales elementos de los módulos fotovoltaicos son: cubierta de cristal, células laminado superior, laminado inferior, caja de conexiones, protección plástica posterior, y marco de aluminio; éstos cuentan con certificaciones establecidas por la Asociación de Normalización y Certificación (ANCE) [5] y se pueden instalar sobre el piso o sobre las edificaciones [8]. Los inversores, tienen una parte eléctrica y otra electrónica, su función es transformar la corriente directa en corriente alterna. Los parámetros relevantes de los inversores que se deben considerar en su selección son: tensión de entrada (VCD), potencia nominal, capacidad de sobrecarga, factor de potencia, eficiencia o rendimiento, autoconsumo, tensión de salida, corriente de salida (a CA), máxima corriente de entrada (a CD), máxima potencia de entrada (W) y frecuencia [8].

La adecuada elección de los conductores incide en el rendimiento operativo, en los sistemas convencionales y los no convencionales. Es importante considerar condiciones tanto de seguridad como de eficiencia en la operación, por ello se deben incluir las protecciones eléctricas (sobrecorriente y sobretensión, en combinación con la puesta a tierra) [5].

II. DESARROLLO

La Fig. 2 muestra un esquema de la propuesta sistemática de análisis de factibilidad financiera para el caso de un invernadero que pretende implementar un SFI, a partir de un crédito para cubrir el costo del sistema. La metodología requiere que se alimenten datos financieros (Activos, Pasivos y Patrimonio Neto) y datos técnicos (dimensionamiento del SFI de una tecnología adecuada para cubrir un 80% de la demanda de electricidad, con lo que se generan los costos del proyecto). De igual manera se requiere la información legal que exige la CFE. Se aplicaron 4 indicadores financieros: Ratio de solvencia (RS), Fondo de Maniobra (FM), Endeudamiento sobre el Patrimonio Neto (EPN) y Grado de Apalancamiento Financiero (GAF).

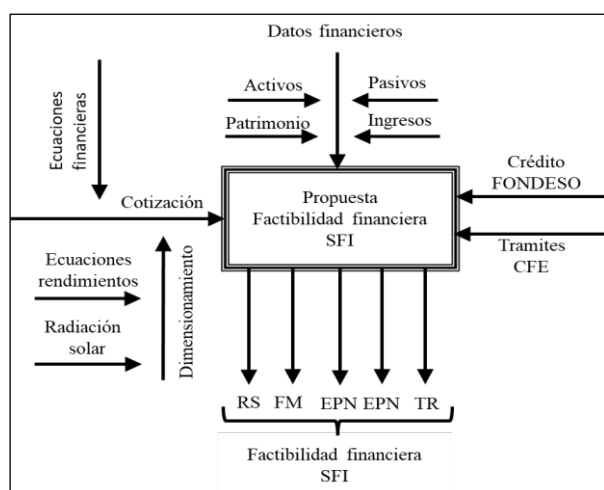


Fig. 2. Propuesta sistemática de factibilidad financiera.

Lo anterior permite conocer si la empresa puede tomar la decisión de instalar el SFI, si tiene la solvencia para cubrir las mensualidades de la deuda. Además, se obtiene el tiempo de recuperación de la inversión (TR) y los beneficios económicos esperados por la operación del sistema durante su vida útil.

A. DIMENSIONAMIENTO DEL SFI

Para determinar los principales elementos del sistema (número de paneles y de inversores), se aplicaron los softwares Global SOLAR Atlas y Solar App, los cuales son herramientas de acceso libre de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés). Se alimentaron las coordenadas geográficas del sitio de estudio. Con ello se generaron los datos de radiación solar, la temperatura del aire, la inclinación óptima y la elevación del terreno, el promedio de irradiación solar mensual de los últimos 5 años y el promedio de irradiación normal directa a través del día [3]. Se consideró la estimación preliminar a partir de la demanda diaria de la Pyme, obtenida del registro del consumo eléctrico bimestral de la compañía suministradora (CFE). El número de módulos en serie se obtuvo de relacionar la potencia máxima de entrada del inversor y la potencia de circuito abierto de la tecnología del módulo. Esta última se obtuvo de la relación del consumo diario y el recurso solar considerando el rendimiento total del sistema fotovoltaico (el cual incluye: rendimiento térmico, rendimiento por degradación, rendimiento de los inversores y rendimiento de los conductores). Para dichas estimaciones es determinante conocer los datos de la temperatura ambiental, temperatura de la célula y el tiempo de degradación de los paneles y del inversor que indica el fabricante [5].

La selección de los paneles se hizo con base en la ponderación de factores prioritarios de la tecnología disponible en el mercado: eficiencia, temperatura de operación y costo. Se eligió la marca JA Solar modelo JAM78S10-445/MR). Para los inversores, los criterios prioritarios de selección fueron: eficiencia, máxima potencia de entrada, máxima corriente de entrada y de salida. El inversor mejor ponderado fue de marca Solar Factory modelo ISF-2KW. Se consideraron soportes fijos para los paneles (NXT-SMI-2-30 Kit con inclinación 15° a 30°), cableado 12 AWG THHN. Para las protecciones eléctricas (protección contra sobrecorriente, se optó por un interruptor termomagnético y para la protección contra sobretensión, se eligió un supresor de voltaje). Se incluyó en el sistema un medidor bidireccional ELSTER SOLUTIONS, MODELO A3 ALPHA NODO y un Kit de tierra física Ground Vari-ground. El ciclo de vida del sistema se consideró de 10 años [5].

B. SITIO DE ESTUDIO

La Pyme donde se propone instalar el SFI es un invernadero ubicado en el municipio de Silao de la Victoria. Sus coordenadas geográficas son: 20.98213°, -101.448139°, con dirección: Calle San Pedro, Silao, de la Victoria, Guanajuato, México. Ver Fig 3.

C. EVALUACIÓN FINANCIERA

Para realizar la evaluación económica del SFI propuesto se aplicaron tres indicadores financieros. Los indicadores financieros son relaciones matemáticas que permiten analizar diferentes aspectos del desempeño de un proyecto o bien del desempeño empresarial. Su finalidad es generar información clave para dirigir una empresa, así como para evaluar la salud financiera, las posibilidades de desarrollo y detectar de forma oportuna los problemas de financiamiento [16].

1. Indicadores de solvencia

El Ratio de Solvencia (RS) representa la capacidad de una persona física/jurídica para hacer frente a sus obligaciones de pago a medio-largo plazo, se puede definir como el cociente del activo y el pasivo totales. Lo ideal es que el valor de esta ratio sea superior a 1.5. No obstante, es preciso indicar que el valor que esta ratio tome dependerá del sector o tipo de empresa del que se trate [2] Ver Ec (1).

$$RS = \frac{\sum A(AC+AF+AD)}{\sum P(PC+PCP+PLP)} \quad (1)$$

Donde: A son los Activos, AC son los Activos Circulantes, AF son los Activos Fijos; AD corresponde a los Activos Diferidos, P indica los Pasivos, PC representa a los Pasivos Circulantes, PCP son los Pasivos a Corto Plazo y PLP corresponde a los Pasivos a Largo Plazo.



Fig. 3. Sitio geográfico de la instalación del SFI.

Por otro lado, el Ratio Fondo de Maniobra (FM) es un indicador que permite valorar la solvencia de una empresa. Un valor positivo indica que los fondos propios de la empresa más el pasivo no corriente (a largo plazo) no sólo permiten cubrir el activo no corriente, sino que existe un remanente que respalda parte del activo corriente. Un valor positivo indica que la empresa tiene una buena posición financiera a corto plazo. Mientras que un valor negativo se produce cuando el pasivo corriente excede al activo corriente, con lo que la empresa se encontrará con unos vencimientos a corto plazo de deudas que no podrá atender con la realización del activo corriente [17]. Ver Ec (2).

$$FM = AC - PC \quad (2)$$

2. Indicador de endeudamiento

Endeudamiento sobre Patrimonio Neto (EPN). Este Ratio muestra el grado de utilización del capital ajeno en relación con el capital propio o al activo total [17] y se obtiene con la Ec (3).

$$EPN = \frac{PT}{PN} = \frac{\sum(PC+PCP+PLP)}{PN} \quad (3)$$

Donde: PT representa el Pasivo Total y PN es el Patrimonio Neto.

El valor óptimo de la ratio de endeudamiento gira en torno a valores comprendidos entre 40% y 60%. Un ratio de endeudamiento mayor o superior a 60% significa que la empresa está muy endeudada. Sin embargo, si el interés sobre saldos insolutos es pequeño, el endeudamiento se reducirá en un tiempo corto. Un ratio de endeudamiento menor a 40% destaca que la empresa posee recursos propios mal aprovechados. Para afinar más los resultados, es posible desarrollar el cálculo de la relación que existe entre el volumen de los fondos propios de una empresa y las deudas que mantiene tanto en el largo como en el corto plazo [17].

3. Indicador de Apalancamiento Financiero

El apalancamiento financiero (GAF) es una ratio que se interpreta como un indicador de inversión fundamentado en el endeudamiento, es empleado por muchas empresas al momento de invertir en un negocio: aportan una parte de capital propio y la otra parte, mediante préstamos adquiridos ante terceros. Tiene un valor positivo (lo cual es favorable) si la rentabilidad de los activos en los que la empresa invierte los fondos obtenidos es superior al costo de dichos fondos. Mientras que tiene un valor negativo cuando la rentabilidad de los activos en los que la empresa invierte los fondos es inferior al costo de dichos fondos [17]. Se estima mediante la Ec (4).

$$GAF = \frac{AC}{\sum A(AC+AF+AD)} \quad (100) \quad (4)$$

Es importante calcular el interés sobre saldos insolutos (I) con el capital de la inversión (P) y la tasa de interés mensual (i). Ver Ec. (5).

$$I = P i \quad (5)$$

De manera complementaria a las ratios arriba mencionadas, se empleó otro indicador relevante que es el tiempo de retorno de la inversión (TR) para el cual se requiere conocer los ahorros por el gasto en electricidad de la Pyme, por las aportaciones del SFI. Se espera que este período de tiempo sea lo más corto posible.

En México, una adecuada opción de financiamiento para las Pymes es el Fondo para el Desarrollo Económico y Social (FONDES) que es organismo público que otorga crédito para inversión a una tasa de interés muy baja (6% anual sobre saldos insolutos), comparado con instituciones bancarias [18]. Los estudios financieros coadyuvan al desarrollo y crecimiento de pequeños productores a través de incorporar nuevas tecnologías sustentables, además favorecen su competitividad internacional como en el caso del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (T-MEC) [19].

D. RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de los softwares correspondientes al sitio de estudio, información relevante para el dimensionamiento del SFI propuesto. Ver Tabla II.

En la Tabla III se muestra el comportamiento de la irradiación a través del año y del día. Se observa la media mensual de la irradiación normal directa que hay disponible en la zona de estudio, corresponde a los meses con mayor irradiación (primavera y verano), entre las 8:00 y las 16:00 h. A partir de la información anterior se obtuvo un ángulo promedio óptimo de 20°. Con ello se estimó la cantidad de horas solares pico por mes.

En la Fig. 4 se observa que manteniendo un ángulo de inclinación fijo de 20.1° se garantizarían en promedio 6.16 horas diarias de irradiación solar. Estos valores tienen un importante efecto en la eficiencia de los módulos. Para la estimación que se presenta, podemos decir que el resultado óptimo está condicionado al ángulo óptimo.

En la Tabla IV se muestran los datos de la tecnología seleccionada para los paneles fotovoltaicos.

En la Tabla V se muestran los datos de la tecnología seleccionada para los inversores.

La demanda de la Pyme para producción de plantas de ornato comprende una potencia contratada: 6.5 kW y una potencia conectada de 6.5 kW con una tarifa 1A. La especificación CFE G0100-04 indica la información para la interconexión a la red eléctrica de baja tensión de un SFI para

una capacidad máxima de 30 kWp, aplicable para viviendas individuales, comercios, escuelas y edificios públicos.

TABLA II. INFORMACIÓN AMBIENTAL Y ÁNGULO ÓPTIMO.

Parámetro	Valor	Unidades
Irradiación directa normal (DNI)	2389.6	(kWh/m ²)
Irradiación global horizontal (GHI)	2275.4	(kWh/m ²)
Irradiación horizontal/ difusa (DIF)	689.7	(kWh/m ²)
Temperatura del aire (TEMP)	20.3	(°C)
Inclinación óptima (OPT)	23	(°)
Elevación de terreno (ELE)	1799	(m)

TABLA III. COMPORTAMIENTO DE LA IRRADIACIÓN EN EL AÑO.

Hora	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
0 - 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 6	0	0	0	48	95	87	62	31	17	15	0	0
6 - 7	106	157	350	454	382	321	282	292	263	318	285	159
7 - 8	508	577	667	661	545	448	409	445	411	526	597	545
8 - 9	679	730	795	775	662	540	504	552	497	634	735	702
9 - 10	775	831	867	840	738	602	556	604	532	689	807	779
10 - 11	818	868	900	866	772	621	586	617	552	704	823	818
11 - 12	810	861	904	859	763	613	581	612	541	695	809	802
12 - 13	776	828	871	825	713	571	557	595	541	667	774	777
13 - 14	744	792	805	748	617	522	518	546	507	614	724	724
14 - 15	676	724	720	665	515	449	447	478	452	550	645	629
15 - 16	576	634	622	543	406	354	356	396	371	462	536	527
16 - 17	396	490	485	421	296	264	253	289	264	289	278	294
17 - 18	42	155	198	202	152	169	154	153	84	18	0	0
18 - 19	0	0	0	0	6	11	11	6	0	0	0	0
19 - 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21 - 22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23 - 24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

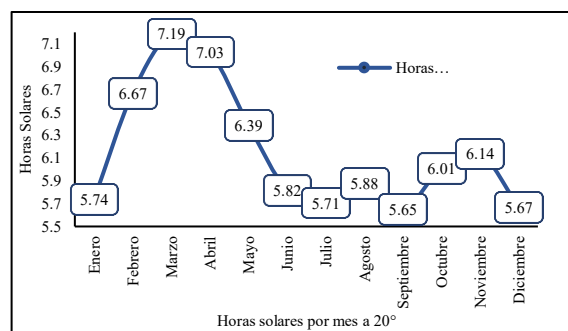


Fig. 4. Horas pico de irradiación solar a un ángulo de 20°.

TABLA IV. DATOS TÉCNICOS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	445 W
Voltaje de circuito abierto	54.56 V
Corriente de corto circuito	10.48 A
Temp. de la célula en condiciones operación	45 °C
Temperatura de la célula en condiciones estándar	25 °C
Irradiancia en condiciones de operación	800 W / m ²
Temp. Ambiente en condiciones de operación	20 °C

TABLA V. DATOS TÉCNICOS DEL INVERSOR.

Máxima potencia de CD	2300 W
Máximo voltaje de CD	450 V
Máxima corriente de entrada	11 A
Máxima corriente de salida	10 A
Voltajes nominales de la red	220 / 230 / 240 V
Máxima eficiencia	97.6 %

Con base en lo anterior la configuración de la cantidad y arreglo de los paneles del SFI propuesto se ajustó a la potencia máxima de entrada del inversor (2300W). En la [Tabla VI](#) se sintetiza el dimensionamiento del sistema.

Con relación a la evaluación financiera en la [Tabla VII](#) se presentan los resultados del balance general de la Pyme.

A continuación se presentan los resultados de la metodología financiera:

1. Ratio de Solvencia (RS). Se obtuvo un valor de 1.06, lo que indica la capacidad que tiene la Pyme para atender sus pagos al endeudamiento a corto plazo (pasivo corriente) sólo con sus activos líquidos normales, es decir, sin necesidad de liquidar sus inventarios. De igual forma, el Fondo de Maniobra (FM) resultó positivo ya que el activo circulante es mayor que el pasivo circulante. Por lo tanto, es el segundo indicador financiero a favor de la realización del proyecto.
2. El Índice de Endeudamiento sobre Patrimonio Neto (EPN) resultó de 93.95%. Considerando el gasto ejercido por el consumo de energía eléctrica de la CFE y la producción del SFI, el gasto mensual por pago de dicho servicio supera en 7.85 % el pago de energía eléctrica a la erogación por el financiamiento otorgado a través de FONDESO. Además, se considera que la Pyme no cuenta con otro tipo de endeudamiento al momento de ejercer dicho crédito, aspecto favorable a la razón de endeudamiento.
3. El Grado de Apalancamiento Financiero (GAF) obtenido del presente estudio, generó un apalancamiento positivo de 6.0454, esto indica que existe rentabilidad para que la Pyme haga la inversión.

TABLA VI. DIMENSIONAMIENTO DEL SFI.

Parámetro	Valor
Potencia FV pico a instalar (PFPI)	6.5 kWp
Paneles totales (NM)	15 unidades
Inversores totales (IT)	3 unidades
Paneles en serie (PS)	5 unidades

TABLA VIII. RESULTADOS DEL BALANCE GENERAL.

Parámetro	Valor
Activo no Corriente	155,548.00
Activo Corriente	10,000.00
Total Activo	165,548.00
Pasivo y Patrimonio Neto	
Patrimonio neto	10,000.00
Pasivo no corriente	155,548.00
Pasivo corriente	0
Total Pasivo y Patrimonio Neto	165,548.00

4. Tiempo de Retorno de la Inversión (TR). Con base en el ahorro de electricidad por la implementación del SFI, el período de tiempo para recuperar la inversión resultó de 47 meses, esto se considera es adecuado para la Pyme.
5. Tiempo de liquidación del crédito. El FONDESO otorga de 36 meses para finiquitar la deuda con una tasa de 6% anual sobre saldos insolutos. A la Pyme le resulta muy conveniente realizar la inversión en SFI, por los bajos intereses que deberá pagar. Ver [Fig 5](#).

Una vez cubiertos los costos del proyecto, los beneficios económicos que se tienen por la instalación del SFI, considerando un tiempo de vida útil de 10 años, corresponden a \$ 288,000. De manera adicional, el invernadero puede contar con la certificación de *empresa responsable con el medio ambiente*, lo que otorga un plus a sus productos en el mercado internacional, con lo que se verían favorecidas sus ventas.

III. CONCLUSIONES

El cambio climático y la transición energética son de los temas prioritarios en los acuerdos comerciales del T-MEC. Nuestro país debe atender el uso de tecnologías que permitan producción de energía de fuentes renovables en las empresas que comercializan sus productos con nuestros vecinos del norte. Por esta razón las empresas requieren implementar proyectos como el de SFI, con lo que aprovechan la energía solar y ahorran electricidad obtenida mediante combustibles fósiles. Esta migración implica realizar estudios de factibilidad financiera, para tomar una decisión argumentada para invertir en estas tecnologías.

Los indicadores financieros abren un abanico de ventajas en la operación de sistemas fotovoltaicos interconectados en los ámbitos: ambiental, social y de mercadotecnia a las organizaciones, porque permiten una actuación sostenible y a la vez motivan el desarrollo y la eficiencia de la industria de producción de tecnología fotovoltaica, así como la investigación en la mejora de la tecnología disponible en el mercado hoy en día.

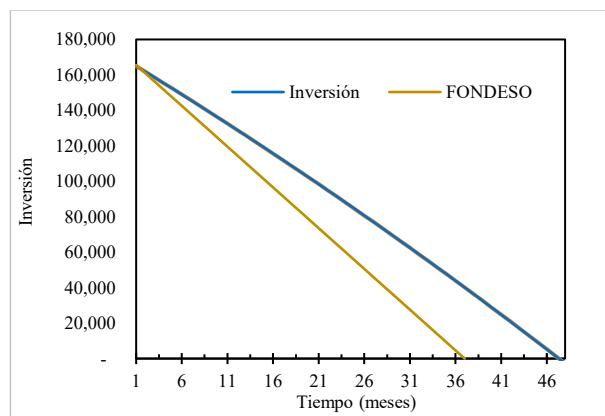


Fig. 5. Tiempo de retorno de la inversión.

Los resultados de la metodología propuesta muestran que el invernadero puede implementar el SFI y cumplir satisfactoriamente con los pagos del financiamiento (que proviene de un crédito gubernamental). De manera adicional, puede cumplir con los requerimientos de certificación ambiental de exportación de sus productos. Además de tener información sobre los beneficios económicos, que, en este caso, corresponden a más de la mitad del tiempo de vida útil del sistema.

REFERENCIAS

- [1] I. Baghdadi, A. Yaakoubi, K. Attari, Z. Leemrani y A. Asselman, 11th International Conference interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2017, Rumania: Procedia, 2018.
- [2] A. Ogbonnaya, "Engineering risk assessment of photovoltaic-thermal-fuel cell system using classical failure modes, effects and criticality analyses," *Cleaner Environmental Systems*, pp. 2-11, 2021.
- [3] NASA, "NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources)", 5 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Último acceso: 6 Mayo 2021].
- [4] L. Fernández y A. Cervantes, Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico de interconexión a la red eléctrica en la Universidad Tecnológica de Altamira, Altamira, Tamaulipas: CIMAR, 2020.
- [5] A. Alvarado, "Manual para la evaluación técnica-económica de: Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red apoyados a través del Programa de Fideicomiso de Riesgo Compartido", Cd. de México: Cooperación alemana GIZ, 2015.
- [6] R. Hernández "Análisis de factibilidad para la instalación, Villahermosa, Tabasco", CIRTEQ, 2017.
- [7] R. Luna y H. Ramos, "Diseño de un sistema fotovoltaico integrado a la red para el área de estacionamiento de la Universidad Tecnológica de Salamanca", Chihuahua, Chihuahua: CIMAR, 2014.
- [8] O. Perpiñán, "Energías Solar Fotovoltaica", noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://github.com/oscarperpinan/esf>.
- [9] SENER, "Sistema de Información Energética", Secretaría de Energía, 22 junio 2022. [En línea]. Available: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=exportar>. [Último acceso: 22 junio 2022].
- [10] C. Ogbonnaya, C. Abeykoon y A. Nasser "Engineering risk assessment of photovoltaic-thermal-fuel cell system using classical failure modes, effects and criticality analyses", *Cleaner Environmental Systems*, pp. 2-11, 2021.
- [11] J. Rajan y F. Fernández, "Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 171-183., 2019.
- [12] F. Benhmad y J. Percebois, "Photovoltaic and wind power feed-in impact on electricity prices: The case of Germany", *Energy Policy*, pp. 317-326, 2018.
- [13] K. Janda, "Slovak electricity market and the price merit order effect of photovoltaics", *Energy Policy*, pp. 551-562, 2018.
- [14] J. Ahmad, M. Imran, A. I. Khalid, S. R. Ashraf, M. Adnan, S. F. Ali y K. Khokhar, "Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kahar." *Energy*, pp. 208-234, 2018.
- [15] K. Sun, K. Li, J. Pan, Y. Liu y Y. Liu, "An optimal combined operation scheme for pumped storage and hybrid wind-photovoltaic complementary power generation system." *Applied Energy*, pp. 1155-1163, 2019.
- [16] G. Dumrauf, Finanzas Corporativas, México: Alfaomega, 2010.
- [17] A. María Fernanda, "17 indicadores financieros que aseguran tu gestión empresarial," *appvizer*, 3 marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.appvizer.es/revista/contabilidad-finanzas/contabilidad/indicadores-financieros>. [Último acceso: 1 septiembre 2022].
- [18] Secretaría de Economía, "Fondo Pyme," SE, 22 noviembre 2017. [En línea]. Available: http://www.fondopyme.gob.mx/2010/descripcion.asp?Cat_Id=3&prog=12. [Último acceso: 9 septiembre 2022].

- [19] SIP. (2019). "Sistema de Información Agroalimentaria y Pesca", Secretaría De Agricultura Y Desarrollo Rural., consultado el 08/28/2021 15 de Diciembre de 2019, de Sistema Información Agroalimentaria Y Pesca, <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>.

BIOGRAFÍAS



AMANDA ENRIQUETA VIOLANTE GAVIRA Profesora del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la DICIS, Ingeniera Química, Maestra en Ciencias y Dra. en Proyectos con Especialidad en Investigación. Línea de Investigación: Medio Ambiente, Calidad y Prevención. Ha realizado trabajos de investigación y artículos científicos relacionados con la producción de gases efecto invernadero, tratamiento de agua y calidad del aire en ciudades altamente contaminadas, así como artículos científicos relacionados con la Educación Ambiental.



MATILDE CALDERÓN MERINO Profesora de la ENMS Salamanca de la Universidad de Guanajuato, Contador Público, Maestra en Administración. Ha realizado trabajos de investigación sobre proyectos de inversión de Micro y pequeñas empresas desde 2016 a la fecha, así como también contribuye en la publicación artículos de divulgación e indexadas de índole económico y educativo.



MARÍA MERCEDES LEÓN SÁNCHEZ Profesora del Departamento de Arte y Empresa de la DICIS. Licenciada en Economía, Maestra en Economía y Cambio Tecnológico, Doctora en Ciencias Sociales, con línea en Desarrollo Regional. Ha realizado diferentes publicaciones sobre la especialización productiva y el empleo y sobre las capacidades tecnológicas en las MiPymes.

Análisis del DAP en municipios del estado de Guanajuato: Comportamiento de facturación, recaudación y déficit

JESUS MARTINEZ PATIÑO, JOSÉ MERCED LOZANO GARCIA, IVÁN ABEL HERNÁNDEZ ROBLES, ALEJANDRA MORA ROMERO

Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. División de Ingenierías. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

jesusmp23@ugto.mx

jm.lozano@ugto.mx

ia.hernandez@ugto.mx

a.moraromero@ugto.mx

RESUMEN El Derecho de Alumbrado Público (DAP) es un impuesto municipal que se cobra a través de dos maneras: a través del recibo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y por medio del pago en oficinas municipales. En años recientes se modificó el porcentaje de cobro aumentado del 8% al 11 o 12 %; con el fin de que los municipios no fueran deficitarios; es decir, que lo que se factura por este servicio fuera igual o menor que lo que se recauda. A través de este artículo se muestran datos de los municipios del estado de Guanajuato en porcentajes y montos, así como el análisis de cuatro municipios mostrando gráficamente el comportamiento entre lo recaudado y lo facturado. El análisis permite observar la variabilidad que existe entre los distintos municipios y las oportunidades de mejora técnica y operativamente del alumbrado público y en el ámbito financiero.

PALABRAS CLAVE - DAP, Facturación, Déficit, Energía.

I. INTRODUCCIÓN

A través del presente trabajo es mostrado un análisis del cobro del DAP en los municipios del Estado de Guanajuato, presentando primeramente la historia reciente del cobro y las modificaciones legislativas realizadas y mostrando datos de facturación, recaudación y déficit del resultado global de todo el estado. Posteriormente es presentado el método y porcentaje de cobro que realiza cada municipio a través de la Ley de Hacienda para los Municipios del Estado de Guanajuato y la correspondiente ley de cada municipio, mostrando una comparativa de porcentaje del impuesto municipal. Finalmente son detallados cuatro casos de estudio bajo la perspectiva de análisis de su facturación, recaudación y déficit; como la variabilidad de las tarifas. Con todo lo antes expuesto en el párrafo final se exponen las conclusiones que dan pauta a la reflexión de los resultados mostrados en el presente trabajo.

II. DESARROLLO

A. DERECHO DE ALUMBRADO PÚBLICO EN EL ESTADO DE GUANAJUATO

El Derecho de Alumbrado Público se puede analizar desde distintas perspectivas, por ejemplo, desde el ámbito jurídico, social, seguridad pública, técnico-eléctrica, entre otros; obviamente enmarcado en el contexto de la municipalidad. Pues, como se sabe, lo dispuesto por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, el municipio tendrá a su cargo entre sus funciones y servicios públicos el Alumbrado Público.

Es necesario precisar que, en el año 2013, de los 46 municipios que conforman el estado de Guanajuato, solamente 8 municipios mantenían superávit con respecto a la recaudación de dinero aplicando el 8% de impuesto municipal; el cual se aplicaba al costo por consumo de energía eléctrica de los usuarios en la facturación de CFE [1]. Se conoce que estos municipios con este recurso inclusive coadyuvaban al pago del alumbrado público de los otros 38 municipios con déficit de recaudación por concepto de DAP. Aunado a que los municipios citados mantenían y tienen un alto desarrollo industrial, comercial y turístico.

Ante ello, el tema del DAP llegó al H. Congreso del Estado mediante una iniciativa de reformas a la Ley de Hacienda para los Municipios del Estado de Guanajuato que proponía concluir el convenio de 1991 con CFE e implantar un nuevo sistema de cobro del DAP el cual fuera manejado como impuesto municipal. Por lo que a partir del 2014 entró en vigor el nuevo esquema tarifario municipal determinado e incluido en las leyes de ingresos de cada uno de los municipios del estado de Guanajuato. Por lo que desde esa época en el estado de Guanajuato los municipios en su mayoría son deficitarios respecto al DAP, lo que merma las finanzas; por lo que, generalmente recurren a solicitar recursos al Gobierno del Estado para subsanar el déficit [1].

En la [Tabla 1](#) se muestran los resultados de facturación, recaudación y déficit de los municipios del estado de Guanajuato en el periodo del 2015 al 2020, mostrando que aún se mantiene el estatus de la sumatoria de los municipios como deficitarios.

TABLA I. FACTURACIÓN Y DÉFICIT DE LOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE GUANAJUATO (PERIODO DE 2015-*SEPTIEMBRE DE 2020) [1].

Periodo	Facturación (Pesos Mexicanos)	Recaudación (Pesos Mexicanos)	Déficit (Pesos Mexicanos)	% Déficit
2015	\$780,321,702	\$317,068,541	\$463,253,161	-59.36%
2016	\$957,108,873	\$342,707,841	\$614,401,032	-64.19%
2017	\$1,027,086,212	\$562,258,672	\$464,827,540	-45.25%
2018	\$1,110,276,375	\$601,241,953	\$509,034,422	-45.84%
2019	\$1,055,758,193	\$645,601,751	\$410,156,442	-38.84%
2020	\$651,646,373	\$576,366,999	\$75,279,374	-11.55%

B. MÉTODO Y PORCENTAJE DE COBRO EN LOS MUNICIPIOS

Como se ha citado anteriormente, el cálculo tarifario para el DAP recae en la ley de ingresos para cada uno de los municipios del estado de Guanajuato, en este contexto; los derechos por la prestación del servicio de alumbrado público se causarán y liquidarán de conformidad con lo dispuesto por la Ley de Hacienda para los Municipios del Estado de Guanajuato y la correspondiente Ley de cada municipio, y con base a la tarifa que determine cada uno de ellos; y tal como se muestra en la [Tabla II](#). Así mismo, en esa ley se menciona que la tarifa mensual o bimestral se aplicará según el periodo de facturación de la CFE y que los usuarios de este servicio que no tengan cuenta con esta institución, pagarán este derecho en los periodos y a través de los recibos que para tal efecto expida la Tesorería en cada uno de los municipios respectivos. Además, se menciona que para los contribuyentes cuya recaudación sea por conducto de la CFE otorga un beneficio fiscal que representa el importe de calcular el porcentaje respectivo (10 o 12%, según aplique en el municipio respectivo) sobre su consumo de energía eléctrica, siempre y cuando el resultado de la operación no rebase la cantidad determinada en la tarifa correspondiente (la que se menciona en la [Tabla II](#)), para tal caso, se aplicará esta última.

TABLA II. PORCENTAJE DE IMPUESTO DAP Y TARIFA LÍMITE DE LOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE GUANAJUATO DEL AÑO 2022 [2-48].

Municipio	Porcentaje de Impuesto (Cobro)	Mensual (Pesos Mexicanos)	Bimestral (Pesos Mexicanos)
Abasolo	12	\$ 3,623.12	\$ 7,246.24
Acámbaro	10	\$ 429.65	\$ 859.30
San Miguel de Allende	12	\$ 1,091.84	\$ 2,183.68
Apaseo el Alto	12	\$ 1,655.05	\$ 3,310.10
Apaseo el Grande	10	\$ 1,769.14	\$ 3,538.28
Atarjea	12	\$ 5,993.23	\$ 11,986.45

TABLA II. PORCENTAJE DE IMPUESTO DAP Y TARIFA LÍMITE DE LOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE GUANAJUATO DEL AÑO 2022. (CONTINUACIÓN)

Municipio	Porcentaje de Impuesto (Cobro)	Mensual (Pesos Mexicanos)	Bimestral (Pesos Mexicanos)
Celaya	12	\$ 2,670.32	\$ 5,340.64
Manuel Doblado	12	\$ 1,913.32	\$ 3,826.63
Comonfort	12	\$ 1,777.82	\$ 3,555.65
Coroneo	12	\$ 1,340.00	\$ 2,680.00
Cortazar	12	\$ 2,304.35	\$ 4,608.69
Cuerámara	12	\$ 1,643.87	\$ 3,287.74
Doctor Mora	12	\$ 1,019.29	\$ 2,038.57
Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional	12	\$ 2,915.04	\$ 5,830.08
Guanajuato	12	\$ 1,059.29	\$ 2,118.58
Huanímaro	12	\$ 1,445.95	\$ 2,891.90
Irapuato	12	\$ 1,922.40	\$ 3,844.80
Jaral del Progreso	12	\$ 1,125.54	\$ 2,251.07
Jerécuaro	12	\$ 799.93	\$ 1,599.87
León	12	\$ 1,221.65	\$ 2,443.31
Manuel Doblado	12	\$ 1,913.32	\$ 3,826.63
Moroleón	12	\$ 1,060.28	\$ 2,120.55
Ocampo	12	\$ 2,054.14	\$ 4,108.27
Pénjamo	12	\$ 3,226.75	\$ 6,453.50
Pueblo Nuevo	12	\$ 1,318.47	\$ 2,636.94
Purísima del Rincón	12	\$ 2,042.57	\$ 4,085.15
Romita	12	\$ 1,100.65	\$ 2,201.30
Salamanca	10	\$ 632.97	\$ 1,265.95
Salvatierra	12	\$ 1,466.38	\$ 2,932.76
San Diego de la Unión	10	\$ 2,479.00	\$ 4,957.99
San Felipe	12	\$ 1,843.11	\$ 3,686.22
San Francisco del Rincón	12	\$ 1,733.96	\$ 3,467.92
San José Iturbide	12	\$ 1,663.67	\$ 3,327.34
San Luis de la Paz	12	\$ 1,440.08	\$ 2,880.16

TABLA II. PORCENTAJE DE IMPUESTO DAP Y TARIFA LÍMITE DE LOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE GUANAJUATO DEL AÑO 2022. (CONTINUACIÓN)

Municipio	Porcentaje de Impuesto (Cobro)	Mensual (Pesos Mexicanos)	Bimestral (Pesos Mexicanos)
San Miguel de Allende	12	\$ 1,091.84	\$ 2,183.68
Santa Catarina	12	\$ 7,695.63	\$ 15,391.27
Santa Cruz de Juventino Rosas	12	\$ 948.52	\$ 1,897.04
Santiago Maravatío	12	\$ 5,248.14	\$ 10,496.28
Silao de la Victoria	12	\$ 3,735.24	\$ 7,470.49
Tarandacuao	12	\$ 2,343.13	\$ 4,686.27
Tarimoro	12	\$ 1,449.40	\$ 2,898.79
Tierra Blanca	12	\$ 2,564.37	\$ 5,128.74
Uriangato	12	\$ 1,362.53	\$ 2,725.05
Valle de Santiago	12	\$ 1,709.30	\$ 3,418.61
Victoria	12	\$ 3,735.24	\$ 7,470.49
Villagrán	12	\$ 1,733.51	\$ 3,467.01
Xichú	12	\$ 2,807.22	\$ 5,614.44
Yuriria	12	\$ 1,858.30	\$ 3,716.60

En la [Tabla II](#) es posible observar la gran variedad en los montos de las tarifas y también una particularidad: cuatro municipios cobran el 10 % en comparación con el resto que cobra el 12 %.

C. CASOS DE ESTUDIO, MUNICIPIOS: APASEO EL GRANDE, CORTÁZAR, ROMITA Y SALAMANCA.

Para focalizar el análisis de manera que se puedan tener algunos rasgos particulares del consumo del DAP en los municipios del estado de Guanajuato, se expone a continuación los resultados públicos de los municipios de Apaseo el Grande, Cortázar, Romita y Salamanca.

El análisis inicia haciendo una comparativa de las tarifas del año 2020 versus el año 2021 que se muestran en la tabla respectiva de cada municipio. Derivado que en la diversidad de los municipios se muestra esta tabla para conocer la variación de un año a otro. Posteriormente se muestra la facturación, recaudación y déficit para el periodo de octubre de 2019 - septiembre de 2020.

TABLA III. TARIFA LÍMITE DEL COBRO DE DAP PARA LOS AÑOS 2020 Y 2021 DEL MUNICIPIO DE APASEO EL GRANDE, GUANAJUATO [6].

Concepto	Año		Variación
	2020	2021	
Mensual	\$ 1,268.74	\$ 512.98	\$ -755.76
Bimestral	\$ 2,537.48	\$ 1,025.96	\$ -1,511.52

TABLA IV. FACTURACIÓN, RECAUDACIÓN Y DÉFICIT DEL MUNICIPIO DE APASEO EL GRANDE, GUANAJUATO (PERIODO DE OCTUBRE DE 2019 – SEPTIEMBRE DE 2020) [1].

Periodo	Facturación (Pesos Mexicanos)	Recaudación (Pesos Mexicanos)	Déficit (Pesos Mexicanos)	% Déficit
oct-19	\$1,145,576	\$738,694	\$ - 406,882	-35.51%
nov-19	\$1,106,801	\$537,622	\$ - 569,179	-51.42%
dic-19	\$955,040	\$704,206	\$ - 250,834	-26.26%
ene-20	\$704,500	\$731,108	\$26,608	3.77%
feb-20	\$612,650	\$710,110	\$97,460	15.90%
mar-20	\$885,357	\$784,822	\$ - 100,535	-11.35%
abr-20	\$627,753	\$740,773	\$113,020	18.00%
may-20	\$797,313	\$802,647	\$5,334	0.66%
jun-20	\$1,983,441	\$897,498	\$ - 1,085,943	-54.75%
jul-20	\$526,767	\$819,312	\$292,545	55.53%
ago-20	\$575,842	\$827,157	\$251,315	43.64%
sep-20	\$530,439	\$847,539	\$317,100	59.78%
Total	\$10,451,479	\$9,141,488	\$ - 1,309,991	-12.53%

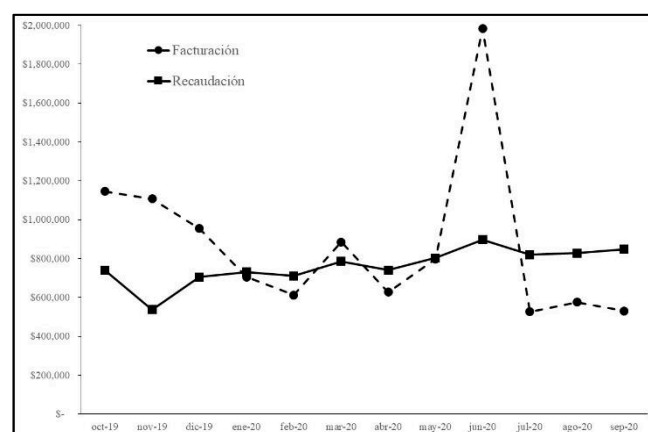


Fig. 1. Gráfico comparativo de facturación vs recaudación del DAP del municipio de Apaseo el Grande, Gto., periodo de octubre de 2019 a septiembre de 2020 [1].

A continuación son mostrados los datos del Municipio de Cortazar.

TABLA V. TARIFA LÍMITE DEL COBRO DE DAP PARA LOS AÑOS 2020 Y 2021 DEL MUNICIPIO DE CORTAZAR, GUANAJUATO [12].

Concepto	Año		Variación
	2020	2021	
Mensual	\$2,428.11	\$2,359.90	\$ -68.21
Bimestral	\$4,856.21	\$4,179.80	\$ -676.41

TABLA VI. FACTURACIÓN, RECAUDACIÓN Y DÉFICIT DEL MUNICIPIO DE CORTAZAR, GUANAJUATO (PERIODO DE OCTUBRE DE 2019 – SEPTIEMBRE DE 2020) [1].

Periodo	Facturación (Pesos Mexicanos)	Recaudación (Pesos Mexicanos)	Déficit (Pesos Mexicanos)	% Déficit
oct-19	\$1,175,310	\$743,544	\$ - 431,766	-36.73%
nov-19	\$1,100,610	\$591,260	\$ - 509,350	-46.27%
dic-19	\$1,196,197	\$689,313	\$ - 506,884	-42.37%
ene-20	\$1,141,776	\$680,773	\$ - 461,003	-40.37%
feb-20	\$1,122,508	\$724,393	\$ - 398,115	-35.46%
mar-20	\$1,158,673	\$762,399	\$ - 396,274	-34.20%
abr-20	\$1,173,635	\$761,914	\$ - 411,721	-35.08%
may-20	\$1,130,878	\$802,232	\$ - 328,646	-20.06%
jun-20	\$1,123,368	\$825,181	\$ - 298,187	-28.54%
jul-20	\$1,113,532	\$874,811	\$ - 238,721	-21.43%
ago-20	\$1,132,294	\$806,343	\$ - 326,951	-28.87%
sep-20	\$1,052,464	\$781,953	\$ - 270,511	-25.70%
Total	\$13,621,245	\$9,043,116	\$ - 4,578,129	-33.61%

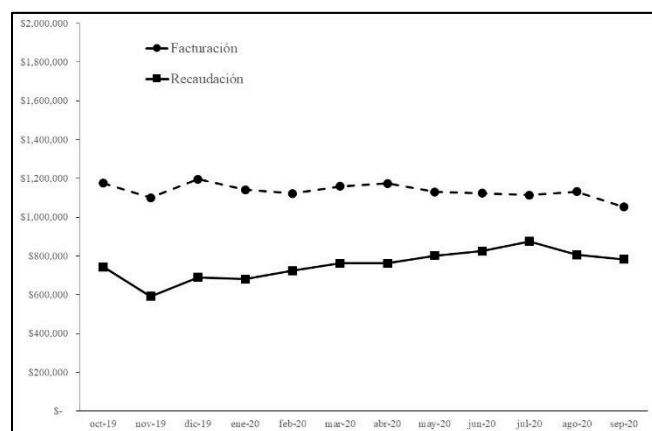


Fig. 2. Gráfico comparativo de facturación vs recaudación del DAP del municipio de Cortazar, Gto., periodo de octubre de 2019 a septiembre de 2020 [1].

En seguida son presentados los datos del Municipio de Romita.

TABLA VII. TARIFA LÍMITE DEL COBRO DE DAP PARA LOS AÑOS 2020 Y 2021 DEL MUNICIPIO DE ROMITA, GUANAJUATO [28].

Concepto	Año		Variación
	2020	2021	
Mensual	\$1,262.00	\$1,336.70	\$74.69
Bimestral	\$2,524.00	\$2,673.39	\$149.39

TABLA VIII. FACTURACIÓN, RECAUDACIÓN Y DÉFICIT DEL MUNICIPIO DE ROMITA, GUANAJUATO (PERIODO DE OCTUBRE DE 2019 – SEPTIEMBRE DE 2020) [1].

Periodo	Facturación (Pesos Mexicanos)	Recaudación (Pesos Mexicanos)	Déficit (Pesos Mexicanos)	% Déficit
oct-19	\$925,763	\$276,232	\$ - 649,531	-70.16%
nov-19	\$964,456	\$280,231	\$ - 684,225	-70.94%
dic-19	\$942,380	\$318,787	\$ - 623,593	-66.17%
ene-20	\$1,018,666	\$394,765	\$ - 623,901	-61.24%
feb-20	\$858,015	\$366,617	\$ - 491,398	-57.27%
mar-20	\$990,493	\$450,485	\$ - 540,008	-54.51%
abr-20	\$880,095	\$389,826	\$ - 490,269	-55.70%
may-20	\$971,994	\$455,565	\$ - 516,429	-53.13%
jun-20	\$852,349	\$430,152	\$ - 422,197	-49.53%
jul-20	\$933,128	\$448,047	\$ - 485,081	-51.98%
ago-20	\$850,535	\$420,607	\$ - 429,928	-50.54%
sep-20	\$891,445	\$440,203	\$ - 451,242	-50.61%
Total	\$11,079,319	\$4,671,517	\$ - 6,407,802	-57.83%

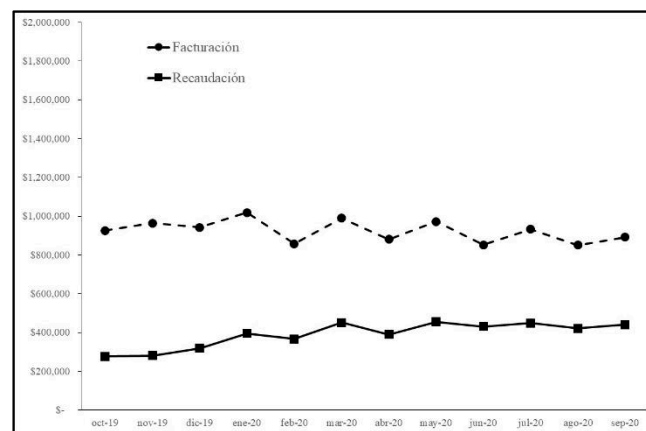


Fig. 3. Gráfico comparativo de facturación vs recaudación del DAP del municipio de Romita, Gto., periodo de octubre de 2019 a septiembre de 2020 [1].

El último caso de estudio presentado es el del municipio de Salamanca.

TABLA IX. TARIFA LÍMITE DEL COBRO DE DAP PARA LOS AÑOS 2020 Y 2021 DEL MUNICIPIO DE SALAMANCA, GUANAJUATO [29].

Concepto	Año		Variación
	2020	2021	
Mensual	\$1,921.45	\$1,921.45	\$-
Bimestral	\$3,842.89	\$3,842.89	\$-

TABLA X. FACTURACIÓN, RECAUDACIÓN Y DÉFICIT DEL MUNICIPIO DE SALAMANCA, GUANAJUATO (OCTUBRE DE 2019 – SEPTIEMBRE DE 2020) [1].

Periodo	Facturación (Pesos Mexicanos)	Recaudación (Pesos Mexicanos)	Déficit (Pesos Mexicanos)	% Déficit
oct-19	\$-	\$-	\$-	N/A
nov-19	\$2,193,920	\$2,013,624	\$ - 180,296	-8.21%
dic-19	\$2,158,052	\$1,935,330	\$ - 222,732	-10.32%
ene-20	\$2,219,687	\$2,322,031	\$102,344	4.61%
feb-20	\$2,068,269	\$1,970,810	\$ - 97,459	-4.71%
mar-20	\$2,188,266	\$2,524,883	\$336,617	15.38%
abr-20	\$2,153,730	\$2,067,275	\$ - 86,455	-4.01%
may-20	\$2,194,274	\$2,667,535	\$473,261	21.56%
jun-20	\$2,145,822	\$2,520,199	\$374,377	17.44%
jul-20	\$2,123,236	\$2,759,411	\$636,175	29.96%
ago-20	\$2,117,127	\$2,312,860	\$195,733	9.24%
sep-20	\$1,988,801	\$2,607,583	\$618,782	31.11%
Total	\$23,551,194	\$25,701,541	\$2,150,347	9.13%

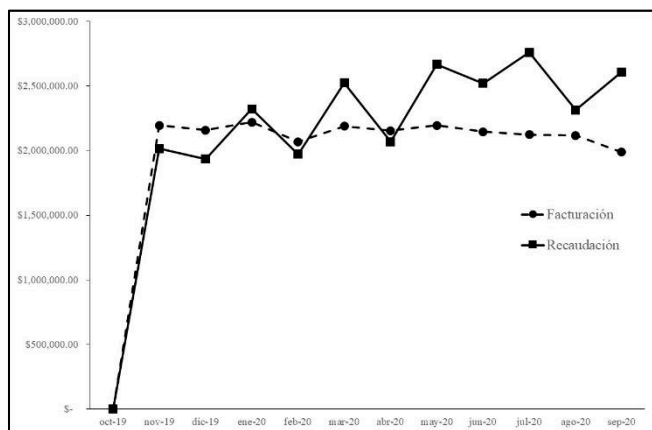


Fig. 4. Gráfico comparativo de facturación vs recaudación del DAP del municipio de Salamanca, Gto., periodo de octubre de 2019 a septiembre de 2020 [1].

D. DISCUSIÓN

La Tabla I y II dan muestra de la gran variabilidad que se da en los municipios del estado de Guanajuato respecto al cobro del DAP. Dicha circunstancia es dada por múltiples factores que algunos se tratan de enunciar a continuación:

- Tecnología instalada (oportunidad de mejora).
- Mantenimiento aplicado a las instalaciones del alumbrado.
- Cálculos de tarifa que no logran ajustarse a los costos globales.
- Cambiantes políticos municipales en el servicio y cobro de alumbrado público.
- Capacitación del personal de alumbrado público.

Lo enunciado anteriormente abre una serie de oportunidades de mejora para las administraciones municipales tanto en la parte técnica-operativa y financiera del alumbrado público.

Por lo anterior citado, la Fig. 5 da muestra que los municipios han buscado acortar la brecha entre la facturación y la recaudación; donde generalmente, los municipios realizan ajustes a los cobros, a la tecnología usada e implementa políticas municipales que favorecen el ahorro de energía eléctrica. Por ello la brecha se va reduciendo en manera general a nivel estatal.

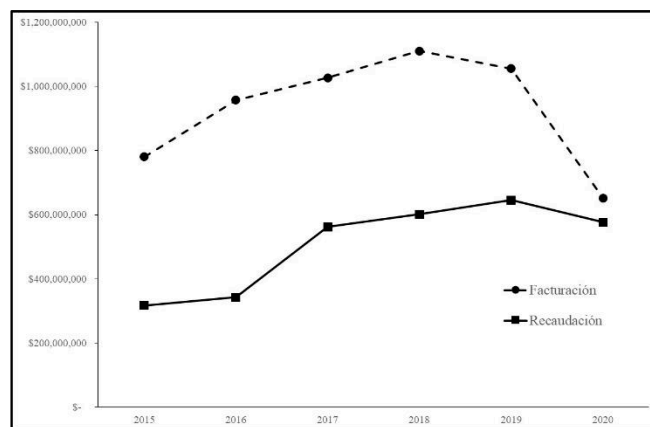


Fig. 5. Gráfico comparativo de facturación vs recaudación del DAP para el estado de Guanajuato durante el periodo de los años del 2015 al 2020 [1].

III. CONCLUSIONES

El análisis presentado del DAP en municipios del Estado de Guanajuato da muestra del comportamiento de la facturación, recaudación y déficit que se tiene en años recientes. Es sabido que algunos municipios tienen mayores ingresos que lo facturado y otros que son deficitarios; pero que de manera global en el estado de Guanajuato del periodo del 2015 al 2020 la curva de diferencia entre ambos conceptos (facturado vs recaudado) beneficia siempre al concepto de facturación. Ante ello, se hace constar en los casos de estudio presentados que, los municipios hacen esfuerzos de distintas maneras (en lo técnico-operativo y en lo administrativo-financiero) para lograr reducir el concepto de facturación y aumentar los montos de recaudación; con el objetivo de reducir esta brecha deficitaria.

REFERENCIAS

- [1] Congreso del Estado de Guanajuato.
- [2] Ley de Ingresos para el Municipio de Abasolo, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [3] Ley de Ingresos para el Municipio de Acambaro, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [4] Ley de Ingresos para el Municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.

- [5] Ley de Ingresos para el Municipio de Apaseo el Alto, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [6] Ley de Ingresos para el Municipio de Apaseo el Grande, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [7] Ley de Ingresos para el Municipio de Atarjea, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [8] Ley de Ingresos para el Municipio de Celaya, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [9] Ley de Ingresos para el Municipio de Manuel Doblado, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [10] Ley de Ingresos para el Municipio de Comonfort, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [11] Ley de Ingresos para el Municipio de Coroneo, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [12] Ley de Ingresos para el Municipio de Cortazar, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [13] Ley de Ingresos para el Municipio de Cuernavaca, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [14] Ley de Ingresos para el Municipio de Doctor Mora, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [15] Ley de Ingresos para el Municipio de Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [16] Ley de Ingresos para el Municipio de Guanajuato, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [17] Ley de Ingresos para el Municipio de Huanimaro, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [18] Ley de Ingresos para el Municipio de Irapuato, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [19] Ley de Ingresos para el Municipio de Jaral del Progreso, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [20] Ley de Ingresos para el Municipio de Jerécuaro, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [21] Ley de Ingresos para el Municipio de León, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [22] Ley de Ingresos para el Municipio de Manuel Doblado, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [23] Ley de Ingresos para el Municipio de Moroleón, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [24] Ley de Ingresos para el Municipio de Ocampo, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [25] Ley de Ingresos para el Municipio de Pénjamo, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [26] Ley de Ingresos para el Municipio de Pueblo Nuevo, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [27] Ley de Ingresos para el Municipio de Purísima del Rincón, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [28] Ley de Ingresos para el Municipio de Romita, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [29] Ley de Ingresos para el Municipio de Salamanca, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [30] Ley de Ingresos para el Municipio de Salvatierra, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [31] Ley de Ingresos para el Municipio de San Diego de la Unión, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [32] Ley de Ingresos para el Municipio de San Felipe, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [33] Ley de Ingresos para el Municipio de San Francisco del Rincón, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [34] Ley de Ingresos para el Municipio de San José Iturbide, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [35] Ley de Ingresos para el Municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [36] Ley de Ingresos para el Municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [37] Ley de Ingresos para el Municipio de Santa Catarina, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.

- [38] Ley de Ingresos para el Municipio de Santa Cruz de Juventino Rosas, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [39] Ley de Ingresos para el Municipio de Santiago Maravatio, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [40] Ley de Ingresos para el Municipio de Silao de la Victoria, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [41] Ley de Ingresos para el Municipio de Tarandacua, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [42] Ley de Ingresos para el Municipio de Tarimoro, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [43] Ley de Ingresos para el Municipio de Tierra Blanca, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [44] Ley de Ingresos para el Municipio de Uriangato, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [45] Ley de Ingresos para el Municipio de Valle de Santiago, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [46] Ley de Ingresos para el Municipio de Victoria, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [47] Ley de Ingresos para el Municipio de Villagran, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [48] Ley de Ingresos para el Municipio de Xichú, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.
- [49] Ley de Ingresos para el Municipio de Yuriria, Guanajuato, para el Ejercicio Fiscal del año 2022.

BIOGRAFÍAS



JESÚS MARTÍNEZ PATIÑO, Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (2008). Egresado del Master en Ecoeficiencia, Ahorro Energético y Ecología Industrial (2003-2004) en la Universidad de Zaragoza (España). Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato (F.I.M.E.E.) (1997-2002).



JOSÉ M. LOZANO GARCÍA recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales

intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes.



IVAN A. HERNÁNDEZ ROBLES, Doctor en Ciencias en Sistemas Eléctricos por el CINVESTAV Unidad Gdl., México, 2013. Se desempeñó como Senior Diseñador de Transformadores de Distribución en la empresa Cooper Power by EATON, su adscripción actual en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato. Su línea de investigación se enfoca en electromagnetismo,

diseño de máquinas eléctricas para renovables, generación inalámbrica, generación distribuida.



ALEJANDRA MORA ROMERO, Egresada de la licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato en el 2022. Realizó instalación de sistemas fotovoltaicos durante sus prácticas profesionales en CEMER SC (2021-2022). Sus principales áreas de interés son las energías renovables, calidad de la energía y microrredes.

Diagnóstico energético en la Facultad de Ingeniería de la UACAM para verificar el cumplimiento del Código de Red

MARÍA ZARAÍ REJÓN CORZO, FRANCISCO ROMÁN LEZAMA ZÁRRAGA, JORGE DE JESÚS CHAN GONZÁLEZ, MENG YEN SHIH, RICARDO RUBÉN SALAZAR UITZ, FELIPE NOH PAT.

Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.

al055590@uacam.mx

frlezama@uacam.mx

jorjchan@uacam.mx

smengyen@uacam.mx

rrsalaza@uacam.mx

felipnoh@uacam.mx

RESUMEN El Código de Red actualizado en la RESOLUCIÓN Núm. RES/550/2021 de la Comisión Reguladora de Energía tiene como objetivo que un centro de carga posea un sistema eléctrico seguro, confiable y eficiente para que pueda estar conectado al Sistema Eléctrico Nacional. Es por ello, que, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, por ser un centro de carga en media tensión, se verifica que las instalaciones eléctricas se encuentren en condiciones de cumplimiento de los requerimientos del Código de Red a través de los resultados obtenidos del diagnóstico energético. El edificio B se tomó como base para nuestro estudio, con la información relevante de las variables eléctricas de interés se proporcionan las conclusiones y propuestas de mejora basados en los resultados de cumplimiento o no cumplimiento. Se pretende que esta metodología sea una guía para que pueda ser aplicada en Instituciones de Educación Superior.

PALABRAS CLAVE - Diagnóstico energético, código de red, centro de carga, sistema eléctrico.

I. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta un diagnóstico energético a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, como requisito del cumplimiento a los requerimientos del Código de Red con el fin de mantener nuestras instalaciones eléctricas confiables y seguras para las personas que las utilizan y para los equipos conectados. Y, además, certificar la conexión de nuestro centro de carga al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

De acuerdo con el Reglamento de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), en su Art. 112, nos dice: “Todas las instalaciones eléctricas destinadas al uso de la energía eléctrica deberán cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas aplicables. La Secretaría de Energía (SENER) podrá efectuar las inspecciones para verificar el cumplimiento” [1]. Dichas inspecciones las realizará a través de algún organismo de control autorizado.

Para cumplir con esta normativa se aplica el manual regulatorio de requerimientos técnicos para la conexión de centros de carga del código de red cuyo objetivo es salvaguardar la seguridad de las personas y sus bienes [2].

Para Centros de Carga que ya se encuentran interconectados al SEN en Media Tensión (entre 13.8, 23 y 34.5 kV), como es el caso de la Facultad de Ingeniería, tendrán la visita de la Unidad de Inspección Eléctrica (UIE), avalada por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para verificar el cumplimiento de los parámetros del Código de

Red. Si hubo algún incumplimiento será acreedor a una fuerte multa y si reincide en la anomalía será desconectado del SEN, de acuerdo con el Art. 165 de la LIE [3].

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Centro de Carga está interconectado al SEN desde hace 12 años, es una Institución de Educación Superior con una demanda contratada de 85 kW y se aborda la preocupación de que la Facultad de Ingeniería no cumpla con alguna de las disposiciones del código de red cuando una UIE llegue a verificar nuestras instalaciones eléctricas. Si encuentra alguna anomalía, la UIE deberá aplicar un plan de trabajo que describa las acciones que serán implementadas para corregir la anomalía y si no se cumplen estas acciones seremos acreedores a una fuerte multa.

Es por ello por lo que se realiza el diagnóstico energético para verificar que se cumplan todos los requerimientos del código de red y en caso de algún incumplimiento realizar las acciones de mejoras para corregir la problemática presente y así evitar sanciones económicas para nuestro centro de carga. La información recabada y analizada es fundamental para el cumplimiento de las disposiciones del Código de Red.

III. METODOLOGÍA

Para este artículo, se empleó una metodología que consta de los siguientes pasos:

1. Preparación de herramientas, equipo de medición y del personal que realizará las mediciones y el levantamiento en campo.
2. Levantamiento físico en las instalaciones en baja tensión y en la subestación con ayuda de los planos eléctricos y diagrama unifilar, identificando cada uno de los conductores, canalizaciones, protecciones, tableros de distribución, circuitos derivados y equipos.
3. Instalar el equipo analizador de redes para almacenar los parámetros eléctricos de interés para nuestro estudio.
4. Analizar la información obtenida del levantamiento y de las mediciones con ayuda de hojas de cálculo y cuadro de cargas para realizar los balanceos por fase.
5. Definir las propuestas de mejora, a través de un plan de trabajo, y ejecutar en un tiempo establecido en la calendarización de actividades y estrategias para obtener el certificado de cumplimiento.
6. Proporcionar un informe final que incluya un programa de mantenimiento preventivo.

La Fig. 1 ilustra las etapas de la metodología desarrollada.

IV. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL CÓDIGO DE RED

En el manual se exponen los requerimientos específicos en el punto de conexión; tiene como objetivo establecer los requerimientos técnicos que deben de cumplir los centros de carga conectados en el SEN [5]. Aplica a todos los nuevos centros de carga que busquen conectarse en alta o media tensión y a los ya conectados. Dependen del nivel de tensión en el que se conectan y el tipo de carga. La Tabla I expone los requerimientos y si aplica o no según el punto de conexión en el que se encuentren, los últimos tres requerimientos son referentes a la calidad de la Energía/Potencia.

V. RESULTADOS OBTENIDOS

La información recabada del edificio B con el medidor de calidad de la energía trifásico es analizada y se verifica el cumplimiento de las disposiciones del código de red.

A. TENSIÓN

La Facultad de Ingeniería es un centro de carga conectado al SEN en media tensión a 13.8 kV y debe cumplir con las especificaciones del código de red mostradas en la Tabla II.

La Tabla III contiene los valores de tensión promedio en el edificio B; se observa que se cumple con lo especificado en la Tabla II y que nuestro centro de carga contiene variaciones de tensión aceptables.

B. FRECUENCIA

Los centros de carga deben ser capaces de soportar variaciones de frecuencia y deberán permanecer conectados, de acuerdo con la Tabla IV.



Fig. 1. Etapas del proceso en un diagnóstico energético.

TABLA I. REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO DE RED

Requerimientos	Centros de Carga en Media Tensión, menor a 1MW	Centros de Carga en Media Tensión, mayor o igual a 1MW	Centros de Carga en Alta Tensión
	Convencionales	Convencionales	Especiales
Tensión	Aplica	Aplica	Aplica
Frecuencia	Aplica	Aplica	Aplica
Corto Circuito	Aplica	Aplica	Aplica
Factor de Potencia	No Aplica	Aplica	Aplica
Protecciones	Aplica	Aplica	Aplica
Control	Aplica sólo a usuarios con Demanda controlable	Aplica sólo a usuarios con Demanda Controlable	Aplica sólo a usuarios con Demanda Controlable
Intercambio de Información	Aplica conforme al manual de TIC	Aplica conforme al manual de TIC	Aplica conforme al manual de TIC
Calidad de la potencia	Aplica sólo el desbalance de tensión y de corriente	Aplica	Aplica

TABLA III. REQUERIMIENTO DE TENSIÓN EN EL CÓDIGO DE RED

Estado Operativo Normal		
Tensión Nominal [kV]	Tensión Máxima [kV]	Tensión Mínima [kV]
13.8	15.0	13.1

TABLA IIIII. NIVELES DE TENSIÓN EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Valores de tensión en el edificio B.		
Tensión nominal [kV]	Tensión Máxima [kV]	Tensión Mínima [kV]
13.8	14.44	13.16

TABLA IV. REQUERIMIENTO DE FRECUENCIA EN EL CÓDIGO DE RED

Tiempo	Frecuencia Máxima [Hz]	Frecuencia Mínima [Hz]
Permanente	61.0	59.0
30 minutos	62.0	58.0

En la Fig. 2, se muestra el comportamiento de frecuencia a lo largo de los 15 días durante el monitoreo con el analizador de redes. Se observa que nuestro centro de carga cumple con lo especificado en la Tabla IV.

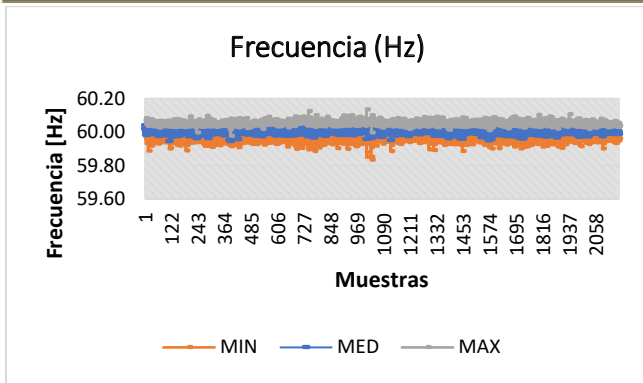


Fig. 2. Muestreo de valores de frecuencia en la Facultad de Ingeniería.

C. CORTOCIRCUITO

La empresa suministradora de energía, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es la encargada de calcular e informar a los centros de carga conectados y los que se conectarán al SEN la corriente máxima y mínima de corto circuito, trifásica y monofásica, en el punto de conexión.

En el estudio de cortocircuito se determina el valor de la Corriente de Cortocircuito (I_{CC}) en el punto de conexión con el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y este es obtenido del valor de Potencia de Cortocircuito (MVA_{CC}) que nos proporciona la CFE.

El método de bus infinito es una técnica simple para calcular un cortocircuito cuando hay una acometida y un transformador. El suministrador proporciona el valor de la potencia aparente de cortocircuito en el punto de conexión para obtener la falla trifásica simétrica balanceada o comúnmente conocida como la corriente de cortocircuito trifásica balanceada. En el punto de conexión, en media tensión, la potencia aparente de cortocircuito está dada por la ecuación:

$$MVA_{CC} = \frac{\sqrt{3} \cdot kV \cdot I_{CC}}{1000} \quad (1)$$

Por consiguiente, la corriente de cortocircuito (I_{CC}) estará dada por:

$$I_{CC} = \frac{MVA_{CC} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot kV} \quad (2)$$

Donde:

kV = voltaje de línea en media tensión, dado en kV ,
 I_{CC} = Corriente de falla de cortocircuito en el punto de conexión, dada en Amperes,
 MVA_{CC} = Potencia aparente de falla de cortocircuito en el punto de conexión, dado en MVA.

Para el tablero de distribución principal, la I_{CC} se obtiene con las ecuaciones:

$$I_{nom} = \frac{kVA_{transformador}}{\sqrt{3} \cdot kV_{lado\ secundario}} \quad (3)$$

$$I_{CC} = \frac{I_{nom}}{\%Z_{transformador}} \quad (4)$$

Donde:

I_{nom} = Corriente nominal en el lado secundario del transformador, dado en Amperes.

I_{CC} = Corriente de falla de cortocircuito en el punto de conexión, dada en Amperes.

$kVA_{transformador}$ = Potencia aparente del transformador, dado en kVA .

$kV_{lado\ secundario}$ = voltaje del lado secundario del transformador, dado en kV .

$\%Z_{transformador}$ = por ciento de la impedancia del transformador.

Esto significa que, si hubiera una falla en el tablero, la única impedancia que limitaría la I_{CC} es la impedancia del transformador y el tablero deberá estar diseñado para soportar dicha I_{CC} .

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche está conectado en media tensión al Sistema Eléctrico Nacional a través del circuito de distribución KAL 4020 CASTAMAY con voltaje de línea igual a 13.2 kV ., perteneciente a la Zona de Distribución Campeche de la Comisión Federal de Electricidad. La CFE como empresa suministradora del servicio de energía eléctrica nos proporcionó el valor de la potencia aparente de cortocircuito, $MVA_{CC} = 125\text{ MVA}$. Entonces, obtenemos la corriente de cortocircuito en el punto de conexión (en la acometida de media tensión) empleando la Ec. (2).

$$I_{CC} = \frac{125\text{ MVA} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 13.2\text{ kV}} = 5,467\text{ A} = 5.46\text{ kA}$$

Ahora, obtenemos la I_{CC} en el tablero de distribución del edificio B. De acuerdo con los datos de placa del transformador del edificio B dados en la Fig. 3, la impedancia del transformador es de 2.27%, por lo que la I_{CC} en el tablero de distribución será

$$I_{nom} = \frac{150\text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0.220\text{ kV}} = 393.64\text{ A}$$

$$I_{CC} = \frac{393.64\text{ A}}{0.0227} = 17,341.31\text{ A} = 17.341\text{ kA}$$

Por lo tanto, se debe seleccionar un tablero I-LINE que soporte la corriente de cortocircuito de 17.341 kA . Si el tablero que se encuentra instalado está diseñado para menos capacidad de I_{CC} deberá ser sustituido.

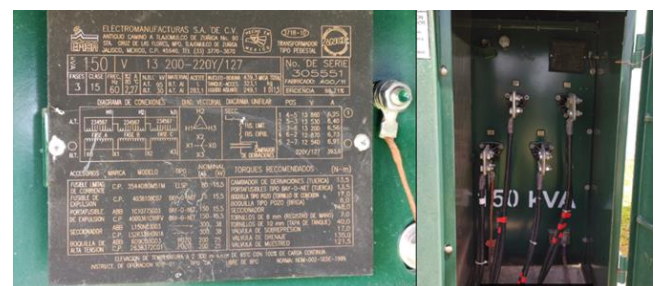


Fig. 3. Información de los datos de placa del transformador del edificio B.

El tablero I-LINE existente en el edificio B es de la marca SQUARE D, modelo MGA600M82B. De acuerdo con las especificaciones del fabricante (Fig. 4) la capacidad de interrupción de corriente de cortocircuito trifásico simétrico del tablero I-LINE a 240V es de 65kA.

Por lo tanto, el tablero de distribución es capaz de soportar la I_{cc} del sistema y ofrece las condiciones de confiabilidad y seguridad para los operadores del tablero.

D. PROTECCIONES

Este estudio es de diagnóstico energético por lo cual hasta este momento no se tiene un estudio de coordinación de protecciones. Este es un requerimiento que no cumplimos y que estará reportado en nuestro informe final como un incumplimiento que deberá ser atendido a la brevedad. Nuestro plan de trabajo incluirá esta anomalía.

E. CONTROL e INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN

Se establece en el código de red que las características de la información del comportamiento de un centro de carga se deben realizar por telemetría en tiempo real a través de un software de monitoreo del tipo Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA).

En los requisitos establecidos para la calidad de la información que deben cumplir el Transportista, Distribuidor, Central Eléctrica o Centro de Carga, así como sus representantes en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), con la finalidad de contribuir a la confiabilidad del SEN [4].

A continuación, se proporcionan las características del medidor bidireccional para mantener el intercambio de información y el monitoreo entre la Red Nacional de Transmisión y el centro de carga de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche.

Tensión de diseño del int.	Marco	No. de polos	Tipo de disparo	Rango en Amperes (A)	Cap. de interrupción - kA simétricos			
					Tensión en CA 50/60 Hz			Tensión en CD
					240	480	600	250
240 V	FA	2,3	TM	15 - 100	10	—	—	5
	FY	1	TM	15 - 30	14	14	—	—
480 V	FA	1	TM	35 - 100	18	18	—	—
		2,3	TM	15 - 100	25	18	—	10
	FC	2,3	TM	15 - 100	100	65	—	—
	FA	2,3	TM	15 - 100	25	18	14	10
600 V	FH	1	TM	15 - 30	65	65	—	—
		2,3	TM	35 - 100	25	25	—	—
		2,3	TM	15 - 100	65	25	18	10
	FI	2,3	TM	20 - 100	200	200	100	—
600 V	HDA	2,3	TM	15 - 150	25	18	14	20
600 V	HGA	2,3	TM	15 - 150	65	35	18	20
600 V	HJA	2,3	TM	15 - 150	100	65	25	20
600 V	HLA	2,3	TM	15 - 150	125	100	50	20
600 V	JDA	2,3	TM	150 - 250	25	18	14	20
600 V	JGA	2,3	TM	150 - 250	65	35	18	20
600 V	JJA	2,3	TM	150 - 250	100	65	25	20
600 V	JLA	2,3	TM	150 - 250	125	100	50	20
600 V	LA	2,3	TM	125 - 400	42	30	22	—
600 V	LH	2,3	TM	125 - 400	65	35	25	—
600 V	LC	2,3	TM	300 - 600	100	65	35	—
600 V	LI	2,3	TM	300 - 600	200	200	100	—
600 V	MGA	2,3	E	300-800	65	35	18	—
600 V	MJA	2,3	E	300-800	100	65	25	—
600 V	PGA	3	EM	600-1200	65	35	18	—
600 V	PJA	3	EM	600-1200	100	65	25	—
480 V	PLA	3	EM	600-1200	125	100	—	—

Fig. 4. Catálogo del fabricante del tablero I-Line.

Medidor multifunción marca Elster solutions llc, modelo A3, medición bidireccional, en cuatro cuadrantes de kWh, kW, kVARh en hasta 4 tarifas horarias, forma 9s, tipo socket, 120-48V, 2.5(20) A, 60 HZ, 3F, 4H, 3e, clase de precisión 0,2%, perfil de carga de 512 kB para seis canales de grabación, pantalla LCD de hasta 6 dígitos, con puerto óptico ANSI II en el panel frontal y puerto ethernet 10 base T con conector RJ-45. Que cumpla con especificación CFE G0000-48-2010, y con LAPEM.

F. DESBALANCE DE TENSIONES

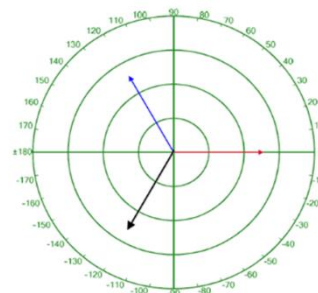
Los sistemas trifásicos se encuentran desbalanceados cuando:

- Los ángulos de desfase entre la tensión y la corriente de cada fase no son iguales.
- Los módulos de la componente fundamental de las tensiones en cada fase del sistema no son iguales.

Esto ocurre por lo general cuando a un sistema que originalmente estaba balanceado, se le agregan cargas de una fase sin balancearlas correctamente, provocando consecuencias negativas para los centros de carga y las redes de distribución, las cuales son:

- Pérdidas por calentamiento de conductores y embobinado de motores.
- Disminución de la vida útil de equipos conectados.
- Disminución en la eficiencia de los motores de inducción trifásicos en la industria.

En la Fig. 5 se presenta el diagrama fasorial de las tensiones de fase a neutro de nuestro sistema trifásico; en él se observa que el sistema se encuentra balanceado debido a que los fasores rotan a una velocidad angular constante de 377 rad/seg, separados 120° eléctricos y con una secuencia ABC. La frecuencia en cada fase está dentro del cumplimiento del código de red (ver Tabla IV). Es importante mencionar que estos valores se obtuvieron de las mediciones del equipo didáctico LABVOLT módulo DSA 8006 serie 8821-22 ubicado en el edificio B de la Facultad de Ingeniería, en el Laboratorio de Electricidad Industrial y Máquinas Eléctricas.



Fase	Voltaje (rms)	Ángulo de fase	Frecuencia (Hz)
A	128.54	0.00	59.86
B	129.94	-119.70	59.90
C	129.76	119.65	60.15

Fig. 5. Diagrama fasorial y valores medidos de tensiones de fase a neutro del sistema, secuencia ABC.

G. DESBALANCE DE CORRIENTE

El resolutivo código de red 2.0 publicado en el DOF el 31 de diciembre de 2021 menciona que el desbalance de corriente en el punto de interconexión de los centros de carga no debe exceder el 15% de conformidad con la NOM-001-CRE/SCFI-2019 vigente o la NMX-J-610-4-30-ANCE-2018 Clase A o IEC 61000-4-30 Clase A. El desbalance de corriente en por ciento está definido como la razón entre la magnitud de la componente de corriente de secuencia negativa $|I_2|$ y la magnitud de la componente de corriente de secuencia positiva $|I_1|$ expresada en porcentaje.

$$\%I_{desbalance} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \times 100 \quad (5)$$

Para los Centros de Carga en Media Tensión con Demanda Contratada menor a 1 MW el desbalance de corriente ($\%I_{desbal.}$) podrá ser calculado mediante la ecuación:

$$\%I_{desbal.} = \frac{\text{Máx}(|I_{prom} - I_A|, |I_{prom} - I_B|, |I_{prom} - I_C|)}{I_{prom}} \quad (6)$$

donde

$$I_{prom} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (7)$$

En el cual:

I_A , I_B e I_C son el valor eficaz de la corriente de la fase A, la fase B y la fase C respectivamente.

La Fig. 6 muestra las mediciones de valor eficaz de corriente obtenidas en cada fase para el edificio B. En ella se observa que la mayor carga de nuestro sistema eléctrico se encuentra en la fase A y la menor carga se encuentra conectada a la fase C. El desbalance es muy grande entre el horario de las 8 de la noche hasta las 6 de la mañana del siguiente día por lo que se deduce que toda la carga del alumbrado exterior, de pasillos y de escaleras está conectada a la fase A. Se procedió a verificar nuestra hipótesis confirmando que dichas cargas están conectadas a la fase A y además la carga del sistema de comunicaciones (voz y datos) aporta corriente significativa a la misma fase A.

De acuerdo con la Ec. (6), en la Fig. 7 se observa el desbalance de corriente en cada instante de las mediciones otorgadas por el analizador de redes trifásico. En ella se nota con mayor claridad que el mayor porcentaje de desbalance ocurre en el horario desde las 8 de la noche hasta las 6 de la mañana del siguiente día. Esto nos indica que no se cumple con el resolutivo del código de red y que se debe corregir esta anomalía realizando un análisis y reconfiguración de las conexiones de las cargas monofásicas del tablero subgeneral y los tableros de circuitos derivados del edificio B antes de la verificación de la unidad de inspección (UI) acreditada por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para la obtención

del certificado de cumplimiento y así evitar multas de cincuenta mil a doscientos mil salarios mínimos por incumplimientos.

La propuesta de solución se deberá plasmar en un plan de trabajo de acuerdo con los lineamientos del código de red.

VI. PLAN DE TRABAJO

Los requerimientos de código de red que no se cumplieron son los siguientes:

1. Protecciones
2. Intercambio de información
3. Desbalance de corriente

Estos son fundamentales para que las instalaciones eléctricas de nuestro centro de carga sean confiables y seguras para las personas que las utilizan y equipos conectados.

El plan de trabajo es el documento oficial donde quedan plasmadas los parámetros del código de red que no se están cumpliendo, los cuales deberán contener una cronología o calendario de actividades y estrategias para su cumplimiento en tiempo y forma. En la RESOLUCIÓN Núm. RES/550/2021 de la Comisión Reguladora de Energía ya se presenta el formato oficial que se debe cumplir; está señalado como el punto 4.1 Formato para presentar el plan de trabajo.

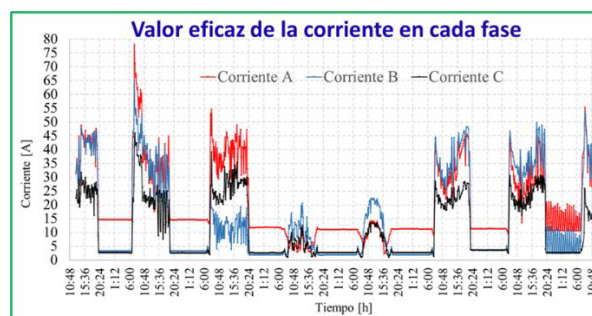


Fig. 6. Mediciones de valor eficaz de corriente obtenidas en cada fase para el edificio B.

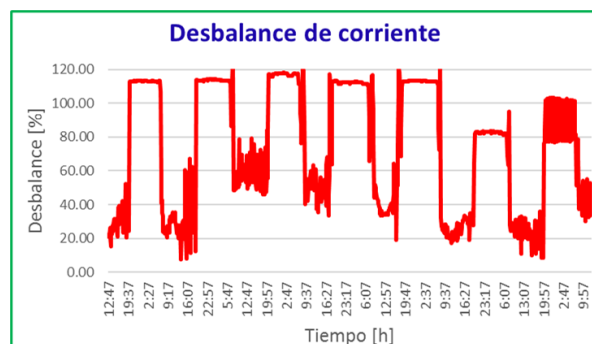


Fig. 7. Desbalance de corriente en cada instante de las mediciones obtenidas para el edificio B.

Entre las estrategias indicadas en dicho formato, se encuentran las siguientes:

- Acciones previstas a implementar para asegurar el cumplimiento del Código de Red.
- Análisis de alternativas, en las que se señalen los equipos evaluados, así como los principales retos técnicos y económicos asociados a cada alternativa.
- Cronograma de acciones previstas con fechas de inicio y terminación.

VII. CONCLUSIONES

Este estudio es fundamental para la verificación de nuestro centro de carga, es una mirada al interior de las instalaciones eléctricas para garantizar su operación confiable, segura y eficiente. Esto asegura que si se presenta una falla interna no afectará la operación del SEN en estado estable.

A través de este estudio logramos definir las acciones correctivas a realizar para el cumplimiento y así cuando la UIE realice la inspección a nuestro centro de carga nos expida el certificado de cumplimiento para mantenerse conectado en media tensión al SEN y de esta manera estaremos exentos de una fuerte multa que ocasionaría graves desbalances económicos a nuestra Universidad. Esta metodología propuesta presenta una base sólida y estructurada para ser implementada en otras Instituciones de Educación Superior.

REFERENCIAS

- [1] Cámara de Diputados. 2014. "Reglamento de la Ley de la Industria Eléctrica". Art. 112. Recuperado de: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LIE.pdf el día 18 de junio de 2022.
- [2] Centro Nacional de Control de Energía. 2018. "Programa de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista". Recuperado de: <https://www.cenace.gob.mx/Docs/Planeacion/ProgramaRNT/Programa%20de%20Ampliacion%20y%20Modernizacion%20del%20Sistema%20El%C3%A9ctrico%20Nacional%202019-2023.pdf> el día 21 de junio de 2022.
- [3] Diario Oficial de la Federación. 2021. "RESOLUCIÓN Núm. RES/550/2021 de la Comisión Reguladora de Energía por la que se expiden las Disposiciones Administrativas de Carácter General que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red". Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5639920&fecha=31/12/2021#gsc.tab=0.
- [4] Diario Oficial de la Federación. 2017. "Procedimiento para la Evaluación de la Conformidad de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización)". Recuperado de: <https://verielec.com/assets/pec-nom-001-sede-2012-nov-2017.pdf> el día 26 de junio de 2022.
- [5] SEGOB, Diario Oficial de la Federación. 2020. "ACUERDO por el que se emite la Política de Confiabilidad, Seguridad, Continuidad y Calidad en el Sistema Eléctrico Nacional". Recuperado de: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5593425&fecha=15/05/2020 el día 28 de junio de 2022.

BIOGRAFÍAS



MARÍA ZARÁI REJÓN CORZO Pasante como Ingeniero en Energía egresada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche (2021). Sus áreas de interés son la implementación de fuentes de energías renovables con sistemas fotovoltaicos interconectados a red y el estudio de eficiencia energética en edificios.



FRANCISCO ROMÁN LEZAMA ZÁRRAGA Doctor en Ciencias por el centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN CINVESTAV (2012). Profesor Investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche desde 2003. Sus áreas de interés comprenden el Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, la Generación Distribuida con Sistemas Fotovoltaicos y la Eficiencia Energética en edificios e industria.



JORGE DE JESÚS CHAN GONZÁLEZ Doctor en Ingeniería por el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM). SNI nivel candidato. Profesor e investigador titular C, de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche desde 1994. Sus áreas de interés comprenden Eficiencia Energética y Energías Renovables, Refrigeración solar térmica y fotovoltaica, Sistemas Fotovoltaicos, Código de Red.



MENG YEN SHIH Doctor en Ingeniería Eléctrica, UANL (2016). Profesor de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche desde 2020, San Francisco de Campeche, México. Sus áreas de interés comprenden protección de sistemas eléctricos, generación distribuida y algoritmos evolutivos. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 1.



RICARDO RUBÉN SALAZAR UITZ Maestro en Ciencias por la Universidad Autónoma de Campeche en el 2013. Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche desde el 2018. Sus áreas de interés comprenden control e instrumentación para sistemas de ingeniería.



FELIPE NOH PAT Doctor en Ciencias por el centro de Investigación de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET (2011). Nivel 1 de SNI. Profesor Investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche desde 2016. Sus áreas de interés son los sistemas térmicos en sistemas mecánicos y en energías renovables desarrollando diversos proyectos de investigación.

Clasificación automática de documentos: el papel de la similitud entre clases

CLAUDIO ISAAC SORIANO-BURGOS, MISAEL LOPEZ-RAMIREZ, RAFAEL GUZMAN CABRERA.

Universidad de Guanajuato, División Ingenierías. Departamento de Estudios Multidisciplinarios.
ci.sorianoburgos@ugto.mx
lopez.misael@ugto.mx
guzmanc@ugto.mx

RESUMEN El incremento continuo de información en formato digital obliga a contar con nuevos métodos y técnicas para acceder, recopilar y organizar estos volúmenes de información textual. Una de las técnicas más utilizadas para organizar la información es la clasificación automática de documentos. Los sistemas de clasificación automáticos de textos tienen una baja eficiencia cuando las clases son muy parecidas, es decir existe traslape entre ellas, y en este caso es muy importante el poder identificar aquellos atributos que nos permiten separar una clase de otra. En este trabajo se presenta la relación que existe entre el traslape entre las clases y la precisión de clasificación. Para la evaluación se utiliza un corpus público con cuatro clases y cada clase además separados por positivos y negativos. Se presentan los resultados obtenidos de cuatro subconjuntos con diferente número de instancias de entrenamiento, para cada caso se presentan las gráficas de similitud, el valor de la precisión y las matrices de confusión obtenidas. Los resultados obtenidos son muy ilustrativos y permiten comprobar que, a mayor similitud entre las clases, menor precisión de clasificación.

PALABRAS CLAVE Aprendizaje supervisado, coeficiente de similitud, clasificación automática de opiniones.

I. INTRODUCCIÓN

Los estudios de aprendizaje automático supervisado están ganando más importancia recientemente debido a la disponibilidad de un número cada vez mayor de documentos electrónicos de diferentes recursos. La clasificación de texto se puede definir como la tarea de categorizar automáticamente un grupo de documentos en una o más clases predefinidas. Por lo tanto, el objetivo principal de la clasificación de texto es permitir a los usuarios extraer información de recursos textuales y tratar procesos como técnicas de recuperación, clasificación y aprendizaje automático para clasificar diferentes patrones. En la técnica de clasificación de texto, una tarea indispensable es la etapa de preprocesamiento, en donde se deben de preparar los datos para realizar la tarea de clasificación. Contar con herramientas computacionales que permitan realizar las tareas de preprocesamiento como la tokenización de un texto o la generación de gráficas para visualizar la similitud de documentos facilitarían el trabajo de clasificación en sus etapas posteriores a la del preprocesamiento.

El problema de medir la similitud entre documentos y clases no es nuevo en el estado del arte, a la fecha sigue siendo un problema de investigación abierto. Al revisar los trabajos más relevantes del área encontramos por ejemplo el reportado en [1] en donde se propone una medición de similitud entre palabras mediante el uso del coeficiente de Jaccard, implementado en el lenguaje de programación Prolog y concluyen que el coeficiente de similitud de Jaccard es lo suficientemente adecuado para ser empleado en la medida de similitud de palabras, pero sin tener en cuenta la similitud entre las oraciones, lo que aumenta la proporción de similitud. Por otra parte, en [2] proponen cinco medidas de

asociación en la recuperación de información de cualquier enciclopedia con gran cantidad de documentos en formato electrónico, como pueden ser Enciclopedia Británica o Wikipedia, las medidas de asociación son: Dice, Jaccard, overlap, coincidencia simple y coeficiente de coseno.

Referente a la clasificación de textos, en [3] mencionan que los textos y documentos son conjuntos de datos no estructurados y que la extracción de características y el procesamiento previo son pasos cruciales para las aplicaciones de clasificación de texto. Como parte de este preprocesamiento mencionan que los datos deben de limpiarse para omitir caracteres y características innecesarias, además de realizar una tokenización y la eliminación de stop words. En el estudio reportado en [4] indican que el proceso de medición en la similitud de textos se puede dividir en la distancia del texto y la representación del texto. La distancia del texto se puede dividir en distancia de longitud, distancia de distribución y distancia semántica; la representación de texto se divide en texto basado en cadenas, basado en corpus, texto semántico único, texto multiséntico y representación basada en estructura gráfica. Dentro de la similitud de texto basado en cadenas se encuentran los coeficientes Sorensen – Dice y de Jaccard. Concluyen que estos métodos tienen en cuenta el significado real del texto, sin embargo, no se pueden adaptar a diferentes dominios e idiomas. El objetivo de las técnicas de aprendizaje automático supervisado para clasificación automática de texto [5], es determinar si un documento determinado pertenece o no a la categoría dada mirando las palabras o términos de esa categoría. De las técnicas más utilizadas se encuentran Naive-Bayes [6] y K-vecinos cercanos [7, 8].

Se considera a la clasificación como una forma de aprendizaje supervisado en donde, a partir de datos de entrada y una etapa de entrenamiento, se generan asignaciones de clase (etiquetas) en base a patrones que son separables, con una precisión cuantificable. Un paso previo para el entrenamiento de un sistema clasificador consiste en realizar la transformación y preparación de los datos que formarán parte del set de entrenamiento, conformado por un conjunto de características que serán utilizadas como entrada al sistema. Dentro de los clasificadores que han reportado mayor precisión se encuentran Naive-Bayes y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). El clasificador Naive-Bayes es la instancia más simple dentro de los clasificadores probabilísticos, basado en el teorema de Bayes. A partir de un conjunto de entrada, el clasificador calcula la probabilidad condicional de que un elemento de ese conjunto pertenezca a una categoría u otra, calculando la razón del número de veces que ocurre el evento y el número de casos posibles. Las SVM consisten en algoritmos que representan modelos predictivos para clasificar un conjunto de características a través de una función lineal conocida como hiperplano. En su implementación se pueden observar 3 pasos: a) la selección de las características; b) entrenamiento y prueba; c) evaluación. De acuerdo con [9], las SVM logran un rendimiento equilibrado y altas precisiones, siendo ideales para abordar una variedad de problemas de clasificación.

Para la estimación de la precisión de un sistema de clasificación, es necesario construir el modelo de clasificación. En primer lugar, se construye el conjunto de entrenamiento con la finalidad de implementarlo en el modelo; y, en segundo lugar, se utiliza un conjunto de prueba para la evaluación del modelo de clasificación propuesto. La razón de los casos etiquetados del conjunto de prueba y el resultado que se obtiene al aplicar el modelo será el porcentaje de precisión de clasificación. Esta razón representa el número de predicciones correctas realizadas por el sistema de clasificación.

II. METODOLOGÍA

Para la obtención del set de entrenamiento para el sistema clasificador y el cálculo en la similitud entre clases, se utiliza un corpus gratuito, disponible en la web, el cual se describe a continuación.

1. Conjunto de datos

El conjunto de datos utilizado consiste en un corpus de archivos de texto con los comentarios de usuarios de la tienda en línea Amazon, referentes a sus experiencias en la compra de libros, dvd's, electrónicos y artículos de cocina, separados cada uno en 2 categorías (positivos y negativos) de acuerdo si la experiencia en la compra fue positiva o negativa para cada una de las clases mencionadas. En la [Tabla I](#) se muestra

que el corpus consiste en 9004 archivos de texto y la forma en la que se encuentran distribuidos en las diferentes clases.

Como se puede observar en la [Tabla I](#), no se cuenta con el mismo número de archivos para todas las categorías ni entre positivos y negativos.

Se utilizó este conjunto para llevar a cabo la evaluación del sistema desarrollado en el presente trabajo. La finalidad es comprobar en primer lugar la similitud entre las clases y en segundo, comprobar la idea intuitiva de que, a mayor similitud, menor precisión de clasificación entre ellas. Se utilizaron varios conjuntos para llevar a cabo la evaluación. En la [Tabla II](#) se muestran los conjuntos balanceados que se formaron para llevar a cabo la evaluación de la metodología propuesta en el presente trabajo. La clase C100 está formada por 100 archivos de la categoría positivos y 100 de la categoría negativos; la clase C200 está formada por 200 archivos de cada tipo y así sucesivamente.

La finalidad de esta distribución de archivos es calcular la precisión de clasificación conforme aumenta el número de instancias en cada clase y además ver qué ocurre con las clases que tienen traslape, es decir son más similares.

2. Generación de archivos

Se implementó un script en Python con la finalidad de generar tres archivos, como se muestra en la [Fig. 1](#). un archivo con extensión. arff, para realizar los cálculos en la clasificación en el software de aprendizaje supervisado Weka; un archivo de texto llamado Reporte.txt, en donde se indican las rutas de las categorías y las palabras con mayor frecuencia que se extrajeron de los archivos de texto; y un archivo de texto llamado Diccionario, en donde se registran todas las palabras extraídas de los archivos de texto junto con sus frecuencias, así como el total de palabras extraídas.

TABLA I. DISTRIBUCIÓN DE LOS ARCHIVOS EN EL CORPUS

Categoría	Positivos	Negativos	Total
books	1037	1463	2500
dvd	1394	1390	2784
electronics	1015	949	1964
kitchen	923	833	1756
			9004

TABLA II. DISTRIBUCIÓN DE LOS ARCHIVOS EN CLASES.

Clase	Positivos	Negativos	Archivos
C100	100	100	1 - 100
C200	200	200	101 - 200
C400	400	400	201 - 400
C800	800	800	401 - 800

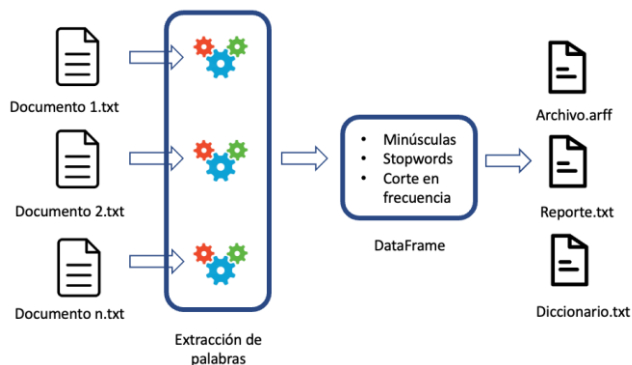


Fig. 1. Generación de archivos.

Para la generación del archivo ARFF se toma cada archivo de cada clase y se realiza la extracción de palabras, eliminando espacios vacíos y caracteres especiales, además de pasar todas las palabras a minúsculas para ser almacenadas en una lista temporal. Posteriormente, cuando se han capturado todas las palabras de los archivos, se encuentran los valores únicos y sus frecuencias. Posteriormente, estos datos se almacenan en un dataframe en donde se continuará el proceso de eliminación de stop words y de corte en frecuencia (ambas opciones si el usuario lo requiere). El dataframe resultante se utiliza para la generación de los archivos ARFF, Reporte y Diccionario.

Con la finalidad de incrementar la funcionalidad del algoritmo desarrollado se ha implementado también la función de realizar la carga del archivo Reporte.txt, con la finalidad de ser archivo fuente para la modificación o generación de nuevos archivos ARFF, permitiendo recortar la cantidad de palabras y de realizar nuevas búsquedas de palabras en los archivos que conforman el corpus en otras rutas.

3. Medidas de similitud

Para el cálculo de la similitud entre documentos y la elaboración de las gráficas de similitud, se calcularon los coeficientes de Jaccard y de Sorensen-Dice, los cuales se describen a continuación.

A. COEFICIENTE DE JACCARD

El coeficiente de Jaccard es una de las técnicas que se utilizan para medir la similitud léxica. Es un valor numérico entre 0 y 1, que mide la similitud entre dos documentos de texto (1=completamente iguales; 0=completamente diferentes) considerando las palabras que tengan en común ambos documentos. Este coeficiente considera que todos los elementos o atributos son igualmente importantes. Puede ser visto como una medida de similitud sobre conjuntos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$j(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

B. COEFICIENTE DE SORENSEN-DICE

El coeficiente de Sorensen-Dice es un coeficiente de similitud parecido al coeficiente de Jaccard que, de igual manera, su valor se encuentra entre 0 y 1, pero a diferencia de Jaccard, este coeficiente considera de mayor importancia a los elementos en común de un par de conjuntos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$s(A, B) = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|}$$

Estas métricas se calculan para llevar a cabo el desarrollo de las gráficas de similitud, las cuales se describen en el siguiente apartado.

4. Gráficas de similitud

El proceso general que se implementó en el algoritmo desarrollado para la generación de las gráficas de similitud se muestra en la Fig. 2. Como se puede observar, se consideró el coeficiente de Jaccard y el coeficiente de Dice. Consiste en tomar cada archivo y realizar el proceso de tokenización, en donde se separan las palabras que forman el texto, se eliminan los espacios vacíos y los caracteres especiales y se convierten a minúsculas. Posteriormente, estas palabras son almacenadas en dos listas para calcular el coeficiente de similitud y se almacena en un dataframe. Cuando un archivo ha sido comparado con el resto, se tomará un segundo archivo de la clase y se repetirá el proceso hasta completar todas las combinaciones. Los datos resultantes se utilizan para realizar una gráfica de dispersión que será la gráfica de similitud de la clase seleccionada.

III. RESULTADOS

Para la evaluación de los algoritmos desarrollados se usaron conjuntos de entrenamiento y prueba tomados de los comentarios positivos de cada uno de los subconjuntos formados (C200, C400, C600 y C800). Después de realizar el proceso de tokenización, se tomaron las 1000 palabras que presentaron las frecuencias más altas. El set de entrenamiento resultante se utilizó con una proporción 80-20 (80% para entrenamiento y 20 % para prueba).

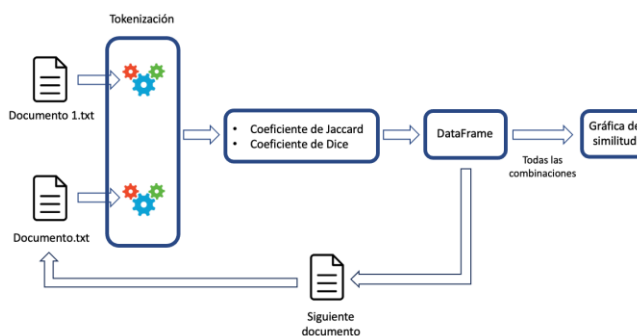


Fig. 2. Generación de gráficas de similitud.

En la [Tabla III](#) se muestran los resultados al llevar a cabo la clasificación de estos conjuntos, utilizando los métodos de aprendizaje descritos con anterioridad Naive Bayes (NB) y máquinas de soporte vectorial (SVM). Podemos observar cómo en ambos casos la precisión aumenta al incrementar el número de instancias de entrenamiento.

De manera similar, en la [Tabla IV](#) se presentan los resultados obtenidos utilizando los mismos métodos de aprendizaje, pero ahora utilizando el escenario de clasificación de conjuntos de entrenamiento y prueba. A diferencia del escenario anterior, en este caso el conjunto de entrenamiento nunca es visto por el conjunto de prueba, lo cual lo convierte en un escenario más deseable cuando se cuenta con un número de instancias suficientemente grande para poder lograr el desempeño eficiente de un sistema de clasificación automática.

Se puede observar, para la mayoría de los casos, que la precisión se incrementa con el aumento del número de instancias de entrenamiento. Ahora bien, es momento de preguntarnos qué ocurre con el traslape entre las clases, para lo cual haremos uso de las gráficas de similitud para estos mismos conjuntos.

Para la generación de las gráficas de similitud, se calcularon los coeficientes de Jaccard y Dice, de los archivos con los comentarios positivos contenidos en las clases C100, C200, C400 y C800. Los valores de estos coeficientes se encuentran en el rango de 0 a 1, en donde el valor 0 corresponde a una completa desigualdad entre los dos archivos, mientras que el valor igual a 1 corresponde al caso en el que se compara un archivo consigo mismo. De acuerdo con las gráficas de similitud generadas, se puede observar un valor más alto en el coeficiente Dice, debido a que este coeficiente les da una mayor importancia a los elementos en común, a diferencia del coeficiente de Jaccard, donde todos los elementos tienen la misma importancia. Las gráficas obtenidas para los conjuntos bajo estudio se presentan en las [Figuras](#) de la 3 a la 5.

TABLA III. RESULTADOS EN LA VALIDACIÓN CRUZADA

Validación cruzada		
Clase	NB	SVM
C100	78.9	76.4
C200	78.1	73.7
C400	80.3	80.5
C800	81	86

TABLA IV. ENTRENAMIENTO Y PRUEBA

Entrenamiento y prueba		
Clase	Bayes	SVM
C100	79.3	73.1
C200	74.3	77.3
C400	79.6	82.6
C800	81.5	86.3

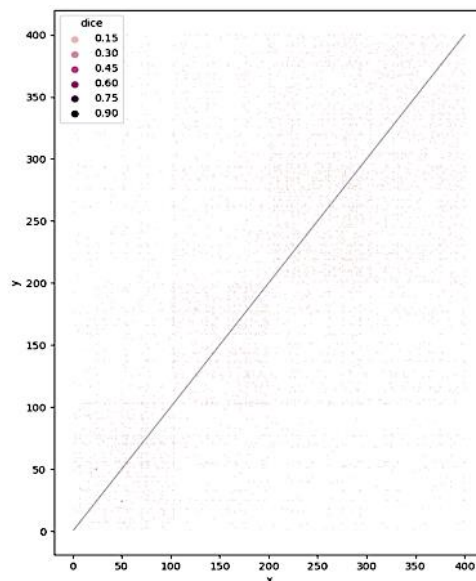


Fig. 3. Gráficas de similitud de la clase C100, positivos.

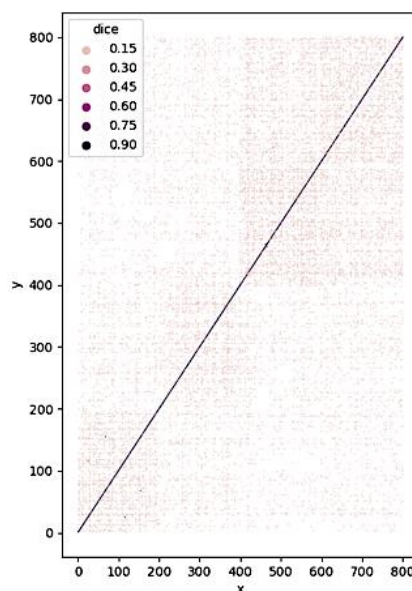


Fig. 4. Gráfica de similitud de la clase C200, positivos.

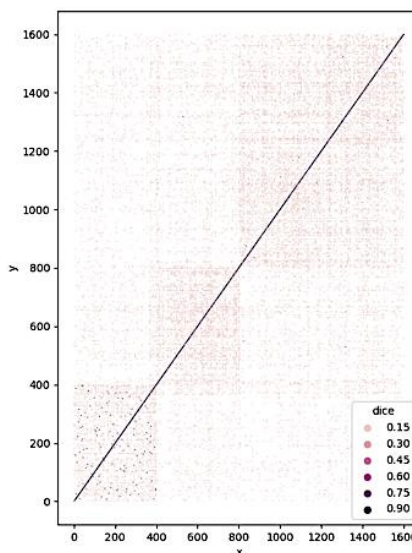


Fig. 5. Gráfica de similitud de la clase C400, positivos.

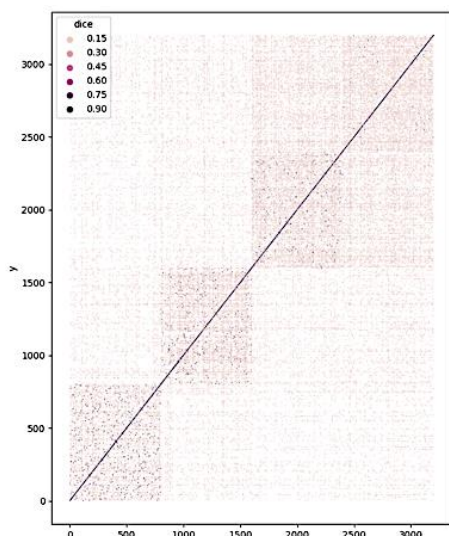


Fig. 6. Gráfica de similitud de la clase C800, positivos.

En las Figs. 3 y 4 se puede observar como el número de puntos se incrementa en la medida en que el número de instancias de entrenamiento también se incrementa, esto es porque el vocabulario (número de palabras) es mayor.

En las Figs. 5 y 6 se puede observar cómo se forman pequeños cuadros por clase, esto es por la similitud entre el lenguaje. Por ejemplo, en la Fig. 6, como se describió, se tienen 800 archivos para cada clase, esto es 3200 archivos en total. Se puede observar un primer cuadro desde 0 hasta 799 (BOOKS), otro de 800 a 1599 (DVD) y observamos entre las últimas dos clases (desde los archivos 1600 hasta el 3199, correspondientes a ELECTRONICS y KITCHEN) un traslape entre estas clases en todas las gráficas de similitud, aunque de manera más notoria a partir del conjunto C200 en adelante.

En la Tabla V se presentan las matrices de confusión para el conjunto C200. Los elementos que se encuentran correctamente clasificados se encuentran sobre la diagonal principal.

TABLA V. MATRICES DE CONFUSIÓN PARA C200

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	155	26	3	16	33	2	1	1
b=dvd	10	162	8	20	3	42	4	4
c=electronics	2	15	150	33	0	5	22	9
d=kitchen	2	15	32	151	0	2	21	21

En el Anexo I se presentan las matrices de confusión para los cuatro conjuntos bajo estudio y ambos escenarios de clasificación. Podemos observar que, tal como se esperaba, el sistema de clasificación se equivoca más entre estas dos categorías. Por ejemplo, para Bayes, 33 archivos que eran de electrónicos los colocó como de cocinas y 32 que eran de cocinas los colocó como de electrónicos.

IV. CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados presentados, se observa que la precisión de clasificación aumenta en la medida que aumenta el número de instancias de entrenamiento. De los algoritmos de clasificación utilizados, las Máquinas de Soporte Vectorial mostraron un mayor valor de precisión conforme el número de instancias va aumentando. Se puede apreciar también de los resultados obtenidos que en la medida que existe traslape entre las clases esto provocar confusión en el método de clasificación.

REFERENCIAS

- [1] S. Niwattanakul, J. Singthongchai, E. Naenudorn, S. Wanapu. Using of Jaccard Coefficient for Keywords Similarity. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2013 Vol I, IMECS 2013, March 13 - 15, 2013.
- [2] S. Takale, S. Nandgaonkar. Measuring Semantic Similarity between Words Using Web Documents. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 1, No.4 October, 2010.
- [3] K. Kowsari, K. Meimandi, M. Heidarysafa, S. Mendu, L. Barnes, D. Brown. Text Classification Algorithms: A Survey. Information 2019, 10, 2019.
- [4] J. Wang, Y. Dong. Measurement of Text Similarity: A Survey. Information 2020, 10, 2020.
- [5] A. Kadhim. Survey on supervised machine learning techniques for automatic text classification. Artificial Intelligence Review. 2019
- [6] A. Mohammad, T. Alwanda, O. Al-Momani. Arabic Text Categorization Using Support vector machine, Naïve Bayes and Neural Network. GSTF Journal on Computing (JOC) Volume 5, Issue 1; pp. 108-115. 2016.
- [7] S. Chen. K-Nearest Neighbor Algorithm Optimization in Text Categorization. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 108. 2018.
- [8] M. Azam, T. Ahmed, F. Sabah, M. Hussain. Feature Extraction based Text Classification using K-Nearest Neighbor Algorithm. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.18 No.12. 2018.
- [9] D. A. Pisner, D. M. Schnyer. Support vector machine. Machine Learning. 2020.

Anexo I.
Clase C100
Naive-Bayes

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	80	15	0	5	21	2	0	0
b=dvd	8	77	4	11	0	14	1	2
c=electronics	2	1	80	17	0	2	18	3
d=kitchen	2	1	20	77	0	0	7	10

SVM

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	88	3	6	3	20	0	1	2
b=dvd	4	78	5	13	0	13	2	2
c=electronics	2	9	63	26	0	4	13	6
d=kitchen	1	6	19	74	0	0	6	11

Clase C200
Naive-Bayes

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	155	26	3	16	33	2	1	1
b=dvd	10	162	8	20	3	42	4	4
c=electronics	2	15	150	33	0	5	22	9
d=kitchen	2	15	32	151	0	2	21	21

SVM

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	171	13	2	14	33	3	0	1
b=dvd	9	153	13	25	2	40	5	6
c=electronics	9	14	126	51	1	4	25	6
d=kitchen	8	17	39	136	0	3	6	25

Clase C400
Naive-Bayes

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	339	18	15	28	74	5	3	1
b=dvd	16	337	15	32	2	67	3	7
c=electronics	8	3	312	77	1	3	57	13
d=kitchen	6	14	95	285	2	3	24	55

SVM

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	355	20	9	16	80	2	1	0
b=dvd	20	347	14	19	5	67	2	5
c=electronics	9	15	289	87	2	5	54	13
d=kitchen	9	12	84	295	4	2	14	64

Clase C800
Naive-Bayes

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	675	55	15	55	132	11	6	12
b=dvd	36	651	32	81	6	133	2	17
c=electronics	11	38	634	117	2	10	123	24
d=kitchen	11	56	114	619	1	11	21	129

SVM

	Validación cruzada				Entrenamiento y prueba			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a=books	755	21	10	14	150	2	3	6
b=dvd	28	729	16	27	5	144	2	7
c=electronics	21	25	629	125	2	5	124	28
d=kitchen	19	36	104	641	3	4	22	133

Análisis del potencial de Ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) como fuente de biorrefinerías

MARA FERNANDA JUÁREZ-COTA¹, DULCE LIBNA AMBRIZ-PÉREZ^{1,2}, MARÍA GUADALUPE SOTO-ÁVILA³, MARIO ARMANDO GÓMEZ-FAVELA⁵, STEFANY SERNA-TORO⁶, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{1,2*}

¹Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

²Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

³Ingeniería en Industrias Alimentarias, Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Michoacán, México

⁵Universidad Politécnica del Mar y la Sierra, La Cruz, Elota, Sinaloa, México.

⁶Grupo de investigaciones en ciencias básicas y educación (GICBE), Universidad del Quindío, Armenia, Quindío, Colombia.

mf.juarezcota@gmail.com

dambroz@upsin.edu.mx

mariagpesotoav@gmail.com

ssernat@uqvirtual.edu.co

magomez@upmys.edu.mx

dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN El ajonjolí es una oleaginosa que por sus características pudiera utilizarse como fuente de biorrefinerías. En este trabajo se estudiaron harinas de semillas de ajonjolí, se analizaron sólidos totales y volátiles, obteniendo valores de $92.03 \pm 0.8\%$ y $90.21 \pm 0.67\%$ respectivamente. Además, se realizó extracción de aceite por soxhlet, utilizando una mezcla de metanol:cloroformo (2:1) como solvente y obteniendo un porcentaje de $25.01 \pm 4.54\%$. Finalmente, se realizó un análisis de las propiedades funcionales de la biomasa completa (BC) y desgrasada (BD) para comparación; obteniendo índice de absorción de agua de $1.86 \pm 0.11 \text{ mL/g}$ y $0.86 \pm 0.11 \text{ mL/g}$; índice de absorción de aceite $3.20 \pm 0.20 \text{ mL/g}$ y $3.00 \pm 0.60 \text{ mL/g}$; para BD y BC, respectivamente; mientras que la actividad emulsificante (AE) fue de $45.00 \pm 1.66\%$ y $18.56 \pm 2.02\%$, la estabilidad de la emulsión (EE) $42.48 \pm 2.17\%$ y $13.75 \pm 2.34\%$, finalmente la capacidad de formación de espuma (CES) fue de $9.7 \pm 1.50\%$ y $7.33 \pm 0.02\%$ para BD y BC, respectivamente; mientras que la estabilidad espumante (EES) fue nula para ambos casos.

PALABRAS CLAVE - Ajonjolí, biorrefinerías, aceite, propiedades funcionales.

I. INTRODUCCIÓN

La evolución de la economía y la industrialización ha traído consigo un incremento en la demanda energética a nivel mundial y paralelamente un prominente consumo y producción de energéticos, donde la mayor parte de ellos son de orígenes no renovables, penosamente estos presentan inconvenientes en su disponibilidad, derivando problemas de carácter político y económico, y en donde su explotación y uso indiscriminado ha originado una crisis ambiental [1,2]. Por lo cual, el uso de alternativas energéticas como los biocombustibles, ha captado la atención por fomentar la diversidad energética, el crecimiento económico y social, además de ser más amigable con el medio ambiente [3,4].

Actualmente, el biodiesel ha destacado por ser una de las alternativas más prometedoras para la sustitución y complementación a los combustibles de origen fósil, debido a que es biodegradable, no tóxico, sus propiedades fisicoquímicas son similares al del diésel de petróleo y puede ser empleado en motores diésel sin requerir modificaciones [5,6]. Este biocombustible está compuesto de ésteres formados por el proceso de transesterificación de aceites vegetales y grasas animales, que con base en su naturaleza se clasifican en primera, segunda y tercera generación (Fig. 1) [7].

Es importante mencionar que, aspectos como la cantidad de aceite, el rendimiento por hectárea, así como su composición y perfil de ácidos grasos, pueden determinar la viabilidad y calidad del biodiesel [8]. Por otro lado, el empleo de productos de origen vegetal con altos contenidos de aceite como semillas, plantas o frutas, han predominado como materia prima para la producción de este combustible. Algunas semillas comestibles han llamado la atención por ser ricas en aceites, tales como la soya (*Glycine max*), el girasol (*Helianthus annuus*), la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), la canola (*Brassica napus*) y el ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) [9,10]. Diversos autores han reportado que existe una preocupación por el uso de aceites comestibles para obtención de bioenergía, ya que esto genera competencia para cubrir los requerimientos alimentarios de las personas, sin embargo, es de considerarse que los aceites no comestibles y los de reúso, no pueden satisfacer la demanda energética que enfrenta el mundo por si solos, por ello tienen que ser complementados con algunos aceites comestibles menos populares [7,9].

Por otro lado, la tendencia actual del desarrollo de biocombustibles se relaciona con el aprovechamiento integral de la biomasa, es decir, ya no se busca un solo producto (como el biodiesel), sino que se investigan procedimientos para el desarrollo de una variedad de productos en serie, esta tecnología es llamada “biorrefinería”, y permite conectar productos que se

generan en gran cantidad (como los biocombustibles) pero que presentan un valor económico bajo, con algunos que se generan a menor escala pero con un valor más elevado; dentro de los productos que se pueden utilizar para complementar la producción de biodiesel destacan los compuestos bioactivos y los ingredientes alimentarios; que normalmente se desarrollan a partir de la biomasa desgrasada (obtenida después de la extracción lipídica) [2,4].

El ajonjolí (*Sesamum indicum* L.), es una de las semillas más antiguas y es ampliamente cultivada en el mundo, esto por ser un material con un alto contenido de aceite, con grandes beneficios nutricionales y nutraceuticos, además, sus características de sabor y su estabilidad oxidativa son muy valorados, esto debido a que contienen algunos compuestos antioxidantes como la sesamina, el sesamol y la sesamolina [9,11]. El contenido de aceite ronda entre el 57-63% y sus principales componentes de ácidos grasos son el linoleico (35-50 %) y el oleico (35-50 %) [12].

Por otra parte, otros autores reportan que la semilla puede contener aproximadamente 50 % de aceite, de los cuales un 35 % son ácidos grasos monoinsaturados y un 44 % ácidos grasos poliinsaturados [13]. Para el desarrollo de biocombustibles es importante cuidar la parte sustentable, y es por ello por lo que es importante considerar los subproductos que se generan después de un proceso, estos pueden ser revalorizados y aprovechados en otras áreas bajo el concepto de biorrefinería. Las harinas que son generadas como residuos después de la extracción de aceite (ya sea comestible o para biocombustible), aún pueden ser aprovechadas y se presume que pueden poseer un alto contenido de proteínas, lo que pudiera relacionarse con algunas propiedades funcionales que determinan su potencial en otras áreas; cabe destacar que, dentro del sector de la industria alimentaria, la viabilidad de utilizar estos materiales está determinada por sus propiedades funcionales, ya que estas pueden generar características tecnológicas específicas para desarrollar productos deseables [14]. En el caso de la biomasa residual desgrasada (BRD) de ajonjolí, usualmente es abundante en proteínas, conteniendo entre el 45-50%, el cual es empleado como alimento de ganado [5].

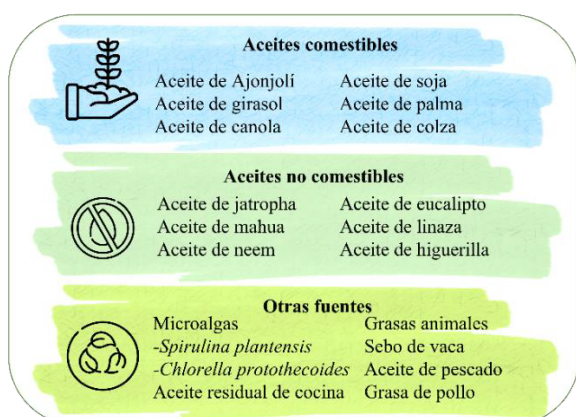


Fig. 1. Materias primas para la producción de biodiesel [7].

La FAOSTAT (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) registró que tan solo en el año 2020 se produjo un total de 6,803,824 millones de toneladas de semillas de ajonjolí en el mundo, con países líderes como Sudán, Birmania (Myanmar), India, China y Etiopía. En el continente americano los principales productores son Brasil, México, Paraguay, Guatemala y Venezuela [15]. Por su parte, en México en el año 2021, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) registró una producción de 53,019.11 toneladas (con un rendimiento de 0.73 ton/ha, siendo Sinaloa el estado líder en el cultivo [16]. Al ser un cultivo ampliamente producido en el mundo y debido a sus características químicas, la semilla de ajonjolí es un prominente candidato como materia prima alternativa para la producción de biodiesel, que es algo que ya se ha estudiado. Sin embargo, hay muy poca información en cuanto a la exploración de este material como fuente de biorrefinería.

El objetivo de este trabajo fue analizar el potencial aprovechamiento integral de las semillas de ajonjolí para obtener productos energéticos y/o alimenticios, en la investigación se realizó la caracterización de la semilla midiendo humedad, cenizas, sólidos totales (ST) y volátiles (SV), posteriormente se realizó extracción de aceite con soxhlet (utilizando una mezcla de metanol:cloroformo como solvente) y finalmente se estudiaron las propiedades de índice de absorción del agua (IAA) y de aceites (IAAc), propiedades emulsificantes y espumantes, tanto de la biomasa desgrasada (BD) y (como control) de la biomasa completa (BC).

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

Las semillas de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) fueron donadas por la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMyS). Posteriormente fueron secadas en un horno de secado por convección (Novatech® HS35-ED) a 70 °C por 8 horas, para la eliminación de humedad; luego fueron molidas empleando un molino eléctrico hasta la formación de harina, para finalmente ser almacenada a 4 ± 1 °C hasta su posterior uso.

B. MÉTODOS

1. Sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad (HUM) y cenizas (SF)

Los contenidos de HUM, ST, SV y SF se evaluaron según lo reportado por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) [17].

Para la determinación de ST, se calentaron los platos de evaporación (crisoles) a 103-105 °C por 15 minutos en un horno de secado (Novatech® HS35-ED) para eliminación de humedad, se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (W_{crisol}). Posteriormente, se colocaron 5 g de la

muestra y se registró su peso (W_{muestra}), finalmente se secaron las muestras a 103-105 °C por 24 h. Se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente (25 °C, en un desecador) y se registró el peso (W_{total}). La prueba se realizó por triplicado y se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar. Dichos porcentajes se calcularon empleando la Ec. (1) [17].

$$\%ST = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{muestra}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (1)$$

El contenido de humedad se calculó restando la diferencia en porcentaje de los sólidos totales (Ec. (2)).

$$\%HUM = 100\% - \%ST \quad (2)$$

Para la determinación de SV y los SF, los crisoles con las muestras secas se sometieron a una calcinación utilizando una mufla a 550 °C durante 120 minutos, posteriormente el residuo es pesado ($W_{\text{volátil}}$). Los SV y SF se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios con desviación estándar, se calcularon empleando las ecuaciones 3 y 4 [17].

$$\%SV = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{volátil}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%SF = \frac{W_{\text{volátil}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (4)$$

2. Extracción de aceite

La extracción de aceite de la harina de semillas de ajonjolí fue llevada a cabo mediante la técnica extracción Soxhlet reportada la AOAC [18]. Se emplearon 100 g de harina de ajonjolí con mezcla de solventes metanol-cloroformo (2:1), la prueba se realizó por triplicado y se representa como promedio con desviación estándar. Posteriormente, el producto se sometió a un rotavapor a 60 °C para la extracción de la mezcla de solventes. El porcentaje de aceite extraído se obtuvo por la diferencia de peso (Ec. (5)) [18].

$$\% \text{ aceite} = \frac{(\text{matraz} + \text{aceite}) - (\text{matraz})}{\text{peso de la muestra}} \times 100 \quad (5)$$

La biomasa residual desgrasada de ajonjolí se secó a 60 °C durante 24 horas para eliminar el exceso de solventes y se almacenó (4 ± 1 °C) para su posterior uso.

3. Propiedades funcionales

Las propiedades del índice absorción del agua (IAA) y de aceite (IAAc) de la harina de BC y BD fueron determinados según lo reportado por Beuchat [18]. Las pruebas se hicieron por triplicado y se reportan promedios con desviación estándar

Para la IAA se emplearon 0.5 g de las muestras con 0.5 ml de agua destilada, mientras que para la IAAc se usaron 0.5 g de las muestras con 0.5 ml de aceite comercial. Se reportó el volumen absorbido por gramo de muestra del sobrenadante medido en una probeta (mL/g).

Las propiedades emulsificantes fueron determinadas mediante la metodología reportada por Neto et al. [20]. Se realizaron 2 pruebas por triplicado, la actividad emulsificante (AE) y la estabilidad de emulsión (EE).

Para la AE se tomaron 0.3 mL de una dispersión de la muestra en agua destilada y se homogenizaron con 0.3 mL de aceite durante 1 min. Se midió la altura de la capa emulsificada y el contenido total del tubo. La AE se calculó con la Ec. (6), y se representa en porcentaje [20].

$$\%AE = \frac{\text{Altura de la capa emulsificada en el tubo}}{\text{Altura del contenido total del tubo}} \times 100 \quad (6)$$

La estabilidad de la emulsión (EE) se determinó por el calentamiento de ésta, a 80 °C por 30 minutos, posteriormente se centrifugó a 1100 rpm por 5 minutos y se calculó, de acuerdo con la Ec. (7) y se representa en porcentaje [20].

$$\%EE = \frac{\text{Altura capa emulsificada desp.de calentar}}{\text{Altura contenido total de tubo desp.de calentar}} \times 100 \quad (7)$$

Finalmente, las propiedades espumantes se determinaron mediante la metodología reportada por Coffman & García [21], para esto se determinaron la capacidad de formación de espuma (CES) y estabilidad espumante (EES) de las muestras analizadas. Para la CES, se emplearon una suspensión con 100 mL de agua destilada y 2 g de harina (entera y desgrasada) en un vaso precipitado, se licuaron (para formar la espuma) y se colocaron en una probeta graduada. La CES se expresa como porcentaje de aumento de los volúmenes iniciales y después de la formación de la espuma, utilizando la Ec. (8):

$$CES\% = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100 \quad (8)$$

Donde, V_2 es el volumen de la solución de harina después de licuar y V_1 es el volumen original de la solución.

La EES se determina como el volumen de la espuma que permanece luego de 0.5 horas, expresado en porcentaje del volumen inicial de espuma.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. Sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad (HUM) y cenizas (SF)

En la Tabla I se observa que la semilla de ajonjolí analizada contiene un 92.03 ± 0.8 de ST, lo que corresponde al contenido de materia orgánica y minerales, resultando en 7.76 ± 0.8 de contenido de humedad de la semilla. Por otro lado, los SV corresponden a la materia orgánica disponible para su aprovechamiento con un resultado de 90.21 ± 0.67 , indicándonos un bajo contenido de ceniza (minerales) de 9.78 ± 0.67 , estos resultados son similares a los reportados en otros trabajos como el de Noël [22], donde se reportaron valores de ST de 93.98 % y SV de 89.36 % en semilla de ajonjolí cruda (tienen un

contenido de humedad y cenizas de 6.25 ± 1.25 y 4.62 ± 0.98 respectivamente). Mientras que Acevedo [23], describe que la semilla puede contener hasta 93.3% de ST y 93.1% de SV (muy pocas cenizas 0.68% y humedad de 6.02).

Estos resultados son relevantes debido a que usualmente la biomasa que se destina a extracción de aceite requiere un paso de secado que implica un alto costo energético y económico del proceso, con las características encontradas este paso podría eliminarse. Por otro lado, los SV representan la materia orgánica disponible para transformarse y los resultados obtenidos sugieren que la semilla de ajonjolí tiene un gran porcentaje de material orgánica aprovechable [22, 23].

Esta materia podría servir como sustrato para la producción de biometano por digestión anaerobia. Hee-Jeong Choi [24], reportó una co-digestión anaerobia de lodos de depuradora y biomasa residual obtenida de la extracción de aceite de ajonjolí, obteniendo un excelente resultado rendimientos de $389.67 \text{ mL/g} \cdot \text{SV}_{\text{in}}$ (mililitro por gramo de sólido volátil). Los autores comentan que esto puede deberse a que la biomasa analizada aun contiene grandes cantidades de materia orgánica en forma de componentes como proteínas, carbohidratos, carbono, nitrógeno, ácido fosfórico y potasio materiales con potencial de producción de biogás.

2. Extracción de aceite

El porcentaje de extracción obtenido fue de 25.01 ± 4.54 %. Cabe mencionar que los resultados son cercanos a los reportados por Acevedo [23], donde reportaron extracción de aceite de 38.41 %. Mientras que otros autores han reportado que la semilla de ajonjolí puede contener entre un 37 % y un 63 %, la variabilidad del contenido de aceite puede deberse a distintos factores como la variedad, la temporada de crecimiento y el cultivo, etapas de maduración, fecha de cosecha y el método de extracción [25, 26].

La cantidad de aceite obtenida en este experimento, si bien es menor que algunos reportes previos, se considera un valor adecuado para la producción de biodiesel, aunque es necesario hacer más pruebas como analizar el perfil de ácidos grasos, índice de acidez, índice de saponificación, entre otras; para poder determinar por completo la posibilidad de utilizarse para este fin. El resultado puede ser relevante por la escasa información de este material para producción de bioenergía. Sobre esto, dentro de los pocos reportes disponibles, Dawodu et al. [9] reportó que el perfil de ácidos grasos y las propiedades del aceite de ajonjolí (cultivado en Sudáfrica) lo catapultan como un material con mucho potencial de usarse para producción de biodiesel y que con esto pueda contribuir a complementar a las materias primas ya existentes. Ahmad et al. [27], reportan un rendimiento de conversión de aceite crudo de ajonjolí (triglicéridos) a biodiesel (éster metílico de ácidos

grasos) del 75.45 % y 72.56 % con una relación de 1:6 (aceite:metanol). Por otro lado, Pandey et al. [28] reportan que, mediante la optimización de parámetros como la relación molar (RM), la concentración del catalizador (CC) y la temperatura de reacción (TR), se puede mejorar el rendimiento de producción de biodiesel, en el estudio se emplearon parámetros de 8:1 RM, 0.34 % CC, 55 °C TR, el rendimiento de la transesterificación fue de 97.27 %.

La **Tabla II** muestra algunas de las propiedades del biodiesel de ajonjolí (obtenido en otras partes del mundo) en comparación con los parámetros de la ASTM D6751 (American Society for Testing and Materials), se observa que este caso, el producto cumple con estos parámetros [29]. Por otro lado, Nath et al. [30], reportó un rendimiento de 92.1% en la transformación de aceite de ajonjolí a biodiesel, con esterificación de etanol:aceite (10:1) y 2,3 % p/vol (peso/volumen) de hidróxido de sodio (NaOH) a 60 °C durante 90 min. Estos resultados infieren que el biodiesel generado con este tipo de aceite puede tener buenos rendimientos y propiedades de calidad, sería importante validar el comportamiento del aceite de ajonjolí de la región.

3. Propiedades funcionales

Con respecto al IAA, la harina de BD presentó mejores resultados con $1.86 \pm 0.11 \text{ mL/g}$, contra $0.86 \pm 0.11 \text{ mL/g}$ de la BC observados en **Tabla III**. Podría deberse a que al contener menos grasa (siendo la grasa de carácter apolar) mejora su miscibilidad favoreciendo la absorción de agua. Algunos autores describen que esta capacidad puede depender de las interacciones de proteínas-agua y agua-agua, resultando en un mayor IAA [31], además, la presencia de carbohidratos contribuye al incremento de este [32].

TABLA I. SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES DE LA SEMILLA DE AJONJOLÍ.

	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	Humedad (%)	Ceniza (%)
Semilla de Ajonjolí	92.03 ± 0.8	90.21 ± 0.67	7.96 ± 0.8	9.78 ± 0.67

± Media de la desviación estándar por triplicado.

TABLA II. PROPIEDADES DE ACEITE DE AJONJOLÍ Y BIODIESEL DE AJONJOLÍ REPORTADO POR OTROS AUTORES*.

Parámetros	Aceite de ajonjolí	Biodiesel de ajonjolí	ASTM D 6751
Contenido de humedad (%)	0.08	0.017	<0.03
Viscosidad cinemática (mm^2/s) a 40 °C	33.34	5.67	1.9 a 6
Punto de inflamación (°C)	285	218	>130
Punto de Fluidez (°C)	-4.9	-9.5	-15 a 16
Punto nube (°C)	-1.2	2.9	-3.0 a 12

*Adaptado de [26,27].

TABLA III. PROPIEDADES FUNCIONALES DE BC Y BD DE AJONJOLÍ.

PROPIEDADES	Biomasa de ajonjolí completa (BC)	Biomasa de ajonjolí desgrasada (BD)
IAA (mL/g)	0.4333 ± 0.05	0.90 ± 0.05
IAAc (mL/g)	1.50 ± 0.3	1.60 ± 0.1
AE (%)	18.5632 ± 2.02	45.00 ± 1.667
EE (%)	13.7521 ± 2.34	42.4859 ± 2.17
CES (%)	7.3 ± 0.02	9.7 ± 0.01
EES (%)	0 ± 0	0 ± 0

Cada valor es un promedio del triplicado con desviación estándar. IAA = Índice de absorción de agua; IAAc = Índice de absorción de aceite; AE = Actividad emulsificante; EE = Estabilidad de la emulsión; CES = Capacidad de formación de espuma; EES = Estabilidad espumante.

Las harinas con buena absorción de agua (IAA > 3 mL/mg) son utilizadas para favorecer la textura de los productos de panadería, por lo cual no se recomienda este uso para las harinas de ajonjolí obtenidas, ya que su IAA es menor al recomendado [33]. La IAAc fue similar para ambos materiales, se observa que la extracción del aceite del material no influyó en la capacidad de absorber grasas. Siendo importante en la tecnología de alimentos, ya se para la incorporación de las harinas en productos congelados precocidos listos para freír, en galletas, incluso salchichas y hamburguesas [33, 34]. La BD y BC podrían ser útiles para la interacción estructural en los alimentos, la retención del sabor, mejora de la palatabilidad y la extensión de la vida útil en productos de panadería o carnes donde se desea la absorción de grasa [35]. Por otro lado, la BD presentó un valor de AE de $45.00 \pm 1.66\%$ y una EE de $42.48 \pm 2.17\%$, a diferencia de la BC con porcentajes menores de AE ($18.56 \pm 2.02\%$) y de EE ($13.75 \pm 2.34\%$). La capacidad de formar emulsiones depende del balance de los grupos hidrofílicos y lipofílicos presentes en los componentes de la harina y es crucial para la incorporación de harinas en cárnicos, aderezos y postres congelados [33, 34]. Los cambios en AE pueden deberse a los cambios de las propiedades hidrofóbicas de las harinas, así como su pH afectando en la capacidad emulsificante [26]. Finalmente, la CES resultó en valores similares para la BC y BD obteniendo $7.3 \pm 0.02\%$ y $9.7 \pm 1.50\%$ respectivamente; por otro lado, la EES fueron nulos en ambas harinas, indicando que la espuma formada no es estable después de cierto tiempo. Una espuma es un coloide con burbujas de aire embebidas en una matriz sólida o líquida [35], relacionadas con las proteínas presentes. Además, puede determinar el tipo de proteína, peso molecular PM, su estructura y de la habilidad relativa de esas proteínas para desnaturalizarse, precipitar y disminuir la tensión superficial en la interfaz aire-líquido de la espuma [35, 36].

Se requiere buena cantidad de proteínas para que haya capacidad espumante, además, deben poseer un balance adecuado entre su solubilidad, flexibilidad y rigidez necesarias para retener el aire dentro de la matriz y por lo tanto formar una espuma estable, propio de proteínas de bajo PM [37, 38]. Harinas con altos valores de CES y EES se recomiendan en alimentos como helados y productos batidos para mejorar sus características sensoriales, por lo

que las harinas de ajonjolí analizadas no son recomendables para este tipo de alimentos.

IV. CONCLUSIONES

Debido a factores climáticos y sociales, actualmente se busca utilizar de manera integral la biomasa, dando origen al enfoque de biorrefinería para la obtención de diversos coproductos dirigidos a una amplia gama de industrias. En este sentido, el ajonjolí es una semilla que podría ser empleada como materia prima, ya que posee altos contenidos de lípidos, proteínas y otros nutrientes de interés.

El presente estudio analizó el potencial del ajonjolí para ser aprovechado por la industria energética y alimenticia. En cuanto al aceite presente, este podría ser utilizado para la obtención de biodiesel, debido a su posible estabilidad oxidativa, sin embargo, aún es necesario realizar un estudio más profundo para conocer su perfil de ácidos grasos y algunas propiedades relacionadas con la calidad del potencial biodiesel. Finalmente, se destacó que el ajonjolí, después de un proceso de desgrasado aún puede ser empleado ya que posee cantidades interesantes de carbohidratos, proteínas y restos de lípidos, entre otros nutrientes; lo cual podría ser aprovechado ya sea para conectar con otro biocombustible como el biogás (esto debido a su alto contenido de materia orgánica), así como en otras áreas como la industria de alimentos, especialmente para mejorar las propiedades sensoriales de productos de panadería, cárnicos, aderezos y postres congelados. Se recomienda seguir analizando la BD, para estudiar su posible incorporación en las industrias energética, cosmética y farmacéutica.

REFERENCIAS

- [1] S. R. Paramati, U. Shahzad, and B. Doğan. "The role of environmental technology for energy demand and energy efficiency: Evidence from OECD countries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111735>, [Online].
- [2] D. Londoño, G., Cardona, J. C., Restrepo, and F. Muñoz. "Fossil or bioenergy? Global fuel market trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110905>, [Online].
- [3] G. P. Romanelli, D. M. Ruiz, y G. A. Pasquale. "Biocombustibles", en *Química de la biomasa y los biocombustibles*, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 2016, cap.5, pp. 62-77. [Online]. Disponible en <https://doi.org/10.35537/10915/59392>.
- [4] Y. Vargas, J. Pazmiño, Y. J. Dávila. "Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión", *Revista Politécnica*, vol. 48, no.2, pp. 7-20, 2021. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01> [Online].
- [5] M. A. Mujtaba, H. Muk Cho, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, H.C. Ong, M. Gul, M.N.A.M. Yusoff. "Critical review on sesame seed oil and its methyl ester on cold flow and oxidation stability", *Energy Reports*, vol. 6, pp. 40-54, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.160> [Online].
- [6] S. K. Duran. "A review on oil extraction and biofuels production from various materials", *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, no. 2, pp.261-265, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.223> [Online].

- [7] P. Verma, and M.P. Sharma. "Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1063–1071, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.054> [Online].
- [8] G. Knothe and R.O. Dunn. "Dependence of oil stability index of fatty compounds on their structure and concentration and Presence of Metals", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol.80, no.10, pp. 1021-1026, 2003. <https://doi.org/10.1007/s11746-003-0814-x> [Online].
- [9] F. A., Dawodu, O. O., Ayodele, and T. Bolanle. "Biodiesel production from *Sesamum indicum* L. seed oil: An optimization study", *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 23, no. 2, pp. 191–199, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.05.006> [Online].
- [10] C. Muthulakshmi, R. Sivarajani, and S. Selvi. "Modification of sesame (*Sesamum indicum* L.) for Triacylglycerol accumulation in plant biomass for biofuel applications". *Biotechnology Reports*, vol. 32, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00668> [Online].
- [11] F.E. Ruiz, "Extracción, Caracterización e índice de estabilidad del aceite de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) a diferentes condiciones de inhibición oxidativa", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería en sistemas, electrónica e industrial, Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador, 2022. [Online]
- [12] J. Plua, S. Sanchez, y E. Giler. "Características bromatológicas, físicas y organolépticas de conservas de piache (*Arapaimas gigas*) en aceite de sacha inchi (*Plukenetia huayllabambana*), ajonjolí (*Sesamum indicum*) y maní (*Arachis hypogaea*)", *Revista Ingeniería e Innovación*, vol. 9, no.1. 2017. <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/rii/article/view/2417> [Online].
- [13] A.P. Ghandi. "Simplified process for the production of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.) butter and its nutritional profile". *Asian Journal of Food and Agro-industry*, vol. 1, no. 1, pp. 24- 27, 2019. Recuperado: [https://www.ajofai.info/Abstract/Simplified%20process%20for%20the%20production%20of%20sesame%20seed%20\(sesamum%20indicum%20\)%20butter%20and%20its%20nutritional%20profile.pdf](https://www.ajofai.info/Abstract/Simplified%20process%20for%20the%20production%20of%20sesame%20seed%20(sesamum%20indicum%20)%20butter%20and%20its%20nutritional%20profile.pdf)
- [14] R. Vegas, A. Zavaleta, y C. Vegas, C. "Efecto del pH y cloruro de sodio sobre las propiedades funcionales de harina de semillas de lupinus mutabilis "tarwi" variedad criolla", *Agroindustrial Science*, vol. 7 no. 1, pp. 49-55, 2017. <https://doi.org/10.17268/agroind.science.2017.01.05> [Online].
- [15] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (17 de febrero 2022). Cultivos y productos de ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- [16] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (19 de agosto 2022). Cierre de la producción agrícola, Anuario estadístico de la producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- [17] U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 January 2001. Disponible: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1002CZ8.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C0000016%5CP1002CZ8.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> [Online]
- [18] AOAC. 1999. Official Methods of Analysis International. 17th Edition, Association of Analytical Communities, Gaithersburg.
- [19] L.R. Beuchat. "Functional and Electrophoretic Characteristics of Succinylated Peanut Flour Protein", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 25, pp.258-261, 1977.<http://dx.doi.org/10.1021/jf60210a044> [Online].
- [20] V.Q., Neto, N. Narain, J.B. Silvia and P.S. Bora. "Functional properties of raw and heat-processed cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) kernel protein isolate", *Nahrung*, vol. 45, no.4, pp.258-262, 2001. [10.1002/1521-3803\(20010801\)45:4<258::AID-FOOD258>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20010801)45:4<258::AID-FOOD258>3.0.CO;2-3) [Online].
- [21] C.W. Coffman, V.V. García. "Functional properties and amino acid content of protein isolate from Mung bean flour". *J. Food Technol.*, vol. 12, pp.473-484, 1977. [Online]
- [22] T. Noël, P. Roger, T. Bernard, F.T. Djikeng, T. Azmeera, M.S.L. Karuna, R.B.N. Prasad, H.M. Womeni. "Effects of boiling and roasting on proximate composition, lipid oxidation, fatty acid profile and mineral content of two sesame varieties commercialized and consumed in Far-North Region of Cameroon", *Food Chemistry*, vol. 221, pp. 1308-1316, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.025> [Online].
- [23] D. Acevedo, Y. Marrugo, & P. Montero. "Evaluación de las propiedades reológicas de pastas de ajonjolí artesanal y tecnificada". *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 16, no. 1, pp. 245–251, 2013. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n1.2013.880> [online].
- [24] Hee-Jeong Choi. Assessment of sludge reduction and biogas production in two-step anaerobic co-digestion using sesame oil cake and sewage sludge. *Water Sci Technol*, Vol.86 no. 7, pp. 1693–1706, 2022. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.294> [Online]
- [25] Hegde, D.M., 2012. Sesame. In: *HandBook of Herbs and Spices*. pp. 449–486.
- [26] A. Asghar, M.N. Majeed. Chemical characterization and fatty acid profile of different sesame varieties in Pakistan. *Am. J. Sci. & Ind. Res.* Vol.4, pp.540–545, 2013. <https://www.org/AJSIR-4-6-540-545.pdf> [Online]
- [27] M. Ahmad, K. Ullah, M. A. Khan, S. Ali, M. Zafar & S. Sultana. Quantitative and Qualitative Analysis of Sesame Oil Biodiesel, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol.33 no.13, pp.1239-1249, 2011. DOI: [10.1080/15567036.2010.531510](https://doi.org/10.1080/15567036.2010.531510) [Online]
- [28] B. Pandey, S.S. Ragit, & S. Kumar. Optimization of biodiesel production from *Sesamum indicum* L. oil by Taguchi's Technique. *Int. J. Appl. Agric. Res*, vol. 12, pp. 255-265, 2017 [Online]
- [29] Knothe, G. Dependence of Biodiesel Fuel Properties on the Structure of Fatty Acid Alkyl Esters. *Fuel Processing Technology*, vol. 86, pp. 1059-1070, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.002>
- [30] Nath, B., Kalita, P., Das, B., & Basumatary, S. Highly efficient renewable heterogeneous base catalyst derived from waste *Sesamum indicum* plant for synthesis of biodiesel. *Renewable Energy*, vol.151, pp. 295-310 2019. doi:10.1016/j.renene.2019.11.029
- [31] J. M. López & K. S. Paredes. (2018). "Efecto de la sustitución parcial de harina de trigo (triticum vulgare) por harina de ajonjolí (*sesamum indicum* l.) desgrasada y harina de arveja (*pisum sativum*) en las características tecnológicas y sensoriales de cupcakes", Tesis de licenciatura, facultad de ingeniería, Escuela profesional de ingeniería agroindustrial, Universidad nacional del santa, 2018. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/3117> [Online].
- [32] M. Mwasaru, K. Muhammad, J. Bakar, Y. CheMan. "Effects of isolation technique and conditions on the extractability, physicochemical and functional properties of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata*) protein isolates II. Functional properties", *Food Chem*, 67: 445-452, 1999.
- [33] A. Ramírez y E. Pacheco. "Propiedades funcionales de harinas altas en fibra dietética obtenidas de piña, Guayaba y guanábana", *Inter ciencia*, 34(4):293-298,2009.
- [34] FS. Taha y MA. Ibrahim. "Effect of degree of hydrolysis on the functional properties of some oilseed proteins", *Grasas y aceites*, 53(3):273-281, 2002.
- [35] S. Chandra, S. Singh, D. Kumari. "Evaluation of functional properties of composite flours and sensorial attributes of composite flour biscuits". *J Food Sci Technol*. 52(6):3681-8, 2015.
- [36] U. Inyang and C. Nwadike. "Functional properties of dehulled sesame (*Sesamum indicum* L.) seed flour", *JOACS* 69:819-822, 1992.
- [37] K. Adebawale, O. Lawal, O. "Comparative study of the functional properties of bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*) jack

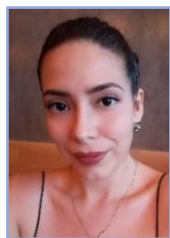
bean (*Canavalia ensiformis*) and Mucuna bean (*Mucuna pruriens*) flours", *Food Res Int.*, 37:355-365, 2004.

[38] S. Badui. "Química de los Alimentos". 5ª Edición. Pearson Educación, 744 pp. 2013,

AGRADECIMIENTOS

Al programa académico de Ingeniería en Biotecnología UPSIN por el apoyo brindado en equipamiento, a los alumnos Jesus David Cota Yanagui y Hector Manuel Uribe Flores por el apoyo técnico en el laboratorio.

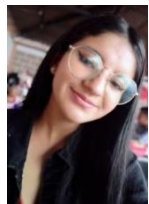
BIOGRAFÍAS



MARA F. JUÁREZ COTA Maestrando en Desarrollo Sustentable en programa Maestría en Ciencias Aplicadas en UPSIN. Formación en Ingeniería en Energía en la misma casa de estudios. Experiencia como profesor de asignatura en el área de inglés conversacional, enseñanza del idioma a nivel principiante, básico e intermedio, además de ciencias básicas nivel bachiller. Experiencia como asistente de coordinación y recepción de materias primas de HQ Flavor, y desarrollo de propuesta de proyecto para eficiencia energética e instalaciones fotovoltaica.



DULCE L. AMBRÍZ PÉREZ Lic. Química en Alimentos, egresada de la UAEH, Maestra en Ciencias egresada de la UAS y Doctora en Ciencias egresada de CIAD-Culiacán. Ha realizado múltiples estancias de investigación en universidades nacionales e internacionales, destacando CIIDIR Sinaloa y Texas A&M University; Profesora en la Universidad Politécnica de Sinaloa; pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Nivel I, desde enero 2018. Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico. Formación y experiencia en el área de alimentos funcionales y compuestos nutraceuticos, ha trabajado en la extracción, cuantificación e identificación de compuestos de interés. Autora de diversas publicaciones científicas indizadas y de divulgación.

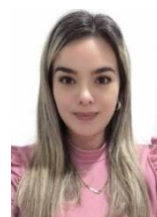


MARÍA GUADALUPE SOTO ÁVILA Estudiante de licenciatura en el Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, perteneciente al Tecnológico Nacional de México, actualmente cursa el séptimo semestre de la carrera de Ingeniería en Industrias Alimentarias, con habilidad en el desarrollo de proyectos internos, así mismo, también cuenta con experiencia en como auxiliar en laboratorio de ciencias básicas



MARIO A. GÓMEZ FAVELA Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Alimentaria, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de del Mar y la Sierra; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2019; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro del Comité

Editor de la Revista Universo de la Tecnológica, Área Biotecnología y Ciencias Agropecuarias; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con Procesamiento de productos y subproductos agroindustriales, Desarrollo de alimentos funcionales usando productos y subproductos agroindustriales, Desarrollo de nuevos materiales biodegradables utilizando subproductos agroindustriales, y Aprovechamiento de semillas nativas subutilizadas en Sinaloa.



STEFANY SERNA TORO Licenciada en Biología y Educación Ambiental, Magister en Biología Vegetal. Actualmente candidata a Doctora en Ciencias- Biología en la Universidad del Quindío. En la actualidad trabaja en la Universidad del Quindío y el Sena Regional Quindío en un programa llamado TecnoAcademia, desempeñándose como Docente, en el área de Biotecnología Vegetal y Microbiología Ambiental. Realiza investigación

relacionada con la capacidad de biorremediación de consorcios microbianos (levaduras/bacterias) en aguas residuales contaminadas con cromo hexavalente.



DAVID U. SANTOS BALLARDO Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2017; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como

Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.

Extracción de aceite de semilla de girasol para potencial fuente de biodiesel

MARIO REYES-VARGAS¹, JESSICA JATZIRI LÓPEZ-PICOS¹, JESÚS ANTONIO OLIVA-GALLARDO¹, JESÚS ALBERTO CALVILLO-BELTRÁN¹, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{1,2}.

¹Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

²Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

2020030100@upsin.edu.mx

2020030113@upsin.edu.mx

2020030110@upsin.edu.mx

2020030755@upsin.edu.mx

dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN La producción nacional de girasol en México sólo satisface un porcentaje bajo de la demanda anual de aceites derivados de la semilla, y el porcentaje restante es cubierto por importaciones principalmente de Argentina, Estados Unidos y España. Para esta situación SAGARPA hizo una planeación agrícola nacional del 2017 al 2030, que propone aumentar las plantaciones de esta leguminosa a nivel nacional y diversificar los productos derivados de ella, para reducir ese porcentaje tan abrupto de importaciones. Para determinar el potencial de la semilla de girasol, se realizó la caracterización de la biomasa y posteriormente se realizó extracción de aceite por método soxhlet (con metanol como solvente), en donde los resultados de ambas pruebas fueron adecuados para pensar en un uso alternativo, entre ellos, resaltó su nulo contenido de humedad que evita pretratamientos costosos. Además de su porcentaje de materia orgánica aprovechable por encima del 75% y su buen porcentaje de extracción de aceite con $14.72\% \pm 0.005$. Se puede concluir que este material es buen candidato para el desarrollo de biodiesel y de una potencial biorrefinería.

PALABRAS CLAVE semilla de girasol, soxhlet, aceite, materia orgánica.

I. INTRODUCCIÓN

El girasol es una planta originaria del norte de México y oeste de Estados Unidos, de nombre científico *Helianthus annuus*, es una planta herbácea anual de la familia de la asteráceas, cultivada principalmente con fines alimenticios y de ornamento, con una gran importancia mundial debido a su alto contenido de aceite (rico en ácidos grasos insaturados) en su semilla. En cuanto a las propiedades físicas de la semilla de girasol, esta llega a medir de entre 0.7 a 2.5 centímetros (cm) de largo, con un ancho de entre 0.4 y 1.3 cm, esto se considera una gran ventaja, ya que algunos pre-tratamientos mecánicos (como troceado o molido) de la biomasa se facilitan bastante, además de que su almacenamiento es más práctico debido a las proporciones de su tamaño en comparación de otros materiales utilizados para la extracción de aceites vegetales [1].

La semilla de girasol cuenta con bastantes características que la hacen adecuada para la extracción de aceite vegetal, químicamente está conformada por tres principales macronutrientes; carbohidratos, proteínas y lípidos, además puede contener una gran variedad de vitaminas, minerales y otros compuestos bio-activos [2]. Aunque el aceite de girasol es ampliamente utilizado para consumo en la alimentación, algunos autores han mencionado que éste material oleaginoso tiene algunas características que lo hacen un buen candidato para obtención de biodiesel, dichas propiedades pueden ser un bajo contenido de glicerina y un alto índice de cetano, registrando valores cercanos a 45.55 [3].

Por otro lado, usualmente la semilla de girasol no requiere grandes consumos energéticos para su proceso de secado, ya que su contenido de humedad es muy bajo (menor del 15%), dependiendo de las condiciones en las que se almacene, esta propiedad se traduce en un ahorro importante de la preparación de la biomasa previo a la extracción de aceite [4]. Uno de los inconvenientes del procesamiento de la semilla de girasol es el proceso de sacarla de su cáscara, aunque no representa una alta dificultad, demanda una gran cantidad de tiempo hacerlo y a nivel industrial es un gasto extra considerable, pero que a su vez es balanceado con el ahorro del gasto del secado, industrialmente hablando [5].

El aceite de semilla de girasol tiene múltiples usos, uno de ellos y actualmente de los más innovadores es el uso para la elaboración de biodiesel como lo reportan diversos autores [6, 7, 8], destacando el uso de semillas de girasol que se utilizaron como biorremediación de metales pesados, es decir al crecer la planta absorbe estos materiales del medio ambiente, concentrándolos en la semilla, esto hace que el aceite obtenido no se pueda utilizar para alimentación, pero si tenga una posible aplicación en producción de biodiesel [5].

Por otro lado, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural en México (SAGARPA) desarrolló una planeación agrícola nacional del 2017 al 2030 para la producción de diversas oleaginosas [9], entre ellas, la semilla de girasol. Entre muchas de las propuestas mencionadas en la planeación de las regiones 16 y 17 (donde se ubica el estado de Sinaloa), destacan las siguientes:

- Impulsar la producción nacional de girasol (aplica en todas las regiones)
- Incrementar la superficie y productividad de las oleaginosas ya cultivadas y diversificar la producción hacia nuevas áreas de riego.
- Diseñar y poner en marcha un sistema de unidades especializadas de innovación y desarrollo de productos.

Estas propuestas tienen su origen en que México produce aproximadamente 8,970 toneladas de semillas de girasol anualmente, dicha producción solo satisface la demanda nacional en un 14.92% y más alarmante aun, solo cubre el 7.42% en cuestión de aceite de girasol para alimentación, por lo que el porcentaje restante se satisface con importaciones principalmente de Argentina, Estados Unidos y España [10]. Esto habla mucho de la calidad de los procesos de extracción nacionales y como se pueden mejorar, y a su vez, la ventana de oportunidades que tiene el girasol como una potencial materia prima para biodiesel en México.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

1. Materia Orgánica

Se utilizó semilla de girasol *Helianthus annuus*, obtenida de fruterías locales ubicadas en Mazatlán, Sinaloa.

B. METODOLOGÍA

1. Caracterización de la semilla de girasol (sólidos totales y volátiles, humedad y cenizas)

Los contenidos de humedad (H), sólidos totales (ST) y volátiles (SV) y sólidos fijos o cenizas (SF) se evaluaron según lo reportado por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) [11].

Para la determinación de ST, se calentaron los platos de evaporación (crisoles) a 103-105°C por 15 min en un horno de secado (Novatech® HS35-ED) para eliminación de humedad. Se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (W_{crisol}). Posteriormente, se colocaron 3 g de la muestra y se registró su peso ($W_{muestra}$), finalmente se secaron las muestras a 103-105°C por 18 h. Se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente (25°C, en un desecador) y se registró el peso (W_{total}). La prueba se realizó por triplicado y se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar. Dichos porcentajes se calcularon empleando la Ec. (1) [11].

Cantidad de sólidos totales:

$$\%ST = \frac{W_{total} - W_{crisol}}{W_{muestra} - W_{crisol}} * 100 \quad (1)$$

El contenido de humedad se calculó restando la diferencia en porcentaje de los sólidos totales (Ec. (2)).

$$\%H = 100\% - \%ST \quad (2)$$

Cantidad de sólidos volátiles:

$$\%SV = \frac{W_{total} - W_{volátil}}{W_{total} - W_{crisol}} * 100 \quad (3)$$

Cantidad de sólidos fijos o cenizas:

$$\%SF = \frac{W_{volátil} - W_{crisol}}{W_{total} - W_{crisol}} * 100 \quad (4)$$

2. Preparación de la semilla de girasol

A las semillas de girasol se le realizó un pretratamiento básico en donde se les retiró la cáscara y posteriormente se molieron en una licuadora, esto con el motivo de que la semilla gane más superficie de contacto con el disolvente y pueda extraer la mayor cantidad de aceite posible.

Se prepararon 55 gramos de muestra (Fig. 1), envueltas en papel filtro de celulosa, para ingresarlas dentro del equipo soxhlet.

3. Montado del equipo de extracción soxhlet

Se utilizó un equipo de extracción soxhlet utilizando metanol como solvente de extracción (300 ml de metanol para cada equipo) (Fig. 2).

4. Extracción del aceite de semilla de girasol

El metanol se evapora con la ayuda de la placa calentadora (Fig. 3), manteniéndolo a una temperatura promedio de $61.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.25$ (Mediciones tomadas con una cámara termo-gráfica), después, el metanol en forma gaseosa pasará a través del tubo exterior y sube hasta encontrarse con el refrigerante, al momento de entrar en contacto con el refrigerante se condensa hasta alcanzar su temperatura ideal para iniciar la extracción de aceite de las cápsulas (semillas de girasol).



Fig. 1. Troceado de la biomasa y preparación de las cápsulas.



Fig. 2. Equipo soxhlet montado.



Fig. 3. Comparación del primer lavado hecho por el equipo soxhlet (lado izquierdo) y el último realizado (lado derecho).

La realización de cada uno de los lavados hechos por el método soxhlet fueron monitoreados por dos días. Posteriormente a este proceso, las capsulas con semilla de girasol se secaron por 16 horas en un horno a 75 °C, para que sus pesos se calcularan nuevamente y así poder saber el porcentaje de extracción de aceite que se obtuvo del método soxhlet.

5. Separación del aceite extraído y el disolvente (Metanol)

Se empleó un rotoevaporador (IKA R-200) para realizar la separación del aceite y metanol a una temperatura aproximada de 40°C y a 65 rpm por una duración de tres horas, en donde se ejecutó un proceso de destilación el cual se aprovecha que el punto de ebullición del metanol sea más bajo que el del aceite, haciendo que se evapore primero y en forma de gas, al entrar en contacto con el refrigerante se condensa haciéndolo gotear en forma de metanol puro, como se observa en la Fig. 4.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. Caracterización de la semilla de girasol

La cantidad de sólidos totales, volátiles y fijos obtenidos por la metodología propuesta [8] se muestran en la Tabla I. Es relevante el contenido de ST fue de 100% ± 0, esto indica que la semilla de girasol presenta contenido de humedad nulo, un dato bastante interesante, ya que para su procesamiento no requiere de un pretratamiento de secado y, hablando económicamente, esto ocasiona una reducción de gastos considerable si se desea utilizar la semilla de girasol como fuente de biodiesel.

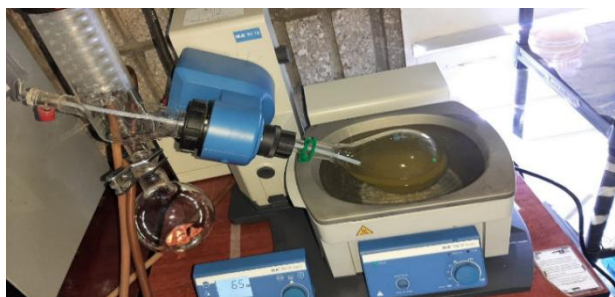


Fig. 4. Rotoevaporador en funcionamiento pasadas tres horas de su uso.

En cuanto a la cantidad de SV (los cuales se pueden definir como la cantidad de materia orgánica presente en la biomasa que se puede transformar y aprovechar); entonces, los resultados obtenidos indican que la semilla tiene mucha materia orgánica aprovechable para una futura producción de biodiesel. Además de contar con un bajo contenido de cenizas, que básicamente es la materia que no se aprovechará de la semilla de girasol. Estas cifras son parecidas a un estudio previo [11], en donde reportaron la caracterización de distintos tipos de girasoles y obtuvieron un total de 91.07 % ± 0.11 en sólidos volátiles y 6.15 % ± 0.04 en contenido de cenizas. Valores más altos (pero cercanos) que los reportados en el presente trabajo.

2. Extracción de aceite de la semilla de girasol

La obtención de aceite promedio de las tres muestras por el método soxhlet se refleja en la Tabla II. El porcentaje de extracción alcanzado indica que el material tiene un potencial como materia prima para obtención de aceite, porque a pesar de que no se utilizó el disolvente más eficiente en el mercado para el método soxhlet, se obtuvo un porcentaje muy cercano al 15% del total de la materia orgánica, esto se puede comparar con el trabajo realizado por Nadeem [10], en donde extrajeron aceite de la semilla de girasol con un porcentaje de 42.5% ± 1.5 por el método soxhlet, pero con la diferencia de que utilizaron como disolvente al benceno, un disolvente mucho más eficiente para la extracción del aceite, pero más peligroso de operar y costoso que el metanol.

Esto puede explicarse a los diferentes puntos de ebullición ya que el metanol presenta 65°C contra 82°C del benceno, esto podría representar un consumo energético menor al utilizar este solvente; además dentro de las opciones de materiales orgánicos disponible para la remoción de lípidos, el metanol presenta características de riesgo menores, además de un costo menor que otros productos, como el acetato de etilo, benceno, cloforormo ciclohexano, diclorometano, etc. [14].

Para determinar el potencial uso del aceite obtenido para biodiesel es necesario conocer parámetros importantes como el perfil de ácidos grasos y el índice de saponificación, éstos son de vital importancia e influyen en la decisión de destinar el material para biocombustibles [5].

TABLA I. CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE GIRASOL.

Materia Orgánica	ST (%)	SV (%)	SF (%)
Semilla de Girasol	100% ± 0	78.8% ± 6	21.2% ± 6

Cada valor representa un promedio del triplicado con desviación estándar. ST = Sólidos totales; SV = Sólidos volátiles; SF = Sólidos fijos o cenizas

Tabla II. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE ACEITE PROMEDIO DE LAS TRES MUESTRAS DE SEMILLA DE GIRASOL.

Método de extracción	Extracción de aceite (%)
Soxhlet	14.72% ± 0.005

Algunos autores han determinado ciertas características del aceite de girasol, por ejemplo, Nadeem [12] reportó un valor de saponificación de 190 ± 3 mgKOH/g de aceite y un contenido de ácidos grasos del $0.92\% \pm 0.008$ como ácido oleico, una cantidad bastante buena ya que se encuentra por debajo del 1%, por otro lado, en el informe realizado por Moschner [13], reportaron que con varias muestras de semilla de girasol molida se pueden obtener porcentajes entre 0.5% y 0.8% en contenido de ácidos grasos.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la semilla de girasol tiene un alto potencial para ser fuente de biodiesel, ya que presenta un buen porcentaje de extracción de aceite, así como una caracterización con resultados bastantes beneficiosos en cuestión de producción a gran escala y poniendo en comparativa con trabajos anteriores realizados, se perfila un buen contenido de ácidos grasos. Es necesario analizar las características del aceite utilizado antes de iniciar a realizar pruebas de transesterificación. Otro punto a destacar es que con el alto contenido de materia orgánica, aún después de la extracción de aceites, esa biomasa se puede seguir aprovechando en búsqueda de más productos de valor agregado ya sea otro biocombustible como el biogás (por su alto contenido de sólidos volátiles) como otros productos bioactivos (por las proteínas presentes).

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN) por brindarnos el apoyo con sus equipos e instalaciones.

REFERENCIAS

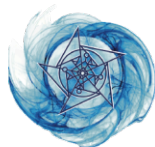
- [1] Equipo Editorial INTAGRI. "Cultivo de Girasol en México | Intagri S.C". Intagri - Cursos Agrícolas - Artículos de agronomía. <https://www.intagri.com/articulos/cereales/cultivo-de-girasol-en-mexico> (Consultados el 2 de agosto de 2022).
- [2] A. Gómez, M. S. Parra Martínez, F. J. Romero, A. J. López y L. Béatriz, "Semillas de girasol, lino, chía y sésamo. compuestos nutricionales y su efecto sobre la salud", Revista Nutrición Investiga, p. 12. (Consultados el 2 de agosto de 2022).
- [3] D. E. Arias Perez, C. A. Teuta Ramírez y J. Parra Plazas, "Caracterización de las propiedades del biodiesel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calorífico", 10 de noviembre de 2011. Accedido el 2 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2709/2129>
- [4] Quintero Fernández, E., Alemán Perez, R. y Rodríguez Valdéz, G. (2007, septiembre). Métodos y tiempo de conservación de aquenios de girasol para semilla. Centro de Investigaciones Agropecuarias, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- [5] S. Iram, I. Tariq, K. S. Ahmad, S. B. Jaffri (2020) *Helianthus annuus* based biodiesel production from seed oil garnered from a phytoremediated terrain, International Journal of Ambient Energy, 43:1, 1763-1771, DOI: 10.1080/01430750.2020.1722228
- [6] G. Antolin Giraldo, "Producción de biodiesel a partir de aceite de girasol en una planta piloto de reacción por cavitación", julio de 2017. Accedido el 1 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/25737/TFG-I-712.pdf?sequence=1>
- [7] J. R. Rodríguez Catañeda, "Producción y evaluación de biodiesel a partir de aceite de girasol (*Heliantus annuus*) de desecho del comedor

- estudiantil de Zamorano.", Honduras, 2006. Accedido el 1 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/017559f8-430d-4596-bbef-ac1326ae1bbb/content>
- [8] K. J. Salamanca-Izaguirre, E. Villanueva-Vega, R. Vivar-Ocampo, O. D. Armendáriz, M. R. Sánchez-Díaz. (2021) Revista Ingeniantes. 2 (2): 36-42.
- [9] SAGARPA. "Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Oleaginosas, Canola, Cártamo, Girasol, Soya", 2017. Accedido el 1 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <http://www.consejagri.mx/images/PLANEACION%20AGRINAL%20MEX/CULTIVOS%20ESTRATEGICOS%20BASICOS/Basic-Oleaginosas.pdf>
- [10] A. Petraru, F. Ursachi y S. Amariei, "Evaluación de las características nutricionales de las semillas de girasol, el aceite y la Torta. Perspectiva de uso de las tortas de girasol como ingrediente funcional", MDPI, p. 8, 2021.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 January 2001. Disponible: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1002CZ8.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000016%5CP1002CZ8.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=k=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>
- [12] R. Nadeem, A. Iqbal, M. Abid Zia, F. Anwar, S. A. Shahid y Z. Mah, "Efecto del prensado en frío y la extracción Soxhlet en los atributos físico-químicos del aceite de girasol (*Helianthus annuus* L.) del aceite de semilla de girasol (*Helianthus annuus* L.)", Revista Internacional de Ciencias Químicas y Bioquímicas, p. 43, 2015. Accedido el 23 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: [https://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.714.8829&rep=rep1&type=pdf#:~:text=The%20result%20showed%20that%20cold,mgkg-1\),%20respectively.](https://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.714.8829&rep=rep1&type=pdf#:~:text=The%20result%20showed%20that%20cold,mgkg-1),%20respectively.)
- [13] C. R. Moschner y B. Biskupek-Korell, "Estimación del contenido de ácidos grasos libres en semillas de girasol con alto contenido de ácido oleico mediante espectroscopia de infrarrojo cercano", Departamento de Bioprocesos Ingeniería - Tecnología de Recursos Renovables, Universidad de Ciencias Aplicadas y Artes de Hannover, Hannover, Alemania, p. 611, 2006.
- [14] D. Tabio-García, Y. Díaz-Domínguez, M. Rondón-Macias, E. Fernández-Santana, R. Piloto-Rodríguez. 2017 Extracción de aceites de origen vegetal. Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". ISBN 978-959-261-553-3.

BIOGRAFÍAS



MARIO REYES VARGAS Actualmente cursa el séptimo cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son los biocombustibles, las energías renovables y energía nuclear.



JESSICA J. LÓPEZ PICOS Actualmente cursa el séptimo cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son las energías renovables.



JESÚS A. OLIVA GALLARDO Actualmente cursa el séptimo cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son las máquinas eléctricas y las energías renovables.



JESÚS ALBERTO CALVILO BELTRÁN Actualmente cursa el séptimo cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son las energías renovables.



DAVID U. SANTOS BALLARDO Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2017; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas

indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.

Efecto de Pretratamiento Térmico en la Producción de Bioetanol a partir de Biomasa Residual de Mango

GABRIEL ARMANDO GONZALEZ-BARRIOS¹, MARA FERNANDA JUÁREZ-COTA², DULCE LIBNA AMBRIZ-PÉREZ^{1,2}, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{1,2}.

¹Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

²Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

2019030136@upsin.edu.mx

2020030670@upsin.edu.mx

dambritz@upsin.edu.mx

dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN La biomasa residual de mango (BRM) es una amenaza para el ambiente y la salud, sin embargo, el aprovechamiento de este residuo mediante la producción de bioetanol puede representar una gran alternativa para valorizar el residuo y al mismo tiempo disminuir su impacto, sin embargo, no hay muchos reportes sobre pretratamientos para este tipo de biomasa. En el presente trabajo se caracterizó la BRM y posteriormente se analizó el efecto de un pre-tratamiento térmico en el rendimiento de la fermentación alcohólica del material. Como resultados se observó un mayor rendimiento de etanol con la fermentación de la biomasa con pre-tratamiento térmico, el incremento reportado fue aproximadamente de 0.9% comparado con la muestra sin pretratamiento.

PALABRAS CLAVE - Biomasa residual de Mango, Bioetanol, pre-tratamiento.

I. INTRODUCCIÓN

La crisis climática que actualmente enfrenta la humanidad es generada, principalmente por las emisiones de CO₂ a la atmosfera. En la actualidad los combustibles fósiles generan aproximadamente el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial, lo cual hace que el índice de condiciones de CO₂ sea muy alto y cada vez vaya en aumento, esto se ha relacionado con grandes daños al ambiente [1]. Los biocombustibles son una gran alternativa que puede ayudar a mitigar la cantidad de emisiones de CO₂ a la atmosfera derivadas de la combustión de combustibles fósiles. Uno de los biocombustibles con un gran potencial, es el bioetanol, el cual para poder utilizarse en este rubro se requiere con un nivel de pureza anhidro, este bioenergético usualmente es producido para ser usado en motores de combustión interna, y se genera a partir de la fermentación de carbohidratos presentes en la biomasa, procedente de cultivos con alto contenido de azúcares o almidones, y a partir de materiales lignocelulósicos [2].

Por otro lado, la producción y el procesamiento de mango en México en los últimos años han ido en aumento (Fig. 1), lo que se traduce a su vez en un incremento de los residuos del mismo. La industria del procesamiento del mango utiliza el 60% del fruto, y el 40% restante son residuos, de los cuales aproximadamente el 20% es pulpa. Si se toman en cuenta los porcentajes de pulpa de desecho de mango y la producción de mango en México en el último año, se calcula un total de 103,489.91 toneladas de pulpa de mango residual que pueden

ser potencialmente aprovechadas para la producción de bioetanol [3,4, 5, 6].

Sobre este tema se ha generado interés lo que ha acarreada el desarrollo de diferentes proyectos, como el de Sarungu et al. [5] donde se realizaron fermentaciones alcohólicas de residuos de mango utilizando combinaciones de dos microorganismos (*Saccharomyces cerevisiae* y *Aspergillus niger*) obteniendo una mezcla con 83 % de pureza de etanol. Por otra parte, Saifuddin et al. [6] analizaron el potencial de producción de bioetanol a partir de *Mangifera indica* L. cv Chokanan, originario de Malasia, donde obtuvieron un producto que cumplía con las características adecuadas como biocombustible. También, Aurora-Vigo & Barrera-Chiroque [12] reportaron la producción de bioetanol a partir de residuos de mango utilizando una optimización del proceso (en los parámetros de concentración de levadura y relación de agua) obteniendo una concentración de alcohol de 61 %.

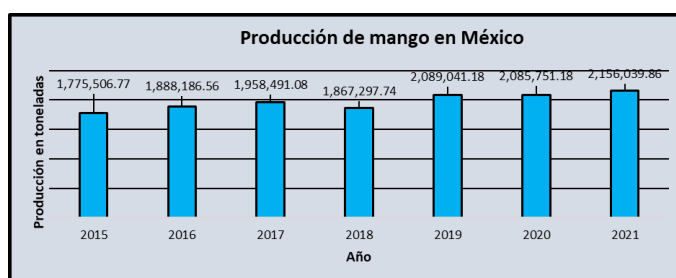


Fig.1. Producción anual de mango en México.

Uno de los principales problemas del aprovechamiento de este tipo de materiales (ricos en lignocelulosa) es la complejidad de los mismos para ser aprovechados por los microorganismos que los transforman, una de las estrategias que se ha venido realizando para mejorar esto es la aplicación de pre-tratamientos, dentro de los que destacan procesos enzimáticos, químicos y físicos (como el térmico) [5,8].

A pesar de esto no existen muchos reportes del uso de pre-tratamientos térmicos a la biomasa residual de mango con el objetivo de mejorar la producción de bioetanol. Es por esto que en el presente trabajo se analizó el potencial de producción de bioetanol a partir de BRM con pretratamiento térmico y sin pretratar.

II. DESARROLLO

Dentro del siguiente apartado se muestra a detalle sobre los métodos y materiales utilizados durante los diferentes procesos realizados para la elaboración de este proyecto.

A. MATERIALES

1. Materiales para la elaboración de los biorreactores

Los biorreactores fueron elaborados en su mayoría por materiales reciclados, solo se requirió comprar 4 llaves de esfera de ½ pulgada de la marca pretul, silicón de uso general de la marca FORTE y pegamento para CPVC de la marca CONTACT. Los materiales reciclados fueron 2 metros de manguera de ½ pulgada, 2 bidones de 4 litros y tubo y conexiones de CPVC.

2. Materiales para la obtención de bioetanol

Los residuos de mango fueron donados por una empresa de procesamiento de mango durante la temporada de producción de 2022.

B. METODOLOGIA

1. Caracterización de la BRM (Determinación de sólidos totales, volátiles, humedad y ceniza).

Los contenidos de HUM, ST, SV y SF se evaluaron según lo reportado por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) [7]. Para la determinación de ST, se calentaron los platos de evaporación (crisoles) a 103-105°C por 15 min en un horno de secado (Novatech® HS35-ED) para eliminación de humedad, se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (W_{crisol}). Posteriormente, se colocaron 5 g de la muestra y se registró su peso ($W_{muestra}$), finalmente se secaron las muestras a 103-105°C por 24 h. Se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente (25°C, en un desecador) y se registró el peso (W_{total}). La prueba se realizó por triplicado y se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar. Dichos porcentajes se calcularon empleando la Ec. (1) [7].

$$\%ST = \frac{W_{total} - W_{crisol}}{W_{muestra} - W_{crisol}} \times 100 \quad (1)$$

El contenido de humedad se calculó restando la diferencia en porcentaje de los sólidos totales (Ec. (2)).

$$\%HUM = 100\% - \%ST \quad (2)$$

Para la determinación de SV y los SF. Los crisoles con las muestras secas se sometieron a una calcinación utilizando una mufla a 550°C durante 120 min, posteriormente el residuo es pesado ($W_{volátil}$). Los SV y SF se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios con desviación estándar, se calcularon empleando las Ecs. (3) y (4) [7].

$$\%SV = \frac{W_{total} - W_{volátil}}{W_{total} - W_{crisol}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%SF = \frac{W_{volátil} - W_{crisol}}{W_{total} - W_{crisol}} \times 100 \quad (4)$$

2. Pre-tratamiento de la biomasa y fermentación

Para el desarrollo del pre-tratamiento, inicialmente toda la biomasa se sometió a un proceso de molienda se utilizó una licuadora de inmersión Oster®, posteriormente la biomasa se sometió a un proceso de 70±1 °C por un periodo de 3 horas, utilizando un horno de convección (Novatech® HS35-ED) [8].

3. Elaboración de los biorreactores

Los biorreactores fueron elaborados con base en un diseño propio (Fig. 2) en donde se reutilizaron galones de 4 litros como biorreactores y se añadieron dos válvulas. Una válvula se colocó en la parte inferior del biorreactor para extraer muestra para monitorear el proceso. Y en la parte superior en la tapa se hizo otro orificio y se colocó otra válvula para con esta controlar y dejar que salir el CO₂ que se libera en el proceso a una trampa de agua, para que este se escape y no se acumule dentro del reactor y aumente la presión y explotara el biorreactor.

4. Fermentación

El proceso de fermentación se realizó a temperatura ambiente con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Primero se activó la levadura con 200 ml de agua tibia durante 10 min, después hizo una mezcla con 3 litros de agua a cada una de las muestras (Fig. 3). Para dar por iniciado el proceso de fermentación, se mezclaron dentro del biorreactor la levadura ya activada y la mezcla de mango con agua. Los parámetros monitoreados durante la fermentación fueron, el pH y la temperatura que fueron medidos con un potenciómetro de la marca Hanna. También se realizó una medición de los grados Brix en la mezcla utilizando un refractómetro. Estas pruebas se estuvieron realizando cada 24 horas con el objetivo de analizar si es que se estaba llevando a cabo una digestión por parte de las levaduras, analizar el tiempo de duración de la fermentación, así como también verificar si no se estaba formando ácido en lugar de alcohol durante el proceso [8].

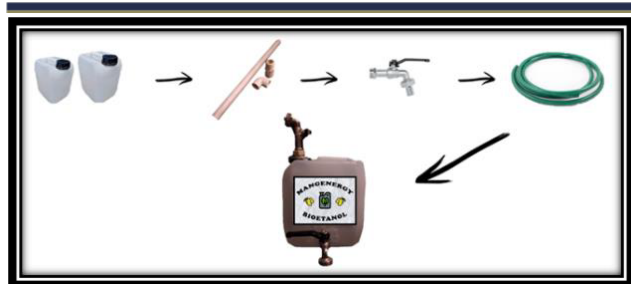


Fig. 2. Diagrama de armado de los biorreactores.



Fig. 3. Proceso de fermentación.

5. Filtrado

El filtrado realizado previo al destilado se hizo con el método de succión el cual consiste en hacer vacío con una bomba dentro de un matraz Kitasato, al cual también se le colocó en la parte superior un embudo Buchner al cual se le colocó un papel filtro. Para realizar el filtrado se colocaron pequeñas cantidades del fermentado, las cuales son absorbidas dentro del matraz Kitasato, gracias al vacío ejercido por la bomba [9].

6. Destilado

El destilado se llevó a cabo en un rotavapor IKA R-200, donde se mantuvo en un rango de temperatura de entre 40 y 45 °C y la rotación del rotavapor se mantuvo a 70 rpm (Fig. 4). Se destilaron 1 litro de cada una de las muestras repartidas en dos cargas de 500 ml. El condensador se mantuvo con agua enfriada con hielo bombeada desde una hielera y el alcohol obtenido fue almacenado en frascos de vidrio [10].



Fig. 4. Destilado en el rotavapor.

C. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Caracterización de la BRM (Determinación de sólidos totales, volátiles, humedad y ceniza).

En la [Tabla I](#) se observa que la BRM analizada contiene un 21.83 ± 2.34 de ST, lo que corresponde al contenido de materia orgánica y minerales, resultando en una alta humedad (78.17 ± 2.34). Por otro lado, los SV corresponden a la materia orgánica disponible para su aprovechamiento, el resultado obtenido es bueno ya que es un porcentaje de 83.79 ± 0.91 , traducándose en un bajo contenido de ceniza (minerales) de 16.2 ± 0.91 .

Estos resultados concuerdan con lo reportado por otros autores donde se reportan contenidos de SV que oscilan entre 80 – 95 % [5,8]. Esto se puede considerar adecuado porque indica que hay una gran cantidad de materia orgánica que puede ser aprovechada.

2. Análisis durante la fermentación

Durante la fermentación se estuvieron monitoreando tres diferentes parámetros, la temperatura, el pH y los grados brix fueron los parámetros monitoreados para ambas muestras. Las [Tablas II](#) y [III](#) muestran los resultados obtenidos.

En ambos reactores se observó un comportamiento similar, tanto en los grados Brix, así como en el pH y temperatura del reactor, sin embargo, hubo una diferencia el 0.9% de rendimiento sobre el total de 1 litro de fermentado después de destilar. Esto pudo deberse a que el pretratamiento térmico pudo liberar algunos azúcares y favorecer su transformación mediante la fermentación [8,11]. El tiempo de fermentación se decidió utilizando los grados Brix obtenidos durante los monitoreos, en este caso, se observa que para ambas muestras se tuvieron la misma tendencia, que desde el segundo día se mantuvieron en 1 hasta el tercero, por lo cual se decidió terminar la fermentación al tercer día. Las [Fig. 5](#) y [6](#) muestran el comportamiento de los grados Brix durante la fermentación.

TABLA I. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA PULPA DE MANGO.

Muestra	% ST	% SV	% SF
CRISOL 204	24.18	82.88	17.11
CRISOL 50	19.49	84.7	15.29
PROMEDIO	21.835	83.79	16.2
DESV. ESTÁNDAR	± 2.34	± 0.91	± 0.91

TABLA II. DATOS DEL MONITOREO DE PARÁMETROS DURANTE EL PROCESO DE FERMENTACIÓN PARA EL BIORREACTOR CON PRETRATAMIENTO TÉRMICO Y MECÁNICO.

Día	pH	Temperatura	Grados Brix
1	4.2	26.6	3
2	4.3	25.5	1
3	4.5	24.8	1

TABLA III. DATOS DEL MONITOREO DE PARÁMETROS DURANTE EL PROCESO DE FERMENTACIÓN PARA EL BIORREACTOR SOLO CON PRETRATAMIENTO MECÁNICO.

Día	pH	Temperatura	Grados Brix
1	4.1	25.8	3
2	4.2	25.3	1
3	4.6	24.9	1

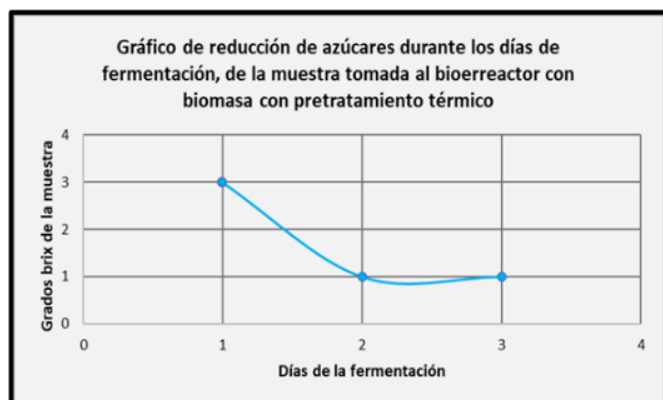


Fig. 5. Gráfico de disminución de los grados Brix durante la fermentación en la muestra con pretratamiento térmico y mecánico.

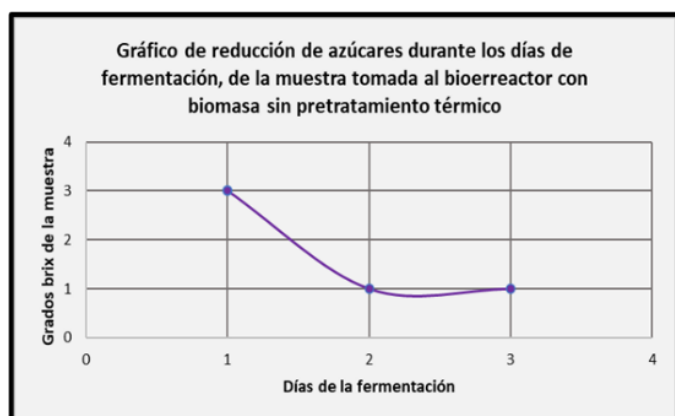


Fig. 6. Gráfico de disminución de los grados Brix durante la fermentación en la muestra con solo pretratamiento mecánico.

3. Resultados de la fermentación

Se obtuvo una diferencia del 0.9% en rendimiento de alcohol (Tabla IV) a pesar de tener una gran similitud entre los parámetros de la fermentación, obteniendo a partir de un litro de fermentado, 43 ml en el caso del pretratamiento térmico y 34 ml del BRM sin pretratar.

Los resultados obtenidos son buenos ya que al compararlos con lo reportado por trabajos similares [11,12], se puede observar que los rendimientos obtenidos en el presente trabajo son mayores a los obtenidos por otros autores, vale la pena mencionar que se utilizó destilación de 1.5 litros de fermentado. En la Tabla V se muestran sus resultados:

TABLA IV. RENDIMIENTO DE ALCOHOL POR LITRO DE MATERIAL FERMENTADO

Pretratamiento Térmico y Mecánico	4.3%
Pretratamiento Mecánico	3.4%

TABLA V. CONCENTRACIÓN DE ETANOL OBTENIDO DE 1.5 LITROS DE MOSTO DE MANGO*

<i>Concentración de etanol obtenido de 1.5 litros de Mosto de Mango.</i>			
MUESTRA	CONCENTRACION DE LEVADURA (%)	RELACION AGUA: MOSTO (%)	CONCENTRACION DE ETANOL PRODUCIDO (%)
1	0.1	0	3.95
2	0.1	0.5	4.68
3	0.1	1	2.95
4	0.2	0	4.25
5	0.2	0.5	5.25
6	0.2	1	3.15
7	0.1	0	3.45
8	0.1	0.5	4.5
9	0.1	1	2.85
10	0.2	0	4.15
11	0.2	0.5	5.35
12	0.2	1	3.05

*Adaptada de [12].

Una de las posibles ventajas de haber realizado el pretratamiento térmico a una de las muestras es, que se logró observar un mayor rendimiento, esto posiblemente debido a que la temperatura ayudó a liberar más azúcares fermentables de la BRM, para que estas fueran aprovechadas de una manera más eficiente por las levaduras y los rendimientos de bioetanol se elevaran. Por otra parte, el pretratamiento térmico involucra un gasto energético, el cual pudiera resultar no tan viable (tomando en cuenta que el incremento obtenido fue de aproximadamente 0.9%), aunque se recomienda realizar un análisis energético de los procesos para poder validar esto. Además, dependiendo también el escalamiento del proceso se pudo comprobar la viabilidad de este tipo de pretratamientos.

III. CONCLUSIONES

Tras los resultados observados, se concluye que la BRM presenta altos contenidos de materia orgánica disponible para transformarse en productos de alto valor (como el bioetanol), además se notó que, efectivamente el proceso de pretratamiento térmico a la BRM previo a la fermentación logró generar un mayor rendimiento con respecto al que tuvo la BRM sin pretratar, esto a pesar de que en el monitoreo de los parámetros de control de la fermentación (pH, temperatura y grados Brix) ambos biorreactores tuvieron un comportamiento muy similar. Con respecto al rendimiento, al solo haber una mejora del 0.9% y debido al posible gasto energético que representa el pretratamiento, no se recomienda su uso en nuestras condiciones de trabajo, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que a diferentes temperaturas y diferentes tiempos pueda llegar a incrementar en gran medida la producción de bioetanol.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN) por brindarnos el apoyo con sus equipos e instalaciones.

REFERENCIAS

[1] S.D. Foster, S.D. Elzinga, 2020. El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible. un.org. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible#:~:text=Los%20combustibles%20fósiles%20comprenden%20el,emisiones%20globales%20de%20CO2>.

[2] Secretaría de Gobernación. Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros., SEGOB, 2018. Accedido el 17 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541659&fecha=22/10/2018#gsc.tab=0

[3] "Desechos de mango servirán para alimentos balanceados". Portalfruticola.com. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2012/06/20/mexico-desechos-de-mangoserviran-para-alimentos-balanceados/> (accedido el 19 de agosto de 2022).

[4] Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. (2021). Gobierno de México-SIAP. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

[5] S. Sarungu, S. Afrida, M. Lumbaa. (2021) Utilization of mango waste for bioethanol production using aspergillus niger and saccharomyces cerevisiae: a pilot-scale study. PETROGAS 3(1): 27-34 e-ISSN - 2656-5080.

[6] M. Saifuddin, M. M. Khandaker, A.B.M.S. Hossain, M.D. S. Jahan, N. B. Mat, A. N. Boyce. (2014) Bioethanol Production from Mango Waste (Mangifera indica L. cv chokanan): Biomass as Renewable Energy. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 8(9): 229-237

[7] U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 January 2001. Disponible: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1002CZ8.TXT?ZyActionD=ZyDocumnt&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QFieldId=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000016%5CP1002CZ8.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>

[8] A. Cruz, "Producción de Etanol Anhidro a partir de residuos agrícolas y comerciales de Mango (Mangifera Indica L.) de la variedad Manila", Revista de Simulación y Laboratorio, vol. 3, 6 1-8, pp. 1-8, 2016. Accedido el 19 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Simulacion_y_Laboratorio/vol3num6/Revista_de_Simulacion_y_Laboratorio_V3_N6_1.pdf

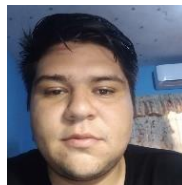
[9] L. Tejeda, "PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LA FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA DE JARABES GLUCOSADOS DERIVADOS DE CÁSCARAS DE NARANJA Y PIÑA", Revista educación en ingeniería, n.º 10, 2010, art. n.º Pp 120-125. Accedido el 19 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: https://www.acofi.edu.co/revista/Revista10/2009_I_51.pdf

[10] "Filtración al vacío". quimicafacil.net. <https://quimicafacil.net/tecnicas-de-laboratorio/filtracion-al-vacio/>

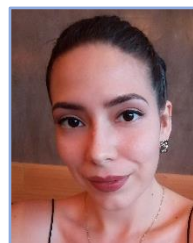
[11] "Uso y funciones del rotavapor". Cis-Lab. <https://www.cislab.mx/uso-y-funciones-del-rotavapor/>

[12] E. F. Aurora Vigo y E. D. Barrera Chiroque, "OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LOS RESIDUOS FERMENTABLES DE MANGO Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DE DESTILACIÓN", Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación, vol. 2, n.º 2, pp. 31-40, 2015. Accedido el 19 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/file:///C:/Users/Gabriel%20A/Downloads/Admin,+Externo+Barrera+-+Aurora+31%20\(2\).pdf](https://doi.org/file:///C:/Users/Gabriel%20A/Downloads/Admin,+Externo+Barrera+-+Aurora+31%20(2).pdf)

BIOGRAFÍAS



GABRIEL A. GONZALEZ BARRIOS Actualmente cursa el séptimo cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son los biocombustibles, las aplicaciones energéticas del hidrógeno y energía nuclear.



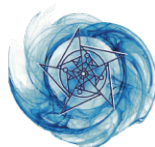
MARA F. JUÁREZ COTA Maestrando en Desarrollo Sustentable en programa Maestría en Ciencias Aplicadas en UPSIN. Formación en Ingeniería en Energía en la misma casa de estudios. Experiencia como profesor de asignatura en el área de inglés conversacional, enseñanza del idioma a nivel principiante, básico e intermedio, además de ciencias básicas nivel bachiller. Experiencia como asistente de coordinación y recepción de materias primas de HQ Flavor, y desarrollo de propuesta de proyecto para eficiencia energética e instalaciones fotovoltaica.



DULCE L. AMBRÍZ PÉREZ Lic. Química en Alimentos, egresada de la UAEH, Maestra en Ciencias egresada de la UAS y Doctora en Ciencias egresada de CIAD-Culiacán. Ha realizado múltiples estancias de investigación en universidades nacionales e internacionales, destacando CIIDIR Sinaloa y Texas A&M University; Profesora en la Universidad Politécnica de Sinaloa; pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Nivel I, desde enero 2018. Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico. Formación y experiencia en el área de alimentos funcionales y compuestos nutraceuticos, ha trabajado en la extracción, cuantificación e identificación de compuestos de interés. Autora de diversas publicaciones científicas indizadas y de divulgación.



DAVID U. SANTOS BALLARDO Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2017; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.



Potencial de residuos agroindustriales de Chile poblano (*Capsicum annuum* var. *annuum* 'Poblano') como materia prima para biorrefinería

María del Carmen Peña-Loza¹, Yoshlin Montserrat Aguilera-Hernández¹, Mara Fernanda Juárez-Cota², Dulce Libna Ambriz-Pérez^{1,2}, Brandon Armenta-Medel³, Stefany Serna-Toro⁴, David Ulises Santos-Ballardo^{1,2*}.

¹ Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

² Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

³ Licenciatura en Biotecnología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

⁴ Grupo de investigaciones en ciencias básicas y educación (GICBE), Universidad del Quindío, Armenia, Quindío, Colombia.

2020030124@upsin.edu.mx

2020030129@upsin.edu.mx

mf.juarezcota@gmail.com

dambroz@upsin.edu.mx

armentabrandon56@gmail.com

ssernat@uqvirtual.edu.co

dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN Las semillas de Chile poblano son un residuo de la agroindustria que por sus características pudiera utilizarse como materia prima bajo un esquema de biorrefinería. En este trabajo se estudiaron harinas de semillas de Chile poblano (*Capsicum annuum* var. *annuum* 'Poblano'), se analizaron sólidos totales y volátiles, obteniendo valores de $88.58 \pm 1.50\%$ y $88.48 \pm 0.6645\%$ respectivamente. Además, se realizó extracción de aceite por Soxhlet, utilizando una mezcla de metanol:cloroformo (2:1) como solvente y obteniendo un porcentaje de $15.98 \pm 1.93\%$. Finalmente, se realizó un análisis de las propiedades funcionales de la biomasa completa (CH) y desgrasada (CHD) para comparación; obteniendo índice de absorción de agua de 2.93 ± 0.11 mL/g y 4.13 ± 0.23 mL/g; índice de absorción de aceite 3.13 ± 0.80 mL/g y 3.33 ± 0.61 mL/g, para CH y CHD, respectivamente; mientras que la actividad emulsificante (AE) fue de $17.97 \pm 2.65\%$ y $16.28 \pm 2.50\%$, la estabilidad de la emulsión (EE) $6.96 \pm 1.73\%$ y $7.80 \pm 3.09\%$; finalmente la capacidad de formación de espuma (CES) fue de $10 \pm 0.005\%$ y $10.3 \pm 0.0058\%$, mientras que la estabilidad espumante (EES) fue de $50.2 \pm 0.054\%$ y $62.2 \pm 5.21\%$ para CH y CHD, respectivamente. Estos resultados permiten establecer el potencial de la semilla de poblano como materia prima para las industrias energética y alimentaria, aunque aún es necesario realizar más análisis.

PALABRAS CLAVE - Chile poblano, biorrefinería, aceite, propiedades funcionales.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad del ser humano por la creación e innovación de nuevas formas de producir energía se ha visto acelerada debido al crecimiento desmedido de la población, lo que se traduce en mayor demanda de productos energéticos, generando así, una gran crisis energética mundial [1]. Por otro lado, se han reportado una gran cantidad de problemas ambientales relacionados con la obtención de energéticos, la mayoría de ellos están relacionados con el uso de recursos no renovables; el uso de este tipo de materiales (como el carbón y petróleo) aumenta la generación y emisión de gases de efecto invernadero que son responsables del calentamiento global [2].

Debido a esto, el desarrollo de fuentes energéticas alternativas, como los biocombustibles, ha captado mucha atención científica y mediática ya que se considera que pueden coadyuvar con la diversidad energética, el crecimiento económico y social, además de ser más amigable

con el medio ambiente [3]. El uso de biocombustibles permite la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, en especial las emisiones de CO₂, esto debido a que la mayoría de estos provienen de fuentes vegetales, lo que genera que se presente un balance potencial de las emisiones de este tipo de gases al ambiente durante la producción de energía [2]. Actualmente los biocombustibles son considerados como un paso intermedio hacia el desarrollo de energía renovable y segura, y estos representan el producto final de la utilización de cultivos como la caña de azúcar, el maíz, la soja, el girasol, la colza y otros [1].

Dentro de la gran variedad de biocombustibles existentes, el biodiesel ha generado gran importancia, éste se trata de una sustancia biodegradable, no explosiva, ni inflamable, renovable, no tóxica, cuya combustión genera bajos niveles de emisiones en gases de efecto invernadero como CO₂, NO_x, SO_x y materiales particulados (MP); además, el biodiésel puede poseer un mayor número de cetano, punto de

inflamabilidad, calor de combustión más estable y mejores características lubricantes que el diésel convencional [2,3].

Por otro lado, hoy en día, el área de la bioenergía ha venido explorando el aprovechamiento integral de la biomasa, es decir, ya no se busca un solo producto energético, si no que se busca desarrollar plataformas para la obtención de co-productos en serie, mediante un enfoque de biorrefinería, esto permite el aprovechamiento integral de la biomasa con políticas de cero residuos; dentro de los productos que se pueden utilizar para complementar la producción de bioenergéticos, destacan los compuestos de alto valor (antioxidantes, colorantes, proteínas, etc.) y los ingredientes alimentarios; que normalmente se desarrollan a partir de la biomasa obtenida posteriormente a la extracción de aceites utilizados para producción de biodiesel [4].

Los materiales utilizados para desarrollar biocombustibles se han clasificado en 3 generaciones; la primera enfocada en recursos vegetales que usualmente pueden emplearse como alimentos (por ejemplo: maíz, soya, trigo, etc.); la segunda generación en donde se utilizan materiales vegetales que no son alimentos (como la jatrofa, o la palma aceitera), así como los residuos (aceites residuales, desechos agroindustriales, entre otros); y finalmente la tercera generación, que se enfoca principalmente en microorganismos, destacando levaduras, hongos y microalgas [5]. Dentro de estas opciones, los biocombustibles de segunda generación han ganado importancia porque al tratarse de materiales no alimenticios, no se compite con la generación de alimentos para la sociedad, y resalta la opción de utilizar residuos agroindustriales, donde, además de generar productos energéticos amigables para el ambiente, se obtiene una ventaja extra relacionada con la disminución de la carga orgánica de los contaminantes generados de esta importante industria, disminuyendo la contaminación [6].

Relacionado con lo anterior, actualmente el mal manejo de la generación de residuos agroindustriales y de industrias alimenticias generan una gran problemática de carácter ambiental, tan solo en México, se generan anualmente aproximadamente 76 millones de toneladas de residuos orgánicos, de los cuales solo una pequeña parte son aprovechados, mientras que la mayoría de ellos son desechados de manera inadecuada, usualmente en cuerpos de agua o en rellenos sanitarios a cielo abierto, generando así contaminación ambiental, fuente de plagas e incluso producción de metano descontrolada [1,5].

Por otro lado, en México se generan una gran cantidad de productos vegetales, como frutas, verduras y distintas variedades de chiles, tanto para su consumo directo como para generación de productos procesados; tal es el caso del chile (*Capsicum annuum* L.), es originario de México y se considera uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, con un gran impacto en la gastronomía nacional e internacional [7]. En México, se producen diversas variedades del género *Capsicum*, donde se cultivan alrededor

de 158,000 hectáreas de chile verde, lo que se traduce en una producción promedio de 3.3 millones de toneladas anuales, convirtiéndose en el segundo productor a nivel mundial después de China; es importante recalcar que cerca de la mitad del chile verde cultivado en México (aproximadamente 1,466,000 de toneladas) corresponden directamente al chile poblano (*Capsicum annuum* var. *annuum* 'Poblano') [8].

Un producto que ha generado gran interés en la industria alimentaria es el chile poblano (*Capsicum annuum* var. *annuum* 'Poblano'), a partir del cual se generan pastas y salsas, durante el procesamiento se generan residuos en grandes cantidades como son la vaina y las semillas. Actualmente, no existen reportes del aprovechamiento y/o caracterización de los residuos de este importante material [9].

El objetivo de este trabajo fue analizar el potencial aprovechamiento integral de las semillas de chile poblano (CH), para esto, se realizó la caracterización del material, determinando humedad, cenizas, sólidos totales (ST) y volátiles (SV), posteriormente se realizó extracción de aceite con soxhlet (utilizando una mezcla de metanol:cloroformo como solvente) y finalmente, se estudiaron las propiedades funcionales índice absorción de agua (IAA) y de grasas (IAAc), propiedades emulsificantes y espumantes, tanto de la biomasa desgrasada (CHD) como de la biomasa completa (CH).

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

Las semillas de chile poblano fueron donadas por la empacadora "Agronegocios San Juan" CA. de CV., (Villa Unión, Sinaloa, México), durante las temporadas de cosecha y procesamiento comprendidas entre los meses de noviembre a mayo de 2021-2022.

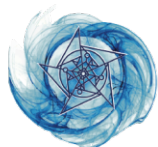
Para el desarrollo del proyecto, las semillas se secaron en un horno (Novatech® HS35-ED) a 70°C por 18 horas, posteriormente se molieron mediante un molino eléctrico comercial, hasta obtener una harina homogénea y se almacenaron en congelación (-4 ± 1 °C) hasta su uso.

B. MÉTODOS

1. Determinación de Sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad (H) y cenizas (CZ)

Los contenidos de ST, H, CZ y SV se evaluaron según lo reportado por la EPA (Agencia de protección ambiental de Estados Unidos, por sus siglas en inglés) [10].

Para la determinación de ST, se calentaron crisoles, a 103-105°C en un horno de convección (Novatech® HS35-ED) hasta alcanzar peso constante, se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (P_{crisol}). Posteriormente, se colocaron 5 g de la muestra y se registró su peso (P_{muestra}); finalmente, se secaron las muestras a 103-105°C por 24 h. Se



dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se registró el peso (P_{total}). La prueba se realizó por triplicado y se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar. Dichos porcentajes se calcularon empleando la Ec. (1) [10].

$$\%ST = \frac{P_{total} - P_{crisol}}{P_{muestra} - P_{crisol}} \times 100 \quad (1)$$

El contenido de humedad se calculó restando la diferencia en porcentaje de los sólidos totales (Ec. (2)).

$$\%H = 100\% - \%ST \quad (2)$$

Para la determinación de SV y CZ. Los crisoles con las muestras secas se sometieron a calcinación a 550°C durante 120 min, posteriormente se registró el peso del residuo ($P_{volátil}$). Los SV y CZ se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios con desviación estándar, se calcularon empleando las Ecs. (3) y (4) [10].

$$\%SV = \frac{P_{total} - P_{volátil}}{P_{total} - P_{crisol}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%CZ = \frac{P_{volátil} - P_{crisol}}{P_{total} - P_{crisol}} \times 100 \quad (4)$$

2. Extracción de aceite

La extracción de aceite de la harina de semillas de Chile poblano (CH) fue llevada a cabo mediante la técnica extracción Soxhlet, según lo reportado por AOAC [11]. Se emplearon 100 g de harina de CH con mezcla de solventes metanol-cloroformo (2:1), la prueba se realizó por triplicado y se representa como promedio con desviación estándar. Posteriormente, el producto se sometió a un rotavapor a 60°C para la extracción de la mezcla de solventes. El porcentaje de aceite extraído se obtuvo por la diferencia de peso (Ec. (5)).

$$\% \text{ aceite} = \frac{(\text{matraz} + \text{aceite}) - (\text{matraz})}{\text{peso de la muestra}} \times 100 \quad (5)$$

La biomasa residual desengrasada (CHD) se secó a 60°C durante 18 horas para eliminar el exceso de solventes y se almacenó (4 ± 1 °C) para su posterior uso.

3. Propiedades funcionales

Las propiedades de índice absorción de agua (IAA) y de aceite (IAG) de la harina de CH y CHD fueron determinados según lo reportado por Beuchat [12]. Las pruebas se hicieron por triplicado y se reportan los promedios con desviación estándar.

Para la IAA se emplearon 0.5 g de las muestras con 0.5 mL de agua destilada. Mientras que para la IAG se usaron 0.5 g de las muestras con 0.5 mL de aceite comercial. Se reportó el volumen absorbido por gramo de muestra del sobrenadante medido en una probeta (mL/g).

Las propiedades emulsificantes fueron determinadas mediante la metodología reportada por Neto et al. [13]. Se

realizaron 2 pruebas por triplicado, la actividad emulsificante (AE) y la estabilidad de emulsión (EE).

Para la AE se tomaron 0.3 mL de una dispersión de la muestra en agua destilada y se homogenizaron con 0.3 mL de aceite durante 1 min. Se midió la altura de la capa emulsificada y el contenido total del tubo. La AE se calculó con la Ec. (6), y se representa en porcentaje [13].

$$AE\% = \frac{\text{Altura de la capa emulsificada en el tubo}}{\text{Altura del contenido total del tubo}} \times 100 \quad (6)$$

La estabilidad de la emulsión (EE) se determinó por el calentamiento de ésta, a 80°C por 30 min, posteriormente se centrifugó a 1100 rpm por 5 min y se calculó, de acuerdo con la Ec. (7) y se representa en porcentaje [13].

$$EE\% = \frac{\text{Altura capa emulsificada desp.de calentar}}{\text{Altura contenido total de tubo desp.de calentar}} \times 100 \quad (7)$$

Finalmente, las propiedades espumantes se determinaron mediante la metodología reportada por Coffman & García [14], para esto se determinaron de la capacidad de formación de espuma (CES) y estabilidad espumante (EES) de las muestras analizadas. Para la CES, se emplearon una suspensión con 100 mL de agua destilada y 2 g de harina (entera y desgrasada) en un vaso precipitado, se licuaron (para formar la espuma) y se colocaron en una probeta graduada. La CES se expresa como porcentaje de aumento de los volúmenes iniciales y después de la formación de la espuma, utilizando la Ec. (8):

$$CES\% = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100 \quad (8)$$

Donde, V_2 es el volumen de la solución de harina después de licuar y V_1 es el volumen original de la solución.

La EES es determina como el volumen de la espuma que permanece luego de 0.5 h, expresado en porcentaje del volumen inicial de espuma.

C. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. Determinación de Sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad (H) y cenizas (CZ)

En la tabla I se muestran los resultados obtenidos en la determinación de ST, SV, H y CZ, se determinó que 11.51 ± 0.66 % corresponde a humedad mientras que ST representan el 88.48 ± 0.66 %, este valor es menor comparado con lo reportado por Mendoza [15] quien en su caso reportó valores de humedad de 20.81 ± 0.51 % para semilla seca de Chile jalapeño. El contenido de humedad es un parámetro importante en el balance económico del proceso, ya que un exceso de esta afecta la eficiencia en la extracción/transformación de compuestos de interés, además, de requerir una etapa de secado para el desarrollo de bioproductos [16].

Con respecto a SV, se reportó un porcentaje de 88.48 ± 0.66 %, considerándose un valor alto, este parámetro es importante ya que representa la cantidad de materia orgánica

que se tiene disponible para transformarse, y los resultados obtenidos en el presente trabajo sugieren que la semilla de chile tiene un gran porcentaje de material que puede ser aprovechado (Tabla I) [17].

TABLA I. SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES DE LA SEMILLA DE CHILE POBLANO.

	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	Humedad (%)	Ceniza (%)
Semilla de chile poblano	88.48±0.6	88.58 ± 1.50	11.41±1.50	11.51±0.66

Cada valor es un promedio de tres muestras ± desviación estándar.

2. Extracción de aceite

El porcentaje de aceite extraído de la semilla de chile poblano fue de $15.98 \pm 1.93\%$. Los resultados obtenidos se sitúan dentro del rango de lo que se ha reportado previamente, donde se han realizado extracciones de aceite entre: 10 - 38 %, esto para otras variedades de chiles incluyendo jalapeños, pimientos rojos, chiles verdes, entre otros [16, 17, 18, 19].

La cantidad de aceite obtenida en este experimento muestra potencial para la producción de biodiesel, sin embargo, antes de determinar la posibilidad real de utilizarse para ese objetivo, es necesario hacer más pruebas como analizar el perfil de ácidos grasos, índice de acidez, índice de saponificación, entre otras propiedades relacionadas con la calidad del biodiesel [5]. Cabe mencionar que, hasta nuestro conocimiento, no hay reportes sobre el aprovechamiento de residuos de chile poblano para la generación de biodiesel, sin embargo, existen estudios con otras variedades de chiles. Lee y col. [18] utilizaron semillas residuales de la agroindustria de chile verde, con 26 % de aceite y un perfil de ácidos grasos que permitió la generación de biodiesel de buena calidad y con eficiencia de la reacción de transesterificación entre 88 y 95 %. Esto permite inferir que el residuo generado del procesamiento del chile poblano pudiera tener potencial para ser utilizado como fuente de biodiesel, por lo que se considera adecuado realizarle análisis de perfil de ácidos grasos y hacerle pruebas de transesterificación.

3. Propiedades funcionales

En las semillas de poblano se almacenan reservas nutritivas útiles durante la germinación, principalmente compuestas por carbohidratos, lípidos y proteínas, además de otros nutrientes [20]. Así mismo, se ha reportado que las semillas de distintas variedades de chiles poseen compuestos de valor, tales como vitaminas C y K, polifenoles, esteroides, saponinas, ácidos grasos insaturados, entre otros [17], todos ellos de importancia en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria. Con respecto a esta última, es necesario evaluar las propiedades funcionales de las harinas para determinar si es posible incorporarlas en los alimentos. En cuanto al IAA, la harina de CHD presentó mejores

resultados con 4.13 ± 0.23 mL/g, contra 2.93 ± 0.11 mL/g de la CH (Tabla II). Esto podría deberse a que al contener menos grasa mejora su miscibilidad favoreciendo la absorción de agua. (Moreno, 2017). En este sentido, algunos autores describen que la presencia de carbohidratos contribuye al incremento del IAA [19], además, esta propiedad puede ser favorecida por las interacciones de proteínas-agua y agua-agua, incrementando el IAA [21]. Las harinas con buena absorción de agua ($IAA > 3$ mL/mg) son utilizadas para favorecer la textura de los productos de panadería, por lo cual únicamente la harina CHD sería recomendable para tal uso [22].

Por otra parte, la absorción de aceite (IAG) fue muy similar para ambos materiales, se observa que la extracción del aceite del material no influyó en su capacidad de absorber grasas. Este parámetro es importante en la tecnología de alimentos, especialmente para la incorporación de las harinas en productos congelados precocidos listos para freír, en galletas, en algunos platos a base de cereal, incluso salchichas y hamburguesas [22,23]. Ambas harinas, CHD y CH, podrían contribuir a la interacción estructural en los alimentos, especialmente en la retención del sabor, la mejora de la palatabilidad y la extensión de la vida útil, particularmente en productos de panadería o carnes donde se desea la absorción de grasa [24].

Por otro lado, en cuanto a las propiedades emulsificantes, así como la estabilidad de emulsión tampoco se observaron grandes diferencias, ya que la CHD presentó un valor de AE de 16.28 ± 2.50 % y una EE de 7.80 ± 3.09 , a diferencia de la CH con porcentajes de AE de $17.97 \pm 2.65\%$ y de EE de $6.96 \pm 1.73\%$. La capacidad de formar emulsiones depende del balance de los grupos hidrofílicos y lipofílicos presentes en los componentes de la harina y es crucial para la incorporación de harinas en cárnicos, aderezos y postres congelados [22,23], ninguna de las harinas estudiadas podría considerarse un buen emulsionante.

Finalmente, en cuanto a la CES resultaron valores muy similares para la CH y CHD obteniendo valores de 10 ± 0.005 % y 10.3 ± 0.0058 % respectivamente; por otro lado, la EES resultó con valores de 50.2 ± 0.054 % (CH) y 62.2 ± 5.21 % (CHD), lo que indica que la espuma formada presenta buena estabilidad después del tiempo analizado. Una espuma es un coloide con burbujas de aire embebidas en una matriz sólida o líquida [24]; y la CES de una harina está altamente relacionada con las proteínas presentes, sin embargo, no solo es determinante la cantidad, sino el tipo de proteína, peso molecular, su estructura y de la habilidad relativa de esas proteínas para desnaturalizarse, precipitar y disminuir la tensión superficial en la interfase aire-líquido de la espuma [24,25]; por lo tanto, se requiere buena cantidad de proteínas para que haya capacidad espumante, además, dichas proteínas deben poseer un balance adecuado entre su solubilidad, flexibilidad y rigidez necesarias para retener el aire dentro de la matriz y por lo tanto formar una espuma estable, lo cual es propio de proteínas de bajo peso molecular [26,27]. Harinas con altos valores de CES y EES se

recomiendan en alimentos como merengues, helados y productos batidos para mejorar sus características sensoriales, por lo que las harinas de ajonjolí analizadas no son recomendables para este tipo de alimentos.

TABLA II. PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA SEMILLA COMPLETA Y DESGRASADA DE CHILE POBLANO

PROPIEDADES	Semilla de Chile poblano completa (CH)	Semilla de Chile poblano desgrasada (CHD)
IAA (mL/g)	2.93±0.11	4.13±0.23
IAG (mL/g)	3.13 ± 0.80	3.33 ± 0.61
AE (%)	17.97 ± 2.65	16.28 ± 2.50
EE (%)	6.96 ± 1.73%	7.80 ± 3.09
CES (%)	10 ± 0.005 %	10.3 ± 0.0058
EES (%)	50.2 ± 0.054 %	62.2 ± 5.21 %

Cada valor es un promedio del triplicado con desviación estándar.

IAA = Índice de absorción de agua; IAAc = Índice de absorción de aceite; AE = Actividad emulsificante; EE = Estabilidad de la emulsión; CES = Capacidad de formación de espuma; EES = Estabilidad espumante.

III CONCLUSIONES

La semilla de Chile poblano actualmente es considerada un residuo de la agroindustria, sin embargo, en este estudio se comprobó su potencial como materia prima de biorrefinería, particularmente en dos diferentes rutas: la energética y la alimentaria. Los valores de ST y SV mostraron el potencial de las semillas de poblano para ser empleadas en la generación de biocombustibles; además, el porcentaje de obtención de aceite indica que es posible explorar su uso para la generación de biodiésel, sin embargo, aún es necesario realizar análisis de perfil de ácidos grasos e índice de saponificación para comprobar su potencial. Por otro lado, las harinas de semilla de poblano podrían ser aprovechadas por la industria de alimentos, especialmente para mejorar las propiedades sensoriales y vida útil de productos de panadería, embutidos, cárnicos procesados, precocidos congelados, merengues helados y productos batidos. Se recomienda seguir analizando las semillas de poblano, para estudiar su posible incorporación en la producción de biogás, así como en las industrias cosmética y farmacéutica.

En conclusión, se considera que este trabajo puede ser relevante debido a la nula información del uso de los residuos de este material endémico mexicano para la producción de energía y/o alimentos, puede servir como parteaguas para el desarrollo de biorrefinerías que permitan el aprovechamiento integral del material.

REFERENCIAS

[1] F. E. Miguez & F. H. Miguez (s/f). Iastate.edu. Recuperado el 29 de julio de 2022, de <http://miguezlab.agron.iastate.edu/OldWebsite/Research/Biocombustibles.pdf>

[2] M. Mofijur, M.G. Rasul, J. Hyde, A. Azad, R. Mamat, M.M. Bhuiya (2016). Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 265–278.

[3] S.E. Mahesh, A. Ramanathan, K.M. S. Begum, A. Narayanan. (2015). Biodiesel production from waste cooking oil using KBr impregnated CaO as catalyst. *Energy Conversion and Management*, 91, 442–450.

[4] D. Londoño, G. Cardona, J. C., Restrepo, and F. Muñoz. "Fossil or bioenergy? Global fuel market trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110905>. [Online].

[5] S. K. Duran. "A review on oil extraction and biofuels production from various materials", *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, no. 2, pp.261–265, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.223> [Online].

[6] P. Verma, and M.P. Sharma. "Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1063–1071, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.054> [Online].

[7] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (19 de agosto 2022). Cierre de la producción agrícola, Anuario estadístico de la producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreaagricola/>

[8] Rural, D. A. D. S. Y. (s. f.). *Chile poblano, delicia del campo mexicano*. gob.mx. Recuperado 14 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/chile-poblano-delicia-del-campo-mexicano>

[9] H.E. Aguirre, O.V. Muñoz. 2015. El Chile como alimento. México. *Rev. Acad. Mex. Cienc. AC*. 66(3):16–23.

[10] U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 January 2001. Disponible: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1002CZ8.TXT?ZyActionD=ZyDoc&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QFieldId=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000016%5CP1002CZ8.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>

[11] AOAC. 1999. Official Methods of Analysis International. 17th Edition, Association of Analytical Communities, Gaithersburg.

[12] L.R. Beuchat. "Functional and Electrophoretic Characteristics of Succinylated Peanut Flour Protein", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 25, pp.258–261, 1977. <http://dx.doi.org/10.1021/jf60210a044> [Online].

[13] V.Q., Neto, N. Narain, J.B. Silvia and P.S. Bora. "Functional properties of raw and heat-processed cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) kernel protein isolate", *Nahrung*, vol. 45, no.4, pp.258–262, 2001. [10.1002/1521-3803\(20010801\)45:4<258::AID-FOOD258>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20010801)45:4<258::AID-FOOD258>3.0.CO;2-3) [Online].

[14] C.W. Coffman, V.V. García. "Functional properties and amino acid content of protein isolate from Mung bean flour". *J. Food Technol*, vol. 12, pp.473–484, 1977.

[15] M. S. Liliana Gabriela. (2013, agosto). *Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del Chile jalapeño (Capsicum annuum var. annuum) fresco y seco*. Cdigital.uv.mx. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46807/MendozaSanchezLiliana.pdf;jsessionid=A9282AFFE6E1BFB6D9BAEC8D422F9C10?sequence=2>

[16] E. A. Laura, S. G. Eleane, S. C. Claudia Jaqueline, A. F. Xochitl, V. M. Maribel. (s/f). *Propiedades fisicoquímicas del aceite de semillas del subproductos de Chile Jalapeño*. Cio.mx. Recuperado el 26 de agosto de 2022, de http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/sesion5/S5-BCA30.pdf

[17] M. Chouaibi, R. Leila, H. Salem, F. Giovanna. (2019) Chemical characteristics and compositions of red pepper seed oils extracted by different methods. *Industrial crops and oil extracted*. 128: 363-370.

[18] J. Lee, K. Kieun, S.K. Yong, E.K. Eilhann. 2017. Rapid biodiesel synthesis from waste pepper seeds without lipid isolation step. *Bioresource Technology*. 239:17-20.

[19] Y. Ma, W. Xiaomeng, Z. Liang, W. Yongtao, L. Xiaojun (2019). Comparison of the compounds and characteristics of pepper seed oil by pressure-assisted, ultrasound-assisted and conventional solvent extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 54: 78-86.

[19] J. M. López & K. S. Paredes. (2018). "Efecto de la sustitución parcial de harina de trigo (*triticum vulgare*) por harina de ajonjolí (*sesamum indicum* L.) desgrasada y harina de arveja (*pisum sativum*) en las características tecnológicas y sensoriales de cupcakes", Tesis de licenciatura, facultad de ingeniería, Escuela profesional de ingeniería agroindustrial, Universidad nacional del santa, 2018. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/3117> [Online].

[20] A.M. Moreno-Jiménez. "Tratamiento con láser He-Ne y diodos emisores de luz (LEDs): su efecto en la germinación de semillas y desarrollo de plántulas de dos variedades de *Capsicum annuum* (*Solanaceae*)". Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara. 2017.

[21] M. Mwasaru, K. Muhammad, J. Bakar, Y. CheMan. "Effects of isolation technique and conditions on the extractability, physicochemical and functional properties of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata*) protein isolates II. Functional properties", *Food Chem*, 67: 445-452, 1999.

[22] A. Ramírez y E. Pacheco. "Propiedades funcionales de harinas altas en fibra dietética obtenidas de piña, Guayaba y guanábana", *Interciencia*, 34(4):293-298, 2009.

[23] F.S. Taha y M.A. Ibrahim. "Effect of degree of hydrolysis on the functional properties of some oilseed proteins", *Grasas y aceites*, 53(3):273-281, 2002.

[24] S. Chandra, S. Singh, D. Kumari. "Evaluation of functional properties of composite flours and sensorial attributes of composite flour biscuits". *J Food Sci Technol*. 52(6):3681-8, 2015.

[25] U. Inyang and C. Nwadike. "Functional properties of dehulled sesame (*Sesamum indicum* L.) seed flour", *JOACS* 69:819-822, 1992.

[26] K. Adebawale, O. Lawal, O. "Comparative study of the functional properties of bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*) jack bean (*Canavalia ensiformis*) and Mucuna bean (*Mucuna pruriens*) flours", *Food Res Int.*, 37:355-365, 2004.

[27] S. Badui. "Química de los Alimentos". 5ª Edición. Pearson Educación, 744 pp. 2013,

AGRADECIMIENTOS

Al programa académico de Ingeniería en Biotecnología UPSIN por el apoyo brindado en equipamiento, a la empacadora "Agronegocios San Juan" CA. de CV., (Villa Unión, Sinaloa, México) por la donación del material.

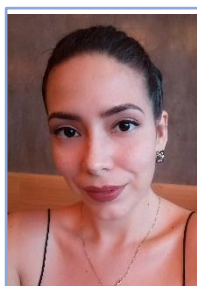
BIOGRAFÍAS



MARÍA C. PEÑA LOZA Estudiante de la Licenciatura en ingeniería en energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa. Con la capacidad para el desarrollo de trabajos tecnológicos enfocados a la solución de problemas sociales y ambientales. Capacidad para crear prototipos enfocados al área de energías fotovoltaica y eólica. Experiencia en el desarrollo y redacción de textos enfocados al área científica, así como de literatura común. Certificada en la instalación fotovoltaica por la fundación de Carlos Slim. Actualmente interesada en la planeación de nuevos proyectos enfocados en la rama de bioenergía.



YOSHILIN M. AGUILERA HERNÁNDEZ Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa. Con capacidad para desarrollar soluciones a problemáticas sociales y ambientales a través de investigaciones cuyos objetivos son aportar en ciencia y tecnología, experiencia en desarrollo y creación de prototipos enfocados al área de fotovoltaica e hidráulica. Capacidad y experiencia en desarrollo y redacción en trabajos de investigación social, participación en olimpiadas de biología y certificada en instalación fotovoltaica por la fundación Carlos Slim. Actualmente interesada en trabajos de investigación enfocados a la bioenergía.



MARA F. JUÁREZ COTA Maestrando en Desarrollo Sustentable en programa Maestría en Ciencias Aplicadas en UPSIN. Formación en Ingeniería en Energía en la misma casa de estudios. Experiencia como profesor de asignatura en el área de inglés conversacional, enseñanza del idioma a nivel principiante, básico e intermedio, además de ciencias básicas nivel bachiller. Experiencia como asistente de coordinación y recepción de materias primas de HQ Flavor, y desarrollo de propuesta de proyecto para eficiencia energética e instalaciones

fotovoltaica.

DULCE L. AMBRIZ PÉREZ



Lic. Química en Alimentos, egresada de la UAEH, Maestra en Ciencias egresada de la UAS y Doctora en Ciencias egresada de CIAD-Culiacán. Ha realizado múltiples estancias de investigación en universidades nacionales e internacionales, destacando CIIDIR Sinaloa y Texas A&M University; Profesora en la Universidad Politécnica de Sinaloa; pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Nivel I, desde enero 2018. Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como

Investigador Honorífico. Formación y experiencia en el área de alimentos funcionales y compuestos nutraceuticos, ha trabajado en la extracción, cuantificación e identificación de compuestos de interés. Autora de diversas publicaciones científicas indizadas y de divulgación.

BRANDON ARMENTA MEDEL Estudiante de la Licenciatura en Biotecnología en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Con capacidad para el desarrollo de trabajo en el laboratorio, capacidad en la resolución de problemas críticos, experiencia en oferta y distribución de productos farmacológicos, certificado para el manejo del idioma inglés. Actualmente desarrollando investigación en la formulación de biopelículas, específicamente para el control de hongos patógenos en diversos cultivos frutales.



STEFANY SERNA TORO Licenciada en Biología y Educación Ambiental, Magister en Biología Vegetal. Actualmente candidata a Doctora en Ciencias- Biología en la Universidad del Quindío. En la actualidad trabaja en la Universidad del Quindío y el Sena Regional Quindío en un programa llamado TecnoAcademia, desempeñándose como Docente, en el área de Biotecnología Vegetal y Microbiología Ambiental. Realiza investigación relacionada con la capacidad de biorremediación de consorcios microbianos (levaduras/bacterias) en aguas residuales contaminadas con cromo hexavalente.



DAVID U. SANTOS BALLARDO Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2017; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.

