

CINERGIA UG
Centro Interinstitucional de Energía
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

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



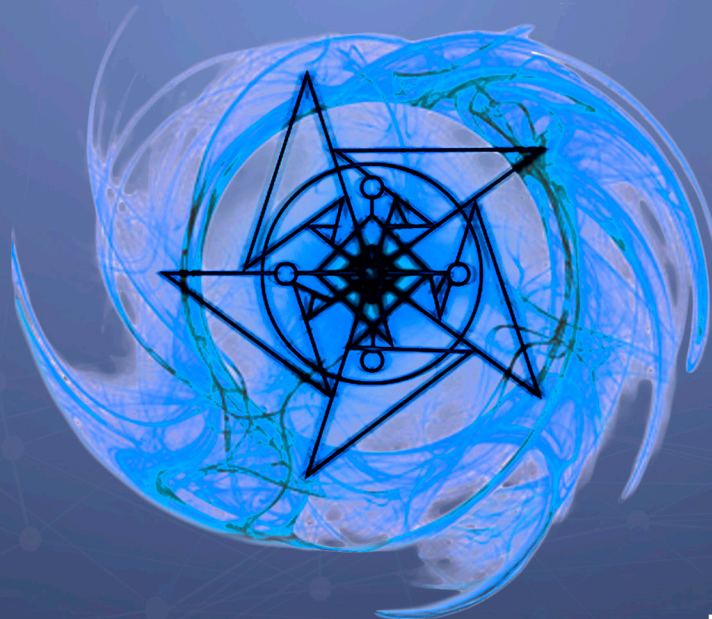
UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



EDICIÓN 2023

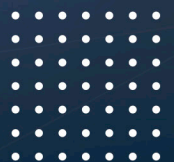
MEMORIAS

27-29 SEPTIEMBRE



CIENERGIA UG

Congreso Internacional de Energía UG





COMITÉ DEL CONGRESO

PRESIDENTE

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

COORDINACIÓN GENERAL

Dra. Xiomara González Ramírez
DIE de la UG

SECRETARIO GENERAL

DIE de la UG

COORDINACIÓN EDITORIAL

Dr. Enrique Arnoldo Zamora Cárdenas
Dr. Osvaldo Rodríguez Villalón
DIE de la UG

COORDINACIÓN TÉCNICA

Dr. Luis Ramón Merchán Villalba
DIE de la UG

COORDINACIÓN DE LOGÍSTICA

Dr. Rafael Guzmán Cabrera
Dr. Víctor Javier Gutiérrez Martínez
Mtro. Irving Wilihado Reyes Buenfil
DIE de la UG

COORDINACIÓN DE DISEÑO Y DIFUSIÓN

L.A.D. J. del Carmen Mendoza Ornelas
L.A.D. Leslie Yared Villegas Fonseca
Departamento de Vinculación CINERGIA UG



COMITÉ TÉCNICO

Dr. Iván Abel Hernández Robles
Director de CINERGIA UG

Dr. Alejandro Pizano Martínez
DIE de la UG

Dr. Adrián González Parada
DIE de la UG

Dr. Miguel Ángel Gómez Martínez
DIE de la UG

Dr. Héctor Javier Estrada García
DIE de la UG

Mtra. Elena del Rocío Dávila Álvarez
DIE de la UG

Dr. J. Juan Rosales García
DIE de la UG

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



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

Área Académica

1. Universidad de Guanajuato.
2. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
3. Delft University of Technology, Delft, Países Bajos.
4. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).
5. Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).
6. Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN).
7. Universidad Incarnate World.
8. Universidad Politécnica de Tulancingo
9. Universidad Autónoma de Baja California.
10. Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
11. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ).
12. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).
13. Universidad Intercultural del Estado de México.
14. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV).
15. Instituto Politécnico Nacional, Guanajuato (UPIIG).
16. Instituto Tecnológico Superior de Morelia.
17. Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.
18. Instituto Tecnológico Superior de Abasolo.
19. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
20. Tecnológico Nacional de México/ITS.
21. Tecnológico de Estudios Superiores de Huixquilucan.
22. Colegios Agustinos - Preparatoria Jaime Torres Bodet.
23. IMF Smart Education.

Área Industrial

1. Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).
2. Unión Nacional de Constructores Electromecánicos (UNCE).
3. Centro Interinstitucional de Energía de la Universidad de Guanajuato (CIENERGIA UG).
4. Sigtronic.
5. EnerSys.



PREFACIO

En la sexta edición del Congreso Internacional de Energía de la Universidad de Guanajuato, CIENERGIA UG 2023, el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Guanajuato (UG) y el Comité Organizador invitaron a la comunidad científica y tecnológica, nacional e internacional, a ser parte de este encuentro con el objetivo de proporcionar un entorno de intercambio y difusión del conocimiento científico para promover el fortalecimiento y el avance de trabajos en los temas de energía. Las actividades que se llevaron a cabo durante el marco del congreso fueron las siguientes:

1. Conferencias Magistrales: Conferencias impartidas por especialistas del área energética; representativos de México y Países Bajos.

2. Presentación en sesión técnica: Un total de 46 Sesiones impartidas en modalidad híbrida por estudiantes, especialistas e investigadores del área energética y afines.

3. Exposición Industrial: Exposición por parte de diferentes empresas del área energética. Exponiendo la aplicabilidad industrial y hablando sobre sus productos y desarrollos más destacados.

4. Talleres: Impartición de 2 Talleres en dos modalidades diferentes;

1) Diagnóstico de eficiencia energética (ámbito eléctrico): Integración de elementos para la toma de decisiones técnico-económicas. Modalidad presencial.

2) Programación y Monitoreo de un PLC con conexión a la Nube. Modalidad virtual.

El evento se llevó a cabo de manera híbrida por medio de una plataforma virtual y dentro de las instalaciones de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS), de la Universidad de Guanajuato, del 27 al 29 de septiembre de 2023, y se contó con un aproximado de 200 participantes.



CONTENIDO

Afectación de los fenómenos meteorológicos severos en los pronósticos de corto plazo y la demanda horaria en los SEP Camilo Narvaez Pérez	08
Análisis y Estudio de un Inversor Multinivel Monofásico sin Transformador Gerardo Vázquez Guzmán	16
Uso de Internet y su Costo Asociado al Consumo de Electricidad en Hogares en el Estado de Guanajuato Jesús Martínez Patiño	23
Transformación digital y variabilidad del consumo de energía eléctrica en bibliotecas universitarias Jesús Martínez Patiño	28
Estudio de Estaciones de Carga para Autos Eléctricos en México Mario Alberto Juárez Balderas	33
Integración de Refrigeración Solar en Unidades de Autotransporte de Carga Jorge Luis García Castillo	41
Implementación de Modulador para Inversor de Fuente de Corriente Francisco J. Moreno Vazquez	46
Cogeneración Inferior con Ciclo Rankine Orgánico y Energía Solar Térmica en Aplicaciones Industriales Jorge Luis García Castillo	52



**Fabricación de una Celda Solar Orgánica Sensibilizada
con Tintura de Capsaicina y Fragaria** 57
José Sabás Segura

**Biorrefinería energética a partir de residuos
de aguacate (Persea americana cv. "Hass")** 63
Jesús Eduardo Valdez Ontiveros

**Potencial bioenergético de residuos agroindustriales de
Chile Poblano (Capsicum annum variedad Poblano)** 69
Joselyn Guadalupe Lezama Rosas

**Técnicas de Preprocesamiento de Texto y su Impacto en la Métrica de
Precisión utilizando el Algoritmo Random Forest y Reuters 21578** 74
Jose Manuel Arengas Acosta

**Estudio y comparativa de algoritmos para el análisis
de sentimientos en opiniones de películas** 80
Jesus Andres Sierra Rangel

Mapa de profundidad a partir de un sistema embebido 86
Javier Ramón Delgado Duran

Afectación de los fenómenos meteorológicos severos en los pronósticos de corto plazo y la demanda horaria en los SEP

Camilo Narvaez Pérez^{1,2}

¹Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).

²Universidad Abierta a Distancia de México.

camilo.narvaez@cenace.gob.mx

camilo.np@nube.unadmexico.mx

RESUMEN El consumo de energía eléctrica o carga de los sistemas eléctricos de potencia es influenciado por diversos factores y variables. Los fenómenos meteorológicos severos: huracanes, tormentas tropicales, depresiones tropicales, remanentes de ciclones, tormentas invernales, frentes fríos, lluvias intensas o torrenciales “súbitas” (por vaguadas, bajas presiones, etcétera), ondas de calor, principalmente, se reflejan de manera considerable, para la Gerencia de Control Regional Occidental, del Centro Nacional de Control de Energía. En esta investigación se hace uso de una metodología, inédita, en base a la estadística de veintiséis años, poniendo de relevancia el impacto de dichos fenómenos en el consumo de energía eléctrica; además de que se proponen estrategias para aminorar el número de horas fuera de especificación para un pronóstico de corto plazo, en caso de que se presente algún fenómeno similar a los ya registrados, y se valida la herramienta con eventos reales, obteniéndose resultados más de 80 % de mejora, respecto a no usar la metodología propuesta.

PALABRAS CLAVE — Pronóstico, horas fuera de especificación, fenómeno meteorológico, ciclón tropical, huracán, tormenta tropical, tormenta invernal, lluvia torrencial, ondas de calor, centro de control de energía.

I. INTRODUCCIÓN

El **Pronóstico de la Carga, PC**, de un **Sistema Eléctrico de Potencia, SEP**, es la determinación con antelación del consumo de las cargas que componen al sistema, para un determinado período. Existen varios tipos de pronósticos, entre los cuales están los de **Corto Plazo, CP**: éstos juegan un papel importante, para poder determinar la aportación de energía al sistema, por central eléctrica, y sus generadores que la conforman, en cada hora, para un período determinado, es decir, es importante la elaboración del **Despacho de Energía, DE**; cabe señalar que el PC a CP se utiliza en los sistemas de **Control Automático de Generación, CAG**; y por ende en los sistemas de administración de energía con control de frecuencia, además de considerar los costos marginales de los combustibles, la cantidad de agua turbinada y en consecuencia, se relaciona con los niveles de los embalses y su aporte al sistema de potencia [1,2,3,4]. También están los pronósticos de **Mediano Plazo, MP**: con éstos se puede realizar una planeación de mantenimientos, asignación de recursos económicos para diversas épocas del año según se presenten los escenarios previstos; y finalmente se tienen los pronósticos a **Largo Plazo, LP**: con los resultados de éstos se pretende planear el futuro crecimiento de la red eléctrica y proyectar las obras en cada zona eléctrica, así como su aporte al consumo de esta [2,3,4]. Existen diversas variables que afectan el consumo de la energía eléctrica, y la combinación

del efecto de éstas en una zona determinada de una red eléctrica, provoca un comportamiento particular en la zona de interés, entre las más importantes y comunes, están: el crecimiento de la carga (variables económicas), las geográficas (climáticas y meteorológicas), las temporales (estación del año, día de la semana, hora del día) y las atípicas (días festivos, eventos inesperados –apagones, huelgas de grandes consumidores, **Fenómenos Meteorológicos Severos, FMS**, etcétera). Cada una de estas variables cobra importancia, dependiendo de: **1)** el área geográfica, **2)** la temporada estacional del año, y **3)** los recursos eléctricos que posea la zona específica para autoabastecerse, exportar la energía excedente ó importar la energía faltante. Además, se tienen a su vez, diversas variables que son determinantes para un buen PC, entre las de mayor impacto están: **a)** los datos históricos de medición de las variables y **b)** el método de proyección [5,6]. En esta investigación se aborda principalmente el impacto que tienen los FMS en el consumo de energía, potencia real por hora (MW-hr), a CP y por ende la consideración de la misma en un método de PC propuesto. Cabe señalar que el problema de PC a CP por parte de las compañías proveedoras de energía eléctrica ha recibido una considerable atención en los últimos 55 años.

II. FMS Y SU IMPACTO EN LOS PC DE CP DE LOS SEP

Cada que se presenta un FMS, el cual conlleve a un incremento extraordinario de algunas variables meteorológicas, la Gerencia de Control Regional Occidental (GCROC) experimenta un cambio abrupto en el consumo de energía eléctrica por cada hora y por días, lo cual conlleva a un incumplimiento en el PC de CP, del orden de un error relativo porcentual $|\%e| \geq 5\%$, especificación definida en el **Centro Nacional de Control de Energía (CENACE)**, ya que se presenta un decremento, por lo común, del consumo eléctrico (MWh), a excepción de las ondas de calor que provocan aumentos en dicho consumo.

Entre los principales FMS más “comunes”, en el ámbito de la GCROC, están:

- Huracanes (H, cualquiera de sus categorías: 1 a 5, en la escala Saffir-Simpson).
- Tormentas Tropicales (TT, las que afecten de forma sustancial al consumo).
- Depresiones Tropicales (DT).
- Remanentes de Ciclones (RC).
- Tormentas Invernales (TI).
- Frentes Fríos (FF).
- Lluvias Intensas (LLI) o torrenciales “súbitas” (por vaguadas, bajas presiones, etcétera).
- Ondas de Calor (OC, las que afecten de forma sustancial al consumo).
- Combinación de los anteriores (CF).

Es de suma importancia el señalar, que, en la GCROC para considerar a un fenómeno meteorológico como severo, FMS, se debe cumplir la condición siguiente: el incremento, positivo o negativo de cada uno de los tres días a considerar (día previo, día de “mayor” afectación, día posterior) respecto a al mismo tipo de día de la semana previa al período de interés, debe ser del $\pm 3\%$ como mínimo, con ciertas excepciones. Dicha problemática es muy “poco frecuente” ya que se presenta de quince a cuarenta ocasiones por año, afectando de veinticinco a sesenta días al consumo anual, de forma tanto diaria como horaria, en la GCROC, provocando el incumplimiento desde cinco hasta noventa horas por evento, **Horas Fuera de Especificación, HFE**, dando un total acumulado de 100 a 500 HFE por año, aproximadamente. Así que, cada que se presenta un FMS, el no hacer algo al respecto, en los PC de CP, influye en tener un número relativamente grande de HFE por cada año y de pérdidas económicas de gran cuantía.

En esta investigación propone una metodología con la cual se desarrolló una herramienta con que se pretende disminuir el número de desvíos en el ámbito electrogeográfico de la GCROC. Dado que, el no hacer algo al respecto influye en tener un número relativamente grande de horas fuera de especificación por cada año. Y con la herramienta desarrollada se pretende disminuir el número de desvíos.

En la Fig. 1 se ilustra las pérdidas económicas (en billones de dólares, en U.S.A.) ocasionadas por desastres meteorológicos y climáticos en los últimos cuarenta años debidos a: 28 eventos de sequía, 33 eventos de inundación, 9 eventos de congelación, 132 eventos de tormentas severas, 52 eventos de ciclones tropicales, 18 eventos de incendios forestales y 19 eventos de tormentas de invierno, con impactos severos y fallas significativas del sistema de energía que ocurren con mayor frecuencia según la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica) [1].

En las redes eléctricas, los FMS pueden provocar una o varias contingencias, que son eventos *inesperados* y aleatorios, por lo tanto, los operadores del sistema eléctrico no esperan que ocurran éstos, en un tiempo y elemento específico. Las contingencias más típicas en los SEP consisten en la pérdida de unidades de generación o componentes de transmisión (líneas de transmisión, transformadores, etcétera). En suma, las contingencias pueden ser causadas por la remoción de equipo y cortos circuitos. Estas causas son clasificadas como internas y externas. Las causas internas surgen de fenómenos como el rompimiento de aislamiento, acción de relevadores por temperatura o simplemente una operación incorrecta de los dispositivos de protección y relevadores. Las causas externas resultan de algunos efectos ambientales tales como descargas atmosféricas, vientos que transportan objetos (ramas, por ejemplo) que impactan los cables de los equipos eléctricos, provocadas por los efectos de los FMS [4,7].

Los sistemas de potencia son supervisados continuamente para observar su comportamiento, es por ello que, se requiere contar con una gran cantidad de mediciones, entre ellas las meteorológicas, para evaluar su desempeño y prever, pronosticar, sus condiciones operativas. Esta información es recolectada en los **Centros de Control de Energía, CCE**, como el CENACE, y utilizada para que los PC de CP den un panorama a los operadores del sistema de potencia, y estos a su vez, ayuden a mantener la estabilidad y continuidad del servicio eléctrico, bajo parámetros económicos específicos.

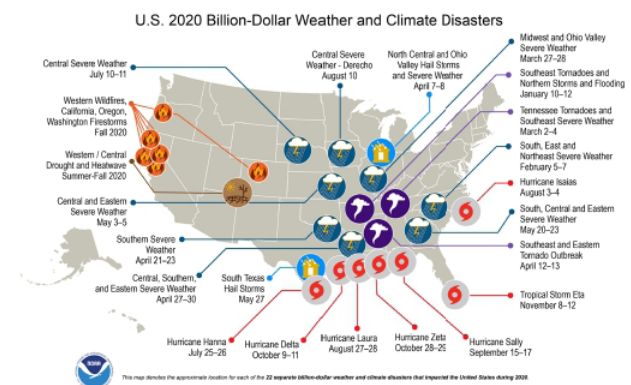


Fig. 1. Pérdidas económicas ocasionadas en U.S.A. por desastres meteorológicos y climáticos.

De lo anterior se desprende la necesidad de investigar a los fenómenos implicados en cada tipo de problemática y desarrollar o adquirir las herramientas que permitan disminuir los impactos de los fenómenos en cuestión, y como es en el caso de la GCROC, en la cual se propone el desarrollo de la herramienta de los FMS, que a continuación se describe.

III. PROPUESTA CENACE-GCROC Y RESULTADOS

Derivado de que, en la GCROC, se cuenta con un historial relativamente grande, de 1997 a 2022, 26 años, de los datos históricos horarios del consumo eléctrico, se realizó una búsqueda de los fenómenos anteriormente citados para encontrar *patrones* que ayuden a poblar un catálogo que englobe las situaciones problemáticas que más se han repetido y utilizarlo, a modo previsorio, cuando se presenten los avisos, de meteoros severos, que publican los especialistas en meteorología, Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua, SMN-CNA, NOAA, entre otros.

La metodología se basa en seleccionar por cierto tipo de día, un conjunto de fenómenos *similares*, al que se espera que ocurra (huracanes que su centro impacten en tierra, en algún lugar determinado, y de cierta categoría, por ejemplo), meteorológicamente hablando, para un tipo de día en específico (por ejemplo, un FMS que ocurrió entre martes a jueves), pudiendo elegirse alguna otra característica del FMS en cuestión (zona de afectación, incremento de alguna variable meteorológica, incremento del consumo eléctrico, entre otras), y de este conjunto se obtienen los promedios de las variables de interés implicadas, como a) el consumo total del día (los consumos de cada año se obtienen en por unidad, para normalizar y después se proyectan al consumo actual o de interés, según el pronóstico a obtener), y, b) el consumo horario, que se realiza de manera similar al diario. Algunos resultados de los hallazgos derivados del análisis de los datos, así como resúmenes estadísticos se ilustran a continuación en los casos de estudio siguientes:

- Caso 1, huracanes.
- Caso 2, tormentas invernales y frentes fríos.
- Caso 3, FMS en días festivos.
- Caso 4, tormentas tropicales.

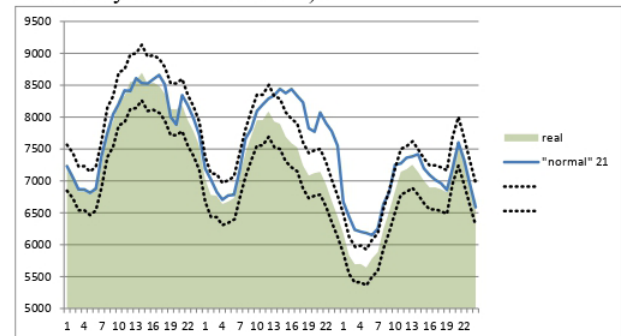
En cada una de las figuras siguientes se observan tres días del PC de CP de la GCROC, siendo de manera regular, el día dos de cada gráfica, el más *afectado* en su consumo, MWh, por el FMS en cuestión. En cada caso, y sus gráficos respectivos, las líneas punteadas son los límites, inferior (e % = -5 %) y superior (e % = +5 %), respectivamente.

En la Fig. 2, se ilustra el Caso 1, que es el impacto de un huracán en las costas del Pacífico (cercano a las costas de alguno de sus estados: Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit), en la Fig. 2 a) se observa que al no hacer uso de la herramienta propuesta se presentaron 21 HFE, por encima ó por debajo de los límites de error máximo ó mínimo (líneas

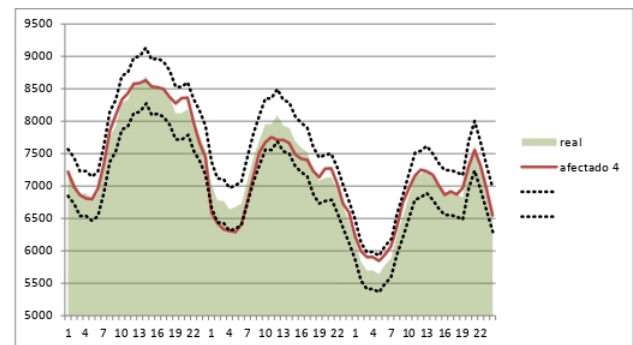
negras punteadas), respectivamente, como se observa, la desviación entre la línea azul (pronóstico), respecto al área verde (consumo real); en tanto que, en la Fig. 2 b) se muestra que al hacer uso de la herramienta propuesta se obtienen sólo 4 HFE, esto es, 81 % de mejora. Cabe señalar que, este es el caso de un huracán que su centro tocó tierra, de ahí que, en el segundo día se observe una afectación sustancial en su perfil de consumo horario.

En el caso de que el centro del huracán no toque tierra, la afectación dependerá, principalmente, de:

- Su categoría (según la escala Saffir-Simpson).
- Cercanía a las costas, más cercanía a las costas, conlleva una mayor afectación.
- Ubicación de su centro respecto a los Centros de Carga, CC, de la GCROC.
- Radio de sus bandas nubosas (500 km en adelante tienen un gran impacto en la baja del consumo y menor generación, solar principalmente).
- Cantidad de precipitación pluvial ocurrida (mayor afectación a mayor lluvia, durante las horas del día, en los grandes CC, por ejemplo, de las 8:00 a las 20:00 horas).
- Presión Barométrica, **PB**, del huracán (a menor PB mayores daños y más baja en el consumo de energía eléctrica).
- Traectoria del huracán, si se aleja o acerca de las costas o de los CC de la GCROC.
- Velocidad de desplazamiento en el océano (menor velocidad, causa más estragos en la carga, dejando mayor lluvia y efectos del viento).



a) Sin hacer uso de la herramienta de FMS.



b) Haciendo uso de la herramienta de FMS.

Fig. 2. Caso 1, huracanes.

- i) Alertas y precauciones que se tomen por parte de las autoridades y población en general.
- j) Orografía del lugar que se acerque.

De manera regular, los huracanes del océano Pacífico afectan más al consumo de la GCROC, en tanto que, los del Atlántico lo hacen en menor medida.

En la Fig. 3, se muestra el Caso 2, que es el impacto de una tormenta invernal en conjunción con un frente frío (regularmente en alguno de los estados del norte de la GCROC: Nayarit, Zacatecas, Aguascalientes y San Luis Potosí), similarmente al caso, 1, se ilustra la situación de no hacer uso de la herramienta propuesta, presentándose 15 HFE, como se muestra la desviación entre el pronóstico, línea azul, respecto al consumo real, área verde; en tanto que, al hacer uso de la herramienta propuesta, línea roja, resultan sólo 3 HFE, esto es, se tiene un 80 % de mejora.

La afectación en la carga provocada por una tormenta invernal en conjunción con un frente frío dependerá, principalmente, de:

- a) Su extensión o dimensión (a mayor extensión, mayor afectación).
- b) Baja de temperatura asociada a su masa de aire, respecto a la zona donde impacta.
- c) Trayectoria de impacto (si *bordea* o incide directamente a la GCROC).
- d) Velocidad de penetración (a menor velocidad, mayor afectación).
- e) Porcentaje de afectación a la generación (dado que, aunque no impacte directamente a la GCROC puede provocar *apagones* programados por falta de generación).
- f) Velocidad del viento asociada (a mayor velocidad, mayor afectación).
- g) Humedad relativa de la GCROC (a mayor humedad relativa, menor afectación).
- h) Nubosidad asociada (mayor cantidad de lluvia, nieve o agua-nieve provocan una mayor afectación).
- i) Mes de la temporada invernal (en la GCROC en diciembre, enero y febrero se da una mayor afectación).

En la Fig. 4, se muestra el Caso 3, que es la presencia de un FMS en un día festivo (tanto fijo, 05/febrero, 21/marzo, 20/noviembre, como móvil, 01/enero, Jueves y Viernes Santos, 01/mayo, 16/septiembre, 25/diciembre, para la GCROC), se observa la situación de no hacer uso de la herramienta propuesta, provocando que estén 44 HFE, línea azul, en tanto que al usar la metodología propuesta, línea roja, se aprecia que 4 horas quedarían fuera de especificación, lo cual dará mejor resultado al tomar en cuenta la propuesta del uso del catálogo. De forma que se evitaría que 40 HFE (una mejora del 91 %). Es importante señalar que, el pronosticar el consumo de los días festivos es relativamente complicado y si se aúna la presencia de algún FMS, aumenta su nivel de complejidad. Y el uso de la herramienta de FMS apoya a dar mayor certeza en un número considerable de ocasiones.

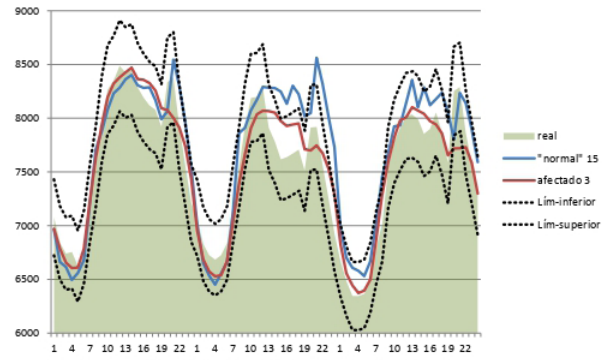


Fig. 3. Caso 2, tormentas invernales y frentes fríos.

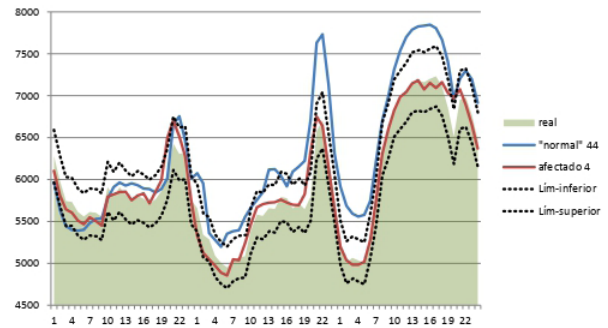
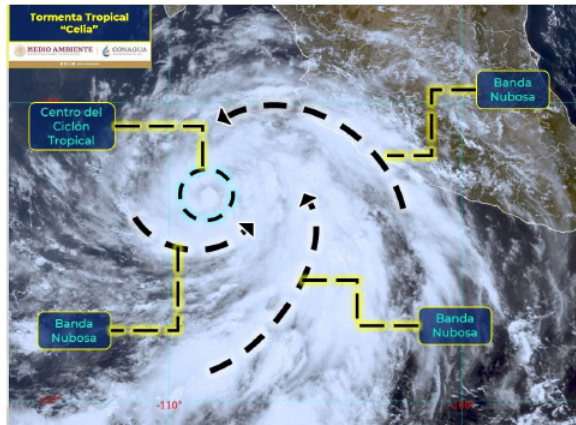


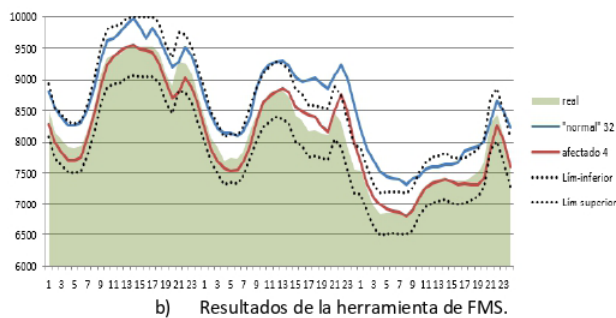
Fig. 4 Caso 3, presencia de FMS en días festivos.

En la Fig. 5, se ilustra el Caso 4, impacto de una tormenta tropical en las costas del Pacífico (cercano a las costas de Michoacán, Colima y Jalisco), en la Fig. 5 a) se ilustra uno de los avisos del SMN-CNA [8], y se observan las bandas nubosas de gran magnitud, de radio mayor a 500 km, de manera que, en la Fig. 5 se observa que b) al no hacer uso de la herramienta propuesta se hubiesen presentado 32 HFE, la línea azul, o pronóstico *normal* o *típico*, respecto al consumo real, área verde; en tanto que, al hacer uso de la herramienta de FMS se obtuvieron solamente 4 HFE, línea roja o pronóstico *afectado*, esto es, 88 % de mejora. Este último caso es una aplicación real, llevada a cabo para los días sábado 25 a lunes 27 de junio de 2022. Ya que, uno de los objetivos principales de la GCROC al realizar esta investigación-proyecto es el validar la herramienta desarrollada para casos reales, y con ello se pretende, además de validar, el capacitar al personal que estará haciendo uso de esta y hacer los ajustes en caso de requerirlos.

Cabe señalar que el catálogo o base de datos conformada en la GCROC proporciona una rápida visualización del impacto o afectación que los FMS han provocado en el consumo y en los pronósticos de dicho consumo a lo largo de los 26 años de análisis, y con ello, se ha obtenido estadística, la cual se presenta en la sección siguiente, que ayuda a capacitar tanto al personal nuevo como al ya *experto* en dichos fenómenos y da *claridad* en cuanto a la afectación y propone perfiles horarios que ayuden a reducir el número de HFE de los PC a CP



a) Aviso del SMN-CNA de la tormenta tropical Celia.



b) Resultados de la herramienta de FMS.

Fig. 5. Caso 4, tormentas tropicales.

IV. ESTADÍSTICAS DE LOS FMS

De 1997 a 2022, 26 años, se tiene el acumulado o la suma de los FMS y sus estadísticas principales siguientes, en la **Tabla I**, se observa por día de la semana *normal* y por días festivos. Entre martes a jueves se han presentado una mayor incidencia, 150, para la semana *normal* en tanto que para los días festivos (los menos del año) se ha presentado la menor incidencia, 5 (los domingos, viernes y sábados). Además, las LLI, han sido el fenómeno de mayor afectación, al consumo de la GCROC, en cuanto a ocasiones se refiere, 100 (después de las OC, 238, en las cuales se tiene una expertiz *alta* en la GCROC).

En la **Fig. 6** se aprecia que en 1997 se tuvo un mayor número de incidencias u ocurrencias de FMS, con 46 afectaciones (línea azul, escala derecha), así como 2010 con 38 afectaciones es el segundo año de mayor ocurrencia. Presentándose un promedio de 27 FMS anualmente. Habiendo años más *tranquilos* como 2000 y 2008 con sólo 16 y 17 FMS, respectivamente. Además de que se clasifican los años por la severidad promedio, siendo los más severos 2012, 2013, 2019, 2020, 2021 y 2022.

La ocurrencia de FMS, suma de los FMS ocurridos en los 26 años del muestreo, por mes se distribuye, según se observa en la **Tabla II**, de la manera siguiente, en los meses de invierno: enero, febrero, marzo y diciembre se tiene un suma de 135, siendo enero el mes de menor incidencia, 13 FMS,

en tanto que para los meses *cálidos*, mayo a octubre, la suma haciendo a 512, siendo julio el mes de mayor ocurrencia, con 115 FMS, en su mayoría del tipo onda de calor y ciclón tropical (OT, TT, H1 a H5, principalmente). Es importante señalar que la temporada ciclónica en el océano Pacífico, según el SMN-CNA, inicia el 15 de mayo y concluye el 15 de noviembre, lo cual coincide con los datos estadísticos de la GCROC, según se observa en los renglones superiores, donde se contabilizan los H1 a H5, TT, DT y RC. Además, se observa que los meses de *transición*, abril y noviembre, son de un número inferior a los ya citados anteriormente.

Para los expertos en PC de CP de la GCROC son de especial cuidado, los meses de junio a octubre, así como, febrero y marzo, derivado que se presenta un número considerable de FMS, y en ocasiones, de manera intercalada, es decir, FMS de calor (OC) y posteriormente de lluvia (LLI, TT, DT, RC, o incluso H1 a H5,) o frío (TI, FF), o viceversa. Lo cual causa oscilaciones de consumo de energía horarias [5,9,10].

TABLA I. Acumulación (1997-2022) de FMS por día de la semana.

		fenómeno por día de la semana									
		semana "normal"					festivos				
		do	lu	ma- ju	vi	sá	do	lu	ma- ju	vi	sá
46	total	3	1	1	1						
	7	1	1	1	1	1		1			
	5	1	1	1	2						
	10	1	2	2	2	2	1				
	21	3	4	5	4	3		1	1		
151	48	9	11	11	9	6		1		1	
	25	4	4	3	7	6		1			
	78	14	14	18	17	13			1	1	
69	19	2	3	4	4	3		2	1		
	50	7	7	10	10	9	1	3	1	1	1
364	100	20	22	21	19	16		1	1		
	26	4	5	3	5	4	2			2	1
	238	48	43	54	46	44	1		1	1	
	67	12	10	15	14	10		3	1	1	1
697		126	128	150	141	117	5	13	7	5	5

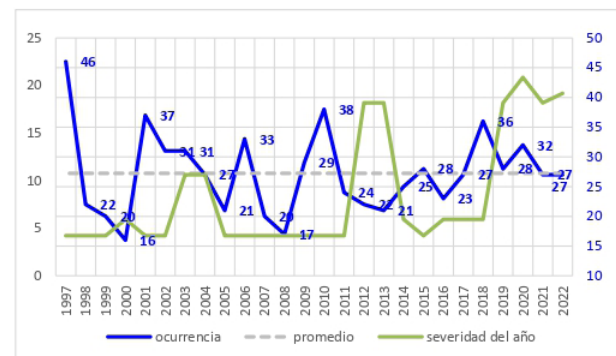


Fig. 6. Estadística anual de los FMS en la GCROC.

TABLA II. Acumulación (1997-2022) de fenómenos por mes del año.

		fenómeno por mes del año												Total
		en	fe	mr	ab	My	jn	jl	ag	se	oc	no	di	
46	3								1	1	1			
	7					1	1	1		2	2			
	5					1	1	1		1	1			
	10					1	2	1	2	1	2	1		
	21					1	6	5	3	5	1			
151	48					1	14	7	8	8	7	3		
	25					1	7	8	2	4	1	2		
	78					3	17	18	9	18	11	2		
69	19	1	7	5						1		1	4	
	50	3	13	11	4		1			1	3	6	8	
364	100		2	1	2	9	32	18	20	9	6	1		
	26	3		1	4	8	1	6	1				2	
	238	6	22	19	11	17	22	36	46	17	26	8	8	
	67		8	5	2	2	6	14	7	8	6	3	6	
697		13	52	42	23	45	110	115	99	76	67	27	28	
		135			50	512								

En un desglose de HFE derivadas de la afectación de los FMS, se observa en la [Tabla III](#), donde se ilustra que, los cuatro FMS de mayor cuidado son:

- OC (con 774 HFE, ya *dominadas* en la GCROC desde 2016).
- LLI (con 592 HFE).
- CF (con 492 HFE).
- RC (con 453 HFE).

Confirmándose, nuevamente, que los FMS de lluvia, mencionados anteriormente en los comentarios de las [Tablas I y II](#), son los que requieren un mayor estudio y desarrollo de herramientas para modelar el impacto de estos en el consumo eléctrico en la GCROC. Y esta metodología es uno de los resultados de dichos desarrollos.

TABLA III. Acumulación (2005-2022) de HFE por día de la semana.

		semana "normal"					festivos					
		do	lu	ju	vi	sa	do	lu	ju	vi	sa	
285	total	36	14	14	8							H5
		27	5	18	4							H4
		41	15	18	5	2	1					H3
		73		20	16	24	12	1				H2
		108	10	24	29	20	16		9			H1
747		193	22	62	63	28	13			3	2	TT
		101	22	9	11	21	38					DT
		453	160	127	55	38	66		7			RC
295		129	38	14	38	24	15					TI
		166	34	43	40	24	21		1	3		FF
1706		592	123	192	87	59	91	13	13	14		LLI
		340	56	69	33	35	46	53		20	28	OF
		774	184	186	126	118	160					OC
		492	115	84	132	74	44		38	1	4	CF
		3525	779	867	667	479	522	68	60	22	27	34

En la [Fig. 7](#) se observa que junio es el mes de mayor probabilidad de ocurrencia de un FMS en la GCROC, con un 34 %, es decir, uno de cada tres días sucederá un evento de este tipo. En tanto que en enero y diciembre se presenta la menor probabilidad, de 3 %, lo cual se traduce a uno de cada treinta días. Y en cuanto la probabilidad por a día, se presenta la mayor, en el año, el día uno de julio con 58 %, dado que, en más de la mitad de los años del estudio se presentaron FMS (quince de veintiséis).

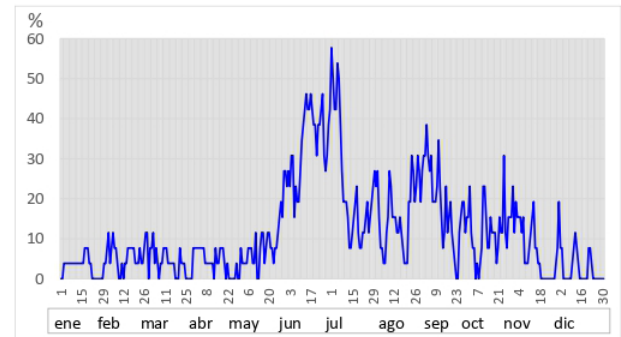


Fig. 7. Probabilidad diaria de ocurrencia de los FMS en la GCROC.

Cabe señalar que, la metodología desarrollada en la GCROC, es adaptable a cualquier otra GCR del CENACE, o CCE, inclusive se han realizado simulaciones e intentos de aplicación en 2019 y 2020, principalmente. Guiando a los expertos en PC de CP ante la presencia de huracanes principalmente. Pero, es importante recalcar, que, a mayor número de registros, se tendrá un catálogo más completo y de aplicación más real y útil [10].

El desarrollo de este tipo de herramientas, en la GCROC, ha contribuido a reducir el número de HFE a lo largo del tiempo, lo cual se puede observar en la [Fig. 8](#). Dado que se pasó de 513 HFE anuales promedio para la década de los 90, a 400 para década de los 2000, a 137 para la década de los 10 y de sólo 23 para la década de los 20; aun cuando la severidad de los FMS se ha incrementado en la década presente [10, 11]. E inclusive, el fenómeno de las ondas de calor (altas presiones, anticiclones o su equivalente) se han controlado en los últimos años. Como lo demuestra los resultados de la figura siguiente ([Fig. 9](#)). De ahí que se asevere que, en la GCROC se tiene una *alta* expertiz en pronosticar el efecto de este tipo de FMS.

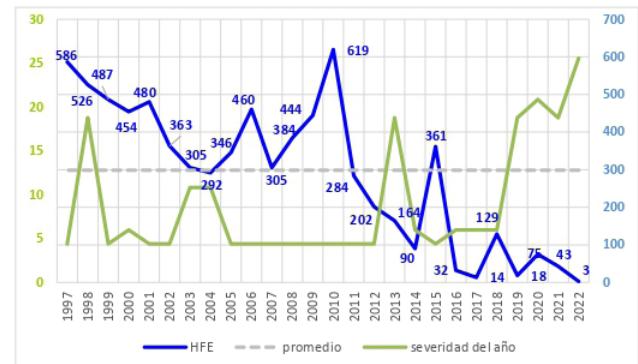


Fig. 8. HFE por año y la severidad de los FMS anual.

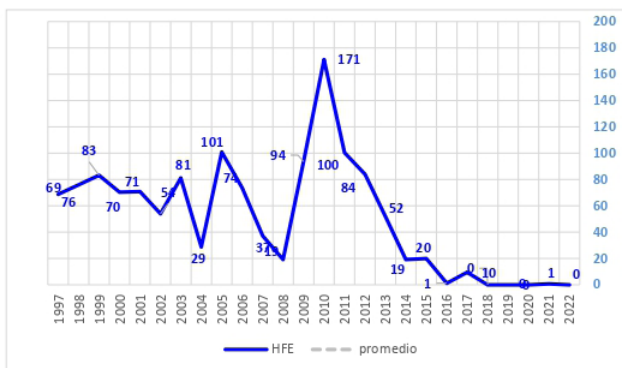


Fig. 9. HFE debidas por las OC y la severidad de los FMS anual.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha descrito la importancia de los pronósticos de carga de corto plazo en los centros de control de energía, utilizados en las redes eléctricas, resaltando el impacto que tienen diversos fenómenos en su consumo eléctrico. Posteriormente, se describió el impacto de los fenómenos meteorológicos severos, listándose los que afectan en el CENACE en su región occidental, siendo ésta la de mayor consumo en el Sistema Interconectado Nacional, SIN, (la GCROC representa un 23 % del consumo de todo el SIN).

Se describió la propuesta de la GCROC, presentándose ejemplos de diversos casos de FMS y la conveniencia de utilizar la metodología descrita versus los resultados de no utilizar la misma. Finalmente, se presentaron estadísticas, por día de la semana, mes del año, del período de análisis de los FMS, 1997 a 2022, resaltando los más perjudiciales para la GCROC. Poniendo de relevancia la utilidad de la herramienta descrita en esta investigación.

En una segunda etapa de esta investigación, se estarán presentando resultados de otras áreas de control o GCR del CENACE, donde se valide la utilidad de la metodología en condiciones similares o distintas a las de la GCROC.

Es recomendable que, el centro de control que adopte esta metodología obtenga su catálogo en base a la definición de las métricas que se utilizan para las HFE y registros de las variables a considerar: carga, temperatura, precipitación pluvial, días y horas de la afectación, etcétera.

En etapas sucesivas se ahondará en algunos FMS particulares, por ejemplo, en los huracanes, en cualquiera de sus categorías, derivado de la importancia de segmentar o investigar de manera desglosada el cómo cada fenómeno afecta el patrón de consumo de la GCROC.

Cabe señalar que en esta investigación se hacen pocas referencias de otros autores, y se cae en el *abuso* de las autocitas, derivado a que este es un tema prácticamente inédito, desde el punto de vista que, a nivel mundial, en las metodologías de los pronósticos de corto plazo, en los sistemas eléctricos de potencia, no hay metodologías

propuestas en cuanto a la afectación de fenómenos meteorológicos severos, como los descritos anteriormente. Pues, las metodologías *tradicionales* propuestas, son en todos y cada uno de los casos, aplicables a períodos de tiempo donde las condiciones meteorológicas no presenten un *incremento extraordinario* de algunas variables meteorológicas, lo cual repercute o experimente un cambio abrupto en el consumo de energía eléctrica por cada hora y por días, y esto se traduce a un incumplimiento en el PC de CP, o bien, en HFE según la métrica que adopte el CC en cuestión.

La metodología propuesta, aunque sencilla, desde el punto de vista matemático, al ser promedios simples, ha evidenciado una mejora en la disminución de las HFE de la GCROC y de otras GCR del CENACE. Y se ha empleado en situaciones reales (una de ellas citada en la presente investigación) que evidencia su utilidad en la reducción del error de los PC de CP. Además, de que, dada la complejidad de los FMS y sus efectos en la carga eléctrica de los CC, la posibilidad de aplicar otras metodologías se reduce en proporción a su ocurrencia y datos registrados.

VI. REFERENCIAS

- [1] <https://www.trccompanies.com/insights/electric-system-planning-for-extreme-weather-events/> consultada en junio 2023.
- [2] Álvarez y Araujo, Impacto del COVID-19 y huracanes Eta e Iota en el sector energético hondureño durante el año 2020 y comparativo con los años 2018 y 2019, ENERLAC-OLADE-AUGM, Volumen VI. Número 1, junio, 2022. ISSN: 2602-80, p 50-83.
- [3] Camilo Narvaez Pérez, Dante Aristóteles García Conejos, Claudia Narvaez Pérez y César Eduardo Blanco Gómez, Consecuencias electro-económicas, ambientales y sociales del abatimiento eficiente de una central hidroeléctrica (C. H. Santa Rosa, CFE-ACO), 10o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-7 marzo 2013, IE-32.
- [4] S. Parkpoom, G.P. Harrison and J.W. Bialek, "Climate change impacts on electricity demand", 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. Vol 3. IEEE.
- [5] Camilo Narvaez Pérez, Víctor Hugo Ortiz Muro y Hugo Humberto Moreno López, "Pronóstico de carga en los SEP considerando la influencia de los cambios de temperatura", 5o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-10 octubre 2007, IE-27.
- [6] Kothari y Nagrath, Sistemas eléctricos de potencia, editorial McGraw Hill, tercera edición, páginas 531 a 555.
- [7] Camilo Narvaez Pérez, Dante Aristóteles García Conejos, 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 1-5 marzo 2013, IE-32.
- [8] <https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/avisos/aviso-de-ciclone-tropical-en-el-oceano-pacifico> y <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>, consultadas en junio 2022.
- [9] Hugo Humberto Moreno López, Camilo Narvaez Pérez, Enrique Rivero Cervantes y Víctor Hugo Ortiz Muro, "Propuesta para pronóstico de demanda horaria mediante RNA considerando la influencia de los cambios de temperatura" RVP-AI/2007, Acapulco, Guerrero, 8-14 de julio de 2007, p 1-6.
- [10] Camilo Narvaez Pérez, "Impacto de los fenómenos meteorológicos severos en los pronósticos y la demanda horaria en los SEP" RVP-AI/ROC&C 2023, Acapulco, Guerrero, 6-10 de agosto de 2023, p 1-6.



[11] Marcos Emmanuel Padilla González, "Pronóstico de carga particionado aplicado a zonas de carga de la GCROC", reporte del proyecto nacional del DEE-SSMEM-GCROC-CENACE, 2021-2022. P. 1-12.

BIOGRAFÍA



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. Doctor en Investigación de la Educación en la UNISAN (2023). Ha laborado desde el 2002 en el Centro Nacional de Control de Energía, CENACE, como Analista de Redes Eléctricas, Aplicaciones de Potencia y Jefe de Evaluación y Estadística, además de ser profesor de Ingeniería y Matemáticas en diversas universidades. Su área de interés es sobre los Transitorios Electromagnéticos, Pronóstico de Carga y la Generación Alternativa de Energía Eléctrica (MHD, eólica, solar y biomasa, principalmente).

Análisis y Estudio de un Inversor Multinivel Monofásico sin Transformador

**GERARDO VÁZQUEZ GUZMÁN¹, LUIS ENRIQUE HERNÁNDEZ AGUILAR¹, JOSE MIGUEL SOSA ZÚÑIGA¹,
PÁNFILO RAYMUNDO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ², DALYNDHA AZTATZI PLUMA³.**

¹Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato

²Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

³Tecnológico Nacional de México/ ITS de Abasolo

gerardo.vazquez@ieee.org

enriquehdz@ieee.org

jmsosa@ieee.org

pamartinez@ieee.org

dalyndha.ap@abasolo.tecnm.mx

RESUMEN La inyección de corriente a la red eléctrica a partir de energías renovables se realizaba usando convertidores de corriente directa a corriente directa y convertidores de corriente directa a corriente alterna en sistemas de dos etapas y con acoplamiento con transformador a la red eléctrica. Sin embargo, al implementar múltiples etapas, la eficiencia del sistema se ve reducida considerablemente, este parámetro es muy importante en sistemas fotovoltaicos ya que se requiere aprovechar tanta energía como sea posible de la energía eléctrica generada. En los sistemas actuales, la implementación se hace principalmente con sistemas de una sola etapa, usando inversores de tres o más niveles y con acoplamiento galvánico a la red eléctrica con el objetivo de mejorar la eficiencia. En este artículo se presenta el análisis de una topología multinivel de cinco niveles que permite tener una baja distorsión armónica y la reducción de la corriente de modo común propia de sistemas fotovoltaicos sin transformador. El sistema se valida a través de simulaciones numéricas identificando ventajas y desventajas del convertidor bajo estudio.

PALABRAS CLAVE — Sistemas fotovoltaicos, inversor multinivel, corriente de modo común.

I. INTRODUCCIÓN

La conversión de la energía solar en energía eléctrica es una de las formas más populares de generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable [1], [2], [3]. Para poder aprovechar adecuadamente la energía eléctrica así generada es necesario adecuarla para que el usuario final pueda utilizarla. Los sistemas fotovoltaicos (FV) producen una señal eléctrica en forma de Corriente Directa (CD), la cual en sistemas independientes o aislados de la red eléctrica puede ser aprovechada para alimentar cargas locales. Sin embargo, si esta energía se produce a partir de una planta solar de alta potencia, la energía puede ser inyectada directamente a la red eléctrica sin la necesidad de almacenamiento o implementación de consumos locales [4]. De acuerdo con lo anterior, es necesario convertir la CD generada en Corriente Alterna (CA), esto se hace a partir de sistemas de conversión basados en electrónica de potencia. En sistemas fotovoltaicos sin transformador se emplea una amplia diversidad de estructuras de convertidores de CA a CD [1], [5]. Dentro de estas estructuras destacan los convertidores que producen múltiples niveles de voltaje a la salida, conocidos como inversores multinivel [6], [7]. Una característica importante con la que deben cumplir estos inversores en los sistemas fotovoltaicos sin transformador es la limitación de la Corriente de Modo Común (CMC) de acuerdo con la normativa internacional aplicable, por

ejemplo, DIN VDE-0126-1-1, la cual limita el valor RMS de esta corriente a 300 mA [8].

Existe una amplia variedad de soluciones en la literatura orientadas a la reducción de la corriente de modo común las cuales pueden ser clasificadas en: diseño específico de la estrategia de modulación PWM (Pulse Width Modulation), rediseño de la topología del convertidor, conexión de la referencia de CD con la referencia de CA también conocido como “tierra virtual”, implementación de filtros pasivos y diseño del sistema de control [9], [10], [11], [12]. En el caso particular de los inversores multinivel en [13] se propone un inversor de cinco niveles el cual hace uso de la técnica de tierra virtual para resolver el problema de la corriente de modo común. En este trabajo de investigación se hace una revisión y un análisis de la operación de este convertidor y se presentan resultados de simulación que permiten identificar características importantes, problemáticas, ventajas y desventajas de este inversor propuesto en [13].

II. DESCRIPCIÓN DE LA TOPOLOGÍA BAJO ESTUDIO

El convertidor multinivel que se propone analizar y estudiar es el que se muestra en la Fig. 1 [13]. La topología está construida utilizando 6 interruptores activos, en este caso se han utilizado IGBTs (Isolated Gate Bipolar Transistor) y un semiconductor no controlado, en este caso *D*. Además, se

implementan tres capacitores electrolíticos (C_1 , C_2 y C_3), la carga está compuesta por un filtro L_f y la red eléctrica y finalmente el generador eléctrico representado por un arreglo de paneles fotovoltaicos (FV) cuya diferencia de potencial está representada por v_{PV} . El funcionamiento del circuito se puede explicar por medio del análisis de los estados de operación válidos (que no producen cortos circuitos o comportamientos no deseados) del inversor.

Para el semiciclo positivo de la señal senoidal de la red eléctrica que se desea reconstruir a partir del inversor, en la Fig. 2 se presenta el estado de operación que produce la mitad de la tensión de entrada, es decir, $v_{PV}/2$ (las líneas negras representan las partes del circuito activas, mientras que las grises representan la parte del circuito que está inactiva). Para este estado de operación se considera que, en un estado de operación previo, los capacitores C_1 y C_2 fueron cargados con la mitad del voltaje que produce el generador FV ($v_{PV}/2$). En este estado, la corriente fluye desde el terminal positivo del capacitor C_1 hacia la carga a través de S_4 y después de pasar a través de la carga regresa al capacitor usando la trayectoria proporcionada por S_3 el cual es un interruptor bidireccional en corriente. Es importante notar, que este estado de operación no puede ser permanente ya que la energía almacenada en el capacitor tendería a agotarse con el paso del tiempo, por lo que, es necesario implementar una estrategia de control PWM que permita procesos de carga y descarga y que, por lo tanto, garantice que el capacitor no pierda la carga almacenada en forma de campo eléctrico.

Por otro lado, para obtener la tensión máxima de salida se utiliza el circuito eléctrico equivalente de la Fig. 3. En esta figura se observa que, la conexión del terminal positivo del generador fotovoltaico con el terminal A de la carga se realiza a través de los IGBTs S_1 y S_4 por lo que la corriente de la carga fluye a través de estos y del terminal de referencia. Por otro lado, es importante notar que este es un estado de carga para los capacitores C_1 y C_2 cuya trayectoria de carga está marcada con línea roja en la Fig. 3.

Para obtener el nivel de voltaje cero en la carga, se implementa la configuración que se muestra en la Fig. 4. Como puede observarse, los transistores S_1 y S_5 se encuentran en estado de saturación. En este caso, el interruptor S_1 proporciona una trayectoria de carga para los capacitores C_1 y C_2 mientras que el transistor S_5 es el encargado de proveer la trayectoria de libre circulación para la corriente de carga la cual circula también a través del diodo D y de la inductancia L_f . La inductancia L_f se usa para ayudar a mitigar los picos de corriente absorbidos durante el proceso de carga de los capacitores el cual ocurre cuando S_1 entra en saturación.

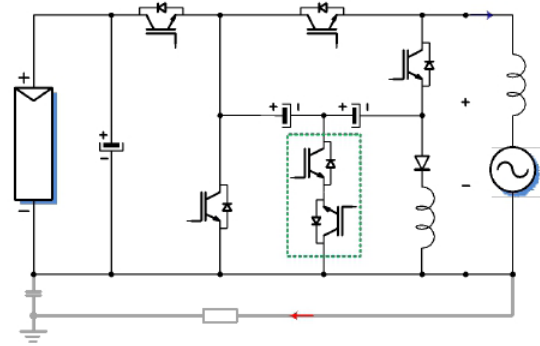


Fig. 1. Circuito eléctrico simplificado de la topología de convertidor multinivel bajo estudio.

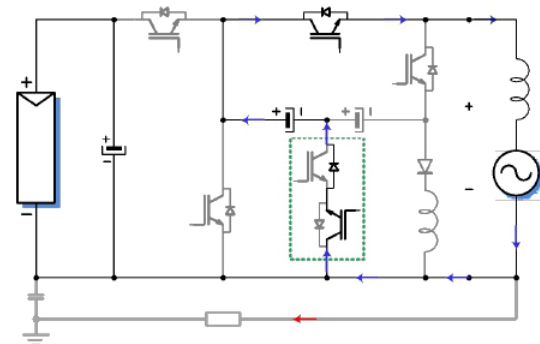


Fig. 2. Circuito simplificado del estado de operación que produce $v_{PV}/2$ a la salida del inversor.

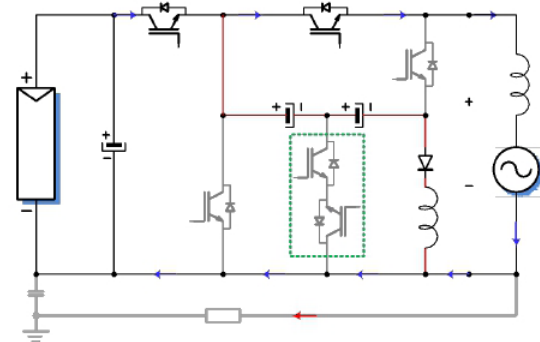


Fig. 3. Circuito simplificado del estado de operación que produce v_{PV} a la salida del inversor y permite también la carga de los capacitores C_1 y C_2 .

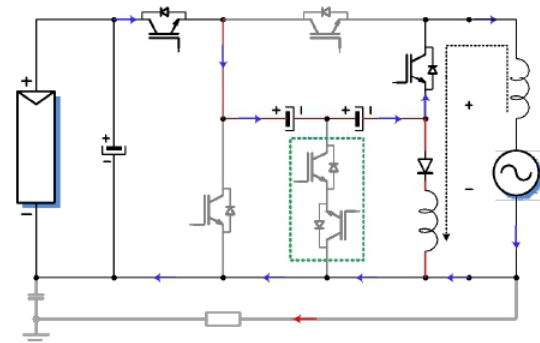


Fig. 4. Circuito simplificado del estado de operación que produce 0 V a la salida del inversor y permite también la carga de los capacitores C_1 y C_2 .

Por otro lado, para el caso del semiciclo negativo, el estado de operación para obtener $-v_{PV}/2$ es el que se muestra en la Fig. 5. Se puede observar que en este caso el generador FV se desconecta de la carga cuando S_1 entra en estado de corte y el voltaje de salida lo proporciona el capacitor C_2 el cual se descarga durante este intervalo. La profundidad de la descarga dependerá del consumo de potencia de la carga, del valor del capacitor y de la duración del intervalo. La corriente de carga se suministra a través del interruptor bidireccional designado como S_3 y regresa al capacitor a través del interruptor S_5 . Finalmente, el estado que produce $-v_{PV}$ en la carga se muestra en la Fig. 6, se puede observar que ahora el voltaje de salida corresponde a la suma de los voltajes individuales de los capacitores C_1 y C_2 y la trayectoria de la corriente de la carga la establecen los interruptores S_2 y S_5 . Es importante notar aquí que, si el capacitor C_2 tuvo una descarga durante el estado anterior, la tensión de salida podría no corresponder con la tensión máxima proporcionada por el generador FV. Esto se mostrará posteriormente por medio de las simulaciones numéricas.

A. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE MODULACIÓN

La metodología de diseño empleada para la estrategia de modulación está basada en la técnica de modulación senoidal convencional la cual consiste en comparar una señal de referencia con forma de onda senoidal con una señal portadora con forma de onda triangular. En el caso particular del inversor multinivel de este estudio la señal de referencia se compara con cuatro señales triangulares desplazadas en el eje vertical como se muestra en la Fig. 7. Observe que también las señales triangulares están desplazadas en fase por un ángulo de 180° y de manera alternada. Esta disposición tanto en nivel como en fase de las señales portadoras corresponde a una estrategia de modulación conocida como Alternative Phase Opposition Disposition (APOD-PWM) [14]. Las señales así generadas son señales digitales con ancho de pulso variable y pueden ser usadas para controlar el inversor.

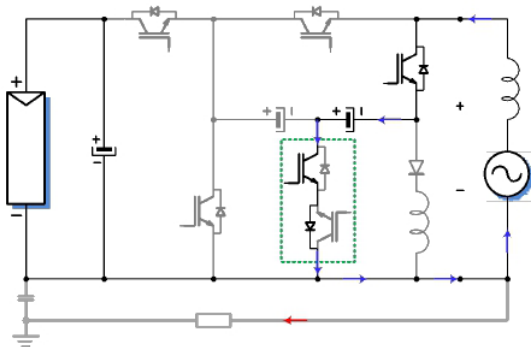


Fig. 5. Circuito simplificado del estado de operación que produce $-v_{PV}/2$ a la salida del inversor.

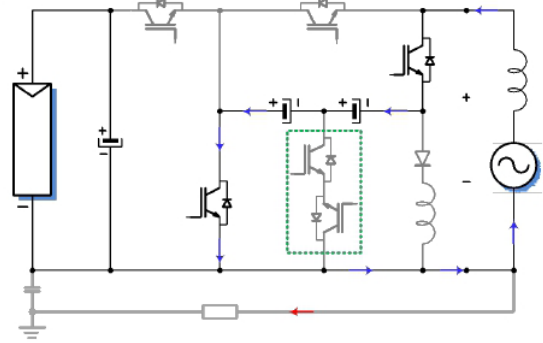


Fig. 6. Circuito simplificado del estado de operación que produce $-v_{PV}$ a la salida del inversor.

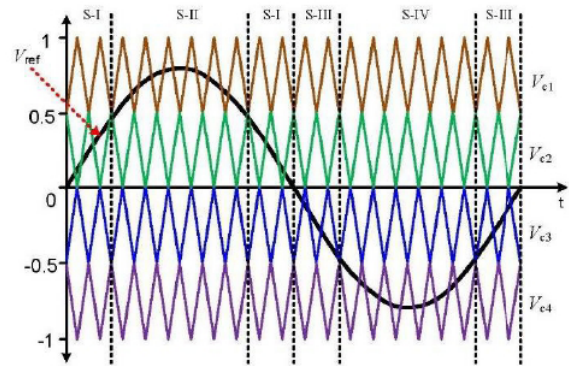


Fig. 7. Señales utilizadas para generar las señales de control de los dispositivos semiconductores controlados del inversor.

Es importante mencionar que, dado que se trata de un inversor multinivel, se ha dividido la comparación de las señales por sectores, por ejemplo, S-I, corresponde al sector en el cual es necesario utilizar configuraciones del inversor para generar 0 V y $v_{PV}/2\text{ V}$, mientras que, el S-II corresponde al intervalo en el cual se genera en la salida del inversor $v_{PV}/2\text{ V}$ y $v_{PV}\text{ V}$, y así sucesivamente para el semiciclo negativo.

El resultado de la comparación de las señales triangulares con la señal de referencia se muestra en la Fig. 8. El patrón de PWM se muestra para dos periodos de la red eléctrica (60 Hz) y se resaltan los intervalos S-I y S-II en donde es posible identificar los estados del inversor utilizados en cada uno de estos intervalos dado que la gráfica se ha obtenido usando una frecuencia de conmutación de 1 kHz. De igual forma, en la parte inferior de la gráfica se ha trazado la gráfica para el S-I con la idea de identificar claramente el sector de operación. Es importante observar que la señal generada para S_3 presenta conmutaciones durante todo el intervalo de operación del inversor y se usa para controlar los dos semiconductores incluidos en el interruptor bidireccional. Además, los interruptores S_4 y S_5 solo presentan conmutaciones durante el S-I, por lo tanto, se puede esperar que estos interruptores no contribuyan significativamente a las pérdidas de potencia por conmutación del inversor.

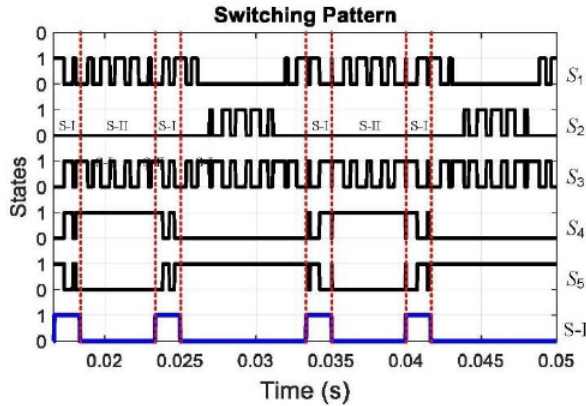


Fig. 8. Señales moduladas por ancho de pulso para el inversor multinivel bajo estudio.

III. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NÚMERICA

A. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MODULACIÓN

La estrategia de modulación se plantea acorde con el análisis de los estados de operación y exceptuando de este planteamiento aquellos estados de operación que producen cortos circuitos o comportamientos no deseados del inversor. Además, se considera el análisis y la estrategia mostrada en la sección anterior. El resumen de las diferentes combinaciones de los estados de los interruptores y los correspondientes voltajes generados se muestran en la [Tabla I](#). Note que, en el caso de este inversor en particular no se presentan estados redundantes, es decir, estados de operación que produzcan el mismo nivel de voltaje en la salida.

Mediante la combinación adecuada de los estados de operación mostrados en la [Tabla I](#) es posible obtener la forma de onda de la tensión de salida multinivel. Para esto, se definen los parámetros del inversor los cuales se muestran en la [Tabla II](#).

Con base en estos parámetros y el esquema de modulación planteado anteriormente, se implementó el circuito del inversor multinivel en el software de simulación PSIM. Es importante mencionar que el algoritmo de modulación se implementó usando el bloque DLL y desarrollando un programa en C para definir la secuencia de activación de los transistores.

B. RESULTADOS DE LAS VARIABLES ELÉCTRICAS DEL INVERSOR MULTINIVEL

Los resultados para la corriente de salida i_s y para el voltaje de salida v_{AB} se muestran en la [Fig. 9](#), se puede observar que el voltaje de salida presenta los cinco niveles de voltaje deseados, sin embargo, la forma de onda presenta procesos de descarga de los capacitores C_1 y C_2

principalmente durante el semiciclo negativo para el nivel de voltaje $-V_{PV}$. Lo anterior se debe a que los estados de operación utilizados durante el intervalo S-IV, los cuales corresponden a los estados 4 y 5 en la [Tabla I](#), se usan únicamente para alimentar a la carga, por lo que existe un desequilibrio entre la carga y la descarga de los capacitores. Esto, además de la distorsión que se produce en el voltaje de salida, también puede generar componentes de corriente directa no deseadas que puedan ser inyectadas a la red eléctrica. Las componentes de corriente directa son no deseadas en la operación de la red eléctrica, ya que pueden producir saturación en los transformadores aguas arriba y por lo tanto calentamiento y desgaste prematuro de los mismos. Es por esta razón por la que existen normativas aplicables que limitan los niveles de componentes de corriente directa que pueden ser inyectadas en la red eléctrica. En el caso de México la Especificación CFE G0100-04 [15] establecida por la Comisión Federal de Electricidad para la regulación de la interconexión a la red eléctrica de baja tensión de sistemas fotovoltaicos, se establece que en ningún caso se permitirá la inyección de componentes de CD en la red eléctrica. Este es un problema de operación del convertidor que no se menciona en [13] y que es importante resaltar.

Respecto a la forma de onda de la corriente de salida i_s , se puede observar que esta se aproxima a una forma de onda senoidal debido a la implementación del filtro de primer orden implementado en la salida del inversor. Se puede observar también que existe un rizado debido al proceso de conmutación de los transistores cuya magnitud está relacionada con la frecuencia de conmutación y el valor del filtro de primer orden.

TABLA I. ESTADOS DE OPERACIÓN DEL INVERSOR MULTINIVEL BAJO ESTUDIO.

Estado	S1	S2	S3	S4	S5	D	V_{AB}
1	0	0	1	1	0	0	$V_{PV}/2$
2	1	0	0	1	0	1	V_{PV}
3	1	0	0	0	1	1	0
4	0	0	1	0	1	0	$-V_{PV}/2$
5	0	1	0	0	1	0	$-V_{PV}$

TABLA II. PARÁMETROS USADOS PARA SIMULACIÓN DEL INVERSOR BAJO ESTUDIO.

Parámetro	Valor	Unidad
V_{PV}	400	V
C_1 y C_2	1	mF
L_f	2	mH
R	35	Ohms
f_{SW}	15	kHz
Potencia	1.5	kW
f_g	60	Hz

Por otro lado, en la Fig. 10 se han obtenido los resultados de simulación para los voltajes de los capacitores C_1 y C_2 y las gráficas de las corrientes que circulan a través de ellos. En primera instancia es difícil decir si los voltajes de los capacitores son iguales, por lo que se ha medido el valor promedio y se obtuvo que $V_{C1}=185$ V y $V_{C2}=202$ V, lo cual demuestra que existe una desviación de los voltajes en los capacitores y que además se incrementa continuamente conforme el tiempo transcurre. Esto significa que existe desequilibrio en estos voltajes y que es necesario implementar técnicas o estrategias que permitan mantener los voltajes equilibrados, la solución de este problema está fuera del enfoque de este trabajo y se deja para investigaciones futuras.

Además, se puede observar que, en el caso de las corrientes, existen niveles de corriente que alcanzan valores en el orden de los 60 A durante los intervalos que corresponden al S-III en el semiciclo negativo. Estos intervalos corresponden a la aplicación de los estados 3 y 4 de la Tabla I, en donde, el estado 3 corresponde a la generación de 0 V en la salida y al proceso de carga de los capacitores, mientras que el estado 4 corresponde a un proceso de descarga y a la generación de $-v_{pv}/2$ en la salida del inversor. Los picos de corriente se producen durante el proceso de carga en el estado 3 y se deben al desequilibrio generado durante el intervalo correspondiente al S-IV. En el resto de los intervalos no se produce este fenómeno debido a la implementación de L_r . Esta es otra importante razón para implementar en este inversor técnicas que permitan equilibrar los voltajes de los capacitores.

En la Fig. 11 se muestran las gráficas de los esfuerzos en voltaje para los semiconductores S_1 , S_2 y S_3 , en el caso de los interruptores S_1 y S_2 , el esfuerzo máximo de voltaje es de 400 V con algunas excursiones hacia valores que no exceden el voltaje máximo, mientras que para el interruptor S_3 es de 200 V para cada uno de los interruptores que componen el interruptor bidireccional. Finalmente, en la Fig. 12 se muestran los resultados de simulación para los esfuerzos en voltaje de los interruptores S_4 y S_5 en donde se puede observar que al igual que en el caso anterior el voltaje máximo que deberán soportar es de 400 V, la cual corresponde con el voltaje del generador fotovoltaico. Este es un parámetro que se debe considerar en el diseño del inversor y en la evaluación de las pérdidas de potencia disipada en forma de calor.

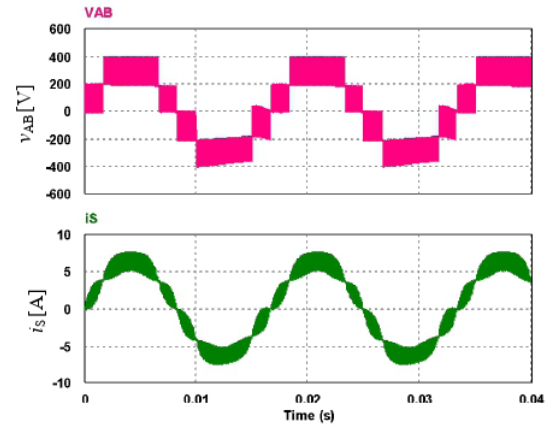


Fig. 9. Voltaje V_{AB} y corriente i_s de salida del inversor multinivel.

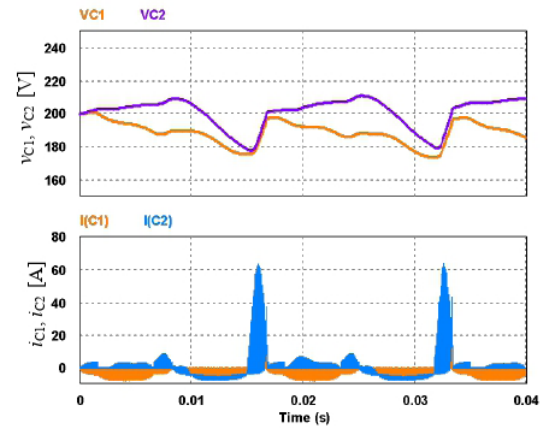


Fig. 10. Voltaje y corriente en los capacitores C_1 y C_2

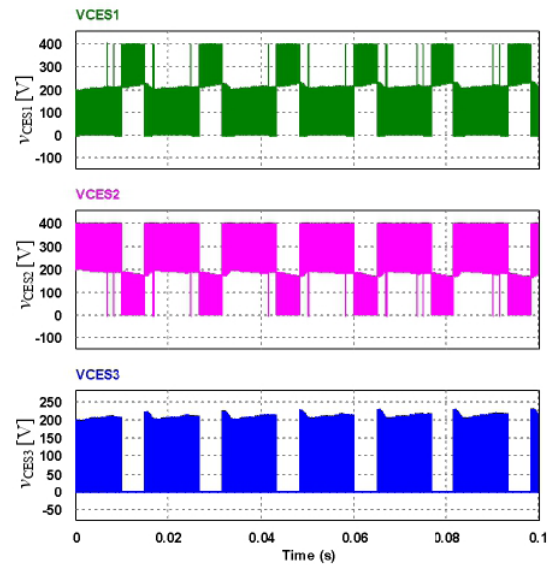


Fig. 11. Esfuerzos en voltaje en los semiconductores S_1 , S_2 y S_3 del inversor multinivel.

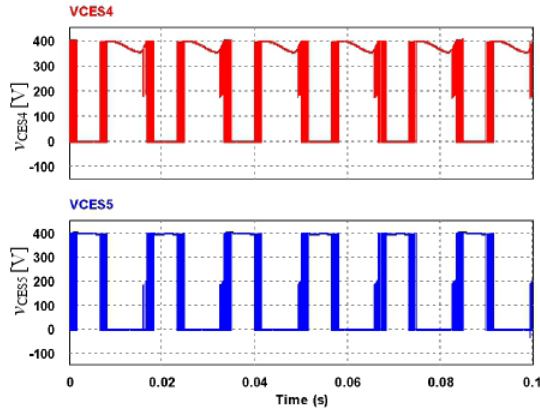


Fig. 12. Esfuerzos en voltaje en los semiconductores S4 y S5 del inversor multinivel.

C. EVALUACIÓN DE LA THD Y LOS NIVELES DE CD DEL CONVERTIDOR MULTINIVEL

Mediante el uso de las simulaciones se realizó una evaluación de la Distorsión Armónica Total (THD, por sus siglas en inglés) de la corriente y el voltaje de salida. Además, se midió el nivel de CD en la corriente de salida que es la que finalmente se inyecta a la red eléctrica. En el caso de la THD del voltaje de salida se obtuvo un valor de 37.2 % (en una condición de operación sin problemas de desequilibrio la THD sería de alrededor de 36.1 %). Por otro lado, para el caso de la corriente de salida la THD medida es de 15 % (en una condición de operación sin problemas de desequilibrio la THD sería de alrededor de 14.2 %). En ambos casos existe un incremento de la distorsión debida al desequilibrio de las tensiones de los capacitores. Por otro lado, en el caso de la componente de CD se obtuvo un valor de 609 mA, sin embargo, en condiciones normales este valor debería ser muy cercano a cero, la medición obtenida fue de -172 μ A.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se realizó un estudio de una topología multinivel de cinco niveles con reducción de la corriente de modo común para sistemas fotovoltaicos sin transformador. Los resultados mostraron que existen dos problemas que deben ser resueltos. El primer problema corresponde a la corriente absorbida por los capacitores C_1 y C_2 durante el proceso de carga. Y el segundo problema corresponde a la operación durante el semiciclo negativo, en particular en el S-IV en donde se observó que el voltaje de salida no se mantiene constante y decrece conforme el tiempo transcurre. Estos dos problemas están directamente relacionados y es necesario implementar técnicas que permitan balancear los voltajes de los capacitores y en consecuencia reducir las excursiones de corriente en los mismos. La corriente absorbida por los capacitores circula principalmente a través

de S_I y D por lo que estos semiconductores podrían dañarse permanentemente. Además, como se mostró en los resultados, estos fenómenos provocan que exista una disminución de la calidad de las formas de onda de salida y la generación de componentes de corriente directa no deseadas y limitadas por la normativa aplicable.

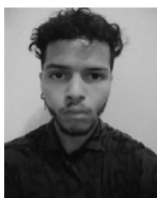
REFERENCIAS

- [1] H. Xiao, Overview of Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverters, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 533-548, Jan. 2021.
- [2] Kumari, S, Verma, AK, N, S, Yaragatti, UR, Pota, HR. An eight-switch five-level inverter with zero leakage current. *IET Power Electron.* 2021; 14: 590– 601.
- [3] I. Günsal, D. A. Stone and M. P. Foster, Suppressing Leakage Current for Cascaded H-Bridge Inverters in Renewable Energy and Storage Systems, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 11, pp. 11035-11043, nov. 2021.
- [4] Madasamy, P.; Suresh Kumar, V.; Sanjeevikumar, P.; Holm-Nielsen, J.B.; Hosain, E.; Bharatiraja, C. A Three-Phase Transformerless T-Type- NPC-MLI for Grid Connected PV Systems with Common-Mode Leakage Current Mitigation. *Energies* 2019, 12, 2434.
- [5] M. N. H. Khan, M. Forouzes, Y. P. Siwakoti, L. Li, T. Kerekes and F. Blaabjerg, Transformerless Inverter Topologies for Single-Phase Photovoltaic Systems: A Comparative Review, in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 1, pp. 805-835, March 2020.
- [6] S. S. Lee, Y. Yang and Y. P. Siwakoti, A Novel Single-Stage Five-Level Common-Ground-Boost-Type Active Neutral-Point-Clamped (5L-CGBT-ANPC) Inverter, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 6, pp. 6192-6196, June 2021.
- [7] L. Wang, Y. Shi, Y. Shi, R. Xie and H. Li, Ground Leakage Current Analysis and Suppression in a 60-kW 5-Level T-Type Transformerless SiC PV Inverter, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 1271-1283, Feb. 2018.
- [8] Automatic Disconnection Device Between a Generator and the Public Low-Voltage Grid, Paragraph 4.7.1. Photovoltaik, Standard DIN VDE 0126-1-1, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnikim DIN UND VDE, Feb. 2006.
- [9] X. Guo, Y. Yang and T. Zhu, ESI: A Novel Three-Phase Inverter With Leakage Current Attenuation for Transformerless PV Systems, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 4, pp. 2967-2974, April 2018.
- [10] Y. Lian, Y. W. Li, Z. Quan, N. R. Zargari and Z. Cheng, SVM Strategies for Common-Mode Current Reduction in Transformerless Current-Source Drives at Low Modulation Index, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1312-1323, Feb. 2017.
- [11] J. C. Giacomini, L. Michels, H. Pinheiro and C. Rech, Active Damping Scheme for Leakage Current Reduction in Transformerless Three-Phase Grid-Connected PV Inverters, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 5, pp. 3988-3999, May 2018.
- [12] G. Vazquez-Guzman et al., A 5LCHB Inverter for PV Transformerless Applications With Reduced Leakage Ground Current, in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 116919-116930, 2022.
- [13] J. F. Ardashir, M. Ghassemi, B. Rozmeh, F. Blaabjerg and S. Peyghami, A Five-Level Transformer-less Grid-Tied Inverter Structure with Capacitive Voltage Divider Concept with Leakage Current Elimination, in *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- [14] S. Rathore, M. K. Kirar, S. K. Bhardwaj, Simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques, *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)*, 2015.
- [15] Comisión federal de electricidad, Interconexión a la red eléctrica de baja tensión de sistemas fotovoltaicos con capacidad hasta 30 kW (Especificación CFE G0100-04), 2008.

BIOGRAFÍAS



GERARDO VÁZQUEZ Nació en México, México el 24 de septiembre de 1977. Recibió el grado de Ingeniero Electrónico del Instituto Tecnológico de Apizaco (ITA), en Tlaxcala, México en 2003, el grado de Maestro en Ciencias del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en Cuernavaca, México, en 2006 y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España en 2013. En 2009 realizó una estancia en la Universidad de Aalborg, en Aalborg, Dinamarca. Es Senior Member de la IEEE desde el año 2022. Desde 2012 es profesor de tiempo completo en el departamento de Ingeniería Electrónica del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Sus principales intereses de investigación incluyen el análisis y el diseño de convertidores de potencia, sistemas de energía renovable y convertidores conectados a la red eléctrica.



LUIS ENRIQUE HERNÁNDEZ AGUILAR Es estudiante de noveno semestre de la carrera de ingeniería electrónica en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Su área de especialidad es la electrónica de potencia con un amplio conocimiento de la electrónica digital y programación de microcontroladores. Ha participado en congresos como el de Participación de la Mujer en la Ciencia 2023 y en el programa de investigación Delfin 2023 con una estancia de investigación en el posgrado de ingeniería eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente desarrolla su tesis enfocada en la generación eficiente de energía por medio de paneles fotovoltaicos.



JOSE MIGUEL SOSA ZÚÑIGA recibió el grado de Maestría y el grado de Doctor en ciencias aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica IPICYT, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, en 2005 y 2009, respectivamente. Desde 2008 ocupa el cargo de Profesor-Investigador de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato TecNM/ITS de Irapuato, Irapuato, Guanajuato, México. Sus intereses de investigación incluyen teoría de control, análisis, diseño y control de convertidores de electrónica de potencia y sistemas de energía renovable.



PÁNFILO RAYMUNDO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ recibió el grado de Doctor en Ciencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. IPICYT, San Luis Potosí, México, en 2007. De 2006 a 2016, fue profesor de tiempo completo en el Tecnológico de México, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, TecNM-ITESI, México. Desde 2017 ocupa el cargo de Profesor-Investigador en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. Sus intereses de investigación se centran en aplicaciones de electrónica de potencia e incluyen el modelado, diseño y control de convertidores de electrónica de potencia aplicados a la mejora de la calidad de la energía eléctrica y la conversión de energía eléctrica a partir de fuentes de energía eléctrica no convencionales.



DALYNDHA AZTATZÍ PLUMA nació en México, México, el 10 de noviembre de 1985. Recibió el grado de licenciatura en Ingeniería Química por la Universidad Autónoma de Tlaxcala, México, en 2007, el grado de maestría en ciencias en ingeniería química de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México, en 2011 y el grado de Doctora en Ingeniería Química por el Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato, México, en 2017. En 2019, fue becaria visitante en la Universidad de Guanajuato, México. Desde 2020 se incorporó al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Abasco ocupando el cargo de Profesora-Investigadora asociada en el Departamento de Mecatrónica. Sus intereses de investigación incluyen la simulación molecular aplicada a nanomateriales, biocompuestos y programación de sistemas electrónicos embebidos.

Uso de Internet y su Costo Asociado al Consumo de Electricidad en Hogares en el Estado de Guanajuato

JESÚS MARTÍNEZ PATIÑO, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA, ROBERTO JOSÉ MUÑOZ MÚJICA, IVÁN ABEL HERNÁNDEZ ROBLES.

Universidad de Guanajuato.
jesusmp23@gto.mx
jm.lozano@ugto.mx
rjmunoz@ugto.mx
ia.hernandez@ugto.mx

RESUMEN Desde hace varios años atrás de manera continua se ha incrementado el uso de internet en los hogares, por lo que los usuarios principalmente asocian sus costos al pago del servicio de este; pero pocas veces consideran en este costo sumar el monto relacionado al costo de electricidad que tiene que ver directamente con la operación de distintos equipos, entre ellos los periféricos. A través de este artículo se muestran los costos para el caso de estudio en los hogares del estado de Guanajuato con todas sus características de insumos para el cálculo aproximado del gasto que puede tener un hogar típico por este concepto.

PALABRAS CLAVE — Internet, electricidad, costo.

I. INTRODUCCIÓN

Según datos de la encuesta nacional sobre disponibilidad y uso de tecnologías de la información en los hogares (ENDUTIH) [1] del año 2022 arroja información importante para su análisis, bajo diferentes perspectivas; desde el ámbito del uso de las Tecnologías de la Información (TIC's) y del consumo de electricidad. Estas dos perspectivas, son temas centrales del caso que se expone en el presente artículo; aunado a las características sociodemográficas de los usuarios de internet.

En este marco, el estudio no se centra solamente en las personas usuarias de internet; también expone la cantidad de personas de los hogares y de horas que se utiliza. Para el caso de estudio, se aplica para el estado de Guanajuato, el cual tiene distintas características y municipios con una gran variedad en todos los ámbitos; por citar algunos; en lo económico, social y educativo; los cuales influyen directamente en la diversidad de datos que se pueden considerar como insumo para el presente trabajo.

Un insumo importante, es la encuesta ENDUTIH, la cual tiene como finalidad obtener datos sobre la disponibilidad y uso de las TIC's en los hogares mexicanos, así como su utilización por los individuos de seis años o más. Estos datos, dan información para el análisis es este ámbito de las TIC's, pero no da información relacionada con el consumo de electricidad por su uso en los hogares; lo cual se considera relevante para el gasto global en ellos.

Dentro del presente trabajo también se expone el tipo de tarifa eléctrica en los hogares que puede darse, centrándose en el caso de estudio para el estado de Guanajuato; aunado también el comportamiento de los ingresos y gastos en los hogares; datos obtenidos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) [2] del año 2022. En este caso, se hace una estimación de la entidad federativa haciendo diferenciación entre el ámbito urbano y rural; aunque en el marco de la electricidad es el mismo costo y subsidio que se da en todo Guanajuato.

Una vez que se expone lo referente al uso de internet en diferentes ámbitos, en el presente trabajo se citan los costos de energía en los hogares. Es importante mencionar que en México prácticamente casi la totalidad de suministro de este energético lo hace la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [3]; la cual tiene diferentes tipos de tarifa para los hogares mexicanos llamándole a ésta: tarifa doméstica, y le asigna el número 1 y una letra en función de la región del país [4]; lo cual se detallará más adelante. También es necesario mencionar que la tarifa doméstica tiene un subsidio por parte de la autoridad federal a través del prestador de servicio; el cual, en este caso es la CFE; el nivel de subsidio se otorgó de manera directa en función del consumo de electricidad; por ejemplo, para los hogares que consumen menos energía el subsidio es mayor.

En la parte final, se presenta el caso de estudio con los cálculos respectivos en función de los costos de electricidad y el de los equipos-dispositivos conectados a internet en el hogar.

II. USO DEL INTERNET

En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en colaboración con el Instituto de Telecomunicaciones (IFT) realizó la encuesta ENDUTIH; la del año 2019 es mucho más completa en referencia a los datos que arroja en su diversidad; y posteriormente se realizan año con año diferentes encuestas y estimaciones de datos. Los datos arrojados en el periodo de los años 2019 a 2022 son de manera particular muy especial debido a la pandemia que se vivió dentro de ese periodo y que incidió de múltiples maneras. Existen estudios en el marco de las TIC's [5] y a parte trabajos relacionados con el consumo de electricidad en ese periodo de la pandemia [6].

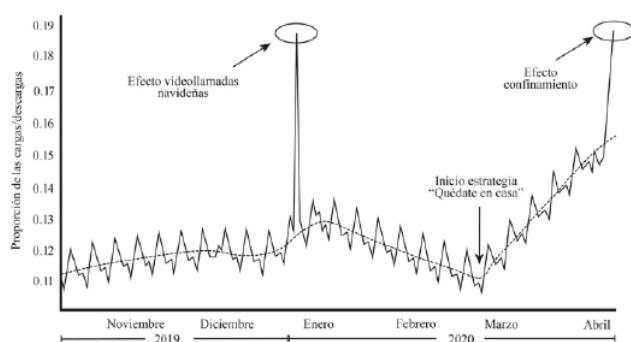


Fig. 1. Demanda del consumo de internet en México en el periodo de noviembre de 2019 a abril de 2020 y el efecto del confinamiento [5].

En la Fig. 1 es un ejemplo de los casos que se publicaron respecto al consumo de Internet en México dándole seguimiento durante el tiempo de la pandemia. Como parte de las conclusiones del trabajo [5], se cita que en nuestro país existen problemas de logística y tecnológicos vinculadas a una pobre infraestructura de las comunicaciones.

En el mismo sentido, los datos del 2019 a 2022 arrojan que en este periodo las personas usuarias se conectaron a internet desde su casa aumentaron 6.3%; debido a que pasaron de 89.1 a 95.4 % [1]. La Fig. 2 da muestra gráficamente de los porcentajes de los demás lugares de acceso, obviamente considerando el antes citado; siguiendo en porcentaje a la baja, el de la conexión móvil es el subsecuente con 54.9% con una reducción del 8.6% respecto al año 2019; le siguen las que se conectaron en el trabajo con 41.3% con una disminución del 0.5% en referencia al año 2019 y finalmente, los usuarios que se conectaron en la escuela con 18% con una disminución del 4.1% en el periodo citado. Este último dato es lógico en referencia a lo acontecido durante la pandemia. Lo que es evidente en el gráfico que, de los conceptos antes citados, el único que tuvo tendencia al alza fue la referente a los usuarios que se conectaron en el hogar, lo cual va acorde a lo sucedido durante la pandemia; de ahí de la importancia de este estudio para conocer; de alguna manera, el impacto económico que esto representó desde el punto de vista de consumo de electricidad.

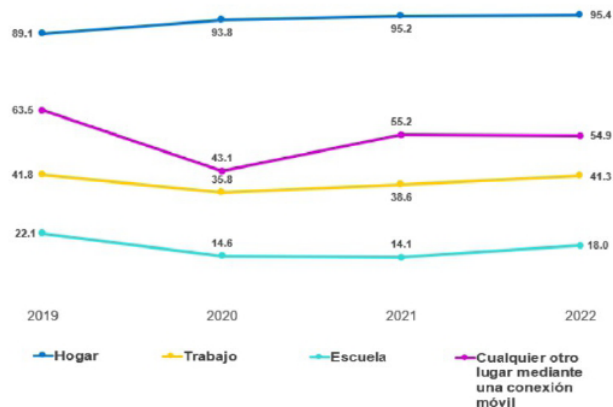
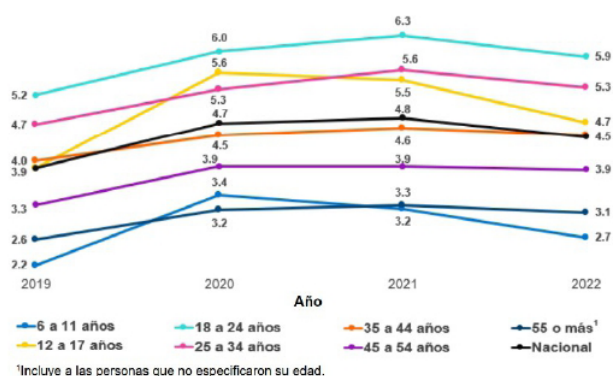


Fig. 2. Usuarios de internet, según lugar de acceso del periodo del año 2019 a 2022 (Porcentaje) [1].



¹Incluye a las personas que no especificaron su edad.

Fig. 3. Horas promedio de uso de internet, según rangos de edad de los años 2019 a 2022 (Porcentaje) [1].

Otro dato importante que es requerido como insumo para el trabajo presente, es la cantidad de horas de uso de internet por usuario; el cual es presentado en la Fig. 3 con datos interesantes respecto a la edad y la cantidad de horas; para el caso que nos ocupa, solamente es necesario la cantidad de horas promedio para conocer la cantidad de energía eléctrica que se consume; lo cual se expondrá más adelante.

De la encuesta ENDUTIH se obtiene que para el año 2022, el tiempo promedio de uso de internet al día, por persona, fue de 4.5 horas; mientras que, en el año 2019, el tiempo promedio fue de 3.9 horas; en 2020, de 4.7; y en 2021, de 4.8 horas. Nuevamente se identifica la variabilidad de las horas en función del tiempo que duró la pandemia.

Con los dos datos expresados en los párrafos anteriores; la cantidad de personas que usan el internet en el hogar y el incremento en el uso de horas de internet; se obtiene de manera de sólida la justificación del presente trabajo en virtud de la variación de actividades que se ha dado en el contexto de la pandemia y post pandemia; siendo la herramienta de internet una pieza fundamental en la vida cotidiana en los hogares; como se cita en los resultados de la encuesta.

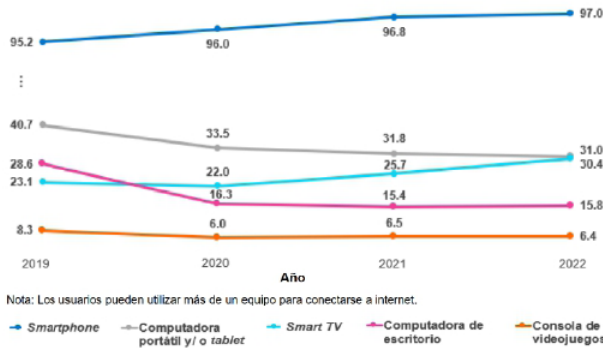


Fig. 4. Usuarios de internet, según equipo de conexión del periodo del año 2019 a 2022 (Porcentaje) [1].

Finalmente, otro dato que es requerido para el estudio que estamos exponiendo, es el tipo de equipo donde el usuario se conecta a internet; por obvias razones, este equipo es el que consume electricidad además de otros periféricos. Nuevamente es referida la encuesta ENDUTIH [1], otorgando datos de los dispositivos y equipos que usan los usuarios para conectarse a internet. Los datos arrojados durante el periodo de los años 2019 al 2022 es muy interesante por la relevancia que ello conlleva; el gráfico de la Fig. 4 muestra claramente los cuatro principales dispositivos y equipos usados para este fin: smartphone, computadora portátil y/o Tablet, smart tv, computadora de escritorio y consola de videojuegos. Los datos mostrados en la Fig. 4, visualiza que el incremento de uso del internet por parte de los usuarios es el smartphone y la smart tv; mientras que en todos los demás equipos la tendencia es a la baja; estas tendencias sorprenden debido al modo de actividades que se ajustaron durante la pandemia.

III. COSTOS DE ELECTRICIDAD

En México la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es el principal suministrador de energía eléctrica en los hogares en México con más del 99% de cobertura; aunado a lo anterior, existe una diversidad de tarifas domésticas (las cuales son las que atienden a los hogares mexicanos), que se identifican con el número 1, y se diferencian con letras ordenadas alfabéticamente: 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F; además de la Tarifa conocida como de Alto Consumo (DAC, por sus siglas) [4]. La diferencia de que, en cada una de las tarifas se agrega su letra corresponde a la zona donde se cobra esta tarifa y va en función de la temperatura promedio de la región. La CFE indica que este tipo de Tarifa 1 se aplica para todos los servicios que se destinen exclusivamente para uso doméstico y que dependiendo de su consumo podrán ser consideradas de Alto Consumo, además que el receptor del servicio deberá aplicarse en una residencia, apartamento, condominio o vivienda, además que los servicios son suministrados en baja tensión. Una característica de esta tarifa es que se debe de tener un consumo mínimo mensual de 25 kWh; también se conforma de manera escalonada en

función del consumo, teniendo tres diferentes bloques de consumo: básico, intermedio y excedente. Tal y como se describe en la Tabla I.

El costo de facturación por la energía eléctrica se va construyendo de manera escalonada en función del tipo de consumo; e incluso, si la suma escalonada de los kWh es mucho mayor y si la sumatoria de los seis periodos (bimestres) anteriores al cobro de la factura dan como resultado mayor a 3000 kWh, automáticamente el servicio se cobra-factura como una Tarifa DAC.

TABLA I. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS COSTOS EN TARIFA 1 [4]

	Características
Básico	Costo por cada uno de los primeros 75 kWh.
Intermedio	Costo por cada uno de los siguientes 65 kWh.
Excedente	Costo por cada kWh adicional a los anteriores.

Con lo anterior descrito se conoce el tipo de tarifa y el cómo se cobra el servicio de suministro de energía eléctrica en los hogares mexicanos; pero es necesario conocer los costos más aproximados para el caso de estudio que se calculará más adelante en este trabajo. Para poder calcular los montos de la facturación, es necesario los precios por kWh que la CFE publica de manera mensual aplicable a la tarifa correspondiente (en este caso Tarifa 1), los cuales se presentan en la Tabla II.

TABLA II. PRECIOS DE LA TARIFA 1 CORRESPONDIENTE AL MES DE AGOSTO DE 2023 [4]

Tipo de consumo (kWh)	Precio (\$, pesos mexicanos)
Básico	0.987
Intermedio	1.203
Excedente	3.518

Un dato principal es conocer el consumo de energía (kWh) de los equipos y dispositivos: smartphone, computadora portátil y/o Tablet, smart TV, computadora de escritorio, consola de video juegos y el router; lo cual se muestra y se resume en la Tabla III. Esta información será útil para el cálculo final presentado en párrafos más adelante; la cual ha sido de elaboración propia y extraída de distintas fuentes de información.

TABLA III. CONSUMO DE ELECTRICIDAD DE LOS EQUIPOS Y DISPOSITIVOS DE CONEXIÓN A INTERNET

Equipo-Dispositivo	Consumo promedio de energía eléctrica (kWh)
Smartphone	0.050
Computadora portátil [7]	0.150
Tablet	0.040
Smart tv	0.250
Computadora de escritorio	0.175
Consola de videojuegos	0.160
Router	0.050

IV. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se centra en varias características en diferentes ámbitos: desde el contexto de las comunicaciones (el uso de internet), el uso y costo de la energía eléctrica, el impacto en el gasto en los hogares, entre otros; en el marco del estado de Guanajuato.

Primeramente, es necesario conocer la cantidad de energía al mes que consume operativamente cada dispositivo y equipo; lo cual se puede conocer con los datos de la [Tabla III](#); y que nos da como resultado en la [Tabla IV](#). En esta tabla se puede apreciar un detalle importante; se construye también con datos de la [Fig. 3](#) en referencia a las 4.5 horas promedio que utiliza el usuario de internet en los hogares; así mismo, es considerado que el router está conectado las 24 horas del día; mientras que los demás equipos-dispositivos solamente se consideran las horas promedio del año 2022 (4.5 h).

TABLA IV. CONSUMO DE ELECTRICIDAD DE LOS EQUIPOS Y DISPOSITIVOS DE CONEXIÓN A INTERNET DURANTE UN MES

Equipo-Dispositivo	Consumo promedio de energía eléctrica (kWh)	Horas promedio día	Días al mes	kWh al mes
Smartphone	0.050	4.5	30	6.75
Computadora portátil [N]	0.150	4.5	30	20.25
Tablet	0.040	4.5	30	5.4
Smart tv	0.250	4.5	30	33.75
Computadora de escritorio	0.175	4.5	30	23.625
Consola de video juegos	0.160	4.5	30	21.6
Router	0.050	24	30	36

Según se ha expuesto en párrafos anteriores, es complicado llegar a conocer en donde insertar el costo de la electricidad en función de la Tarifa 1 con relación a su característica escalonada; es decir, no se puede conocer en qué bloque se debe de considerar: en el básico, intermedio o en el excedente. Por lo anterior, en la [Tabla V](#) se muestran los resultados del caso de estudio, considerando lo antes expuesto; por lo que se ha tomado un costo promedio para cada uno de los equipos-dispositivos. Pero a ese resultado

parcial; es necesario sumarle el monto del router; es decir, para cada uno de los cálculos parciales es necesario sumarle el consumo de electricidad que se da en las 24 horas del día del router. Los resultados de los montos aproximados para la Tarifa 1 y la Tarifa DAC para el estado de Guanajuato según los datos obtenidos se encuentran en las dos últimas columnas de la [Tabla V](#); los datos corresponden al mes de agosto del presente año; con relación a los precios publicados por la CFE. Es de resaltar que, estos montos no se le ha incluido los impuestos federales del 16% de IVA y el 10 o 12% de impuesto municipal del Derecho de Alumbrado Público que se cobra en los municipios del estado de Guanajuato.

Para poner en este contexto, según datos de la encuesta ENIGH en los hogares del estado de Guanajuato; en el año 2022, el 4.9% del gasto corriente es destinado para pagar el concepto de comunicaciones; por lo que los montos obtenidos en el presente trabajo inciden directamente en este rubro de gasto en el hogar.

V. CONCLUSIONES

La variabilidad que ha tenido el uso del internet en las décadas recientes se intensificó en años recientes a causa de la pandemia, teniendo resultados interesantes respecto a su uso en los hogares y los equipos de donde se usa; dando como resultado datos respecto a los costos de consumo de energía eléctrica incidiendo en los gastos de los hogares mexicanos.

De manera particular, en el caso del estado de Guanajuato los resultados dan muestra de los montos mínimos en el caso de la Tarifa 1 usando una Tablet por \$ 78.7704 de manera mensual hasta el monto más alto en referencia a la Tarifa DAC con el equipo de smart tv por \$ 405.38. Es de resaltar que, estos montos son aproximados y que seguramente en la vida cotidiana en los hogares existe una combinación de uso de los equipos y dispositivos conectados a internet; pero lo que se busca es mostrar un acercamiento a los costos reales poniéndolos de manifiesto a través del presente trabajo.

TABLA V. RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO

Equipo-Dispositivo	kWh al mes	Costo mensual			Costo Promedio	Costo mensual Tarifa DAC (\$5.812)	Costo total aproximado considerando el router y el equipo-dispositivo	
		Básico (kWh) (\$0.987)	Intermedio (kWh) (\$1.203)	Excedente (kWh) (\$3.518)			Tarifa 1 (\$)	Tarifa DAC (\$)
Smartphone	6.75	6.662	8.120	23.747	12.843	39.231	81.339	248.463
Computadora portátil [N]	20.25	19.987	24.361	71.240	38.529	117.693	107.025	326.925
Tablet	5.4	5.330	6.496	18.997	10.2744	31.3848	78.7704	240.6168
Smart tv	33.75	33.311	40.601	118.733	64.215	196.155	132.711	405.387
Computadora de escritorio	23.625	23.318	28.421	83.113	44.9505	137.3085	113.4465	346.5405
Consola de video juegos	21.6	21.319	25.985	75.989	41.0976	125.5392	109.5936	334.7712
Router	36	35.532	43.308	126.648	68.496	209.232		

REFERENCIAS

- [1] INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía](2023). Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH) 2022.
- [2] INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía](2023). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH). 2022.
- [3] <https://www.cfe.mx/finanzas/reports-financieros/pages/reports-anuales.aspx>
- [4] www.cfe.mx/tarifas/Pages/Tarifas.aspx
- [5] J. García-Grajales, A. Buenrostro-Silva y A.S. López-Vázquez, El internet en tiempos del SARS-Cov-2 (COVID-19) en México, *CIENCIA ergo-sum*, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, vol. 28, no. 4, 2021.
- [6] R. Contreras Lisperguer, Análisis de las tarifas del sector eléctrico: los efectos del COVID-19 y la integración energética en los casos de la Argentina, Chile, el Ecuador, México y el Uruguay.
- [7] B. Prieto Campos, J. J. Escobar Pérez, J.C. Gómez López, A. F. Díaz, y A. Prieto Espinosa, Eficiencia energética de computadores personales: un análisis comparativo, 2022.

BIOGRAFÍAS



JESÚS MARTÍNEZ-PATIÑO Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (2008). Egresado del Máster 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.



ROBERTO JOSÉ MUÑOZ MUJICA Doctor en Tecnología Educativa por el Centro Escolar del Mar de Cortés y Maestro en Entornos Virtuales de Aprendizaje por la Universidad de Panamá. Especialista en el campo de la educación a distancia en línea, ha desempeñado diversos roles en la Universidad de Guanajuato, tales como jefe del Departamento de Educación a Distancia y responsable del Sistema Universitario de Multimodalidad Educativa. Actualmente, colabora en el Sistema de Educación Digital de dicha universidad.



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.

Transformación digital y variabilidad del consumo de energía eléctrica en bibliotecas universitarias

JESÚS MARTÍNEZ PATIÑO, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA, ROBERTO JOSÉ MUÑOZ MÚJICA, ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ.

Universidad de Guanajuato.

jesusmp23@ugto.mx

jm.lozano@ugto.mx

rjmunoz@ugto.mx

apizano@ugto.mx

RESUMEN Las bibliotecas universitarias se enfrentan de manera continua a retos de actualización a su contenido e infraestructura para prestar de la mejor manera su servicio. En este artículo se menciona su evolución y reto más reciente frente a la digitalización y la actualización de su iluminación modificando de manera constante el funcionamiento-operación para los usuarios que; a su vez, también van cambiando en generación y en conocimiento; obviamente de manera particular en las universidades. Esta transformación digital y actualización de iluminación conlleva a costos operativos en el contexto del consumo de electricidad; lo que se expone en el caso de estudio centrándose en las adecuaciones y los montos posibles que surgen en las nuevas bibliotecas digitalizadas.

PALABRAS CLAVE — Bibliotecas, Digitalización, Electricidad, Costo.

I. INTRODUCCIÓN

Las bibliotecas han jugado un papel y valor fundamental en el conocimiento; lo que conlleva a su constante actualización de acervo; pero también de la forma operativa del cómo prestan el servicio a los usuarios. De manera particular, las bibliotecas universitarias están inmersas en un entorno de conocimiento que se genera por la propia exigencia de actualización de los usuarios. Esta actualización recientemente tiene una esencia en la transformación digital que necesitan hacer este tipo de bibliotecas, aunado a las condiciones de la instalación eléctrica que requiere y sumando la evolución en el ámbito de la iluminación y su cambiante tecnología.

Las bibliotecas universitarias en años recientes están atravesando por una digitalización en su organización, colecciones y servicios que se despliegan con diferentes niveles de intervención tecnológica y de manera paralela la alineación de los profesionales de las bibliotecas [1] [2].

La modificación de infraestructura que requiere la digitalización en este tipo de instalaciones va acompañada de un ajuste en la iluminación que se requiere en la infraestructura para prestar de la mejor manera el servicio. En este marco, en México se tiene la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008: de iluminación en los centros de trabajo [3].

Dicha norma tiene como objetivo “*Establecer los requerimientos de iluminación en las áreas de los centros de trabajo, para que se cuente con la cantidad de iluminación*

requerida para cada actividad visual, a fin de proveer un ambiente seguro y saludable en la realización de las tareas que desarrollen los trabajadores”, en este sentido, esta norma aplica a las bibliotecas como centro de trabajo en el marco universitario; por lo tanto, al realizar los ajustes aplicados para la digitalización de este tipo de instalaciones conlleva a que se siga aplicando las mismas o mejorando las condiciones de iluminación; pero a la vez, permite la oportunidad de actualizarla con dispositivos más eficientes; lo cual se expondrá más adelante.

Por todo lo anterior, el presente trabajo da muestra de la intersección de dos temas prioritarios en las bibliotecas universitarias: la transformación digital y la actualización de la iluminación artificial. Cada uno de los temas se detalla en función de sus características y de la propuesta de transformación o de actualización, según aplique. Ambos confluyen en que los costos operativos se tendrán que ajustar en el ámbito del consumo de electricidad; por ejemplo, para el caso del incremento de equipos y dispositivos para la transformación digital; obviamente, de igual manera aumenta el consumo de electricidad; mientras que la actualización de dispositivos de iluminación con mayor eficiencia abona a la reducción de los costos. Ambos casos, se detallarán en el caso de estudio que se expone en este trabajo.

II. TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN LAS BIBLIOTECAS UNIVERSITARIAS

En el amplio espectro de lo complejo que implican las bibliotecas universitarias en el ámbito de los contenidos, aplicaciones-procesos, edificios e infraestructura,

Congreso Internacional de Energía UG, 27-29 de septiembre 2023

profesionales y competencias, modelo de servicios, entre otros; la transformación digital forma parte de su actualización en todos los ámbitos citados; lo cual constituye un reto constante para atender de manera oportuna a los usuarios.

En el año 2019 [4] se propuso un modelo llamado *Enterprise architecture model* que busca adaptar la realidad de las bibliotecas universitarias para entender el reto digital desde una perspectiva integral con lo que además expone e identifica sus riesgos. En la Fig. 1 se muestra este modelo, el cual, a manera descriptiva, en el centro y en el área superior se encuentra lo fundamental: generar valor para los usuarios (estudiantes, el personal docente e investigador, personal administrativo y en algunos casos personas ajenas a la universidad).

Estas capas citadas, son propiamente el modelo de servicio de la biblioteca universitaria, que orienta su actividad hacia la comunidad universitaria; los procesos, que son el conjunto de acciones encaminadas a desarrollar los servicios; los profesionales de las bibliotecas, que conectan las colecciones y los servicios con los usuarios; las aplicaciones, que actúan a modo de instrumentos para la gestión de los procesos; los contenidos o colecciones; y la infraestructura, que pueden ser tanto los edificios e instalaciones como los equipamientos que albergan.

El reto digital para este tipo de prestación de servicio se centra en cuatro distintos tipos de apoyos: al aprendizaje, docencia, investigación y gestión; y tal como se ha mencionado: generando un valor agregado.

A manera de identificar de manera puntual las oportunidades que la transformación digital ofrece, se pueden resumir en cuatro [2]:

1. Nuevos servicios, formas de prestación de servicios y formas de trabajo y organización.
2. Nuevos contenidos.
3. Nuevas competencias.
4. Oportunidades de posicionamiento.

Al identificar las oportunidades, de igual manera se exponen a continuación los cuatro principales riesgos:

1. Insostenibilidad financiera de la puesta en marcha o el mantenimiento de servicios/colecciones.
2. Transformación de la propiedad en acceso.
3. Insuficiente o inadecuado desarrollo de competencias.
4. Cumplimiento de expectativas.

Los puntos expuestos anteriormente entre las oportunidades y los riesgos se dan en mayor o menor medida en las condiciones que cada sede bibliotecaria tenga. De manera más reciente, parte de esta actualización se encuentra en la tecnología emergente de la inteligencia artificial (IA), la cual puede tener muchas aplicaciones en las bibliotecas universitarias; por ejemplo, puede tener las siguientes ventajas [2]:

1. Facilitar el acceso y la consulta de catálogos y fuentes bibliográficas mediante aprendizaje automático.
2. Mejorar los servicios de referencia, catalogación, clasificación y gestión de colección mediante el uso de *chatbots*, reconocimientos de objetos y robots.

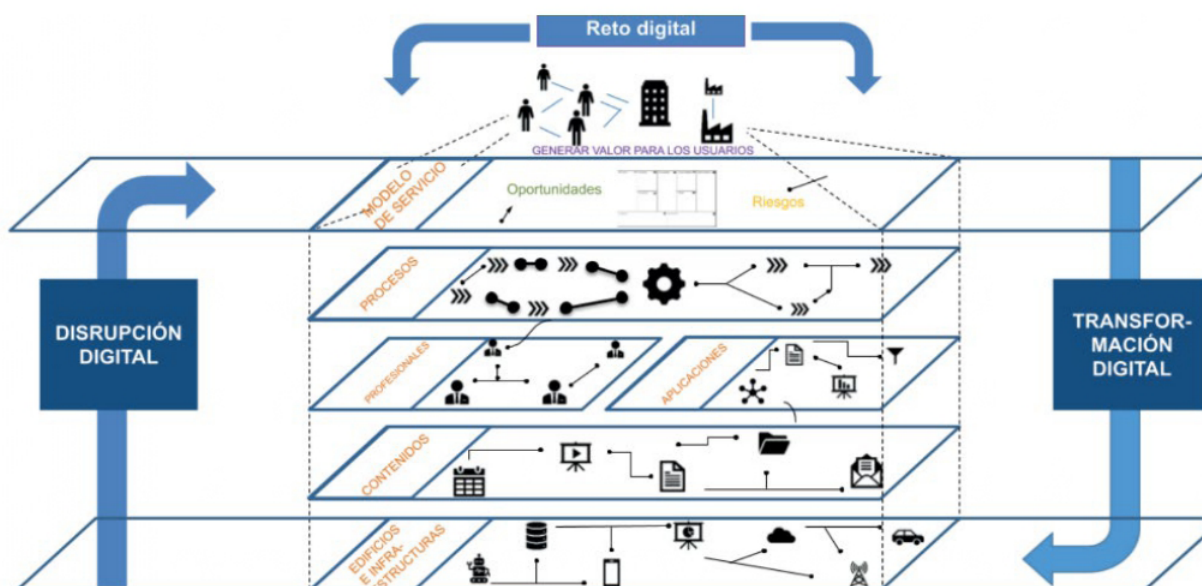


Fig. 1. *Enterprise architecture model* adaptado a las bibliotecas universitarias [4].

3. Ampliar la extensión cultural y los servicios especiales mediante el uso de herramientas de personalización y recomendación.
4. Optimizar las adquisiciones, los préstamos y el presupuesto mediante el uso de análisis de datos y predicciones.

Como parte final de este apartado, es necesario citar una visión preliminar de las implicaciones de la IA en las bibliotecas:

- Bibliotecas como fuente de *big data* para su posterior aprovechamiento por la IA/usuarios.
- IA como soporte remoto inmediato.
- IA para la identificación de recursos físicos extraviados o mal colocados.
- IA para la selección de fuentes.

Lo citado en párrafos anteriores representa en primera instancia una reflexión en las condiciones actuales de las instalaciones bibliotecarias en el marco de la transformación digital para que, posteriormente, se realice un análisis de los alcances de cambio que es posible alcanzar en los diferentes retos expuestos.

III. EVOLUCIÓN DE LA ILUMINACIÓN COMO PARTE DE LA TRANSFORMACIÓN-ACTUALIZACIÓN DE INSTALACIONES DE LAS BIBLIOTECAS UNIVERSITARIAS

La iluminación en las bibliotecas universitarias desde su diseño se ha privilegiado la luz natural buscando su máximo aprovechamiento. Obviamente, se ha recurrido también a la iluminación artificial para prolongar los horarios de uso y también para los espacios con poca luz natural. El avance tecnológico en este ámbito ha pasado con diferentes fuentes de luz; como es el caso del uso de las velas y lámparas de aceite hace ya muchos años; pero con el inicio del uso de la energía eléctrica se crearon los focos incandescentes; en esa época, de igual manera, la forma de construir las bibliotecas se modificó para tratar de aprovechar la luz natural en conjunto con la iluminación artificial que prestaban los focos incandescentes.

Indudablemente en las recientes décadas ha habido cambios tecnológicos en materia de iluminación desde la incandescente pasando por la fluorescencia y vapor de sodio y llegando a la LED Fig. 2; para insertarse también en las bibliotecas universitarias.

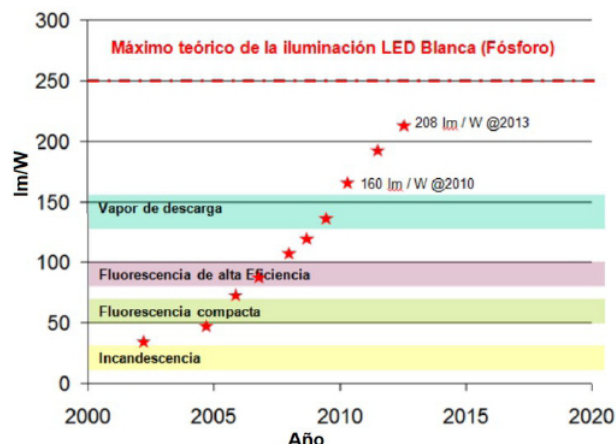


Fig. 2. Comparativo de dispositivos de iluminación con su máximo teórico de iluminación [5].

En este marco, una de las razones del cambio de luminarias tiene que ver con la llegada de nueva tecnología; obviamente, esto aplica para el caso que se tenga tecnología obsoleta instalada o tenga una baja eficiencia en comparación con la tecnología LED.

En el contexto citado en el apartado anterior en referencia a la transformación digital, lo cual implica la instalación de equipos electrónicos de cómputo y otros dispositivos, así como el ajuste e incluso remodelación de las instalaciones; es necesario realizar una revisión de la iluminación que en todo caso se debe de cumplir con determinadas exigencias comunes:

- Niveles de iluminación: iluminancias que se necesitan (niveles de flujo que inciden en una superficie).
- Distribución de luminancias en el campo visual.
- Limitación del deslumbramiento.
- Modelado: limitación del contraste de luces y sombras creado por el sistema de iluminación.
- Color: color de la luz y la reproducción cromática.
- Estética: selección del tipo de iluminación, de las lámparas y de las luminarias.

Por lo anterior, los parámetros básicos para la elección de los dispositivos de iluminación (lámparas) son muy conocidos:

- a) Flujo luminoso.
- b) Eficacia luminosa.
- c) Índice de reproducción cromática.
- d) Temperatura de color.
- e) Vida media.
- f) Vida económica o útil.

Por lo que se resume en tres puntos para elección de las lámparas:

1ro. Identificar las necesidades que ha de cumplir en función del tipo de instalaciones en las bibliotecas universitarias.

2do. Seleccionar el tipo de lámpara más apropiado según esas necesidades.

3ro. Comprobar que tu elección es la apropiada.

Por lo anterior, es posible que ante una mala elección de dispositivos de iluminación se plantee su cambio [6][7].

IV. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se centra en una biblioteca universitaria ubicada en el estado de Guanajuato; la ubicación es importante para conocer los costos de electricidad; la cual es suministrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Identificando que para el inmueble se tiene la Tarifa Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH) [8]; la cual se aplica a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda igual o mayor a 100 kilowatts. Se identifica la región tarifaria Bajío; donde los cargos para el mes de agosto de este año 2023 aparecen en la [Tabla I](#).

TABLA I. COSTOS APPLICABLES A LA TARIFA GDMTH EN LA REGIÓN BAJÍO PARA AGOSTO DEL 2023 [8]

Horario	Tipo de cargo	Unidades	Monto (\$, M.N.)
-	Fijo	\$/mes	304.99
Base	Variable (energía)	\$/kWh	1.0908
Intermedia	Variable (energía)	\$/kWh	1.9494
Punta	Variable (energía)	\$/kWh	2.2232
-	Distribución	\$/kWh	101.35
-	Capacidad	\$/kWh	411.00

La aplicación de los costos en función de los horarios Base, Intermedia y Punta se destina en dos periodos a lo largo del año, los cuales se definen según las regiones tarifarias para distintas temporadas del año como se describe en la [Tabla II](#). Este dato es importante a considerar en función de los horarios de operatividad que una biblioteca universitaria puede tener; debido a que, este tipo de tarifa tiene como una de sus características principales que sus costos varían en función de su horario y de los días de la semana, tal y como se describen en la [Tabla I](#) y [Tabla II](#).

TABLA II. HORARIOS APPLICABLES A LA TARIFA GDMTH EN LA REGIÓN BAJÍO DURANTE EL AÑO [8]

Aplicable del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre			
Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril			
Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
-	Capacidad	\$/kWh	411.00
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

La Tarifa GDMTH tiene más características respecto a su cobro, pero no se describen en este artículo debido a que no es un tema central del mismo.

Un dato principal es conocer el consumo de energía (kWh) del inmueble para poder hacer la intersección de las dos curvas de la variación del consumo de electricidad que se busca a través del presente trabajo: por la transformación digital y por el cambio de luminarias. Cada una de las curvas de consumo en función de sus características; para el caso de la transformación digital aumentaría el consumo de energía eléctrica derivado del aumento de equipos y dispositivos electrónicos; mientras que para el cambio de dispositivos de iluminación se reduciría el consumo debido al cambio de luminarias más eficientes.

Para poder tener el contexto del consumo de energía eléctrica, se realizaron dos actividades: un censo de carga [Tabla III](#) y una medición con equipo registrador trifásico de calidad de energía.

La variabilidad de los datos arrojados por el equipo de medición a lo largo de los días de la semana, dan muestra de los diferentes consumos de energía que tienen los equipos y dispositivos instalados en la biblioteca universitaria. Dando un total de consumo de 2689 kWh al mes para el inmueble [Tabla IV](#).

TABLA III. CENSO DE CARGA DE LA BIBLIOTECA DEL CASO ESTUDIO

Equipo-Dispositivo	Cantidad	Potencia del equipo (W)
Luminaria suspendida	345	40
Tubo de iluminación	84	60
Foco LED	171	14
Proyector	1	350
Aire acondicionado	18	1800
Computadora de escritorio	31	400

TABLA IV. CANTIDAD Y HORARIOS DEL CONSUMO DE KWH MEDIDOS DEL CASO DE ESTUDIO DURANTE UN MES

Horario	Energía (kWh)
Base	876
Intermedia	1551
Punta	262
TOTAL	2689

Se ha considerado un incremento del doble de equipos de cómputo para la actualización-transformación digital de la biblioteca; lo que representaría un incremento de carga de 12.4 kW. Mientras que, por otra parte, el cambio de luminarias suspendidas pasaría de la carga de 13.8 kW a 5.175 kW al colocar luminarias de 15 W; además se cambiarían los tubos de iluminación de 60 W a 20 W lo que representa pasar de 5.04 kW a 1.68 kW; dando un total de reducción de carga de 11.985 kW. Realizando una resta simple del incremento (12.4 kW) menos la reducción por el concepto de iluminación (11.985 kW); obteniendo un incremento de carga de 0.415 kW. Este incremento de carga no representa necesariamente manera directa un aumento lineal en el consumo de electricidad debido a las condiciones operativas de la biblioteca universitaria; dando como resultado un incremento de 934 kWh durante un mes de operación [Tabla V](#). Este resultado, es la combinación de dos acciones: se incrementa al doble el uso de equipo de cómputo (la cantidad de energía aumenta en horario intermedio) y se reducen el consumo en la iluminación con el ajuste de luminarias más eficientes (la cantidad de energía se reduce en el horario intermedio y punta).

TABLA V. CANTIDAD Y HORARIOS DEL CONSUMO DE KWH CON LA INSTALACIÓN DE EQUIPO DE CÓMPUTO PARA LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y DE LUMINARIAS MÁS EFICIENTES DEL CASO DE ESTUDIO DURANTE UN MES

Horario	Energía (kWh)
Base	672
Intermedia	2802
Punta	149
TOTAL	3623

V. CONCLUSIONES

El planteamiento en este trabajo responde a una coyuntura tecnológica que ocurre en las bibliotecas universitarias: la transición digital y el uso de iluminación más eficiente. Lo que supone por un lado el incremento de electricidad y por otro, su reducción. El caso de estudio muestra claramente los múltiples factores que pueden ocurrir ante esta situación, desde el ajuste de infraestructura cómo las características del cobro de la tarifa que aplica, resultando un incremento en la energía eléctrica del 34.73 % (pasando de 2689 kWh a 3623 kWh). El resultado hace notar que, el incremento pudiera haber sido mayor si no se hubiera realizado el cambio a luminarias más eficientes. Por lo que la transformación digital en las bibliotecas puede tener una repercusión importante incrementando el consumo de electricidad.

REFERENCIAS

- [1] Ortega, R. A., Ascacibar, F. J. M., & Balerdi, A. M. (2022). Bibliotecas frente al reto digital. Boletín de la Asociación Andaluza de Bibliotecarios, (124), 204-225.
- [2] Aguilera Ortega, R. (2023). Bibliotecas en busca de futuros: de la transformación digital a la transformación IA.
- [3] Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, condiciones de iluminación en los centros de trabajo.
- [4] Urbach, N. & Röglinger, M. (2019). Digitalization cases: how organizations rethink their business for the digital age. Springer. p. 5.
- [5] Andrés-Díaz, J. R. (2015). Tecnología de la iluminación. Evolución y adaptación.
- [6] G Castilla Cabanes, N., Blanca Giménez, V., Martínez Antón, A., Pastor Villa, R. M. (2011). Criterios de elección de lámparas.
- [7] Blanca Jiménez, Vicente, Aguilar Rico, Mariano. Iluminación y color. Ed. UPV, Valencia, 1995.
- [8] <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Negocio.aspx>

BIOGRAFÍAS



JESÚS MARTÍNEZ-PATIÑO Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (2008). Egresado del Máster en Ecoeficiencia, Ahorro Energético y Ecología Industrial (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 (2002).



JOSÉ M. LOZANO-GARCÍA recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, 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.



ROBERTO JOSÉ MUÑOZ MUJICA, Doctor en Tecnología Educativa por el Centro Escolar del Mar de Cortés y Maestro en Entornos Virtuales de Aprendizaje por la Universidad de Panamá. Especialista en el campo de la educación a distancia en línea, ha desempeñado diversos roles en la Universidad de Guanajuato, tales como Jefe del Departamento de Educación a Distancia y Responsable del Sistema Universitario de Multimodalidad Educativa. Actualmente, colabora en el Sistema de Educación Digital de dicha universidad.



ALEJANDRO PIZANO MARTINEZ, Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, en 2001, y los grados de Maestría y Doctorado Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en 2004 y 2010, respectivamente. Es Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación se centran en la operación óptima, el análisis dinámico y de estado estable de los sistemas de energía modernos.

Estudio de Estaciones de Carga para Autos Eléctricos en México

MARIO ALBERTO JUÁREZ BALDERAS, JASON ISRAEL HERNÁNDEZ OCAMPO, ADOLFO RAFAEL LÓPEZ NÚÑEZ, JUAN JOSÉ ALFARO RODRÍGUEZ

Tecnológico Nacional de México / ITS Irapuato.
mario.jb@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN En México, se están desarrollando infraestructuras de carga para vehículos eléctricos debido a su creciente aceptación. Existen diferentes tipos de cargadores y protocolos de carga, lo que dificulta la carga universal. Se requiere estandarización y más inversión en infraestructura para facilitar la transición a los vehículos eléctricos. Se estima que en México habrá un aumento de autos eléctricos circulantes para el año del 2041, por lo que se requiere una expansión de la infraestructura con estaciones de carga adicionales. La estandarización y la inversión en infraestructura de carga son importantes para facilitar la transición a los vehículos eléctricos.

PALABRAS CLAVE — Cargador, auto, energía, estándares, infraestructura.

I. INTRODUCCIÓN

La historia del vehículo eléctrico se remonta a un periodo anterior al desarrollo de los vehículos impulsados por combustibles fósiles. El primer vehículo eléctrico lo inventó Robert Anderson entre 1832 y 1839 [1] y [2]. Con la invención de los acumuladores eléctricos recargables en 1881 [1], los vehículos eléctricos ganaron gran popularidad entre los vehículos de gasolina y los propulsados por vapor, por lo que, los primeros adoptantes de vehículos eléctricos superaron ampliamente en número a los usuarios de automóviles de gasolina en sus inicios [3]. En 1896, los británicos H.J. Dowsing y L. Epstein patentó ideas sobre hibridación paralela [4]. El cual consistía en un dinamo que arrancaba un motor de gasolina y además recargaba las baterías siendo probablemente el primer híbrido de la historia. También en 1899, Ferdinand Porsche diseñó por primera vez un coche híbrido con motor eléctrico y de gasolina [5], conocido como el primer híbrido producido en el mundo y el primer con tracción delantera [2]. En 1907, la compañía Detroit Electric Car Company inició la fabricación de vehículos eléctricos que funcionaban con baterías recargables de plomo-ácido [6], esta misma compañía importó vehículos eléctricos a México a principios del siglo XX. En 1911, se fundó la Compañía Manufacturera de Automóviles Eléctricos (CMAE) en la Ciudad de México, la cual se dedicó a la producción y venta de vehículos eléctricos para uso comercial y privado [7]. No obstante, el declive de los automóviles eléctricos se materializó alrededor de 1915, factores como la llegada de la línea de ensamblaje con el Ford Modelo T, el combustible fósil económico y la incapacidad de competir en costos, hicieron que los vehículos eléctricos no fueran competitivos.

Posteriormente pasaron varias décadas hasta que, en 1990, en el Auto Show de Los Ángeles, General Motors hizo

debutar el "Impact", el predecesor del icónico automóvil eléctrico de la historia: el Vehículo Experimental 1 de General Motors, también conocido como EV-1 [8].

En los últimos años, se ha experimentado un creciente interés por los autos eléctricos en México. Esto se debe a los avances en tecnología de baterías y a una mayor conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad. Marcas reconocidas como Tesla, Nissan, BMW, Chevrolet y Hyundai han lanzado modelos de autos eléctricos en el mercado mexicano, brindando opciones más accesibles y con mayor autonomía para los consumidores. En México, existe una empresa llamada Zacua que se dedica a la fabricación de vehículos eléctricos. Esta compañía es parte de Motores Limpios S.A. de C.V., una empresa comprometida en ofrecer opciones de movilidad sustentable [9].

Hoy en día con las preocupaciones ambientales y de seguridad energética se clasifican a los países con más emisiones de gases contaminantes. Las clasificaciones de los 10 países más contaminados por la emisión de vehículos a gasolina son: Estados Unidos, China, India, Rusia, Japón, Alemania, Canadá, Brasil, México y Reino Unido [10-15].

En esta tónica, más del 90% del sector del transporte mundial depende del petróleo [16]. El transporte por sí solo consume alrededor del 49% de la producción de petróleo y es el consumidor de energía de más rápido crecimiento en el mundo [17]. En otras palabras, los automóviles están consumiendo una importante cantidad de combustible que puede ser usado en otros rubros y la falta de esta puede ser un factor importante para la seguridad y bienestar social.

En México, se han implementado diversos incentivos para promover el uso de automóviles eléctricos y la transición hacia una movilidad sostenible. Estos incluyen la exención del Impuesto sobre Automóviles Nuevos (ISAN), descuentos en el impuesto sobre tenencia y uso de vehículos, tarifas preferenciales en peajes, estacionamiento gratuito o tarifas reducidas, y programas de incentivos a la movilidad eléctrica

Congreso Internacional de Energía UG, 27 – 29 de septiembre de 2023

a través de subsidios y financiamiento preferencial [18]. Estos incentivos buscan reducir los costos de adquisición y brindar beneficios adicionales a los propietarios de vehículos eléctricos en el país.

Además, se tiene en México el programa de Movilidad Eléctrica Sustentable (PROMES): Este programa tiene como objetivo desarrollar e implementar políticas y acciones específicas para promover la movilidad eléctrica en México [19]. Busca fomentar la inversión en tecnologías y servicios relacionados con la movilidad eléctrica, así como mejorar la infraestructura de carga y promover la educación y concientización sobre esta tecnología.

Actualmente, una de las principales restricciones asociadas al vehículo eléctrico es su menor autonomía en comparación con los vehículos de combustión interna. Para lograr una adopción de los automóviles eléctricos en el mercado, es fundamental que su utilización sea acorde con los hábitos de desplazamiento de sus usuarios [20].

Es importante analizar estos hábitos en términos de las regiones y países, los países se pueden dividir en tres grupos de acuerdo con su tamaño:

1. Países con trayectos cortos: Desplazamientos diarios en automóvil relativamente cortos debido a transporte público eficiente, alta densidad de población o cultura de movilidad activa. Ejemplos: Países Bajos, Dinamarca, Singapur.
2. Países con trayectos moderados: Ciudadanos que dependen más del automóvil para desplazamientos diarios de distancia moderada, equilibrio entre transporte público y uso de automóviles. Ejemplos: Alemania, Francia, Canadá.
3. Países con trayectos largos: Trayectos diarios en automóvil más largos debido a baja densidad de población, geografía extensa o alta dependencia del automóvil. Estos hábitos dependen de la infraestructura vial desarrollada y cultura arraigada del automóvil. Ejemplos: Estados Unidos, Canadá, México (en algunas regiones).

La capacidad nominal de la batería de 16 kWh se determina considerando la necesidad de una autonomía de aproximadamente 50-60 km para abarcar al menos el 80 % de los desplazamientos diarios habituales [21]. Por lo tanto, la distancia recorrida debe estar dentro del rango de la capacidad de las baterías o puntos de recarga.

En México, se pueden identificar los tres grupos considerando la distancia media diaria recorrida en automóviles, estos son: Grandes metrópolis con desplazamientos diarios extensos: Este conjunto engloba las principales urbes metropolitanas de México, como la Ciudad de México, Guadalajara o Monterrey, donde los trayectos en automóvil suelen ser más largos debido al tamaño y la expansión de estas áreas urbanas. Los habitantes de estas ciudades a menudo dependen del automóvil para sus desplazamientos diarios debido a la falta de opciones de transporte público eficientes o a la necesidad de cubrir grandes distancias. El otro grupo de ciudades intermedias con

desplazamientos diarios moderados: son ciudades como: Puebla, Querétaro o Mérida, donde los recorridos en automóvil son de longitud moderada. Estas ciudades suelen contar con una estructura urbana más compacta, lo que permite distancias más cortas entre destinos comunes. El último segmento corresponde a las áreas rurales o pequeñas localidades con desplazamientos diarios cortos, donde los trayectos en automóvil suelen ser cortos. En estas áreas, la dependencia del automóvil puede ser menor debido a la proximidad de servicios. Además, es posible que en estas comunidades más pequeñas se dé una mayor preferencia al uso de la bicicleta o desplazarse a pie.

En México se tienen alrededor de 39,000 autos con tecnología eléctrica, y se prevé que para el 2041 unos 700,000 vehículos eléctricos estarán circulando [22].

Por otro lado, actualmente no hay un gran impacto en cuanto a la compra de un auto eléctrico a pesar de que se conoce que un auto eléctrico suele ser más eficiente y menos contaminante a mediano y largo plazo. Esto es debido a diferentes situaciones como lo es el costo, ya que los autos eléctricos en comparación de un auto convencional tienden a costar \$19,000 USD por encima del costo de un auto convencional, además, la “ansiedad de rango” es un factor de suma importancia ya que este factor se presenta cuando se teme que el carro eléctrico se quede sin energía. Por ejemplo, si se carga el auto por las noches y se realizan viajes de cortas distancias se puede utilizar sin problema alguno, sin embargo, si se desea hacer un recorrido mayor se presentan problemas como el hecho de que solo se pueden hacer recorridos entre 300 km y 400 km según el tipo de auto.

En México no hay una relación equitativa entre la cantidad de autos y la cantidad de centros de carga, ya que estos últimos son minoritarios, sumado a eso la distribución que existe en cuanto a los centros de carga es deficiente. Aunado a esto, la compraventa de cargadores en México no resulta viable, debido a que no existe una entrada universal que permita realizar una carga en cualquier parte del mundo, por ejemplo, un cargador proveniente del continente europeo difícilmente podría ser usado sin un adaptador en el continente americano pues las líneas de abastecimiento de energía difieren entre ambos continentes.

Además, invertir actualmente en la compra de cargadores eléctricos resulta poco eficiente debido a que actualmente en México no existe una gran cantidad de autos eléctricos circulantes, además de que la evolución de la tecnología de los cargadores seguirá avanzando con el paso del tiempo, haciendo que los cargadores actuales sean obsoletos en algunos años.

Actualmente en mercado se tienen cargadores de carga lenta, Tipo 1 y Tipo 2, carga rápida de corriente continua, CHAdeMo y super-cargador Tesla, y combo (corriente alterna y continua) del Tipo CCS 1 y 2. Estos cargadores adicionalmente tienen protocolos de carga para su comunicación con el vehículo eléctrico. La mayoría de los enchufes utilizados para cargar autos eléctricos en casa emplean Corriente Alterna (CA) y son lentos, mientras que

las estaciones de carga usan Corriente Continua (CC) y pueden ser hasta siete veces más rápidas. Los cargadores del tipo 1 tienen una intensidad de 34 A, en cuanto al tipo 2 este tiene dos presentaciones, monofásica y trifásica, la monofásica de 16 A y la trifásica de 63 A, lo que implica que la conexión trifásica es más rápida, mientras que los CHAdeMO pueden tener una capacidad de hasta 200 A, debido a esto existe disputa entre los formatos de conexiones. Algunos fabricantes están ajustando sus modelos de auto a dos tomas ofreciendo adaptadores para los distintos tipos de formatos.

A. INFRAESTRUCTURA PARA LA MOVILIDAD DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

La velocidad de carga se refiere a la rapidez con la que se recarga la batería, medida en kilómetros de autonomía ganados por hora de carga y se divide en tres tipos de carga.

Carga convencional: Es la opción estándar para la recarga en el hogar, se realiza mediante corriente alterna monofásica generalmente de 220 V – 230 V y de hasta 16 A a 32 A.

Carga semi-rápida: Sólo la aceptan algunos vehículos, la carga se realiza con corriente alterna monofásica o trifásica, con una tensión de hasta 400 V y una intensidad de hasta 32 A a 63 A. En este caso, el tiempo de recarga se reduce de 1 a 2 horas. Las potencias normales son 22 kW, aunque muchos coches trifásicos solo cargan a 11 kW en estos equipos.

Carga rápida: La carga rápida en estaciones públicas es aceptada por la mayoría de fabricantes de vehículos eléctricos, utiliza corriente continua de 400 V y 125 A, con potencia de 50 kW. Tiempo de recarga: 30-60 minutos.

Carga ultrarrápida o recarga: Es para la carga pública en carretera, es admitida por cada vez más fabricantes de vehículos eléctricos, utiliza corriente continua de 400 V a 800 V y hasta 500 A, con una potencia de 100 a 350 kW, el tiempo de recarga se reduce de 10 a 20 minutos.

B. TIPOS DE CARGADORES ELÉCTRICOS

Existe una amplia variedad de cargadores eléctricos enfocados a los autos eléctricos, se tienen al menos cinco tipos diferentes disponibles en el mercado para automóviles eléctricos. Su alcance varía directamente de un país a otro. En China, por ejemplo, el tipo de cargador más común es GB/T, que tuvo un gran avance en el año 2015 y ahora es el tipo de cargador líder. En la Unión Europea, el tipo de cargador mayormente utilizado es el tipo Mennekes. En Estados Unidos, el tipo de cargador más común es el J1772.

Lo anterior, expone que actualmente no existe un estándar universal para el sistema de cargado de vehículos eléctricos en las diferentes partes del mundo [23]. Los cargadores de vehículos eléctricos tienen diferentes niveles de carga entre ellos, la carga nivel 1, la carga nivel 2 y la carga rápida de corriente continua. La carga de nivel 1 proporciona aproximadamente de 3.5 km a 8.5 km de alcance por cada

hora de carga a través de un enchufe de 120 V, mientras que la carga de cargador nivel 2 proporciona de 16 km a 32 km aproximadamente de alcance por hora de carga a través de un enchufe de 208 V a 240 V. Por otro lado, la carga rápida de corriente continua (CC) puede llegar a suministrar energía de hasta 480 V, lo que permite agregar de 80 km a 112.5 km por cada 20 minutos de carga (a 50 kW o más) [24].

1. Tipos de estaciones de carga.

Existen diferentes tipos de cargadores para autos eléctricos que cumplen con diferentes características entre sí (Tabla I).

La norma internacional IEC 61851 describe cuatro modos de carga:

Modo 1: Utilizado en el hogar, emplea corriente alterna monofásica con una tensión de 220 V a 230 V y una intensidad de hasta 16 A a 32 A.

Modo 2: También para carga doméstica, pero más seguro que el Modo 1 ya que tiene un dispositivo de control y protección integrado en el cable, aunque su capacidad de carga está limitada por la clasificación de la toma de corriente.

Modo 3: Utiliza corriente alterna monofásica o trifásica en puntos de carga públicos. Permite alcanzar una potencia máxima de 7.4 kW en conexión monofásica y hasta 22 kW en trifásica, con una corriente máxima de hasta 32 A a 63 A y requiere un dispositivo de control y protección.

Modo 4: Es el más rápido y se emplea en estaciones de carga pública, utiliza corriente continua de 400 V a 800 V y hasta 500 A, con una potencia de 100 kW a 350 kW. El tiempo de recarga es significativamente menor, generalmente de 10 a 20 minutos.

C. ESTÁNDARES DE CARGA

Los estándares de carga especifican técnicas y normas que definen los protocolos de comunicación, conectores y características eléctricas para la carga de vehículos eléctricos. Estos estándares son desarrollados y adoptados por organizaciones de la industria automotriz, eléctrica y tecnológica con el objetivo de garantizar la seguridad y eficiencia en la infraestructura de carga.

TABLA I. COMPARATIVA ENTRE LOS DIFERENTES TIPOS DE CARGADORES

Tipo de cargador y estaciones de carga	Potencia	Tiempo de carga
Cargador Shuko	1.4 kW	8 – 15 horas
Cargador SAEJ1772	3.6 – 22 kW	3 – 8 horas
Mennekes	3.6 – 22 kW	3 – 8 horas
CHAdeMO	50 – 100 kW	1.25 horas
CCS	50 – 100 kW	1.25 horas

La carga de vehículos eléctricos es una parte fundamental para el funcionamiento de los sistemas. En la actualidad

existen diferentes estándares y protocolos de carga que se utilizan en los vehículos eléctricos. Cabe mencionar que los estándares de carga son intercambiables, por lo que los vehículos eléctricos deben ser compatibles con el estándar de carga correspondiente para poder realizar un servicio en una estación de carga.

2. CHAdeMO.

Es un estándar japonés utilizado en muchos de los vehículos actualmente circulantes, incluyendo los fabricados por la marca Nissan y Mitsubishi. Este estándar dicta que el conector de carga rápida permite una carga de hasta 62.5 kW de potencia [25]. Este conector se muestra en la Fig.1.



Fig. 1. Conector CHAdeMO.

3. CCS (Combined Charging System).

Es un estándar desarrollado por un consorcio de fabricantes de automóviles, incluyendo las marcas BMW, Daimler, Ford y Volkswagen. Este estándar dicta que el conector de carga permite realizar cargas de hasta 350 kW [26], ver Fig. 2.



Fig. 2. Conector CCS.

4. Tesla Supercharger.

Es un estándar de carga rápida desarrollado por la marca Tesla para su propia serie de vehículos eléctricos. Este estándar utiliza un conector de carga que permite realizar cargas de hasta 250 kW [27]. Ver Fig. 3.



Fig.3. Tesla supercharger.

5. AC (Alternating Current).

Es el estándar más común utilizado por los vehículos eléctricos. Utiliza un conector tipo 2 y permite una carga de hasta 22 kW [25]. Este conector se muestra en la Fig.4.



Fig. 4. A) Conector SAEJ1772 utilizado en Norteamérica. B) Conector Mennekes utilizado en Europa.

D. REDES DE CARGA

Las redes de estaciones de carga son sistemas conectados de estaciones de carga y vehículos eléctricos que se utilizan para cargar baterías de vehículos eléctricos. Estas redes pueden estar ubicadas en lugares públicos como estacionamientos, centros comerciales o privados,

1. Principio de funcionamiento de las redes de estaciones de carga.

Las redes de estaciones de carga para vehículos eléctricos operan de manera similar al principio de funcionamiento de cualquier red de suministro de energía eléctrica. Estas redes están formadas por un conjunto de estaciones de carga que a su vez están interconectadas y que se comunican entre sí para de esa manera proporcionar un servicio de carga seguro y eficiente.

Cuando un vehículo eléctrico se conecta a una estación de carga, esta se comunica con la red para realizar una verificación de la identidad del usuario y la capacidad de la batería del vehículo. Posteriormente la red envía un flujo de energía eléctrica a la estación de carga para que de esa manera la batería del vehículo comience a cargarse.

Las estaciones de carga pueden estar equipadas con sistemas de medición y control para monitorear el flujo de energía y garantizar la seguridad de la carga. Las estaciones de carga individuales pueden ser diseñadas para proporcionar diferentes niveles de carga, desde la carga nivel 1 utilizada en hogares, oficinas, hasta las cargas de nivel 3 que se utilizan en lugares públicos y proporcionan una carga rápida. Las redes de estaciones de carga también pueden estar diseñadas para proporcionar diferentes servicios, como pago de carga, monitoreo de carga, etc. [30], [31].

2. Importancia de las redes en estaciones de carga.

Las redes de estaciones de carga son de suma importancia para el desarrollo de la movilidad eléctrica ya que proporcionan la infraestructura necesaria, sin redes de estaciones de carga los conductores no tendrían una vía para cargar sus vehículos eléctricos. Además, las redes de estaciones eléctricas son de suma importancia pues la seguridad de carga es significativa para la batería del auto eléctrico, por lo que las redes de estaciones de carga proporcionan un control centralizado y un monitoreo que garantiza la seguridad de las baterías del auto eléctrico al estar sometidas a una carga. Finalmente, las redes de estaciones de carga son importantes para la sostenibilidad y el medio ambiente. Los vehículos eléctricos son mayormente eficientes, además emiten menor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que los vehículos de combustión interna, por lo que, las redes de estaciones de carga impulsan la adopción de los vehículos eléctricos [32], [33], [34].

3. Impacto ambiental.

El impacto ambiental de las estaciones de carga de los autos eléctricos está relacionado principalmente con el uso de la electricidad que se utiliza para realizar las cargas de las baterías de los vehículos. Si la electricidad utilizada es proveniente de fuentes energéticas renovables como lo es la energía solar o eólica, el impacto ambiental tendería a ser mínimo. Por otro lado, si la electricidad utilizada es proveniente de fuentes que no son renovables, como lo pudieran ser los combustibles fósiles, entonces, se genera una mayor huella de carbono.

Un estudio publicado por el World Economic Forum en el 2020 mostró que los vehículos eléctricos son mejores en cuanto al cuidado del medio ambiente en comparación de los vehículos de combustión interna en un 95% a nivel mundial [35]. Además, el empleo de estaciones de carga públicas, en lugar de cargas privadas tiende a disminuir la huella de carbono ya que se permite el uso compartido de la infraestructura, evitando la necesidad de construir nuevas estaciones de carga [36].

Un factor importante a considerar es la ubicación de las estaciones de carga. Si se ubican cerca de zonas naturales protegidas, como ríos, arroyos o humedales, se puede llegar a generar un impacto ambiental negativo. Por lo tanto, es de suma importancia realizar una evaluación del impacto ambiental antes de la construcción de nuevas estaciones de carga de vehículos eléctricos.

E. PROBLEMÁTICA DE LOS AUTOS ELÉCTRICOS EN MÉXICO

1. Estado actual de la infraestructura.

México, al igual que otros países, está inmerso en la transición hacia la movilidad eléctrica. Sin embargo, se enfrenta a desafíos en cuanto a la infraestructura de vehículos eléctricos en el país. La falta de una cantidad suficiente de estaciones de carga y la necesidad de incrementar la capacidad de producción de energía representan obstáculos significativos [37]. A pesar de que se han instalado alrededor de 2100 cargadores eléctricos en todo México, esta cifra resulta baja en comparación con otros mercados globales. Es necesario abordar tanto la cantidad como la ubicación estratégica de los cargadores públicos, privados y de depósito para satisfacer las necesidades de carga de los vehículos eléctricos [38], [39].

Aunque México es reconocido como un centro de fabricación de vehículos eléctricos, las ventas de estos vehículos en el mercado interno aún son limitadas. No obstante, grandes fabricantes automotrices como General Motors, BMW, Ford, Stellantis, Kia y Tesla están incrementando su producción de vehículos eléctricos en el país, aprovechando el crecimiento del mercado local [39], [40].

El gobierno mexicano ha tomado medidas en favor de los vehículos eléctricos, como la implementación de regulaciones flexibles en economía de combustible para vehículos ligeros y la eliminación temporal de impuestos a la importación de vehículos eléctricos [38]. En términos de energía renovable, México ha establecido el Plan Sonora, un ambicioso proyecto que busca impulsar la generación de energía solar, el desarrollo de la producción de litio y la fabricación de baterías para vehículos eléctricos en el estado nortero de Sonora. Además, compañías como General Motors y BMW están realizando inversiones significativas en plantas de producción de vehículos eléctricos en Coahuila y San Luis Potosí, respectivamente. Además, se ha generado expectación en torno a la posible construcción de una Gigafactory de Tesla en México [40].

A pesar de estos avances, la infraestructura de vehículos eléctricos en México, particularmente en lo que respecta a las estaciones de carga, sigue siendo insuficiente. Es crucial abordar estos desafíos para impulsar la adopción masiva de vehículos eléctricos y establecer una red de carga confiable y extensa en todo el país [39].

2. Estado actual de la infraestructura.

En México, se está observando un incremento gradual en la adopción de vehículos eléctricos, aunque actualmente existen limitados incentivos gubernamentales para su posesión y uso en comparación con otros países. Aunque se otorgan algunos beneficios, como la exención de impuestos y pagos de tenencia y verificación durante los primeros años, se requiere un enfoque más completo de incentivos fiscales, crediticios e infraestructurales a nivel nacional y local para fomentar la adquisición de vehículos eléctricos en el país [42].

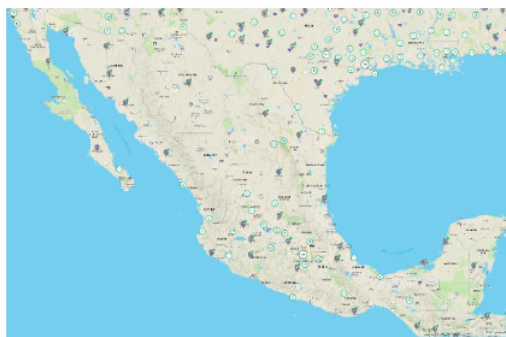


Fig. 5. Mapa de los centros de carga en México.

El desarrollo de la infraestructura de carga para vehículos eléctricos en México enfrenta desafíos importantes (Fig. 5). La falta de suficientes estaciones de carga y la necesidad de incrementar la producción de energía eléctrica son obstáculos que deben superarse. Aunque se está observando un crecimiento en la producción y venta de vehículos eléctricos en el país, la falta de una infraestructura de carga adecuada ha limitado su expansión. Para desarrollar esta infraestructura, es necesario revisar las tarifas eléctricas y lograr la estandarización e interoperabilidad de las redes de carga [42], [38].

F. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN VENTA EN MÉXICO

En México, se encuentran disponibles diversos tipos de vehículos eléctricos, a continuación, se muestra los más sostenibles y eficientes para la movilidad.

Tesla: es una marca pionera en vehículos eléctricos y ofrece diferentes modelos en México, como el Tesla Model S, Model 3, Model X y Model Y.

Marca	Modelo	Velocidad Máxima	Potencia (kW)
Tesla	Model S	322 km/h	820
Tesla	Model 3	250 km/h	225
Tesla	Model X	262 km/h	492
Tesla	Model Y	250 km/h	353

Nissan cuenta con el Nissan LEAF, uno de los autos eléctricos más populares y accesibles en el mercado mexicano.

Marca	Modelo	Velocidad Máxima	Potencia (kW)
Nissan	LEAF	144 km/h	160 kW

BMW: ofrece el BMW i3, un vehículo compacto totalmente eléctrico que combina sostenibilidad y rendimiento.

Marca	Modelo	Velocidad Máxima	Potencia (kW)
BMW	i3	160 km/h	130 kW

Chevrolet: Tiene disponible el Chevrolet Bolt EV, un auto eléctrico con una amplia autonomía y espacio interior.

Marca	Modelo	Velocidad Máxima	Potencia (kW)
Chevrolet	Bolt EV	145 km/h	150 kW

Hyundai: Ofrece el Hyundai Kona Electric, una SUV compacto totalmente eléctrico con características avanzadas y buena autonomía.

Marca	Modelo	Velocidad Máxima	Potencia (kW)
Hyundai	Kona	167 km/h	100 kW

Volkswagen ha lanzado el Volkswagen ID.4, un SUV eléctrico con un diseño moderno y una buena autonomía.

Marca	Modelo	Velocidad Máxima	Potencia (kW)
VW	ID 4	185 km/h	220 kW

Zacua: pionero en la fabricación de vehículos eléctricos en México, ha lanzado 2 modelos el MX2 y MX3.

Marca	Modelo	Velocidad Máxima	Potencia (kW)
Zakua	MX2	85 km/h	34kW
Zakua	MX3	85 km/h	34kW

II. CONCLUSIONES

Los vehículos eléctricos son una opción que reduce el daño al medio ambiente en comparación de los autos convencionales ya que se reducen de manera significativa las emisiones de CO₂.

La ubicación de las estaciones de carga supone un factor importante a considerar, debido a su distribución e incluso debido a la ubicación de estas, ya que su construcción cerca de zonas naturales podría traer una consecuencia negativa.

La inversión en la infraestructura de carga es crucial para el impulso de la aceptación de los autos eléctricos.

En México actualmente no resulta viable tener un auto eléctrico debido a que aún no existen suficientes centros de carga distribuidos de manera equitativa en el territorio mexicano.

REFERENCIAS

- [1] C.C. Chan, "The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned [Scanning Our Past]," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 1, pp. 206–212, jan. 2013, doi: 10.1109/JPROC.2012.2228370.
- [2] C.C. Chan, "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, April 2007, doi: 10.1109/JPROC.2007.892489.
- [3] Mom G., *The electric vehicle: technology and expectations in the automobile age*, Baltimore, MD: John Hopkins University Press; 2004.
- [4] Improvements in apparatus for the application of electricity to vehicles driven by mechanical means, by H. Dowsing (1896) Patent.
- [5] K. Chau and Y. Wong, "Overview of power management in hybrid electric vehicles *Energy Convers Manag* 2002," Vol. 43, No. 15, pp. 1953–1968, Oct. 2002, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00148-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00148-0).
- [6] R. Cowan and S. Hultén, "Escaping lock-in: the case of the electric vehicle," *Technol Forecast Soc Change* 1996; Vol. 53, No. 1, pp. 61–79, Sept. 1996. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(96\)00059-5](https://doi.org/10.1016/0040-1625(96)00059-5).
- [7] J. Rodríguez, *Historia de los autos eléctricos* (2022, Nov 16) Expansión.mx; disponible: <https://expansion.mx/vida-arte/2022/11/16/historia-de-los-autos-electricos>
- [8] H. Chan, "A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems," In: *Power Engineering Society Winter Meeting IEEE*, 2000, Vol. 1, pp. 470–475. doi: 10.1109/PESW.2000.850009.
- [9] L. Morales y M. Suarez, "Zacua: esto cuesta y así puedes comprar el auto eléctrico producido en México," (2023, Sep 22); Infobae.com; disponible en: <https://www.infobae.com/mexico/2023/05/18/zacua->

- esto-cuesta-y-asi-puedes-comprar-el-auto-electrico-producido-en-mexico/
- [10] Carbon Dioxide Information Analysis Center; Global Emissions; (Oak Ridge National Laboratory, 2017); disponible: <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
 - [11] Stare Vartan, "Carbon Emissions by Country: Top 15" (2022, agosto 2), Treehugger.com: <https://www.treehugger.com/greenhouse-gas-emissions-by-country-5120253>
 - [12] Sofia Fominova, Top 5 Carbon Emitters by Country, (2022, May 2), Net0.com, disponible en: <https://net0.com/blog/top-five-carbon-emitters-by-country>
 - [13] EPA Environmental protection Agency, (2023, February 15), Epa.gov, disponible en: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
 - [14] IEA (2023), Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer, IEA, Paris (2023, Aug 2), Iea.org: disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>
 - [15] Johannes Friedrich, Mengpin Ge, Andrew Pickens, Leandro Vigna, This Interactive Chart Shows Changes in the World's Top 10 Emitters, (2023, March 2), disponible: <https://www.wri.org/insights/interactive-chart-shows-changes-worlds-top-10-emitters>
 - [16] O. Van Vliet, A. Brouwer, T. Kuramochi, M. Van Den Broek, A. Faaij, "Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars," *J Power Sources* 2011, Vol. 196, No. 4, pp. 2298–310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.119>
 - [17] S. Amjad, S. Neelakrishnan, R. Rudramoorthy, "Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles," *Renew Sustain Energy Reviews*, Vol. 14, No. 3, pp. 1104–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.001>
 - [18] Senado de la república México, Incentivos para impulsar el uso de vehículos Híbridos y Eléctricos en México; (2016, junio) disponible: https://www.senado.gob.mx/comisiones/distrito_federal/reu/docs/presentacion_JV_270616.pdf
 - [19] Energía hoy, Electromovilidad en México, por un futuro sustentable, (2022, oct 13); Disponible en: <https://energiyahoy.com/2022/10/13/realizan-foro-electromovilidad-en-mexico-por-un-futuro-sustentable/>
 - [20] G. Pasaoglu, D. Fiorello, A. Martino, G. Scarella, A. Alemanno, C. Zubaryeva, C. Thiel, Driving and parking patterns of European car drivers: a mobility survey, (2012, dic 17). <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC77079>
 - [21] U. Eberle, R. Von Helmolt, "Sustainable transportation based on electric vehicle, concepts: a brief overview," *Energy Environ Sci*, vol. 3, no. 6, pp. 689–99, May 2010. <https://doi.org/10.1039/C001674H>
 - [22] Arena publica, La movilidad eléctrica en México aún enfrenta poca infraestructura y altos precios en 2023, (2023, may 25) disponible: <https://arenapublica.com/politicas-publicas/la-movilidad-electrica-en-mexico-aun-enfrenta-poca-infraestructura-y-altos-precios-en-2023>
 - [23] M. Knez, G. Kozelj Zevnik, M. Obrecht, "A review of available charges for electric vehicles: United States of America, European Union, and Asia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 284–293, July 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.013>
 - [24] J. H. Lee, D. Chakraborty, S. J. Hardman, G. Tal, "Exploring electric vehicle charging patterns: Mixed usage of charging infrastructure," *Trans. Res. Part D: Transport and Environment*, vol. 79, Feb 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102249>
 - [25] Andrés. (s/f). Guía básica para carga de vehículos eléctricos tipo 1, 2 y 3. Eléctrica aplicada. <https://www.electricaplicada.com/guia-basica-carga-vehiculos-electricos/#niveles-de-carga>
 - [26] ¿Los cargadores de coches eléctricos son universales? (s/f). Kia México. Recuperado el 8 de mayo de 2023, de <https://www.kia.com/mx/discover-kia/ask/are-electric-car-chargers-universal.html>
 - [27] Society of Automotive Engineers International. (2017). SAE J1772: SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler. Recuperado de https://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/
 - [28] Comisión Electrotécnica Internacional. (2019). IEC 61851-1: Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements. Recuperado de <https://www.iec.ch/standards/standard/61851-1>
 - [29] Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. (2021). IEEE 2030.1.1: Recommended Practice for Electric Power Systems in Electric Vehicle (EV) Charging Stations. Recuperado de https://standards.ieee.org/standard/2030_1_1-2019.html
 - [30] Kema Consulting. (2011). Electric Vehicle Charging Infrastructure Deployment Guidelines: A Report for the California Energy Commission. Recuperado de <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2018-08/CEC-600-2011-006.pdf>
 - [31] International Energy Agency. (2020). Global EV Outlook 2020. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
 - [32] National Renewable Energy Laboratory. (2018). Electric Vehicle Infrastructure Projection Tool (EVI-Pro) User Guide. Recuperado de <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70587.pdf>
 - [33] U.S. Department of Energy. (2021). Electric Vehicle Charging. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/electricvehicles/electric-vehicle-charging>
 - [34] European Commission. (2021). Alternative Fuels Infrastructure Directive (AFID). Recuperado de https://ec.europa.eu/transport/themes/mobility-and-transport-clean-vehicles/alternative-fuels/infrastructure-directive_en
 - [35] California Air Resources Board. (2021). Electric Vehicle Charging Stations. Recuperado de <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/electric-vehicle-charging-stations>
 - [36] Edison Electric Institute. (2019). Electric Vehicle Charging Infrastructure State of the Industry. Recuperado de <https://www.eei.org/resourcesandmedia/industrydataanalysis/Documents/Electric%20Vehicle%20Charging%20Infrastructure%20State%20of%20the%20Industry%20Report%20FINAL.pdf>
 - [37] Vehículos eléctricos y su impacto en el medio ambiente. (2020, noviembre 1). World Energy Trade. <https://www.worldenergytrade.com/innovacion/movilidad/vehiculos-electricos-y-su-impacto-en-el-medio-ambiente>
 - [38] Ismael Castillo Ávila, Á. M. (2016). Implementación de estaciones de carga para autos eléctricos en estacionamientos de la ESIME Zacatecano (Edificio 2). México D.F. Instituto Politécnico Nacional.
 - [39] What's missing in Mexico's EV strategy? (n.d.) Recuperado June 24, 2023, de theicct.org/whats-missing-mexicos-ev-strategy-oct22/
 - [40] México in Numbers: Electric vehicles. (n.d.) Recuperado June 24, 2023, de mexiconewsdaily.com
 - [41] México Is Dreaming Bigger Than Tesla. (n.d.) Recuperado June 24, 2023, de slate.com
 - [42] México needs incentives for electric vehicles: Experts. (n.d.) Recuperado June 24, 2023, de mexico-now.com

BIOGRAFÍAS



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



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



JOSÉ JUAN ALFARO RODRÍGUEZ Tiene el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónico por parte de la Universidad de Guanajuato en el año 2001 y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en el 2017. Actualmente se encuentra adscrito a la Maestría de Ingeniería Electrónica, como profesor asociado C, en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI) del Tecnológico Nacional de México. El área de interés es el control e inversores multinivel con aplicaciones a sistemas eléctricos de energías renovables. Cuenta con perfil PRODEP y es miembro del IEEE Sección Guanajuato como presidente.

Integración de Refrigeración Solar en Unidades de Autotransporte de Carga

JORGE LUIS GARCÍA CASTILLO¹, CARLOS BENITO MARTÍNEZ PÉREZ¹, HÉCTOR CAMPOS DE ANDA¹, JESÚS ALBERTO CRESPO QUINTANILLA²

¹Departamento de Ingenierías, Campus Bajío, Universidad Incamate Word Campus Bajío, México.

²Departamento de ciencias de la vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

jlgarcia@profesores.uibajio.mx

benito.martinez@uibajio.mx

hector.campos@alumnos.uibajio.mx

crespo.ja@ugto.mx

RESUMEN En la actualidad, el sistema de refrigeración del transporte de carga representa un alto costo en los costos de operación de las unidades; por tal razón, es importante diseñar estrategias para contar esquemas más eficientes y sustentables. Se presenta una evaluación del uso de sistemas fotovoltaicos en unidades tractocamiones de carga refrigerada para reducir el consumo de energía. La tecnología fotovoltaica permite integrar estos sistemas con los compresores instalados actualmente. El sistema de refrigeración opera con refrigerante R-134a con temperatura de -18°C ; se calcula la carga térmica y potencia necesaria por el compresor para contar con 5 renovaciones de aire. El proyecto resultante consta de 10 módulos de 550W con una potencia instalada de 6 kW. Como sistema de respaldo, se propone un banco de 31 baterías de 120 Ah y 12V y profundidad de descarga del 60%; el sistema puede operar hasta 10 horas al día.

PALABRAS CLAVE — Fotovoltaica, Refrigeración Solar, Energías Renovables.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración en el sector automotriz son ampliamente utilizados. Las unidades refrigeradas se emplean principalmente para conservar la cadena de frío en el transporte de alimentos y bebidas, estas deben recorrer grandes distancias y mantener los niveles de temperatura bajos para conservar alimentos perecederos, estos niveles oscilan alrededor de los -15°C .

Debido a las bajas temperaturas y grandes distancias recorridas por las unidades, estas unidades suelen tener elevados consumos de energía [2]. Los sistemas tradicionales funcionan con sistemas de combustible fósiles, típicamente utilizan diésel o gasolina lo que se traduce en altos costos de operación con afectaciones ambientales.

El presente proyecto está enfocado en evaluar la integración energética de un sistema fotovoltaico que provea de energía eléctrica para la operación de los sistemas de refrigeración y un banco de baterías para almacenar y suministrar la electricidad necesaria para la operación de los sistemas de refrigeración de las unidades de transporte.

Inicialmente se desarrolla un modelo matemático del ciclo de generación de potencia; se utiliza como fluido de trabajo refrigerante R-134a, debido a que este es empleado usualmente en los sistemas de refrigeración existentes.

Se lleva a cabo la evaluación de distintos escenarios de operación y autonomía. Se establecen las áreas de oportunidad y limitaciones para un caso de estudio.

II. METODOLOGÍA

Se analiza la unidad de refrigeración de autotransporte de 112 m^3 empleada habitualmente para transporte de grandes cantidades de carga (Fig. 2). El ciclo de refrigeración usa refrigerante R134a como fluido de trabajo.

Como parámetro de diseño, se fija una temperatura de operación interior del recinto de -18°C . De manera adicional, se incluye como variable de diseño el número de renovaciones del aire del interior de la cámara refrigerada; este es un parámetro de suma importancia y es una función del tipo de materia prima que desea transportarse.

De esta manera se genera una región de diseño en términos del número de renovaciones. Se realizan los balances de materia y energía mediante la aplicación de la Primera Ley de la termodinámica. Se emplea el software versión libre *Engineering Equation Solver* (EES).

Para medir el desempeño de los ciclos de refrigeración bajo las condiciones de operación supuestas, se determina el coeficiente de desempeño COP del sistema. Posteriormente, basado en la potencia del compresor y las horas de operación, se dimensiona un sistema fotovoltaico que dote de la energía requerida para su funcionamiento en el periodo de trabajo.

Se presenta en la Fig. 1 un ciclo de refrigeración por expansión de refrigerante propuesto por [3]. Se lleva a cabo el balance de energía para cada uno de los principales equipos que lo componen.

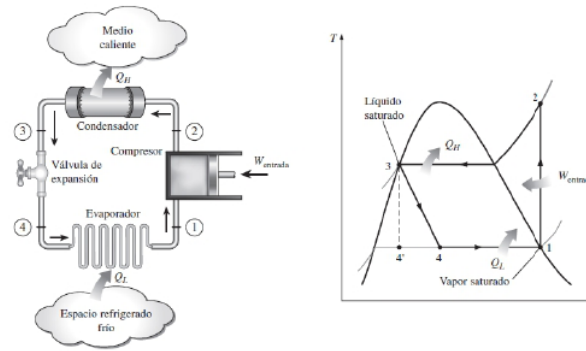


Fig. 1. Ciclo de refrigeración operando con expansión de refrigerante.

Aplicando la primera ley de la termodinámica y considerando estado estable, energías cinéticas y potenciales despreciables.

El trabajo por unidad de masa en el compresor es:

$$W_{comp} = h_1 - h_2 \text{ [kW]} \quad (1)$$

Donde h_1 y h_2 son las entalpías en los estados 1 y 2 respectivamente [kJ/kg]. En el proceso de 2-3 se tiene un rechazo de calor a presión constante en el condensador Q_H y este se calcula a partir de las entalpías en los estados 2 y 3.

$$Q_H = h_2 - h_3 \text{ [kW]} \quad (2)$$

Se realiza una expansión en la válvula, la cual puede modelarse como una expansión súbita a entalpía constante y se representa como:

$$h_3 = h_4 \text{ [kW]} \quad (3)$$

Finalmente se lleva a cabo el proceso de remoción de calor a presión constante en el evaporador. El calor absorbido en la región de baja temperatura es:

$$\text{COP} = Q_L / W_{comp} \quad (4)$$

EL COP de la Ec. (4) representa la cantidad de calor removido por unidad de trabajo mecánico y es conocido como Coeficiente de Desempeño por sus siglas en inglés. Para que un sistema sea considerado eficiente, dicho valor debe ser mayor a 1.

El procedimiento de diseño comienza con la determinación de la carga térmica a eliminar por el sistema de refrigeración, para ello es necesario determinar el volumen de aire de la cámara y el número de renovaciones por hora con ayuda de la Ec. (5):

$$\dot{m}_{aire} = (1.287 V_{cont} N_{ren}) / 3600 \quad (5)$$

Las dimensiones del contenedor son $L=16\text{m}$, $b=2.5$, $H=2.8$, obteniendo un volumen de 100m^3 como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. Caja refrigerada 53ft. 30 toneladas 100m^3 volumen nominal.

De acuerdo con [3], para aplicaciones de transporte refrigerado de carne y alimentos, es recomendable realizar 5 renovaciones del aire de la cámara cada hora. De esta manera es posible determinar el flujo másico de aire en la cámara refrigerada.

En este momento, es posible determinar la carga térmica a remover por el sistema de refrigeración Q_L con ayuda de la Ec. (6) de la siguiente manera:

$$Q_L = \dot{m}_{aire} * C_{p_{aire}} (T_{amb} - T_{ref}) \quad (6)$$

Donde $\dot{m}_{aire}$ es el flujo másico de aire a remover en el espacio refrigerado [kg/s], $C_{p_{aire}}$ es el calor específico del aire [kJ/kg °C] y T_{amb} , T_{ref} [°C] son las temperaturas del ambiente y del espacio refrigerado respectivamente.

El siguiente paso es determinar la potencia necesaria para el funcionamiento del compresor y definir las horas de operación. Así, la energía necesaria a suministrar en tal periodo de tiempo $\dot{W}_{comp}$ se determina de la siguiente manera.

$$\dot{W}_{comp} = W_{comp} t_{oper} \quad (7)$$

Donde W_{comp} [kW] es la potencia del compresor y t_{oper} [h] el periodo de tiempo de operación del sistema.

La energía necesaria para alimentar al compresor es proporcionada por un sistema fotovoltaico; este se dimensiona a partir de la energía eléctrica diaria requerida en kWh.

Considerando que para la región del bajo en México se tiene una radiación promedio de 850 W/m^2 durante un periodo de 5 horas por día, la energía generada $\dot{E}_{panel}$ para un módulo solar fotovoltaico de 550W se calcula de la siguiente forma con la Ec. (8).

$$\dot{E}_{panel} = 5 W_{panel} \quad (8)$$

El número total de paneles se determina en términos de la energía diaria total requerida por el compresor de la siguiente manera:

$$N_{\text{paneles}} = \dot{W}_{\text{comp}} / \dot{E}_{\text{Panel}} \quad (9)$$

De manera adicional, es importante evaluar la disponibilidad de espacio para la instalación de módulos. Se presenta en la Fig. 3 las dimensiones de un módulo solar de 550W de la marca Jinko Solar

El módulo tiene una célula monocristalina con 144 celdas (6x24) y una eficiencia máxima de 21.3%, caja de conexiones IP68 [4]. Las dimensiones del módulo son 2.279 m x 1.134 m.

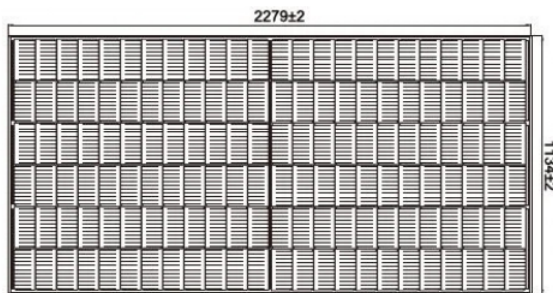


Fig. 3. Dimensiones de módulo fotovoltaico de 550W Jinko Solar.

III. RESULTADOS

En términos de la carga térmica a remover se diseña el sistema de refrigeración, estableciendo niveles de temperatura y presión adecuados para satisfacer las necesidades energéticas. Los estados termodinámicos del sistema aparecen en la Fig. 4, se muestran las presiones de operación en la región de condensación y evaporación

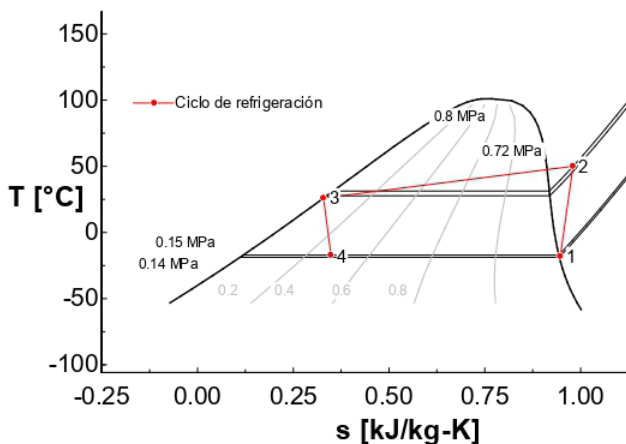


Fig. 4. Parámetros de operación de ciclo de refrigeración empleando R-134a.

Se presentan a continuación los resultados de diseño del ciclo de refrigeración.

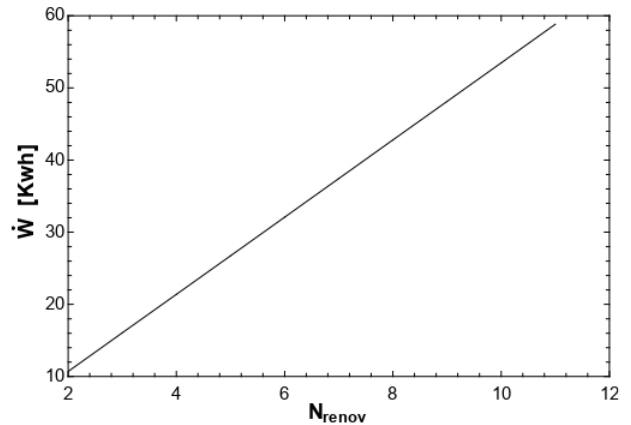


Fig. 5. Energía requerida por el sistema de compresión en términos del número de renovaciones de aire

Se observa en la Fig. 5 el incremento lineal de la energía requerida en términos del número de renovaciones. Esto indica que tal parámetro es una importante variable de diseño. De manera similar, el número de módulos es una función de la potencia del compresor y el número de renovaciones de la siguiente manera:

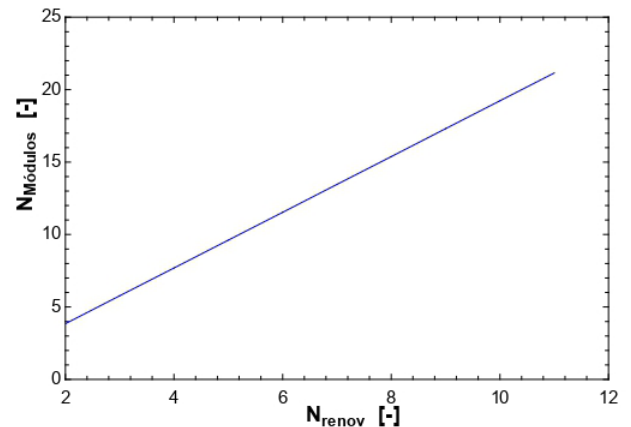


Fig. 6. Energía requerida por el sistema de compresión en términos del número de renovaciones de aire

La Fig. 6 muestra el incremento de módulos fotovoltaicos al incrementarse las renovaciones de aire. Para renovaciones mayores a 10 el número de módulos excede 22 unidades, esta opción podría verse afectada por el espacio disponible. La caja refrigerada puede albergar solamente 15 módulos.

Para una temperatura del recinto de -18°C , se consideran 5 renovaciones del aire de la cámara por hora, se ha diseñado un esquema que funcione con paneles solares. Empleando módulos de 550 W y una potencia del compresor de 2,674 W la energía necesaria para el compresor durante un ciclo de 10 horas de operación es 26.74 kWhDía.

Con la información obtenida, se dimensiona un sistema fotovoltaico y se calcula que es necesario un arreglo de 11 módulos, para tener una potencia instalada de 6 kW. El primer escenario contempla contar con sistema de

almacenamiento con un banco de baterías de 120 Ah y 24V, empleando un total de 21 unidades, lo que resulta en contar con una autonomía de 10 horas de operación. El sistema de baterías ha sido diseñado para tener una profundidad de descarga del 60%. Los resultados de diseño se muestran a continuación en la [Tabla I](#).

TABLA I. COSTO DE BATERÍAS PARA DISTINTAS AUTONOMÍAS

Energía diaria requerida por baterías	
Corriente Día [Ah Día]	2,228.33
Batería 12V [Ah]	120
Profundidad de descarga [%]	60%
Corriente Día [Ah Día]	3,713.9
Número de baterías [-]	31
Energía diaria para el sistema	
Energía Día [Wh]	26,740
Potencia del panel	550
Horas rad >550 [W/m ²]	5
Energía Panel [WhDía]	2,601.50
Número de paneles [-]	10
Potencia instalada [W]	6,050

Se establecen 2 escenarios:

El *primer escenario* implica tener un sistema FV que sólo funcione mientras se tiene luz solar, este sistema no tiene un banco de baterías e implica el uso de un inversor para convertir la energía de corriente directa a corriente alterna. Para ello considerando un costo de \$21.00/W instalado, el costo del proyecto es de \$121,000.

El *segundo escenario*, el cual incluye un banco de batería y considerando un costo de baterías de \$3,500 por unidad, el sistema de baterías tendría un costo de inversión de \$108,500. Considerando el costo del sistema con inversor y sumando el banco de baterías, se puede estimar un costo total del proyecto de alrededor de \$229,500.

La [Tabla II](#) muestra un análisis de sensibilidad en la cual se evalúan el costo total del proyecto para diferentes números de renovaciones de aire en la cámara refrigerada.

Para el sistema propuesto, se tiene un total de 10 módulos fotovoltaicos. Una propuesta de instalación se presenta a continuación en la [Fig. 7](#).

TABLA III. COSTO DE BATERÍAS PARA DISTINTAS AUTONOMÍAS.

N_{ren}	$\dot{W}_{comp}$	$N_{paneles}$	$N_{baterías}$	$Costo_{Pan}$	$Costo_{Total}$
2	10.7	3.845	12.38	\$48,043	\$91,369
3	16.04	5.767	18.57	\$72,065	\$137,054
4	21.39	7.69	24.76	\$96,086	\$182,738
5	26.74	9.612	30.95	\$120,108	\$228,423
6	32.09	11.53	37.14	\$144,129	\$274,107
7	37.43	13.46	43.33	\$168,151	\$319,792
8	42.78	15.38	49.52	\$192,173	\$365,476
9	48.13	17.3	55.7	\$216,194	\$411,161
10	53.48	19.22	61.89	\$240,216	\$456,846
11	58.82	21.15	68.08	\$264,237	\$502,530



Fig. 7. Propuesta de instalación de módulos solares en cajas de refrigeración.

IV. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista técnico, el uso de sistemas fotovoltaicos resulta práctico y factible. El tiempo de vida de los proyectos fotovoltaicos de alrededor de 20 años, lo cual hace que se incremente su competitividad para ser implementado en este tipo de proyectos.

Los montos de inversión del sistema de paneles sin batería son de \$121,000. representan un 10% -15% del costo aproximado de una caja refrigerada convencional, haciéndolo factible debido a los altos costos de operación actuales. El escenario con baterías tiene un costo total de \$229,500.

Uno de los principales retos por considerar es el peso de los módulos; es necesario evaluar nuevas tecnologías de generación solar, tales como paneles adheribles con menor peso.

De manera adicional es necesario desarrollar esquemas de operación híbrido *Generador Diésel- Paneles solares-Baterías*, así como generación de energía eléctrica mediante la recuperación de sistema de frenado.

REFERENCIAS

- [1] David E. Energeka. 2021, Obtenido de <https://www.energeka.com/post/una-breve-historia-de-las-celdas-solares-en-m%C3%A9xico>

BIOGRAFÍAS



JORGE LUIS GARCÍA CASTILLO Ingeniero Mecánico por la Universidad de Guanajuato, Maestría en Ingeniería Química en Integración de Procesos y Doctor en Ciencias en Ingeniería Química también por parte de la Universidad de Guanajuato. Se ha desempeñado como jefe del departamento de eficiencia energética en el Centro Mexicano de Energías Renovables, dirigiendo y coordinando múltiples proyectos industriales. Fundador y director de la empresa "Soluciones en energía Kolin-Energy". Desde hace aproximadamente 5 años la empresa ha desarrollado proyectos relacionados con la industria en materia de eficiencia energética como: Diagnósticos en eficiencia energética Eléctrica/Térmica, Sistemas fotovoltaicos en baja y media tensión. Diseño de secadores, quemadores a pellet, instalaciones de calentadores solares y diplomados en eficiencia energética. Actualmente, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel candidato, adscrito al Departamento de Ciencias Ambientales en la carrera de Energías Renovables en la División Ciencias de la Vida, en la Universidad de Guanajuato. Se desempeña como profesor en Ingeniería Mecánica en Universidad Incarnate Word (UIW) Plantel Bajío, participando en la dirección de proyectos de tesis y estancias profesionales.



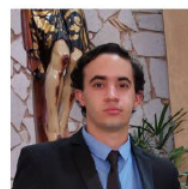
JESÚS ALBERTO CRESPO QUINTANILLA Ingeniero Mecánico por la Universidad de Guanajuato, Maestría en Ingeniería Química en Integración de Procesos y Doctor en Ciencias en Ingeniería Química también por parte de la Universidad de Guanajuato. Se ha desempeñado como gerente de proyectos en la empresa de energías renovables 4e Power and Fuels. Experiencia de 4 años en la Impartición de cursos de alumnos de nivel licenciatura, así como experiencia en diversas actividades de gestión académica. Ha sido miembro de la Sociedad de Alumnos de la División de Ingenierías (Enero-Diciembre 2013), así como merecedor de la Clarke scholarship otorgada por ASME (2008). También ha sido merecedor del reconocimiento al mérito universitario por aprovechamiento académico dentro de la Maestría en Ingeniería Química, otorgado por la UG (2016) y merecedor del reconocimiento al mérito universitario por aprovechamiento académico dentro del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química, otorgado por la UG (2019, 2020). A su vez ha participado como jurado evaluador dentro del "Concurso de prototipos de Ingeniería Sustentable" en la Universidad de Guanajuato. (2019). Actualmente se desempeña como profesor en Ingeniería Mecánica en la Universidad Incarnate Word (UIW) plantel Bajío, participando en la dirección de proyectos de tesis y estancias profesionales.



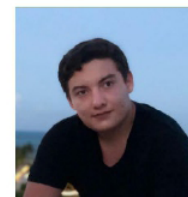
CARLOS BENITO MARTÍNEZ PÉREZ Ingeniero Químico por la Universidad de Guanajuato, Maestría en Ingeniería Química en Integración de Procesos Químicos y Doctor en Ciencias en Ingeniería Química también por parte de la Universidad de Guanajuato. Director de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Incarnate Word Campus bajo, Coordinador del programa de posgrado Maestría en

- [2] Dorantes, D. R. Mundo HVACR. 2010, Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/2007/10/la-refrigeracion-solar/>
- [3] MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.: Fundamentals of Engineering Thermodynamics: SI Version. John Wiley & Sons Ltd: West Sussex, 7ta. edición, 2011
- [4] Dsi Solar, 2023, Obtenido de <https://www.dsisolat.com/solar-panel/mono-solar-panel/550w-half-cell-perc-monocrystalline-solar.html>

Gestión e Innovación Tecnológica de la DCNE Universidad de Guanajuato, Profesor de tiempo parcial en la DCNE de la Universidad de Guanajuato en la carrera de ingeniería química y en la Maestría en Gestión e Innovación Tecnológica, Profesor de asignatura de la Universidad Interactiva y a Distancia del Estado de Guanajuato UNIDEG campus León II, miembro del Comité Académico del Posgrado MGIT de la DCNE de la Universidad de Guanajuato. Fundador y director y apoderado legal de la empresa SERVER SA de CV, empresa mexicana que se dedica a desarrollar equipo a la medida para la industria química, metal mecánico, automotriz, tratamiento de aguas y alimentarias. Cuenta con presentación de trabajos en congreso nacionales (28) e internacionales (7), un artículo publicado en una revista de alto impacto, 1 patente otorgada así como más de 25 direcciones de tesis de licenciatura y maestría.



HECTOR CAMPOS DE ANDA Estudiante de séptimo semestre de Ingeniería Mecánica/BS in Mechanical Engineering por la Universidad Incarnate Word Campus Bajo. Tiene experiencia laboral como técnico especializado en seguridad electrónica de la empresa "ALCAM". Desde hace aproximadamente 2 años ha adquirido la experiencia necesaria para lidiar con proyectos grandes y solucionar correctamente los problemas que se pudieron atravesar tales como: Instalación de sistemas de seguridad tales como video vigilancia tanto análogos como IP o Wifi, cercos eléctricos y sistemas de alarmas, diagnósticos de problemas en fallas de equipos y reparación de este. Actualmente, pertenece a la Sociedad estudiantil de Ingeniería Mecánica (SEIM) siendo fundador y presidente del mismo donde en este grupo se busca aumentar el nivel académico de los estudiantes de ingeniería mecánica.



ANGELO NAVARRETE PÉREZ Estudiante de séptimo semestre de Ingeniería Mecánica/BS in Mechanical Engineering en la Universidad Incarnate Word Campus Bajo. Experiencia laboral de un año como supervisor de obra en la empresa "Pasa Irapuato" desarrollando ciertas habilidades como el cómo manejar las obras bajo presión, seguridad del personal y desarrollando conocimientos de los distintos tipos de materiales impermeabilizantes y soluciones a problemas frecuentes en estos. Dentro del campo del diseño e investigación, junto a un equipo realizaron una banda para pilas, la cual imprimimos en una impresora 3D, mostrando nuestro proyecto dentro del congreso de la mujer de 2022. Actualmente, pertenece a la Sociedad estudiantil de Ingeniería Mecánica (SEIM) siendo fundador el cual es un grupo que busca realizar nuevos proyectos para los estudiantes de ingeniería mecánica.

Implementación de Modulador para Inversor de Fuente de Corriente

FRANCISCO J. MORENO VAZQUEZ, GUSTAVO CERDA VILLAFañA.

División de Ingenierías, Campus Irapuato – Salamanca, Universidad de Guanajuato.
fj.morenovazquez@ugto.mx
gcerdav@ugto.mx

RESUMEN En este artículo se aborda la implementación de un modulador para inversor de fuente de corriente con seguimiento de una señal trifásica externa, centrándose en el uso de técnicas de modulación por vector espacial (SVM) y modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM). Se presenta una metodología detallada para la generación y comparación de señales, destacando el proceso de asignación de activación de los sextantes. La implementación se realiza tanto en el dominio matemático como en el físico, utilizando una matriz de puertas lógicas programable en campo (Field Programmable Gate Array, FPGA) y un circuito de puente de diodos para asegurar la coherencia entre la simulación y la señal adquirida. El artículo concluye que la técnica SVM, junto con el uso adecuado de los sextantes, permite una conversión de energía eficiente y precisa en el inversor trifásico, lo que resulta en un funcionamiento óptimo del sistema.

PALABRAS CLAVE — FPGA, MATLAB, Inversor Trifásico, Modulación SVM.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los inversores han adquirido una creciente importancia en el campo de la energía debido a la creciente adopción de fuentes de energía renovables en todo el mundo. Con el aumento de la conciencia sobre el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, las energías renovables, como la energía solar, han experimentado una rápida expansión en la matriz energética. Los inversores, como elementos cruciales en los sistemas de conversión de energía, juegan un papel fundamental al facilitar la integración eficiente y segura de estas fuentes limpias y sostenibles en las redes eléctricas existentes. En este contexto, la implementación de técnicas de modulación avanzadas en inversores de corriente juega un papel fundamental en el desarrollo de sistemas energéticos más eficientes y sostenibles. La optimización de la conversión de energía de corriente continua a corriente alterna es esencial para lograr una integración armoniosa de fuentes de energía renovable en las redes eléctricas y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Entre las técnicas de modulación para la implementación de inversores destacan la Modulación Sinusoidal por Ancho de Pulso (SPWM) y la Modulación por Vector Espacial (SVM) [1-3]. El SPWM es una técnica de modulación que se utiliza en los inversores para generar una señal de salida que se asemeje a una forma de onda sinusoidal. Consiste en comparar una señal de referencia sinusoidal con una señal portadora triangular y ajustar el ancho de pulso de la señal de salida en función de la señal de referencia. De esta manera, el SPWM permite controlar la amplitud y frecuencia de la corriente alterna generada, logrando una inversión de alta calidad con una baja distorsión armónica.

Por otra parte, la SVM es una técnica avanzada de modulación utilizada en inversores de fuente de corriente. Al igual que el SPWM, la SVM tiene como objetivo lograr una inversión eficiente de corriente continua a corriente alterna. Sin embargo, a diferencia de la SPWM, la SVM opera en un espacio tridimensional y utiliza vectores para representar las señales de referencia. Esto permite obtener una salida de corriente alterna con alta precisión, reduciendo las distorsiones armónicas y mejorando la calidad de la forma de onda generada [4].

En este artículo, se presenta el diseño e implementación de un modulador para inversor de fuente de tensión, basado en la técnica de SVM. La investigación se enfoca en la aplicación práctica y eficiente de la SVM en un inversor trifásico de dos niveles, tal y como se muestra en la Fig. 1, aprovechando las ventajas de esta técnica avanzada para obtener una conversión de corriente continua a corriente alterna de alta calidad.

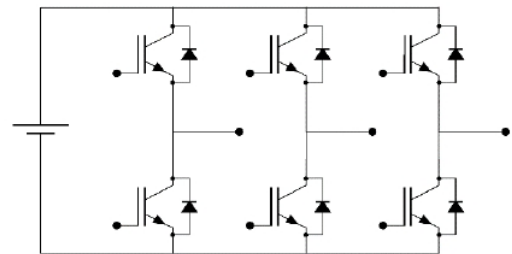


Fig. 1. Inversor Trifásico de Dos Niveles.

El modulador fue desarrollado e implementado en un FPGA, utilizando tablas de búsqueda para lograr un control preciso y robusto. Este enfoque matemático en un FPGA busca contribuir al avance en el campo de la generación de energía eléctrica, promoviendo soluciones innovadoras y sostenibles en la integración de fuentes de energía renovable en las redes eléctricas existentes.

II. METODOLOGÍA PROPUESTA

Antes de entrar en los detalles de la implementación matemática y en el FPGA, la Fig. 2 presenta un diagrama esquemático que ilustra los pasos clave involucrados en la técnica de SVM. Este diagrama proporciona una visión general del flujo de trabajo y los procesos a seguir para la realización exitosa de la SVM. A continuación, se procederá a explicar cada uno de estos pasos en profundidad, incluyendo las formulaciones matemáticas y algoritmos asociados a cada etapa.

A. IMPLEMENTACIÓN MATEMÁTICA

El desarrollo del modulador se basa en la implementación matemática de la técnica de SVM. Esta implementación se realizó en el lenguaje de cómputo matemático MATLAB [8]. En este trabajo no se tocarán las ecuaciones dominantes de la SVM. Sin embargo, se presentarán los resultados obtenidos en la implementación matemática de la técnica de SVM, que sirvieron como base para el desarrollo del modulador en el FPGA.

1. Adquisición de la Señal.

Como parte de la simulación de la SVM, se generó una señal de referencia sinusoidal ideal [5]. Esta señal se utilizó como entrada para el modulador, que se encargó de procesarla y generar una señal de salida que se asemejara a una forma de onda sinusoidal. La Fig. 3 muestra la señal de referencia generada en la simulación de MATLAB.

2. Procesamiento de la Señal.

El procesamiento realizó un ajuste de escala de la señal para adaptarla a los rangos requeridos. Se estableció un valor máximo deseado y se normaliza la señal multiplicándose por este valor y dividiéndola por el máximo valor medido en el ADC. Este proceso garantizó que la señal adquirida tuviera la amplitud necesaria para la posterior implementación en el FPGA, manteniendo la coherencia con la simulación en MATLAB.

3. Suma Acumulativa.

La Ec. (1) representa la suma progresiva que permite rastrear y registrar los cambios angulares acumulados a lo largo de la señal. Esta información es crucial para la

implementación de la técnica de SVM en la generación precisa de la señal de salida del inversor trifásico [6].

$$suma_i = \sum |y_i - y_{i-1}| \quad (1)$$

La Fig. 4 muestra la curva de la suma acumulativa que representa los ángulos de la función seno para cada ciclo de esta y, de esta forma, poder implementar la asignación de sextantes.

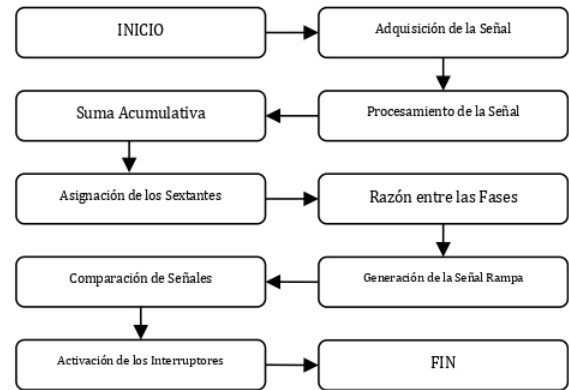


Fig. 2. Secuencia de Pasos para la SVM.

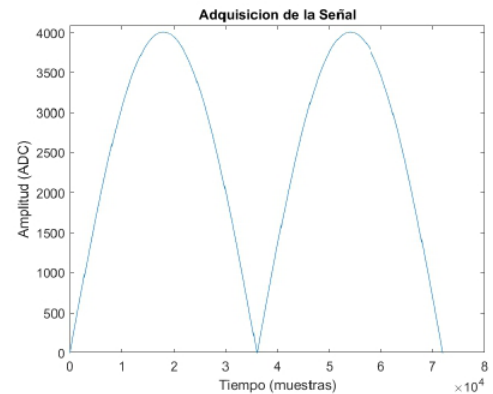


Fig. 3. Señal de Referencia Generada en MATLAB.

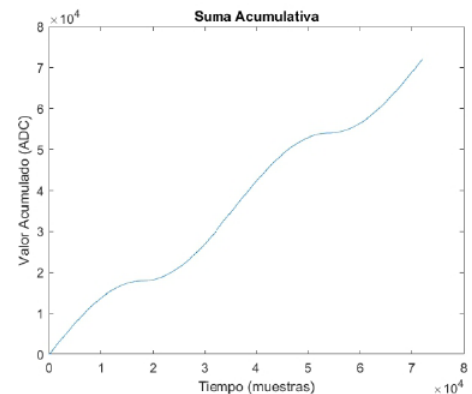


Fig. 4. Curva de la suma acumulativa de un ciclo de la función seno.

4. Asignación de los Sextantes.

Un sextante es un sector de 60 grados (1/6 de un círculo completo) que divide una circunferencia en seis partes iguales. En el contexto del modulador SVM, los sextantes se distribuyen siguiendo la orientación normal de ángulos en el sistema sexagesimal, dividiendo el círculo en seis segmentos de 60 grados cada uno. Estos sextantes son fundamentales para representar las diferentes combinaciones de voltajes en un inversor trifásico. Esta disposición es mostrada en la Fig. 5.

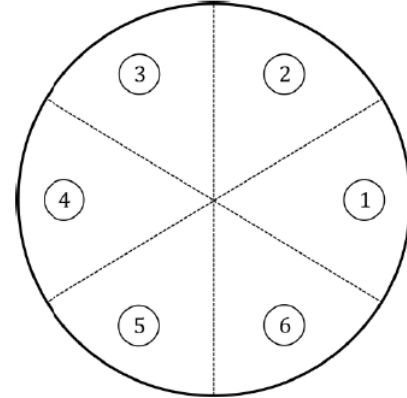


Fig. 5. Representación de los Sextantes.

Para la asignación de cada sextante, se utilizó la información obtenida en la suma acumulativa. Esta información se utilizó para determinar la posición angular de la señal de referencia en cada instante de tiempo. En la Fig. 6 se observa cómo fue esta asignación basada en la suma acumulativa.

5. Razón entre las Fases.

Para cada fase se utiliza una razón angular. Para el primer sextante se tienen las siguientes relaciones:

$$d_{01} = \frac{-\cos\theta_b}{\cos\theta_a}, \quad d_{02} = \frac{-\cos\theta_c}{\cos\theta_a} \quad (2)$$

Las razones d_{01} y d_{02} son las señales que se compararán con la señal rampa para la generación de las señales de disparo. Como se puede observar, cada cociente es el complemento del otro, lo que permite activar y desactivar los interruptores de manera eficiente y precisa. En la Fig. 7 se observa cómo se generan estas razones para cada muestra.

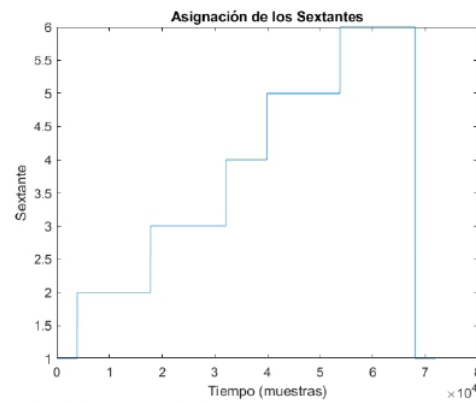


Fig. 6. Asignación de los Sextantes.

6. Generación de Señal Rampa.

La señal de rampa generada en la Fig. 8 proporciona una referencia lineal del comportamiento de la señal de referencia. Su característica de incremento gradual y constante a lo largo del tiempo permite establecer una base de comparación para otros parámetros del sistema [7].

7. Comparación de Señales.

La señal de rampa generada se compara con la razón de las fases, lo que permite determinar qué señales se activarán y, en consecuencia, establecer los sextantes correspondientes, de acuerdo con la Ec. (3).

$$\text{señal}_1 = \{1, d_{01} \geq \text{rampa}, 0, d_{01} < \text{rampa}\} \quad (3)$$

Como se observa en la Fig. 9, cada pulso es el inverso del otro, lo que permite activar y desactivar los interruptores de manera eficiente y precisa.

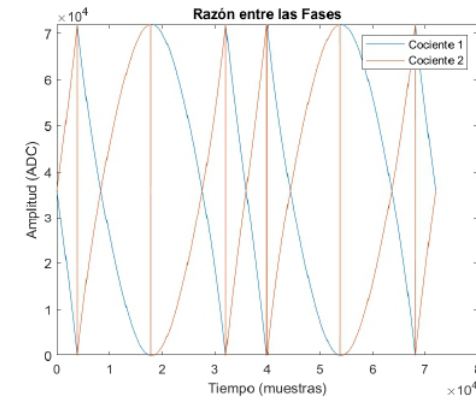


Fig. 7. Señales Activadas.

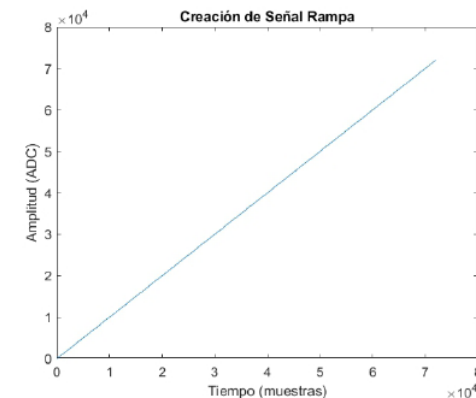


Fig. 8. Señal Rampa.

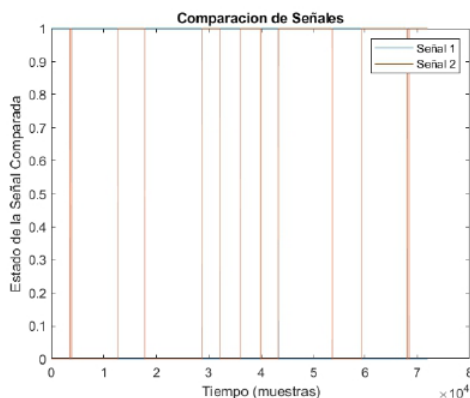


Fig. 9. Señales Activadas.

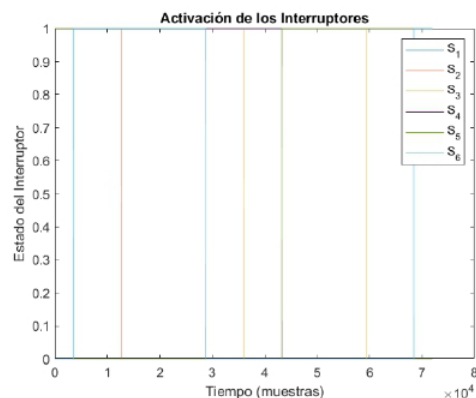


Fig. 10. Interruptores Activados.

8. Activación de los Interruptores.

Finalmente, con base en los datos obtenidos de la Fig. 6 y la Fig. 9, se procede a activar los interruptores identificados como S1 a S6 en la Fig. 1. Estas activaciones se llevan a cabo utilizando una tabla de búsqueda (LUT) que incluye el valor de las señales activadas y el sextante en que se encuentra la suma acumulativa. Las activaciones de los interruptores generan la señal de salida del inversor trifásico. En la Fig. 10, se muestra claramente cómo se activan los interruptores en cada etapa del ciclo de la señal de referencia, lo que resulta en la generación precisa de la señal de salida requerida para la implementación del modulador SVM.

B. IMPLEMENTACIÓN A FPGA

En la implementación en el FPGA, se utilizó la tarjeta DE1-SoC, mostrada en la Fig. 11, como plataforma de desarrollo. Esta tarjeta ofrece una amplia gama de recursos, incluyendo un FPGA Cyclone V y un conversor analógico a digital de 12 bits (12-bits ADC) LTC2308 integrado en el chip. El FPGA Cyclone V proporciona una alta capacidad de procesamiento y flexibilidad para realizar operaciones matemáticas complejas y procesamiento paralelo requerido para la implementación de la técnica de SVM. Por otro lado, el ADC LTC2308 permite la adquisición precisa de datos analógicos para el control y monitoreo de la señal de referencia. La combinación de estos recursos en la tarjeta DE1-SoC ofrece una solución integral para la realización de los experimentos y permite obtener resultados con alta precisión y confiabilidad, lo que contribuye a la validación de la implementación matemática.

En este punto, es de suma importancia mencionar que algunas fases del proceso de la SVM serán omitidas debido a que siguen el mismo enfoque que en la implementación matemática. Por lo tanto, se centrará la atención en las etapas que requieren un enfoque diferente para la implementación en el FPGA.

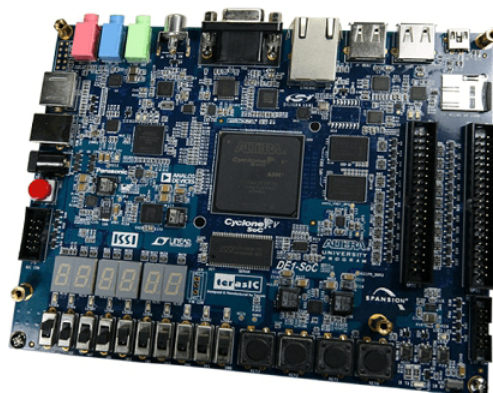


Fig. 11. Tarjeta de Desarrollo DE1-SoC.

1. Adquisición de la Señal.

Para lograr la coincidencia de la señal adquirida con la generada en MATLAB, se empleó el ADC del FPGA y se implementó un circuito de puente de diodos. Esta adición permitió obtener una señal siempre positiva y adecuada para el FPGA, siguiendo el formato de la Fig. 2. De esta manera, se aseguró la correspondencia entre los datos adquiridos y los resultados esperados.

2. Asignación de los Sextantes.

Para lograr una asignación precisa de los sextantes, se utilizó la información recabada de la simulación en MATLAB. Esta información fue codificada en una LUT dentro del código del FPGA, asegurando la coherencia con la implementación matemática. La Fig. 12 muestra los valores de la LUT utilizada para la asignación de los sextantes. Gracias a esta estrategia, se logró una correspondencia precisa entre los resultados obtenidos en la simulación y la implementación en el FPGA.

3. Razón entre las Fases.

Aunque VHDL no admite operaciones matemáticas complejas, se logró una implementación eficiente de las razones de las fases mediante el uso de una LUT. Esta LUT

se basó en los valores obtenidos en la simulación de MATLAB, lo que permitió una asignación precisa y coherente con los datos adquiridos en tiempo real. Estos valores y su discrepancia con los valores de la simulación se muestran en la Fig. 13.

4. Generación de Señal Rampa.

La generación de esta señal se logró mediante un sencillo contador, el cual se incrementaba paralelamente con las mediciones realizadas por el ADC del FPGA. Esta estrategia permitió obtener una señal continua y coherente que se adaptaba dinámicamente a las variaciones en las mediciones del ADC.

5. Comparación de Señales.

A pesar de que en la Fig. 14 se encuentra una pequeña discrepancia de asignación de valores, al realizar la comparación de las señales se obtuvo una correspondencia precisa entre los resultados de la simulación y la implementación en el FPGA. Esto se debe a que la comparación de las señales se realizó con base en la información de la LUT, que fue codificada con los valores de la simulación.

6. Activación de los Interruptores.

Finalmente, la activación de los interruptores se llevó a cabo utilizando la misma técnica empleada en la simulación de MATLAB. La Fig. 15 ilustra claramente cómo se activan los interruptores en cada fase del ciclo de la señal de referencia. Esta consistencia entre la simulación y la implementación en el FPGA aseguró un comportamiento coherente y preciso del modulador para inversor de fuente de corriente.

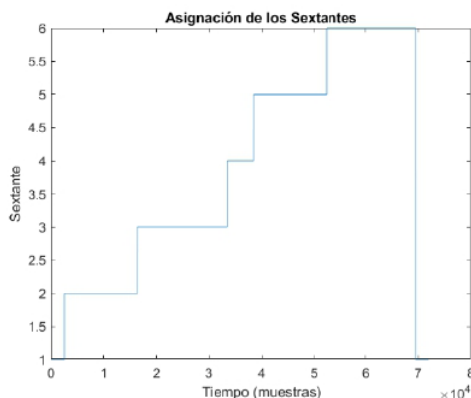


Fig. 12. Asignación de los Sextantes a través de la LUT.

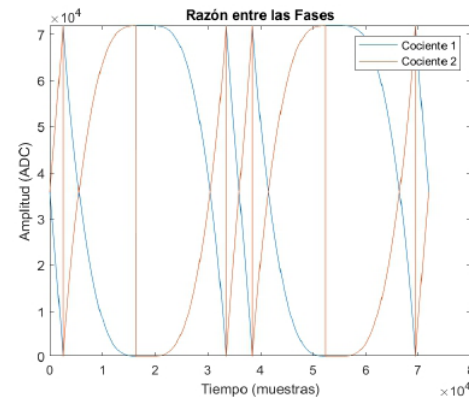


Fig. 13. Señales Activadas a través de la LUT.

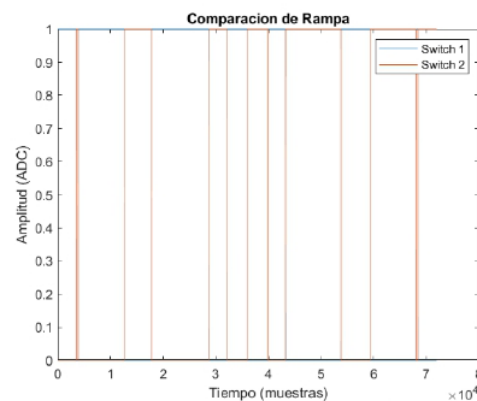


Fig. 14. Interruptores Activados para la implementación en el FPGA.

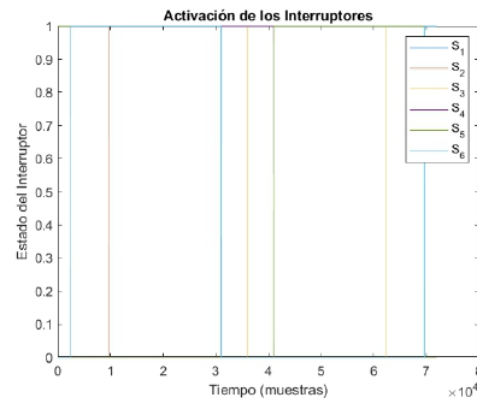


Fig. 15. Interruptores Activados.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los experimentos realizados para evaluar la implementación del modulador para inversor de fuente de corriente. La Fig. 16 muestra una fotografía del osciloscopio, con la señal recibida en la parte superior y la activación de uno de los interruptores en la parte inferior.

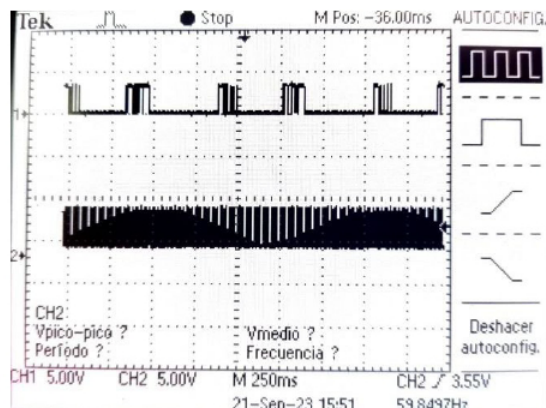


Fig. 16. Comparación entre la señal recibida y la activación del S1.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se puede apreciar cómo se logró implementar en una tarjeta de desarrollo basada en un FPGA la técnica basada en SVM. Así mismo, se pudo comprobar su desempeño comparándolo con el algoritmo desarrollado para MATLAB. Se utilizó el convertidor analógico-digital LTC2308 integrado en la tarjeta de desarrollo Cyclone V de Intel. Para futuras etapas, se plantea la comprobación del algoritmo implementando el control de un sistema trifásico de dos niveles que permita verificar físicamente los tiempos de las señales de disparo generadas por el FPGA.

REFERENCIAS

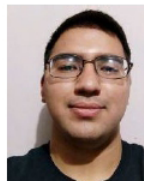
- [1] G. Oriti and A. L. Julian, "Three-Phase VSI with FPGA-Based Multisampled Space Vector Modulation," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 4, pp. 1813-1820, July-Aug. 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2154295.
- [2] W. P. Hew, C. P. Ooi and N. A. Rahim, "Realization of Space Vector Modulation Technique in a Single FPGA Chip for Induction Motor Drive," 2005 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, Hong Kong, China, 2005, pp. 817-820, doi: 10.1109/EDSSC.2005.1635403.
- [3] J. Holtz, M. Hölzgen and J. O. Krah, "A Space Vector Modulator for the High-Switching Frequency Control of Three-Level SiC Inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 5, pp. 2618-2626, May 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2280768.
- [4] O. mellati, S. Saidat, M. Bouzidi and S. Barkat, "Design and implementation of three-dimensional space vector modulation for three-phase four-leg inverter based on FPGA," 2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE), El Oued, Algeria, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCEE.2018.8634452.
- [5] A. L. Julian and G. Oriti, "FPGA based digital implementation of naturally sampled space vector modulation," 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 625-630, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316528.
- [6] Tian Liu, Qiang Song, Wenhua Liu, Yuanhua Chen and Jianguo Li, "FPGA-based universal multilevel space vector modulator," 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005., Raleigh, NC, 2005, pp. 5 pp.-, doi: 10.1109/IECON.2005.1568997.
- [7] A. S. Al-Khayyat, A. Al-Safi and M. J. Hameed, "Single-phase grnd-connected power control in dq synchronous reference frame with space vector modulation using FPGA," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 30, no. 1, pp 57-69, April 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v30.i1.
- [8] Madasamy, P.; Pongiannan, R.K.; Ravichandran, S.; Padmanaban, S.; Chokkalingam, B.; Hossain, E.; Adedayo, Y. A Simple Multilevel Space Vector Modulation Technique and MATLAB System Generator Built FPGA Implementation for Three-Level Neutral-Point

Clamped Inverter. Energies 2019, 12, 4332.
<https://doi.org/10.3390/en1224332>

BIOGRAFÍAS



GUSTAVO CERDA VILFAÑA Profesor del Departamento de Ingeniería Electrónica de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato. Sus áreas de investigación son el procesamiento digital de señales y el diseño de circuitos.



FRANCISCO JAVIER MORENO VAZQUEZ Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica en la Universidad de Guanajuato. Apasionado por la investigación con experiencia en proyectos de veranos de investigación. Sus áreas de interés son el Machine Learning, los Sistemas Embebidos y la Visión por Computadora.

Cogeneración Inferior con Ciclo Rankine Orgánico y Energía Solar Térmica en Aplicaciones Industriales

JORGE LUIS GARCÍA CASTILLO¹, CARLOS BENITO MARTÍNEZ PÉREZ¹, ANGELO NAVARRETE PÉREZ ¹,
JESÚS ALBERTO CRESPO QUINTANILLA².

¹Departamento de Ingenierías, Campus Bajío, Universidad Incamate Word Campus Bajío, México.

²Departamento de ciencias de la vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

jlgarciac@profesores.uibajio.mx
benito.martinez@uibajio.mx
angelo.navarrete@alumnos.uibajio.mx
crespo.ja@ugto.mx

RESUMEN En el sector industrial diversas industrias emplean energía térmica en calderas, hornos y secadores, por ello es común encontrar gases de combustión con flujos másicos considerables. Este residuo energético puede aprovecharse empleando esquemas de cogeneración inferior para generar energía eléctrica y térmica. Una técnica comúnmente empleada es el uso de Ciclos Rankine Orgánicos (ORC) que emplean fluidos de trabajo con bajas temperaturas de evaporación y condensación, además de buena estabilidad térmica. Este trabajo estudia el uso de ORC's para gases de combustión con temperaturas entre 100 °C y 300 °C. Se evalúan tres fluidos de trabajo, calculando la eficiencia neta del ciclo y la potencia generada. Para 1kg/s de gases, se obtiene para butano $\eta_{cy} = 13.19\%$ (7.914kW), R123 $\eta_{cy} = 23.77\%$ (14.96kW) y el n-hexano $\eta_{cy} = 24.94\%$ (14.26 kW). Se varía el flujo másico de gases. Adicionalmente, se integra una red de calentadores solares proveyendo una carga térmica de 45 kW.

PALABRAS CLAVE — Cogeneración, ORC, Solar Térmica.

I. INTRODUCCIÓN

El actual interés de la generación combinada de calor y electricidad surgió debido a que se observó que la eficiencia general de dichos sistemas en conjunto es mayor a la eficiencia de los sistemas por separado, lo cual conlleva a menores costos de producción y un menor impacto ambiental [1]. Este tipo de tecnologías tienen la capacidad de poder ser implementadas para suministrar agua caliente e incluso para aplicaciones de refrigeración, dependiendo de las necesidades y requerimientos de cada industria [2].

Un sistema de cogeneración se define como la generación simultánea de electricidad y calor a partir de la misma fuente primaria energética. Pueden identificarse dos tipos de sistemas de cogeneración: Los sistemas superiores e inferiores.

Los sistemas superiores tienen como objetivo la quema de un combustible y generar electricidad a partir de este. Los sistemas inferiores de cogeneración se caracterizan por utilizar energía residual de procesos industriales para la generación de energía eléctrica y energía térmica.

En los diferentes sectores, se tienen distintos niveles de temperatura de gases de escape tal como lo muestra la Fig. 1; para los procesos que tienen gases de combustión con bajos niveles de temperatura, los Ciclos Rankine Orgánicos representan una opción viable para la generación de electricidad [3].

Estos sistemas se caracterizan por utilizar fluidos de trabajo orgánicos con bajos puntos de evaporación y lograr condiciones de saturación y sobrecalentamiento a más bajas temperaturas. Se diseña un sistema de cogeneración inferior que aprovecha gases de combustión con temperaturas en el rango de entre 100 °C y 300 °C, se evalúa el uso de butano, R123 y hexano con la integración de calentamiento solar. Se establecen las áreas de oportunidad y limitaciones para un caso de estudio.

Un Ciclo Rankine Orgánico (ORC por sus siglas en inglés) es un medio eficaz de utilizar el calor residual a temperaturas más bajas en comparación con la generación de energía convencional. De hecho, existen varias investigaciones sobre la optimización y el rendimiento de los ORCs, para diferentes fuentes de calor, entre las que se incluyen la energía solar [4] y energía geotérmica [5].

II. DESARROLLO

Se estudia un *Ciclo Rankine Orgánico* empleando gases de combustión con temperaturas de gases de combustión en el orden de entre 100°C y 300°C, integrado con un sistema de calentamiento solar, como se muestra en la Fig. 2. De acuerdo con [6], se emplean distintos fluidos de trabajo, clasificados de acuerdo con sus temperaturas de evaporación y condensación.

Se emplea butano, R123 y n-hexano como fluido de trabajo, estos fluidos son elegidos debido a que su temperatura de evaporación oscila entre los 55-80 °C y 80-230 °C respectivamente (Tabla I); esto permite cubrir el rango de temperaturas de una amplia variedad de industrias. Con la intención de contar con un amplio rango de operación para el sistema, los diseños se llevan a cabo para flujos másicos de gases de combustión en un rango de 1 a 10 kg/s bajo la suposición de aire estándar. Se realizan los balances de materia y energía haciendo uso del software EES, determinando la eficiencia térmica del ciclo. De manera adicional, es posible obtener energía térmica para suministrar al proceso mediante la implementación de agua caliente usando un sistema de calentamiento solar.

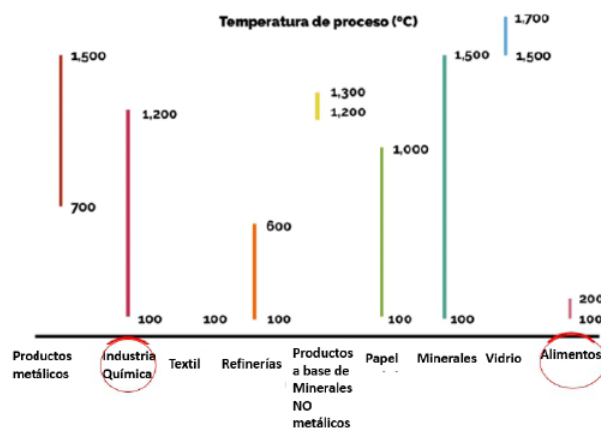


Fig. 1. Temperatura de gases de escape representativa de diversas industrias [7].

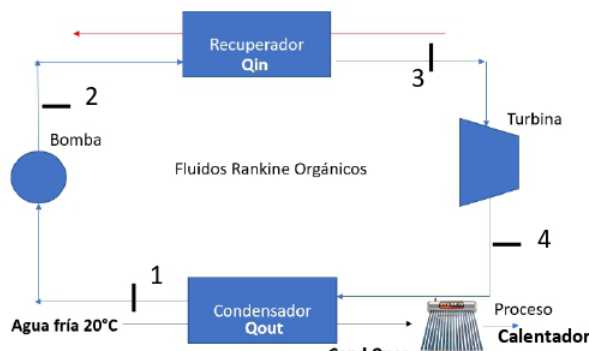


Fig. 2. Sistema de cogeneración con ORC integrado con calentamiento solar.

Tabla I. Fluidos compatibles con los rangos de temperatura del ORC.

Fluido de trabajo	Temperatura recomendada de la fuente de calor (°C)	Temperatura de evaporación (°C)	Temperatura de Condensación (°C)
Butano	85	55-80	25
n-hexano	100-250	80-230	30
R123	292	180	27

Se determinan los balances de materia y energía para obtener los calores de entrada y de salida del sistema, así como los trabajos en bombas y turbina para finalmente determinar la eficiencia térmica del ciclo. El calor de entrada y salida por unidad de masa se determina con la Ec. (1) y Ec. (2) respectivamente:

$$Q_{entrada} = h_3 - h_2 \text{ [kJ/kg]} \quad (1)$$

$$Q_{salida} = h_4 - h_1 \text{ [kJ/kg]} \quad (2)$$

donde h_1 es la entalpía a la salida del condensador, h_2 es la entalpía a la salida de la bomba, h_3 es la entalpía a la salida del recuperador y h_4 es la entalpía a la salida de la turbina.

La eficiencia térmica del ciclo ($\eta_{térmica}$) se calcula en términos de los calores de entrada y salida previamente obtenidos de las Ecs. (1) y (2) como la Ec. (3):

$$\eta_{térmica} = 1 - \frac{Q_{salida}}{Q_{entrada}} \quad (3)$$

Para obtener el trabajo requerido por el compresor se hizo empleo de la Ec. (4):

$$W_{compresor} = (h_2 - h_1)\dot{m}_{vapor} \quad (4)$$

donde $\dot{m}_{vapor}$ es el flujo másico de vapor generado por el Ciclo Rankine Orgánico.

El trabajo de la turbina fue calculado por medio de la Ec. (5):

$$W_{turbina} = (h_3 - h_4)\dot{m}_{vapor} \quad (5)$$

El trabajo del ciclo se calcula mediante la Ec. (6):

$$W_{ciclo} = W_{turbina} - W_{compresor} \quad (6)$$

Las Ecs. (7) y (8) sirven para determinar el calor contenido de los humos expulsados por la caldera:

$$\dot{Q}_{humos} = \dot{m}_{humos} c_{p,h} (T_{humos\ entrada} - T_{humos\ salida}) \quad (7)$$

Dado que los niveles de presión y temperatura del ciclo Rankine Orgánico se fijan en términos de las presiones de evaporación y condensación de los fluidos de trabajo, el único grado de libertad restante es el cálculo del flujo másico de vapor necesario para el calor de entrada requerido. Se introduce un intercambiador de calor, en el cual se llevará a cabo el proceso de recuperación de calor entre los gases de combustión y el agua de proceso para la generación de vapor. Se lleva a cabo un balance de energía en el recuperador de

determinando la cantidad de vapor requerida para satisfacer la carga térmica de entrada de la siguiente manera (Ec. (8):

$$\dot{Q}_{humos} = \dot{m}_{vapor} * Q_{entrada} \quad (8)$$

Con la información obtenida se calcula la eficiencia térmica del ciclo.

III. RESULTADOS

Los análisis para el cálculo de la eficiencia del ciclo se realizaron empleando el concepto de eficiencia isentrópica para bomba y turbina. Se usa una eficiencia isentrópica para bomba y turbina $\eta_{iso}=85\%$. Para motivos de comparación se determina la eficiencia y potencia del ciclo para distintos flujos másicos de gases de combustión. Para 1kg/s de gases de combustión la eficiencia del ciclo empleando los distintos flujos de trabajo es: Para el butano 13.19%, R123 de 23.77% y el n-hexano es 24.94%, con una potencia neta generada de 7.914 kW, 14.96 kW y 14.26 kW respectivamente. Se observa que la mejor eficiencia es alcanzada cuando n-hexano es el fluido de trabajo.

Los diagramas T-S de los tres fluidos se presentan a continuación en la Fig. 3, Fig. 4 y Fig. 5.

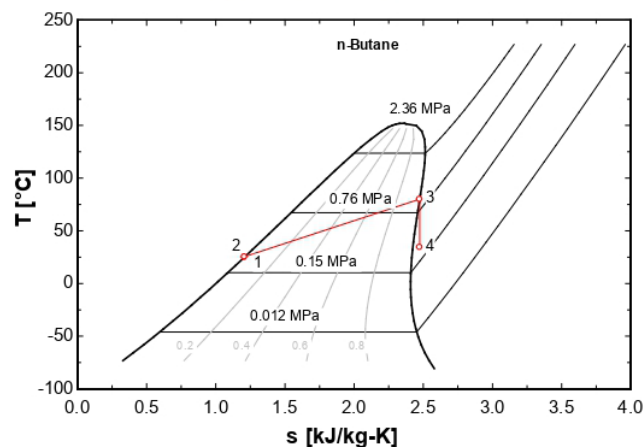


Fig. 3. Diagrama T-S Butano

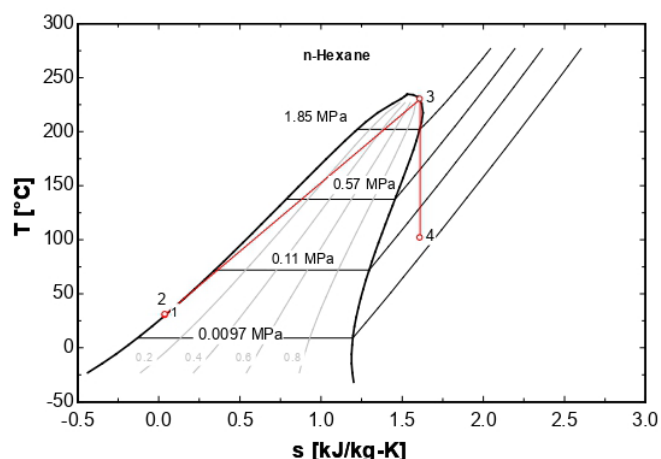


Fig. 4. Diagrama T-S n-Hexano

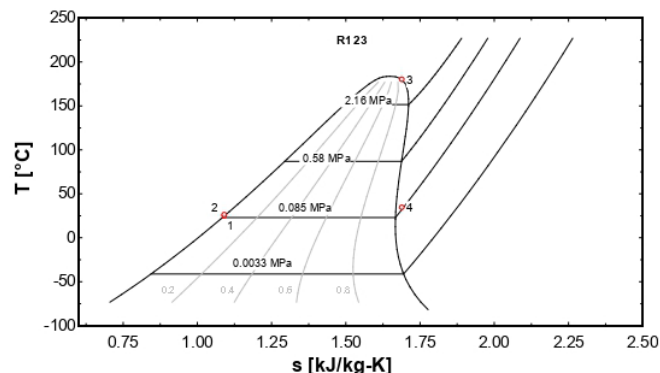


Fig. 5. Diagrama T-s R123

Se presenta a continuación en la Tabla II, Tabla III y Tabla IV el flujo másico de vapor, la potencia del compresor, potencia en la turbina y el trabajo neto del ciclo de los diferentes ORC operando con distintos fluidos de trabajo.

TABLA II. POTENCIA GENERADA EN CICLO RANKINE ORGÁNICO PARA DISTINTOS FLUJOS MÁSCOS DE GASES DE COMBUSTIÓN CON n-BUTANO.

$\dot{m}_{humos}$ [kg/s]	$\dot{m}_{vapor}$ [kg/s]	Q_{in} [kW]	W_{comp} [kW]	W_{turb} [kW]	W_{cy} [kW]
1	0.1378	60	0.1848	8.099	7.914
2	0.2756	120	0.3695	16.2	15.83
3	0.4135	180	0.5543	24.3	23.74
4	0.5513	240	0.7391	32.39	31.66
5	0.6891	300	0.9238	40.49	39.57
6	0.8269	360	1.109	48.59	47.48
7	0.9648	420	1.293	56.69	55.4
8	1.103	480	1.478	64.79	63.31
9	1.24	540	1.663	72.89	71.23
10	1.378	600	1.848	80.99	79.14

En la Tabla II se puede observar que cuando se tiene un mayor flujo másico de gases de combustión es posible tener mayor recuperación de energía, incrementando la potencia del ciclo Rankine Orgánico; por ejemplo, para flujos másicos de 5 kg/s, es posible tener una potencia del ciclo $W_{cy}= 39.57$ kW para el n-butano, y cuando se duplica el flujo másico a 10kg/s, la potencia del ciclo alcanza los $W_{cy}= 79.14$ kW. Este comportamiento también se puede observar en la Fig. 6, ya que para el ciclo que opera con n-Butano es posible generar potencias cercanas a los 80kW para flujos másico de gases de combustión de 10kg/s. Esto representa una potencia importante que puede ser lograda con flujos de gases en rangos comunes.

En la Tabla III se muestra la potencia generada empleando n-Hexano como fluido de trabajo. En la Tabla III se observa como la potencia del ciclo de nueva cuenta incrementa conforme se tiene un mayor flujo másico de gases de combustión, sin embargo, la diferencia más significativa es que la potencia del ciclo, cuando se tiene un flujo másico de 10 kg/s de n-Hexano, alcanza los $W_{cy}= 149.6$ kW, lo cual casi el doble que la potencia obtenida cuando se utiliza el n-butano.

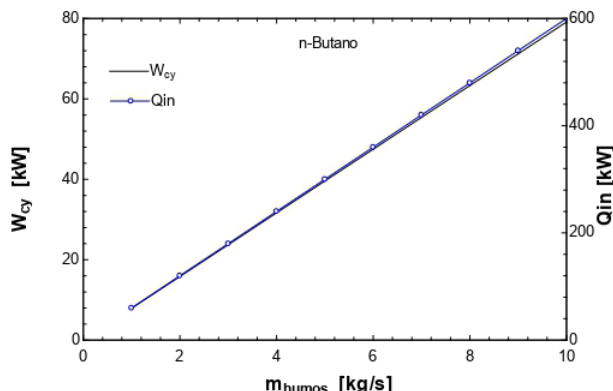


Fig. 6. Diagrama T-S Butano.

TABLA III. POTENCIA GENERADA EN CICLO RANKINE ORGÁNICO PARA DISTINTOS FLUJOS MÁSCOS DE GASES DE COMBUSTIÓN CON N-HEXANO

$\dot{m}_{humos}$ [kg/s]	$\dot{m}_{vapor}$ [kg/s]	Q_{in} [kW]	W_{comp} [kW]	W_{turb} [kW]	W_{cy} [kW]
1	0.09188	60	0.3955	15.36	14.96
2	0.1838	120	0.791	30.72	29.93
3	0.2757	180	1.187	46.07	44.89
4	0.3675	240	1.582	61.43	59.85
5	0.4594	300	1.978	76.79	74.81
6	0.5513	360	2.373	92.15	89.78
7	0.6432	420	2.769	107.5	104.7
8	0.7351	480	3.164	122.9	119.7
9	0.827	540	3.56	138.2	134.7
10	0.9188	600	3.955	153.6	149.6

En la Fig. 7 se muestra la potencia del ciclo y el calor de entrada del ciclo empleando n-hexano como fluido de trabajo. El rango de la potencia del ciclo va desde 14.96 kW hasta 149.6 kW, lo que lo hace versátil para implementarse a una amplia gama de necesidades de generación.

Finalmente, en la Tabla IV se muestran la potencia del ciclo y calor de entrada usando R-123 como fluido de trabajo en el ORC. El rango de potencias mostrado en la Tabla IV es muy similar al obtenido cuando se utiliza n-Hexano, ya que oscila desde los 14.85 kW hasta los 148.5 kW. Esto nos indica que el rango de aplicación de este sistema es muy amplio adaptándose a distintos requerimientos.

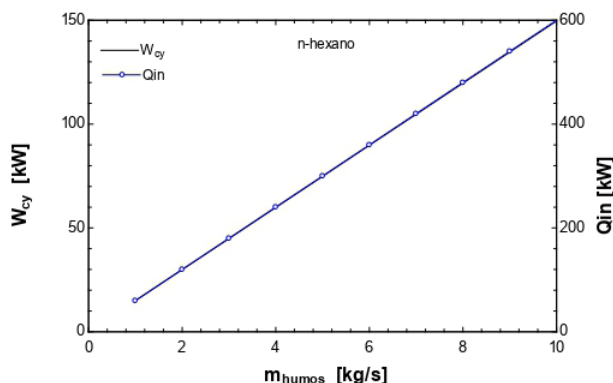


Fig. 7. Diagrama T-S Butano.

TABLA IV. POTENCIA GENERADA EN CICLO RANKINE ORGÁNICO PARA DISTINTOS FLUJOS MÁSCOS DE GASES DE COMBUSTIÓN CON R-123

$\dot{m}_{humos}$ [kg/s]	$\dot{m}_{vapor}$ [kg/s]	Q_{in} [kW]	W_{comp} [kW]	W_{turb} [kW]	W_{cy} [kW]
1	0.2563	60	60	0.5891	14.85
2	0.5126	120	120	1.178	29.7
3	0.7689	180	180	1.767	44.55
4	1.025	240	240	2.356	59.39
5	1.282	300	300	2.945	74.24
6	1.538	360	360	3.535	89.09
7	1.794	420	420	4.124	103.9
8	2.051	480	480	4.713	118.8
9	2.307	540	540	5.302	133.6
10	2.563	600	600	5.891	148.5

La Fig. 8 muestra como varía el calor de entrada y el trabajo del ciclo cuando se emplea R123 como fluido de trabajo.

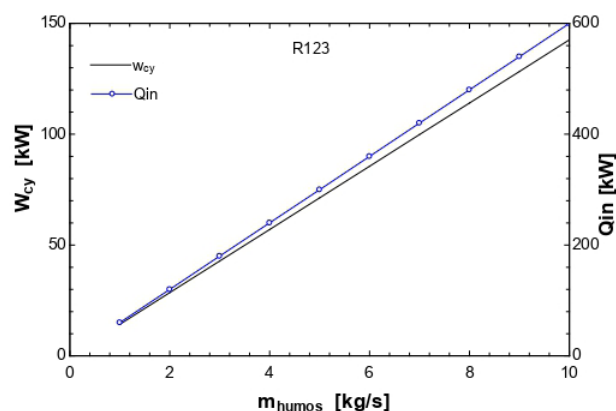


Fig. 8. Diagrama T-s Butano.

III. CONCLUSIONES

Desde una perspectiva técnica, existe un amplio potencial del uso de sistemas de cogeneración inferior mediante la recuperación de energía residual del proceso. Se llevó a cabo la evaluación de tres fluidos de trabajo en un ciclo Rankine orgánico (ORC); los ciclos Rankine orgánicos mostraron una eficiencia relativamente buena. Para el butano 13.19%, R123 de 23.77% y el n-hexano es 24.94%, con una potencia neta generada de 7.914 kW, 14.96 kW y 14.26 kW respectivamente. Para las potencias de ciclo alcanzadas por cada uno de los fluidos de trabajo, se observa cómo, para un flujo másico de 10 kg/s, se alcanza una mayor potencia de ciclo cuando se utiliza n-Hexano ($W_{cy}= 149.6$ kW), mientras que la menor potencia se alcanza al utilizar n-Butano ($W_{cy}= 79.14$ kW).

Es posible implementar tecnologías de cogeneración inferior que utilicen energía residual de procesos en una amplia variedad de industrias. De manera adicional, es posible generar alrededor de 45 kW de energía térmica con la integración de un sistema de calentadores solares. Es posible mejorar la eficiencia energética de los ORC's mediante técnicas como el recalentamiento y recuperación regenerativa con el sistema de calentamiento solar.

REFERENCIAS

- [1] Simpson, Michael C., Chatzopoulou, Maria A., Oyewunmi, Oyeniyi A. & Markides, Christos N. Technoeconomic analysis of internal combustion engine- organic Rankine cycle cogeneration systems in energy-intensive buildings. International Conference on Applied Energy, 158, 2354-2359. (2019). <https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.283>
- [2] Markides, Christos N., Low-Concentration Solar-Power Systems Based on Organic Rankine Cycles for Distributed-Scale Applications: Overview and Further Developments. Frontiers in Energy Research, 3:47 (2015) doi: 10.3389/fenrg.2015.00047.
- [3] Rank®. Tecnología Rank® – Como funciona un ORC. 2019, <https://www.rank-orc.com/es/2019/06/21/tecnologia-rank-como-funciona-un-orc/>
- [4] Freeman, J., Hellgardt, K. & Markides, CN. An assessment of solar powered organic Rankine cycle systems for combined heating and power in UK domestic applications. Appl Energy, 138:605-20 (2015). doi:10.1016/j.apenergy.2014.10.035.
- [5] Oyewunmi, OA. & Markides, CN. Thermo-economic and heat transfer optimization of working-fluid mixtures in a low-temperature organic Rankine cycle system. Energies, 9:1-21. (2016). doi:10.3390/en9060448
- [6] Bao, J., & Zhao, L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 325–342. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>
- [7] Universidad de Guanajuato. Clase digital 7: Cogeneración. Generación de calor, electricidad y trabajo mecánico. (s/f). UGto.Mx. Recuperado el 29 de noviembre de 2022, de https://oa.ugto.mx/oa/uda_energias_convencionales/oa-rg-0006671/#/lessons/kMjemFI894Y6Mo5nkxjfqBsk4zOW1-g7

BIOGRAFÍAS



JORGE LUIS GARCÍA CASTILLO Ingeniero Mecánico por la Universidad de Guanajuato, Maestría en Ingeniería Química en Integración de Procesos y Doctor en Ciencias en Ingeniería Química también por parte de la Universidad de Guanajuato. Se ha desempeñado como jefe del departamento de eficiencia energética en el Centro Mexicano de Energías Renovables, dirigiendo y coordinando múltiples proyectos industriales. Fundador y director de la empresa “Soluciones en energía Kolin-Energy”. Desde hace aproximadamente 5 años la empresa ha desarrollado proyectos relacionados con la industria en materia de eficiencia energética como: Diagnósticos en eficiencia energética Eléctrica/Térmica, Sistemas fotovoltaicos en baja y media tensión. Diseño de secadores, quemadores a pellet, instalaciones de calentadores solares y diplomados en eficiencia energética. Actualmente, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel candidato, adscrito al Departamento de Ciencias Ambientales en la carrera de Energías Renovables en la División Ciencias de la Vida, en la Universidad de Guanajuato. Se desempeña como profesor en Ingeniería Mecánica en Universidad Incarnate Word (UIW) Plantel Bajío, participando en la dirección de proyectos de tesis y estancias profesionales.

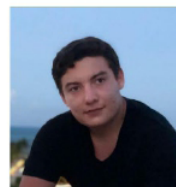


JESÚS ALBERTO CRESPO QUINTANILLA Ingeniero Mecánico por la Universidad de Guanajuato, Maestría en Ingeniería Química en Integración de Procesos y Doctor en Ciencias en Ingeniería Química también por parte de la Universidad de Guanajuato. Se ha desempeñado como gerente de proyectos en la empresa de energías renovables 4e Power and Fuels. Experiencia de 4 años en la Impartición de cursos de alumnos de nivel licenciatura, así como experiencia en diversas actividades de gestión académica. Ha sido miembro de la Sociedad de Alumnos de la División de Ingenierías (Enero-Diciembre 2013), así como merecedor de la Clarke scholarship otorgada por ASME (2008). También ha sido merecedor del reconocimiento al mérito universitario por aprovechamiento académico dentro de la Maestría en Ingeniería Química,

otorgado por la UG (2016) y merecedor del reconocimiento al mérito universitario por aprovechamiento académico dentro del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química, otorgado por la UG (2019, 2020). A su vez ha participado como jurado evaluador dentro del “Concurso de prototipos de Ingeniería Sustentable” en la Universidad de Guanajuato. (2019). Actualmente se desempeña como profesor en Ingeniería Mecánica en la Universidad Incarnate Word (UIW) plantel Bajío, participando en la dirección de proyectos de tesis y estancias profesionales.



CARLOS BENITO MARTÍNEZ PÉREZ Ingeniero Químico por la Universidad de Guanajuato, Maestría en Ingeniería Química en Integración de Procesos Químicos y Doctor en Ciencias en Ingeniería Química también por parte de la Universidad de Guanajuato. Director de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Incarnate Word Campus Bajío, Coordinador del programa de posgrado Maestría en Gestión e Innovación Tecnológica de la DCNE Universidad de Guanajuato, Profesor de tiempo parcial en la DCNE de la Universidad de Guanajuato en la carrera de ingeniería química y en la Maestría en Gestión e Innovación Tecnológica, Profesor de asignatura de la Universidad Interactiva y a Distancia del Estado de Guanajuato UNIDEG campus León II, miembro del Comité Académico del Posgrado MGIT de la DCNE de la Universidad de Guanajuato. Fundador y director y apoderado legal de la empresa SERVER SA de CV, empresa mexicana que se dedica a desarrollar equipo a la medida para la industria química, metal mecánico, automotriz, tratamiento de aguas y alimentarias. Cuenta con presentación de trabajos en congreso nacionales (28) e internacionales (7), un artículo publicado en una revista de alto impacto, 1 patente otorgada, así como más de 25 direcciones de tesis de licenciatura y maestría.



ANGELO NAVARRETE PÉREZ Estudiante de séptimo semestre de Ingeniería Mecánica/BS in Mechanical Engineering en la Universidad Incarnate Word Campus Bajío. Experiencia laboral de un año como supervisor de obra en la empresa “Pasa Irapuato” desarrollando ciertas habilidades como el cómo manejar las obras bajo presión, seguridad del personal y desarrollando conocimientos de los distintos tipos de materiales impermeabilizantes y soluciones a problemas frecuentes en estos. Dentro del campo del diseño e investigación, junto a un equipo realizaron una banda para pilas, la cual imprimimos en una impresora 3D, mostrando nuestro proyecto dentro del congreso de la mujer de 2022. Actualmente, pertenece a la Sociedad estudiantil de Ingeniería Mecánica (SEIM) siendo fundador el cual es un grupo que busca realizar nuevos proyectos para los estudiantes de ingeniería mecánica.

Fabricación de una Celda Solar Orgánica Sensibilizada con Tintura de Capsaicina y Fragaria

JOSÉ SABÁS SEGURA, VICTORIA CARRILLO CORONA, OMAR DANIEL CORRAL GARCÍA.

Coordinación de Ingeniería en Energías Renovables, Tecnológico Nacional de México / ITS de Abasolo.

jose_ss@abasolo.tecnm.mx

as18110058@tecabasolo.edu.mx

omar.cg@abasolo.tecnm.mx

RESUMEN Este trabajo presenta una alternativa para la sustitución de celdas solares de silicio, buscando dar una solución a los problemas que se generan debido a la dificultad de reciclarlas, lo cual es un problema en términos medioambientales. Se pretende tener una celda solar orgánica de tipo de Graetzel que proporcione una eficiencia superior al adicionar extracto de capsaicina, al ser sensibilizada con fragaria, la cual pueda degradarse por acción natural una vez desechada. Se sabe que el 40% de la cantidad de alimento es desechado antes de llegar al consumidor final debido al mal manejo, una ventaja es el darle un segundo uso a los productos desechados, que tengan características potenciales para poder utilizarse como tinte sensibilizador para celdas orgánicas.

PALABRAS CLAVE — Orgánica, energía renovable, radiación solar.

I. INTRODUCCIÓN

Las celdas fotoelectroquímicas o celdas orgánicas sensibilizadas con colorante son el resultado de la combinación de diversas sustancias, cada una de las cuales ejecuta una acción específica dentro del esquema de funcionamiento de la celda para la transformación de la luz solar en electricidad. A pesar de que se han reportado eficiencias de 11%, la aplicación de esta tecnología ha sido obstaculizada por problemas con la fuga y evaporación de la solución electrolítica (la activación de la celda). Para solventar este problema, recientes esfuerzos en el área de celdas orgánicas sensibilizadas con colorante se enfocan en el reemplazo de la solución electrolítica por un material sólido, lo que eliminaría los actuales problemas con el sellado y el poco tiempo de vida [1]. La celda solar Graetzel también conocida como célula solar sensibilizada por colorante (en inglés, dye-sensitized solar cell, DSSC, DSC o DYSC1) produce electricidad mediante un principio fotoelectroquímico, cambiando la energía lumínica en energía eléctrica. Son celdas solares asequibles que forman parte de la categoría de células solares de películas delgadas. Estas celdas están compuestas por un semiconductor situado entre un ánodo fotosensible y un electrolito. Presentan características atractivas, ya que aparte de su costo reducido, son simples de fabricar y cuentan con cualidades semirrígidas, semitransparentes e incluso en algunos casos, completamente transparentes, según los últimos diseños.

Aunque su eficiencia de conversión de energía es menor que la de los paneles solares basados en silicio, éstos presentan una mejora en cuestión de precio de fabricación, por lo que se convierte en un mejor candidato de distribución en masa. La celda Graetzel está compuesta por un material semiconductor (TiO₂, dióxido de titanio) pintado por un colorante, un

electrolito (solución de Yodo), dos electrodos de vidrio con una capa conductora y transparente (SnO₂) y un catalizador (grafito o platina). La fragaria es la onceava fruta más producida en México, aunque del grupo de las berries es la principal, con una gran importancia económica para el país, pues una parte de la producción se exporta a los Estados Unidos, donde su consumo ha aumentado en los últimos años, siendo Guanajuato una de las 3 entidades federativas con mayor producción con 97499 toneladas, y la superficie cosechada fue de 1709 hectáreas [3].

La evolución de los Paneles Solares se refiere a las tres generaciones, consideradas las más importantes:

Primera generación: Las placas solares fotovoltaicas se basan en dos obleas o láminas con materiales semiconductores. Tanto una como la otra utilizan sustancias químicas llamadas dopantes, que provocan en una de las placas un exceso de electrones (carga negativa, tipo N) y en la otra una escasez de electrones (carga positiva, tipo P). Esta conexión P-N crea un campo eléctrico con una barrera de potencial que bloquea el flujo de electrones entre las placas. El silicio es el material predominante en la fabricación de estos paneles solares fotovoltaicos.

Segunda Generación: Esta etapa se fundamenta en un proceso de fabricación que produce láminas considerablemente más flexibles y delgadas en comparación con las generaciones anteriores. Por esta razón, se les conoce como láminas delgadas. Aunque la eficiencia de estas placas es aún inferior a la de la primera generación, sus defensores argumentan que es solo una cuestión de tiempo alcanzarlas e incluso superarlas.

Tercera Generación: Esta aún se encuentra en fase de experimentación, persiguen mejorar aún más los paneles de

láminas delgadas. Investigadores y compañías de distintas partes del mundo están enfocados en diversas tecnologías, tales como las conocidas como tecnologías de huecos cuánticos, nanotubos de carbono y nanoestructuras de óxido de titanio con colorante (DSSC).

II. MARCO TEÓRICO

El descubrimiento del efecto fotovoltaico (PV) se atribuye comúnmente a Henry Becquerel, un físico francés, quien generó una fotocorriente al iluminar dos electrodos de platino, recubiertos con bromuro o cloruro de plata sumergidos en una solución acuosa. Smith y Adams hicieron los primeros informes de fotoconductividad, en 1873 y 1876, respectivamente, trabajando con selenio. Sin embargo, solo hasta el principio de la década de 1950, los laboratorios Bell comenzaron a aplicar este efecto a través de celdas solares inorgánicas basadas en silicio para producir energía eléctrica con un porcentaje de eficiencia del 6%. Debido a la crisis energética que sufrió el mundo en la década de los 70, se generaron las oportunidades para que el uso de la energía solar entrara en el mercado de energías alternativas al petróleo [4]. El sol es una poderosa fuente de energía, tanto así que la energía recibida en la superficie de la tierra en una hora cubre la demanda energética de todo el año.

El medio para aprovechar esta energía son las celdas solares, las cuales son dispositivos que pueden convertir la radiación solar en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico. Existen dos categorías principales de celdas solares: inorgánicas y orgánicas. Las celdas inorgánicas incluyen variedades como el silicio amorfo, silicio cristalino, CdTe y Cu(In,Ga)Se₂. Por otro lado, las celdas orgánicas, como las celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC), utilizan tintes para absorber la luz solar y generar electricidad. Cada tipo tiene sus propias ventajas y aplicaciones específicas en la conversión de energía solar en electricidad [2]. En 1991, O'Regan y Grätzel obtuvieron una celda solar basada en una película de TiO₂ recubierta de una monocapa de colorante, dicho dispositivo logró un rendimiento de conversión de energía en el rango de 7.1 a 7.9%. De esta manera, se abrió la oportunidad de mejorar este tipo de celdas solares, las cuales tienen una película de colorante, destacadas por su bajo costo de producción y la alta conversión de la luz solar incidente a corriente eléctrica [2].

En los años recientes, han surgido diversas ideas para crear productos alimentarios con atributos y cualidades fisicoquímicas y sensoriales específicas, es decir, alimentos con funcionalidad fisiológica. Por esta razón, ha habido un enfoque en la investigación del café, incluyendo su composición, propiedades y su vínculo con la salud.

Normalmente para que una celda solar se considere como tal se debe producir corriente y voltaje al ser sometida a la radiación solar y por otro lado al generar voltaje y corriente debe producir una gráfica característica mostrada en la Fig. 1.

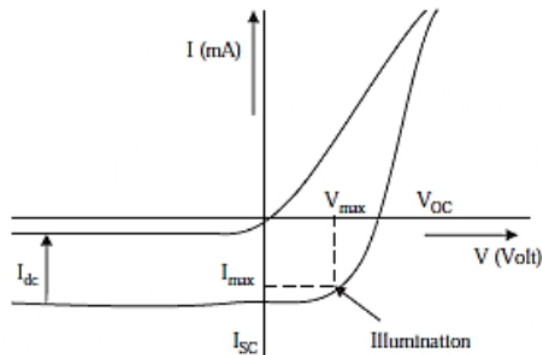


Fig. 1. Curva característica de la celda solar [9].

El “fill factor” (FF) es una medida de la capacidad de una celda fotovoltaica para convertir la energía de la luz solar en electricidad utilizable. Matemáticamente, el “fill factor” se calcula como la relación entre la potencia máxima de salida de la celda y el producto de su voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y su corriente de cortocircuito (I_{sc}) [6]. Para calcular el “fill factor” y la eficiencia de la celda, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{I_{max} * V_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (1)$$

El “fill factor” es igual a la corriente máxima por el voltaje máximo, entre el voltaje de circuito abierto por la corriente de corto circuito. El “fill factor” máximo teórico es 1.

El “fill factor” está influenciado por varios factores, como la calidad de los materiales utilizados en la celda, la geometría de esta, la temperatura y la intensidad de la luz solar. Los fabricantes de paneles solares y celdas fotovoltaicas trabajan para optimizar el “fill factor” para lograr un equilibrio entre eficiencia y costo [6].

La eficiencia de un panel solar se refiere a la capacidad de dicho panel para convertir la energía solar que incide sobre él en electricidad utilizable. Es un indicador crucial de la calidad y rendimiento de un panel solar o módulo fotovoltaico, esto es descrito en la ecuación dos. En términos simples, la eficiencia solar muestra qué tan efectivamente el panel puede convertir la energía lumínica del sol en energía eléctrica [9].

$$\eta_{ec} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{(V_{oc} * I_{sc} * FF)}{I(t) * A_c} \quad (2)$$

La eficiencia de la celda es igual al voltaje de circuito abierto por la corriente de cortocircuito por el “fill factor”, entre la radiación solar por el área.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Los siguientes materiales, reactivos y equipos, son importantes en la elaboración del tinte extraído de capsicina y fragaria, para con ellos construir las celdas orgánicas de tipo Graetzel, siendo un proceso sencillo pero requiere de paciencia y precisión, cada uno de los reactivos es importante desde el NaOH, ya que con éste se realiza el tinte tanto de capsicina o fragaria por lo tanto se considera el más

importante, el TiO_2 es la capa que ayuda a mantener la celda con humedad y la capacidad, para ayudar a los demás materiales a conducir, o bien a que suceda el principio foto-electro-químico, capaz de captar la radiación solar para que sea producida la electricidad con ayuda de las celdas solares orgánicas. Los materiales, equipos y reactivos que se requieren son los siguientes, cinta adhesiva, cristales de 3x3 cm, encendedor, goteros, 1 mortero, pinzas para folder, vasos de precipitados, vidrios de reloj, bomba de vacío, multímetro, parrilla de agitación (mosquita), roto vapor, ácido acético, agua destilada, alcohol, tinte de capsicina y fragaria, tritón x-100, dióxido de titanio, electrolitos, fragaria, hidróxido de sodio, pastilla de carbón o grafito.

IV. METODOLOGÍA

Para la preparación del colorante (tinte de capsicina o fragaria), se pesaron 20 gramos de capsicina o fragaria y se cortaron en trozos lo más pequeños posible para evitar la pérdida de materia. A continuación, se disolvieron 0.9 gramos de NaOH (hidróxido de sodio) en 120 ml de agua destilada. La capsicina o fragaria se agregó a la solución de NaOH y se colocó en una parrilla de agitación durante 90 minutos. Al final de este tiempo, se dejó reposar durante aproximadamente 90 minutos.

Una vez finalizado el tiempo de reposo, se filtró la mezcla con la ayuda de una bomba de vacío. Para aumentar la densidad de la mezcla, se utilizó un rotavapor para eliminar el exceso de agua, como se muestra en la Fig. 2. Finalmente, la solución se almacenó en un recipiente de vidrio oscuro para evitar la radiación incidente.



Fig. 2. Destilación de exceso de líquido del tinte.

El siguiente paso fue la preparación de las placas de vidrio. Con la ayuda de alcohol, se limpiaron suavemente las placas de vidrio y se localizó el lado conductor de cada una. Para preparar la solución de TiO_2 (Dióxido de titanio), se colocaron en un mortero 10 gramos de TiO_2 , 15 ml de ácido acético y 2 ml de Tritón X-100. Luego, se revolvió suavemente y se dejó reposar durante 15 minutos.

El siguiente paso fue la preparación y coloración del electrodo negativo. Para esto, se aplicó la solución de TiO_2 sobre la placa de vidrio del lado conductor, cubriéndola completamente, y se dejó secar antes de continuar. Utilizando una pipeta, se agregaron 3 ml del tinte de capsicina o fragaria, y se esperó a que se secara. Mientras se secaba el tinte, se prepararon 20 ml de suero casero, que se usaría para activar las celdas.

Luego, se procedió a preparar el electrodo positivo. El objetivo era obtener un color negro en el lado conductor de la placa, lo cual se logró quemándolo con la ayuda de un encendedor o disolviendo una pastilla de carbón para obtener el color negro deseado. Por último, para el montaje de la celda solar, se agregó suero a la placa que contenía el tinte de capsicina o fragaria. Se unieron las dos placas, asegurándose de que la parte pintada se alineara con la parte teñida de negro, con un pequeño desfase entre ellas, y se sujetaron con una o dos pinzas de folder. Finalmente, se utilizó un multímetro para observar el funcionamiento de la celda, midiendo la corriente eléctrica y el voltaje, como se muestra en la Fig. 3.



Fig. 3. Medición de la corriente y voltaje de la celda orgánica.

V. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una curva de corriente y voltaje es una representación gráfica que muestra la relación entre la corriente eléctrica y el voltaje en un dispositivo eléctrico, siendo esencial para el análisis de paneles solares. En estas curvas, se distingue un punto de máxima potencia (MPP) donde la potencia es máxima, junto con puntos clave de voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y corriente de cortocircuito (I_{sc}). La forma de la curva, su inclinación y su desplazamiento pueden variar según las condiciones ambientales. La identificación de estas características es crucial para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares en diferentes situaciones.

Es así, que se obtuvieron datos de voltaje, corriente y potencia al someter las celdas solares orgánicas sensibilizadas mediante el tinte de capsicina y fragaria a una radiación de 1000 W/m^2 en condiciones ambientales. Se realizaron las gráficas, mostradas en las figuras 4, 5, 6 y 7, las cuales representan la relación entre la corriente y el voltaje de un semiconductor, así como las curvas de potencia contra voltaje.

En la Fig. 4, se muestra la curva de la relación voltaje-corriente obtenida de la celda sensibilizada mediante fragaria, es notable que dicha curva es similar a la curva mostrada en la Fig. 1. Esto se puede notar por la curvatura que se genera entre el voltaje y la corriente máxima.

La Fig. 5 muestra una curva de potencia-voltaje en la que se observa un rendimiento menor debido a que el tinte no es muy eficiente.

En la Fig. 6 se presenta la curva de voltaje-corriente de la celda sensibilizada con tintes de fragaria y capsicina, de igual forma es de notar que corresponde a la gráfica de un semiconductor similar al mostrado en la Fig. 1. En comparación con la Fig. 3, se observa un resultado mejorado debido a sus características, como un pico más alto y un cálculo de eficiencia mejorado.

Finalmente, en la Fig. 7, se observa una mejora al comparar los datos de potencia-voltaje contra la curva con la mostrada en la Fig. 5. La Fig. 7 corresponde a la celda sensibilizada con la mezcla de tintes de fragaria y capsaicina.

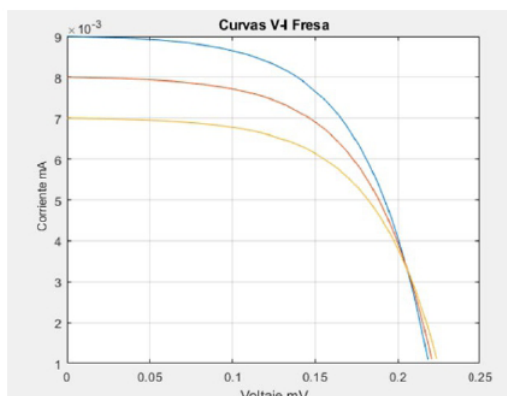


Fig. 4. Curva V-I fragaria.

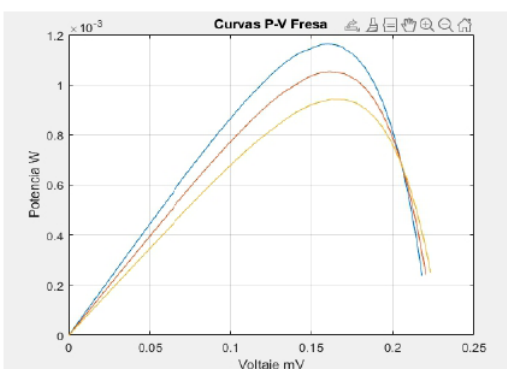


Fig. 5. Curva P-V fragaria.

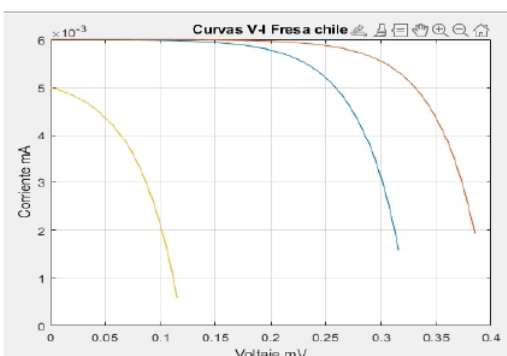


Fig. 6. Curva V-I fragaria más capsaicina.

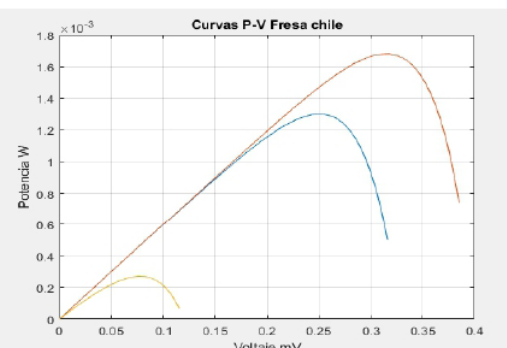


Fig. 7. Curva V-P fragaria más capsaicina.

Para el cálculo tanto de la eficiencia como del “fill factor” se tomaron en cuenta los valores máximos mostrados en la figura V_{max} e I_{max} , presentados en la Tabla I.

En el caso de la eficiencia de la celda, esta se calcula multiplicando el voltaje de circuito abierto por la corriente de cortocircuito y el “fill factor”, dividido por la radiación solar incidente en el área de 0.0125 m^2 . Los resultados de estos cálculos se muestran en la Tabla I, donde se observa el cálculo del “fill factor” y la eficiencia de la celda sensibilizada con tinte de fragaria.

TABLA I. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DEL FILL FACTOR, LA POTENCIA MÁXIMA Y LA EFICIENCIA EN LA CELDA DE FRAGARIA

Exp	Voc (volts)	Isc (Amps)	Vmax (volts)	Imax (Amps)	FF	Eficiencia
1	0.223	0.009	0.1628	0.007133	0.5786	0.0929
2	0.226	0.008	0.1611	0.006534	0.5822	0.0842
3	0.23	0.007	0.1618	0.005823	0.5851	0.0753

Por otro lado, al incorporar el tinte de capsaicina se lograron mejoras. En la Tabla I se muestran los datos obtenidos del “fill factor” y eficiencia, los cuales son, en términos generales, superiores en comparación con los de la Tabla I. De esta manera, se observa un aumento en la eficiencia al utilizar tanto el tinte de fragaria como la capsaicina.

TABLA II. CÁLCULOS DEL FILL FACTOR, LA POTENCIA MÁXIMA Y LA EFICIENCIA EN LA CELDA DE FRAGARIA MÁS CAPSAICINA

Exp	Voc (volts)	Isc (Amps)	Vmax (volts)	Imax (Amps)	FF	Eficiencia
1	0.328	0.006	0.254	0.005121	0.6609	0.1040
2	0.4	0.006	0.3176	0.005293	0.7004	0.1344
3	0.12	0.005	0.0765	0.00354	0.4513	0.0216

Los resultados de la Tabla I y, en particular, de la Tabla II, se compararon con otros trabajos. Un primer trabajo comparado fue el presentado por Mochamad C. (2014), en el cual se analizaron los resultados de “fill factor” y eficiencia de las celdas orgánicas utilizando fragaria (fresa), como se muestra en la Tabla III.

TABLA III. PARÁMETROS DE LA CELDA SOLAR DSSC [8]

pH solución en porcentaje de fresa	Isc (μA)	Voc (mV)	Imax (μA)	Vmax (mV)	FF	η ($10^{-3}\%$)
3.0	21	3.6	14	2.60	0.48	0.016
2.5	30	31.60	19	21.10	0.42	0.170
2.0	45	321.0	31	190.0	0.40	2.560

Por otro lado, un segundo trabajo en el artículo de A. Torchani, (2014) se analizan los datos del “fill factor” y eficiencia solo de la fresa, de la Tabla IV.

TABLA IV. PARÁMETROS FOTOELECTROQUÍMICOS DE LAS DSSC SENSIBILIZADAS CON COLORANTES NATURALES EXTRAÍDOS CON (A) ETANOL, (B) AGUA DESTILADA [6]

Tinte natural	Jsc (mA cm ⁻²)	Voc (mV)	FF (%)	η (%)
Remolacha b	0.76	370	39.01	0.109
Lombarda b	0.97	461	28.98	0.130
Espinaca a	0.55	460	53.12	0.134
Fresa b	1.33	465	37.10	0.229

La mayor eficiencia de las celdas solares orgánicas registradas y analizadas en esta investigación es del 0.14%. La eficiencia de conversión de fotones en función de la corriente depende de la captación de la luz incidente, específicamente, depende de la intensidad. La capacidad de supervivencia de este sensibilizador es intrigante, ya que, en comparación con las células solares de silicio, es menos costoso y más fácilmente disponible, lo que lo convierte en un reemplazo potencial. Sin embargo, la aplicación de pigmentos naturales como fotosensibilizadores puede traducirse en alternativas para el desarrollo de DSSC económicos y respetuosos con el medio ambiente.

Los tintes extraídos de plantas y frutos provenientes de la fresa fueron descritos en las Tablas III, IV y V, donde todas las tablas muestran el potencial de emplear este tinte en la fabricación de celdas solares. Es importante señalar que se debe buscar una forma diferente de obtener tinte de fresa que pueda aumentar la fuerza y la eficiencia de la conversión de energía, ya que los métodos de extracción propuestos tienen baja eficiencia en comparación con otros sensibilizadores. Por tanto, la eficiencia obtenida al mezclar los tintes en este trabajo fue de 0.1344, con un FF de 0.7, como se mostró en la Tabla II, siendo mayor al valor mostrado en la Tabla I de 0.0929, con un FF de 0.5786.

Los valores máximos indicados en otros estudios sobre la eficiencia solar para las celdas sensibilizadas por tinte de fresa son del 0.002560 por ciento, con un FF de 0.4, de acuerdo con la Tabla III [8], y del 0.229 por ciento, con un FF de 0.37, de acuerdo con la Tabla IV [6]. Por tanto, la eficiencia en estudio es mayor a lo presentado anteriormente sobre el tinte extraído de Fragaria.

VI. CONCLUSIONES

Con este experimento se demuestra que la celda orgánica sensibilizada utilizando tinte de fragaria más capsicina tiene mayor eficiencia. Aún está en fase de experimentación; por ello, es necesario realizar más pruebas. Hasta el momento, es un tinte prometedor. Sin embargo, es importante mencionar que se debe repetir el experimento en diferentes condiciones para mejorar la eficiencia. Como se ha podido observar a lo largo del análisis realizado a las celdas solares orgánicas sensibilizadas mediante tinte de fragaria y de fragaria más capsicina, se obtuvo un mayor rendimiento en la celda utilizada con tinte de fragaria más capsicina, lo que resultó en un aumento del "Fill Factor" y la eficiencia de la celda.

Es importante destacar que el proceso de fabricación es sencillo y económico. Por ello, la comparación con las celdas de silicio, que son costosas y a futuro pueden convertirse en un problema al no poder ser recicladas, es relevante. Debemos tener en cuenta esta última problemática, ya que las celdas orgánicas son reciclables. Comenzamos con las placas de vidrio, que pueden reutilizarse, las capas de dióxido de titanio y el tinte pueden retirarse fácilmente, además de que son biodegradables.

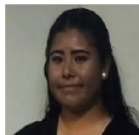
REFERENCIAS

- [1] J. F. Salinas Torres, "Fabricación y estudio de celdas fotovoltaicas basadas en polímeros y moléculas orgánicas", Maestro en Ciencias (Óptica), Centro de Investigaciones en Óptica A. C., León, Gto., 2009. Accedido el 19 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/460/1/13667.pdf>
- [2] C. S. Gaytan Rivera, A. Martínez Luévanos, E. Aguilera-González y C. Pérez Berumen. "Celdas Solares sensibilizadas con colorantes: Factores para mejorar su eficiencia". (accedido el 29 de junio de 2022). CienciAcierta. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2019/10/04/celdas-solares-sensibilizadas-con-colorantes-factores-para-mejorar-su-eficiencia/>
- [3] "Regiones productoras de fresa en México". ProducePay. Impulsando al Productor, de la Siembra a la Venta. accedido el 5 de julio de 2022 <https://es.producepay.com/regiones-productoras-de-fresa-en-mexico>.
- [4] W. Chamorro y S. Urrego Riveros. "Celdas solares orgánicas, una perspectiva hacia el futuro". accedido el 19 de julio de 2022. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/276307925_Celdas_solares_organicas_una_perspectiva_hacia_el_futuro.
- [5] S. energía. "¿En qué consisten las generaciones de los Paneles Solares? | Paneles solares". Paneles Solares en Playa del Carmen Instalación y venta. <https://solarenergia.mx/productos/en-que-consisten-las-generaciones-de-los-paneles-solares/> (accedido el 19 de julio de 2022).
- [6] A. Torchani et al., "Sensitized solar cells based on natural dyes," *Current Applied Physics* 15.3, vol. 15, no. 3, pp. 307-312, 2015.
- [7] T. S. Senthil, N. Muthukumarasamy, y M. Kang, "ZnO nanorods based dye sensitized solar cells sensitized using natural dyes extracted from beetroot, rose and strawberry." *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 35, no. 4, pp. 1050-1056, 2014
- [8] M.C. Misbachudin, F.S. Rondonuwu and A. Sutresno, "Pengaruh pH Larutan Antocianin Strawberry dalam Prototype Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)," *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 10, no. 2, pp. 57-62, 2014.
- [9] G.N. Tiwari, "Solar energy: fundamentals, design, modeling and applications," New Delhi: Alpha Science Int'l Ltd, 2002.

BIOGRAFÍAS



JOSÉ SABÁS SEGURA Maestro en Eficiencia Energética y Energías Renovables por el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec y la Fachhochschule Südwestfalen campus Soest (Alemania). Actualmente es profesor de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasolo desde el año 2015. Ha publicado un total de 9 artículos científicos en revistas nacionales e internacionales con riguroso arbitraje, así como 9 artículos de divulgación científica en varias revistas nacionales.



VICTORIA CARRILLO CORONA Estudiante de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasolo. Se ha destacado por su participación en el Verano de la Ciencia Región Centro 2022, así como en eventos de innovación del TECNM.



OMAR DANIEL CORRAL GARCÍA Maestro en Educación con enfoque en Educación en Línea por la Universidad Virtual del Estado de Guanajuato. Actualmente es profesor de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasolo desde el año 2015. Ha participado en proyectos de instalación de paneles fotovoltaicos aislados, para alimentación de telefonía rural satelital en el estado de Guanajuato y se encuentra certificado en el estándar de competencia laboral en Instalación de sistemas fotovoltaicos en residencia, comercio e industria con clave EC0586 por la ANCE.

Biorrefinería energética a partir de residuos de aguacate (*Persea americana* cv. "Hass")

JESÚS EDUARDO VALDEZ-ONTIVEROS¹, KARLA ALELY PERAZA-REGALADO¹, HECTOR MANUEL URIBE-FLORES¹, MARA FERNANDA JUAREZ COTA², 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.

dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN El uso de los biocombustibles, producidos a partir de materias primas renovables, se presenta como una opción para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. En el caso de México, donde el 90.2% de la energía proviene de combustibles fósiles, el aguacate Hass "*Persea americana*" se destaca como una fuente valiosa para la producción de biocombustibles debido a su alta producción y relevancia económica. Se realizó una caracterización de la semilla, analizando su contenido de humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos fijos, contenido de cenizas y contenido de aceite. La semilla contuvo un 52.82% de humedad, 95.68% de sólidos totales y 97.78% de sólidos volátiles. La extracción de aceite de la semilla mediante la técnica soxhlet mostró un bajo rendimiento de solo 3.6%. Sin embargo, las pruebas de producción de metano en biorreactores revelaron un buen potencial metanogénico, obteniendo una producción total acumulada de 280.153 mL/g de sólidos volátiles para la semilla completa con el inóculo proporcionado Be-Gaia. Aunque la extracción de aceite no alcanzó un resultado aprovechable, la semilla de aguacate Hass mostró promesa como materia prima para la producción de biocombustibles, especialmente en la generación de biogás. La semilla de aguacate Hass "*Persea americana*", contuvo una cantidad significativa de sólidos volátiles, lo que sugiere su potencial para la transformación en biocombustibles.

PALABRAS CLAVE — Biorrefinería, aguacate, biodiésel, biogás.

I. INTRODUCCIÓN

A. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA POR COMBUSTIBLES FÓSILES

En la búsqueda continua por encontrar alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente para satisfacer nuestras crecientes necesidades energéticas, el desarrollo de fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad global. Durante décadas, la principal fuente de energía de la humanidad ha mostrado una clara inclinación hacia los combustibles fósiles, comprendiendo el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial; relacionándose con esto, casi dos tercios de las emisiones globales de dióxido de carbono [1]. En México, el consumo de energía a partir de combustibles fósiles asciende al 90.2% [2]. Su explotación desmedida ha tenido un impacto significativo en el cambio climático y la degradación del medio ambiente.

B. BIOCOMBUSTIBLES, FUENTE ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

En respuesta a la problemática de los combustibles fósiles, los biocombustibles se presentan como una alternativa esperanzadora, ya que ofrecen la posibilidad de reducir la dependencia de los carburantes fósiles y, al mismo tiempo, pueden aportar a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos productos, son generados a partir de materias primas renovables y se considera que

pueden jugar un papel fundamental en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible [3]. En México la capacidad instalada para generar energía a partir de la biomasa es de alrededor de 640 MW con una generación de 1,400 GWh. La producción de bioenergía está presente en 21 estados, siendo Veracruz el líder con 264 MW de capacidad instalada. El recurso principal es el bagazo, residuos agrícolas y desechos orgánicos de origen vegetal o animal [4].

C. EL AGUACATE PERSEA AMERICANA "HASS" EN MÉXICO

En el contexto específico de México, un país con una rica diversidad de recursos naturales y una relevante producción agrícola, el aguacate "Hass" (*Persea americana* "Hass"), además de ser un fruto apreciado a nivel mundial, presenta un potencial inexplorado como fuente de biocombustibles. México es uno de los principales productores y exportadores de aguacate, y el cultivo del aguacate "Hass" ha experimentado un considerable crecimiento en los últimos años. Su producción ha alcanzado las 2.4 millones de toneladas para el año de 2020 en México, de esta manera, representando el 43% de la producción mundial [5].

D. USO DE SEMILLA RESIDUAL DE AGUACATE PARA BIOCOMBUSTIBLE

La producción de biomasa residual originada a partir del sector del aguacate proviene de la gran cantidad de

Congreso Internacional de Energía UG, 27 – 29 de septiembre de 2023

fabricantes de guacamole que generan subproductos con un alto contenido de materia orgánica transformable en energía, ya sea para la producción de energía térmica u obtención de biocombustibles. El principal residuo de esta industria es la semilla de aguacate, que podría ser un importante biocombustible, aunque su potencial como biomasa no se ha explorado de manera importante. Perea-Moreno et al. [6] analizaron varios parámetros de este subproducto, tales como humedad (35.2%), poder calorífico superior o PCS (19.145 MJ/kg), poder calorífico inferior o PCI (17.889 MJ/kg), y la composición elemental (48.01% de carbono, 5.755% de Hidrógeno, 0.447% de nitrógeno), contenido de cenizas (2.86%) y contenido de aceite (1.715%). Se estableció una correlación entre el análisis elemental y los valores más altos de calentamiento (PCS) de la semilla de aguacate, lo que indica que este material tiene potencial como fuente de biocombustible [6].

Si bien es conocida la versatilidad de esta semilla como material para diversos usos, incluidos productos cosméticos y alimenticios, sólo se han esbozado algunos intentos de aprovechar la semilla residual de aguacate como fuente energética, y además en la actualidad hay muy pocos reportes del aprovechamiento integral de la biomasa mediante esquemas de biorrefinerías. Por lo que en el presente trabajo, se exploró el potencial de la semilla residual de aguacate "Hass" como fuente de una biorrefinería energética para la obtención en cadena de biodiésel y biogás (a partir de la biomasa completa y desgrasada); lo que puede representar una solución prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y, a su vez, contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, avanzando hacia un futuro energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES Y MÉTODOS

La biomasa residual de semilla de aguacate *Persea americana* "Hass" fue recolectada de taquerías locales de la ciudad de Mazatlán, Sinaloa.

B. METODOLOGÍA

1. Caracterización de la semilla de aguacate e inóculos (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) [7]. Para la determinación de humedad, se realizó una prueba por triplicado empleando semillas de aguacate de un peso aproximado de 29.5 g. Se pesaron los platos (W_{platos}) y las muestras (W_{muestra}) y se

ingresaron a un horno de secado Novatech® HS35-ED) a 70 °C durante 48 horas. Transcurrido ese tiempo, se tomó el peso total seco del recipiente con la muestra y se comparó con el peso total inicial que se tenía para obtener el porcentaje de humedad de la semilla completa.

Para el cálculo 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 la 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 en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente (25°C) y se registró el peso (W_{total}). Las pruebas se realizaron por triplicado y el resultado se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar. Para el caso de la caracterización de los Lodos Activados de Be-Gaia (LABG) y los Lodos Activados de Tostaditas Blancas (LATB) se realizó el mismo proceso, pero con muestras de 6 g. Para el cálculo del porcentaje de sólidos totales se empleó la ecuación Ec. (1) [7].

$$\%ST = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{muestra}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (1)$$

Para la determinación de SV y los SF, los crisoles con las muestras secas se calcinaron utilizando una mufla a 550°C durante 20 horas, posteriormente el residuo fue 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 Ecs. (3) y (4) [7].

$$\%SV = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{volátil}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\%SF = \frac{W_{\text{volátil}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (3)$$

2. Preparación de la semilla de aguacate.

Las semillas fueron preparadas mediante secado en un horno de secado (Novatech® HS35-ED) a 70 °C durante 48 horas con la finalidad de ablandar el material. Posteriormente, se trituro y molió la semilla hasta obtener una harina fina con el objetivo de contar con mayor superficie de contacto con el disolvente y alcanzar la mejor extracción de aceite posible.

Con la harina de aguacate se prepararon 3 muestras de aproximadamente 63 gramos cada una, envueltas en papel filtro de celulosa para su ingreso al equipo de extracción soxhlet.

3. Extracción de aceite de la semilla de aguacate.

El método de extracción de aceite mediante la técnica soxhlet utilizado sigue la metodología propuesta por la

Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [8]. En la Fig. 1 se muestra el montaje del equipo soxhlet para el proceso de extracción. Se empleó como solvente la mezcla metanol-cloroformo (2:1), la prueba se realizó por triplicado y se representó como promedio con desviación estándar.

Posteriormente, el producto se sometió a un rotavapor a 60°C para la extracción de la mezcla de solventes, como se muestra en la Fig. 2. El porcentaje de aceite extraído se calculó por la diferencia de peso mediante Ec. (4).

$$\% \text{ Aceite} = \frac{(\text{Matraz} + \text{Aceite}) - \text{Matraz}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (4)$$

La biomasa residual desgrasada de semilla de aguacate se secó a 60 °C durante 24 horas para eliminar el exceso de solventes y se almacenó (4 ± 1 °C) para su posterior uso.

4. Cálculo de sustrato e inóculo para la prueba de potencial metanogénico.

Para la determinación de la cantidad de gramos de SV a añadir en los reactores para llevar a cabo la digestión anaerobia, se empleó la relación 2:1 para inóculo y sustrato, respectivamente, para 45 mL de mezcla (volumen de trabajo). Los sustratos empleados fueron tanto la harina de semilla de aguacate completa, como la obtenida a partir de residuos de semilla de aguacate desgrasada, resultante del proceso de extracción de aceite descrito en el punto 3. Los inóculos con los que se realizaron las pruebas fueron lodos activados proporcionados por las empresas "Be-Gaia" y "Tostaditas Blancas".

5. Carga de biorreactores.

Se realizaron pruebas por triplicado para cada sustrato con ambos inóculos. Para el caso del inóculo Be-Gaia, se determinó emplear 0.5681 g de sustrato de semilla completa y 0.5551 g de sustrato de semilla desgrasada para 0.5315 gSV del inóculo. Por otro lado, para el caso del inóculo proporcionado por Tostaditas Blancas, se emplearon 0.5800 gSV de inóculo para 0.6199 g de sustrato de semilla completa y 0.6057 g de sustrato de semilla desgrasada.

6. Determinación de potencial metanogénico.

Se llevaron a cabo pruebas de potencial metanogénico mediante un proceso de lotes en triplicado haciendo uso de 2 inóculos distintos. Para las pruebas de producción de metano se estableció un conjunto de biorreactores de vidrio con capacidad de 60 mL, los cuales fueron sellados herméticamente haciendo uso de un septum para posteriormente realizar pruebas periódicamente. Para las muestras se manejó una relación de 2:1 en proporción de inóculo y sustrato, cada biorreactor se trabajó con un volumen de 45 mL.

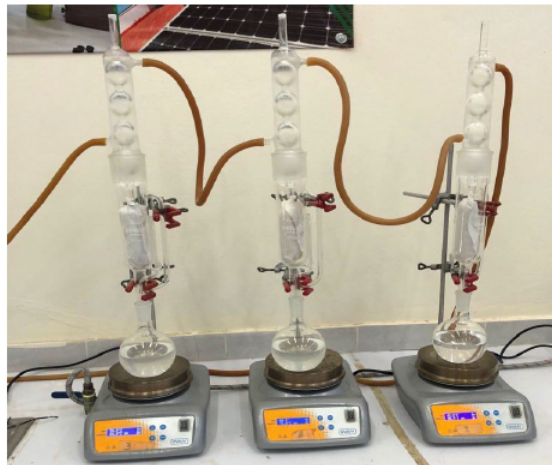


Fig. 1. Equipos de extracción Soxhlet. Elaborado por fuente propia.



Fig. 2 Extracción de solvente con rotavapor. Elaborado por fuente propia.

Se empleó una temperatura constante de 37 ± 1 °C para la digestión anaeróbica, con un tiempo de retención hidráulica de 42 días, todos los biorreactores fueron homogenizados diariamente mediante agitación manual para asegurar la mezcla adecuada del inóculo con el sustrato [9].

El volumen de metano se midió usando un eudiómetro con desplazamiento de NaOH (1N), además se efectuaron mediciones con biorreactores que contenían solamente inóculo (utilizados como blancos) para obtener la producción endógena de estos (para restarlo a la producción de los demás biorreactores que contienen mezcla de sustrato e inóculo para el ajuste de producción de metano) [9].

III. RESULTADOS

A. CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE

La cantidad de sólidos totales, volátiles y fijos obtenidos por la metodología propuesta [8] se muestran en la Tabla I. El contenido de humedad de la semilla de aguacate completa fue de 52.82 ± 0.030 %, cifra cercana a la obtenida en un estudio previo de caracterización de este tipo de materiales,

donde el porcentaje de humedad para la semilla de aguacate fue de 44.4 ± 1.9 [10].

En cuanto a los sólidos totales, resulta interesante que la variación entre ambos sustratos es muy baja, siendo de 2.54 %, lo que podría ser un indicador de que la extracción de aceite fue relativamente baja. En cuanto a sólidos volátiles, se reportó un valor alto, de aproximadamente 97 % para ambos sustratos, cifra bastante significativa si se toma en cuenta que esto representa la materia orgánica que puede ser aprovechable para su transformación y utilización.

En la **Tabla II** se comparan los parámetros de humedad, contenido de cenizas y de aceite obtenidos de la semilla de aguacate con otras fuentes de biomasa actualmente utilizadas para biocombustibles. Se toman de ejemplo la semilla de oliva y la cáscara de almendra. Comparando los resultados con J. Mata [10] y N. Gómez [11], el porcentaje de humedad de la semilla de aguacate triplica casi a la humedad presentada en la semilla de oliva, y es seis veces mayor a la cáscara de almendra. Por otro lado, el porcentaje de sólidos volátiles se encuentra más de 10 % por arriba de las otras dos fuentes. Mientras que el contenido de cenizas respecto a la semilla de oliva difiere un 1.45 % y un 1.72 % de la cáscara de almendra. Esto indica que el material del presente estudio tiene buen contenido de materia orgánica para aprovecharse en la generación de productos de interés.

B. EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA SEMILLA DE AGUACATE

La obtención de aceite promedio de las tres muestras por el método soxhlet fue de 3.6 ± 0.099 %, lo que se considera un valor bajo para este tipo de materiales. Teniendo en cuenta que la extracción se llevó a cabo por un método químico, el cual no es empleado en el área industrial debido a su alto costo, una extracción por un método mecánico como lo sería el prensado (método más popular industrialmente) tendría un porcentaje de extracción menor lo cual podría afectar la factibilidad de la generación de aceite, esto podría mejorarse utilizando otro solvente que pudiera arrastrar una mayor cantidad de lípidos del material.

C. POTENCIAL METANOGENICO DE LA SEMILLA DE AGUACATE

La producción de metano por gramos de sólido volátil acumulada a partir de semilla de aguacate completa y semilla de aguacate desgrasada bajo las condiciones de operación utilizadas en este estudio, y con respecto a cada uno de los dos lodos activados utilizados, se presentan en las **Fig. 3** y **Fig. 4**.

Tras 42 días, la producción total acumulada correspondiente al primer inóculo fue de 280.153 mL CH_4/gSV para la harina de semilla de aguacate completa, y

de 172.803 mL CH_4/gSV para la harina de semilla desgrasada. Sin embargo, la mejor producción obtenida fue con los lodos activados Be-Gaia, obteniéndose un total de producción acumulado de 340.610 mL (CH_4/gSV) para la harina de semilla de aguacate completo, y un total de 178.947 mL (CH_4/gSV) para la harina de semilla de aguacate desgrasada.

Con los lodos de Tostaditas Blancas, se observó un comportamiento muy uniforme a partir del día 7 de digestión, lo que indica que a partir de ese tiempo la producción fue prácticamente nula, a pesar de que en los primeros días produjo de forma rápida. En general, el comportamiento en con el inóculo de Tostaditas Blancas fue bastante similar para ambos sustratos.

Algunos autores determinan que el potencial bioenergético con productos del aguacate es una opción viable, específicamente hablando del potencial metanogénico de este fruto se han reportado como el rendimiento de biogás de la semilla y cáscara de aguacate es de 201 mL/g y 28 mL/g, respectivamente; valores que concuerdan con los resultados obtenidos en el presente trabajo [12].

TABLA I. CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE (COMPLETA Y DESGRASADA).

Materia orgánica	H (%)	ST (%)	SV (%)	SF (%)
Semilla de aguacate completa	52.82 $\pm$ 0.030	95.68 $\pm$ 0.004	97.78 $\pm$ 0.002	2.22 $\pm$ 0.002
Semilla de aguacate desgrasada	1.78 $\pm$ 0.004	98.22 $\pm$ 0.004	97.49 $\pm$ 0.001	2.51 $\pm$ 0.001

H = Humedad; ST = Sólidos totales; SV = Sólidos volátiles; SF = Sólidos fijos o cenizas. Cada valor representa un promedio del triplicado con desviación estándar.

TABLA II. COMPARACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE CON OTRAS FUENTES DE BIOMASA.

	Semilla de Aguacate	Semilla de Oliva [10]	Cáscara de Almendra [11]
Humedad (%)	52.82	18.45	7.63
Sólidos Volátiles (%)	97.78	82.47	82.14
Contenido de Cenizas (%)	2.22	0.77	0.5

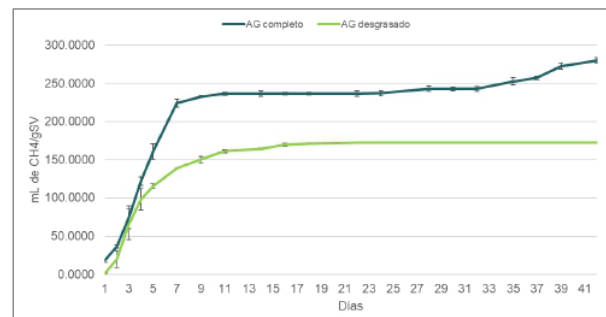


Fig. 3. Producción de mililitros de metano por gramos de sólido volátil con el inóculo LATB.

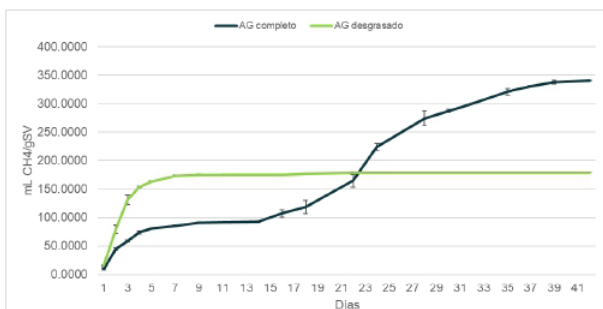


Fig. 4. Producción de mililitros de metano por gramos de sólido volátil con el inóculo LABG.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la semilla de aguacate cuenta con un porcentaje de materia prima aprovechable bastante alto, sin embargo, el rendimiento del proceso de extracción de aceite (bajo nuestras condiciones experimentales) es muy bajo, lo que no lo vuelve rentable en caso de que se deseara producir biodiesel o algún otro producto derivado del aceite. Habría que realizar más pruebas sobre las propiedades del aceite resultante para determinar si podría destinarse a la elaboración de alguno de los productos antes mencionados.

Por otro lado, los resultados de la generación de biogás fueron significativamente altos, probando así que la semilla de aguacate completa cuenta con un buen potencial metanogénico al haber alcanzado una producción de entre 280 y 340 mL de metano por gramo de sólido volátil agregado al reactor. De igual forma, aun cuando la producción con semilla desgrasada fue menor, se observó un comportamiento similar en producción con ambos inóculos, teniendo una producción promedio de 175.8748 mL CH₄/gSV.

Aunque falta mejorar el proceso de extracción el presente trabajo puede ser un parteaguas para el aprovechamiento integral de este importante subproducto industrial, lo que permitiría aportar a la generación de energía accesible y a la disminución de la contaminación derivada de esta importante industria.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN) por brindarnos el apoyo con sus equipos e instalaciones.

REFERENCIAS

- [1] S. Foster y D. Elzinga, «Naciones Unidas», 1 noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>.
- [2] Agencia Internacional de Energía, «Banco Mundial», 2015. [En línea]. Disponible en:

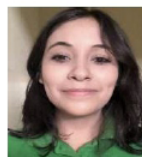
<https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS?locations=MX>

- [3] R. Cunningham, Biocombustibles como alternativa de los combustibles fósiles: ¿solución integral o apenas un paliativo?, 2007.
- [4] OISE, «Observatorio de Inteligencia del Sector Energético», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.oise.mx/biomasa>.
- [5] D. F. Cruz-López, I. Caamal-Cauch, V. G. Pat-Fernández y J. Reza Salgado, «Competitividad de las exportaciones de aguacate Hass de México en el mercado mundial», *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2022.
- [6] A. J. Perea Moreno, M. J. Aguilera Ureña y F. Manzano Agugliaro, «Fuel properties of avocado stone», *FUEL*, vol. 186, pp. 358-364, junio 2016.
- [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=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%5C1002CZ8.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] AOAC. 1999. Official Methods of Analysis International. 17th Edition, Association of Analytical Communities, Gaithersburg.
- [9] D.U. Santos-Ballardo, X. Font-Segura, A. Sánchez-Ferrer, R. Barrena, S. Rossi, A. Valdez-Ortiz, «Valorisation of biodiesel production wastes: Anaerobic digestion of residual *Tetraselmis suecica* biomass and co-digestion with glycerol», *Waste Management & Research*, vol. 33, no. 3, pp. 250-257, 2015.
- [10] L. Di Bitonto, H. Reynel-Avila, D. Mendoza-Castillo, C. Pastore & A. Bonilla-Petriciolet, «Valorization of mexican waste biomasses for bioenergy applications», National Technical University of Athens.
- [11] J. Mata-Sánchez, J.A. Pérez-Jiménez, M.J. Díaz-Villanueva, A. Serrano, N. Núñez-Sánchez, F.J. López-Giménez, «Statistical evaluation of quality parameters of olive stone to predict its heating value», *Fuel*, vol. 113, pp. 750-756, 2013.
- [12] N. Gómez, et al., «Slow pyrolysis of relevant biomasses in the Mediterranean basin. Part 1. Effect of temperature on process performance on a pilot scale», *J of Clean Prod.* Vol. 120, pp. 181-90, 2016.
- [13] C. E. Orrego Alzate y C. A. Cardona Alzate, *Informe técnico sobre propuestas de desarrollo de biorrefinerías a partir del uso de residuos de cosecha, postcosecha e industrialización de la fruta fresca, para su aprovechamiento en la producción de energía u otros subproductos*. Colombia: Fontagro, 2020.

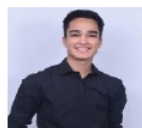
BIOGRAFÍAS



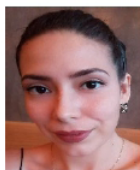
JESÚS E. VALDEZ ONTIVEROS Actualmente cursa la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son las energías renovables y las plantas generadoras de energía.



KARLA A. PERAZA REGALADO Actualmente cursa el noveno cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Experiencia en análisis de potencial energético. Sus líneas de interés son las matemáticas, las energías renovables y la cogeneración eficiente.

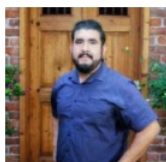


HÉCTOR M. URIBE FLORES Actualmente es estudiante de noveno cuatrimestre de Ingeniería en Energía de la Universidad Politécnica de Sinaloa. Sus líneas de interés son la política energética, soluciones energéticas y las energías renovables.



MARA F. JUÁREZ COTA Maestrando en Desarrollo Sustentable en el Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas en la 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 fotovoltaicas.

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 bioenergético de residuos agroindustriales de Chile Poblano (*Capsicum annum variedad Poblano*)

JOSELYN GUADALUPE LEZAMA-ROSAS¹, BRANDON ARMENTA-MEDEL¹,
MARA FERNANDA JUÁREZ-COTA², DULCE LIBNA AMBRIZ-PÉREZ^{2,3},
DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{2,3}

¹Licenciatura en Biotecnología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

²Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

³Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

joselyn.lezamar@alumno.buap.mx

armentabrandon56@gmail.com

mfjuarezcota@gmail.com

dambritz@upsin.edu.mx

dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN Uno de los temas de gran interés es encontrar materias primas para generar biocombustibles que presenten potencial adecuado y que además aporten a la disminución de la contaminación. Es por ello que, el presente artículo tiene la finalidad de analizar el potencial energético de semillas de chile poblano desechadas por una empresa agroindustrial ubicada en Sinaloa, buscando desarrollar un esquema de biorrefinería energética mediante la obtención de aceite para biodiesel y el aprovechamiento de la biomasa desgrasada como fuente de biogás; como resultado se obtuvo un porcentaje de extracción de aceite de $18.125\% \pm 1.86$ y una producción entre 238 y 417 mililitros de metano por gramo de sólido volátil al reactor. Tomando en cuenta la escasez de reportes del aprovechamiento de estos residuos de la industria del chile poblano, estos resultados pueden ser un parteaguas para la posible explotación de este tipo de materiales.

PALABRAS CLAVE — Biocombustibles, biorrefinería, biomasa, chile poblano.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible es una meta que la sociedad debe considerar prioritaria, para alcanzarla es necesaria una adecuada utilización de los recursos y la tecnología que actualmente se encuentran disponibles. Sin embargo, para que exista un crecimiento en el modelo económico, hay una estrecha relación con la expansión de la producción y, por ende, con el consumo creciente de energía [1]. Por otro lado, los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidos a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Además, globalmente, la causa principal del incremento en las emisiones de éstos GEI son las actividades relacionadas con el sector energético que representan 26% de las emisiones, seguido del sector industrial con 19% [2].

Para lograr una contención del crecimiento de las emisiones de GEI, es necesario, disminuir el uso de combustibles fósiles, con el fin de reducir las emisiones de dióxido de carbono [1]. Es por ello, que se buscan alternativas que formen parte de un modelo energético sostenible y que ayuden a satisfacer las necesidades presentes en la sociedad.

La utilización de biomasa como modelo energético podría constituir una de las fuentes de energía de mayor interés al buscar una alternativa viable y sostenible. Es entonces, que los biocombustibles pueden ser considerados un paso al desarrollo de energía renovable [1,2].

Sin embargo, una de las tendencias actuales en el aprovechamiento de este tipo de recursos se basa en la explotación integral de la biomasa, mediante un enfoque orientado hacia las biorrefinerías, esto con el fin de utilizar los recursos orgánicos con las políticas de cero residuos; usualmente buscando además de un producto energético, otra serie de bienes que complementen el balance energético y económico de dicha producción de biocombustibles [3].

Por otro lado, los biocombustibles generados a partir de biomasa se han clasificado de acuerdo con su origen en generaciones: la primera generación, son recursos naturales que se pueden utilizar también como alimento; la segunda generación en donde se usan materiales vegetales que no son alimento y residuos (como desechos agroindustriales) y la tercera generación basada en microorganismos [4].

La utilización de residuos agroindustriales para obtención de biocombustibles es de suma importancia en nuestro país,

Congreso Internacional de Energía UG, 27 – 29 de septiembre de 2023

esto debido a que en México se generan aproximadamente 76 millones de toneladas de residuos orgánicos al año, resultando en que la gran mayoría son desechados sin un tratamiento a cuerpos de agua o al aire, provocando una gran problemática de carácter ambiental [5,6].

De acuerdo con esto, México es productor de diferentes productos vegetales, que actualmente son explotados por el sector agroindustrial. Uno de ellos es el chile, en sus diversas variedades; este producto tiene una gran importancia sociocultural, económica y gastronómica desde hace miles de años. En la república mexicana, se producen diversas variedades, entre ellas se encuentra el chile verde del cual se cultivan alrededor de 158,000 hectáreas, generando una producción promedio de 3.3 millones de toneladas anuales, convirtiéndose en el segundo productor a nivel mundial después de China [7].

Una parte importante de esta producción de chile verde es dedicada exclusivamente al chile poblano, una variedad endémica de la que se ha logrado su domesticación, alcanzando una gran producción y fomentando el consumo de este producto, trascendiendo en la comida mexicana gracias a su olor y sabor tan característico [6], por otro lado, una parte importante de esta producción se usa en el sector agroindustrial para la generación de salsas y pastas, traducándose esto en la acumulación de materia orgánica residual (principalmente en forma de semillas), es importante aprovechar estos subproductos para disminuir la carga orgánica que esta industria libera al ambiente [7].

El presente estudio, busca una alternativa energética basada en las biorrefinerías mediante el aprovechamiento de los residuos agroindustriales de la industria del chile poblano; buscando aportar en la disminución de la contaminación generada en la generación de alimentos, y promoviendo el desarrollo de tecnologías y procesos sostenibles.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

Las semillas de chile poblano fueron donadas por la empacadora “Agro negocios San Juan” S.A. de C.V., (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. Extracción de aceites.

El trabajo de investigación se realizó en la Universidad Politécnica de Sinaloa, en donde se acondicionaron las semillas para posteriormente realizar la extracción mecánica de los aceites de la harina seca de semillas de chile poblano por prensa expeller automática (modelo MLM-1515130776), este proceso fue realizado en la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra, donde se emplearon dos muestras de 400 g de semilla seca molida.

2. Determinación de Sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ).

Los contenidos de sólidos totales (ST), Humedad (H), sólidos volátiles (SV) y Cenizas (CZ) se evaluaron según lo reportado por la EPA (Agencia de protección ambiental de Estados Unidos, por sus siglas en inglés) [8].

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) [8].

$$\%ST = \frac{P_{total} - P_{crisol}}{P_{muestra} - P_{crisol}} \times 100 \quad (1)$$

La humedad se calculó por diferencia donde la suma se humedad y ST es el 100 % de la materia.

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 Ec. (2) y (3) [8].

$$\%SV = \frac{P_{total} - P_{volátil}}{P_{total} - P_{crisol}} \times 100 \quad (2)$$

$$\%CZ = \frac{P_{volátil} - P_{crisol}}{P_{total} - P_{crisol}} \times 100 \quad (3)$$

3. Producción de biogás.

Para la producción de biogás se realizó la carga de los biorreactores, utilizando la biomasa previamente desgrasada del chile poblano como sustrato, esto se realizó por triplicado, en reactores de vidrio de 60 mL sellados con tapas de aluminio con septum hermético de politetrafluoroetileno (PTFE), utilizando un volumen de trabajo de 45 mL. Los reactores se agitaron manualmente de manera diaria, el experimento se mantuvo a 37 ± 1 °C [9].

Para la digestión de los biorreactores, se requiere la presencia de inóculos, para ello se utilizaron lodos activados

provenientes de las plantas tratadoras de agua de dos industrias pertenecientes al estado de Sinaloa, “Tostaditas blancas” (LA-TB) y “Be Gaia” (LA-BG). Se utilizó una relación 2:1 en inóculo:sustrato. Para la carga de biorreactores se utilizó la Ec. (4) [10]

$$gSV = \frac{vol}{m}(ST)(SV) \quad (4)$$

Al realizarse la prueba, se utilizó el método de eudiometría, donde se utilizó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1N, esto con la intención de generar una trampa de metano CH₄, para atrapar el dióxido de carbono (CO₂) producido por los reactores y de esta manera medir el biogás producido por los mismos. Se realizaron pruebas con reactores cargados solamente con inóculo (Pruebas blanco), esto para eliminar la producción endógena de los inóculos y presentar solamente la producción relacionada con el sustrato [9, 10].

C. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Extracción de aceites.

El porcentaje de aceite extraído de la semilla de chile poblano fue de 18.12 % ± 1.86, los resultados obtenidos se sitúan dentro del rango de lo que se ha reportado previamente por otros autores, donde se han obtenido porcentajes de extracción con un rango entre: 10 - 38 %, esto para otras variedades de chiles incluyendo jalapeños, pimientos rojos, chiles verdes, entre otros [11, 12, 13, 14]. El único reporte donde se muestra directamente extracción de aceite de semilla de chile poblano obtuvo un porcentaje de aceite extraído de 15.98 % ± 1.93, esto a través del método Soxhlet [10].

De acuerdo con los resultados obtenidos, se demuestra que la semilla residual de Chile poblano pudiera tener un buen potencial para ser utilizado como biodiesel, sin embargo, es necesario realizar diversas pruebas que complementen el resultado obtenido, tal es el caso de un índice de saponificación, índice de acidez, perfil de ácidos grasos, etc., todo esto con el propósito de garantizar una buena calidad del potencial biocombustible a generar [13].

Se ha reportado análisis de aceites a partir de semillas otras variedades de chiles, tal es el caso del chile verde, en donde se encontró un porcentaje de 26% de aceites y una eficiencia en la reacción de la transesterificación de entre 88 y 95%, es por ello, que deducimos el potencial que podría existir en el chile poblano y que sería bastante prometedor para su uso en biodiesel [14].

Es importante resaltar, que a pesar del buen contenido lipídico que demuestran las semillas de chile poblano y que pudiera proyectarlo para el desarrollo de biocombustibles, no existe ningún estudio en donde se haya aprovechado este material para desarrollar biodiesel y probarlo, por lo que el

interés sobre la explotación de este subproducto incrementa y favorece en gran medida a la cultura científica.

2. Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ).

Los resultados obtenidos de la determinación de ST, SV y CZ se reportan en la Tabla I. Donde se determinó, que el porcentaje de ST representan el 93.7879 ± 2.8762 %, con humedad de 6.2121 ± 2.8762 %. Con respecto a SV, se reportó un porcentaje de 82.4417 ± 1.5764 %, este parámetro es bastante importante, ya que representa la cantidad de materia orgánica que se tiene disponible para transformación, los resultados sugieren que la biomasa desgrasada de la semilla de chile tiene un gran porcentaje de material que puede ser aprovechado, en cuanto a las cenizas se detectó un porcentaje de 17.5583 ± 1.5764 %, este representa el material inorgánico que no puede ser aprovechado en procesos bioquímicos, para materiales que se buscan aprovechar en producción de biogás es deseable que se mantengan porcentajes bajos [10,11].

3. Producción de biogás.

Los biorreactores tuvieron un tiempo de retención hidráulica de 18 días y mostraron resultados bastante significativos en cuanto a la producción de biogás, como se puede observar en la Fig. 1 referente a la producción diaria de chile poblano con lodos activados de tostaditas blancas (LATB) y Fig. 2, en donde se reporta la producción acumulada de chile poblano con el mismo inóculo.

TABLA I. SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES DE LA SEMILLA DE CHILE POBLANO.

	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)
Semilla de chile poblano	93.7879 ± 2.8762	82.4417 ± 1.5764

Cada valor es un promedio de triplicado ± desviación estándar.

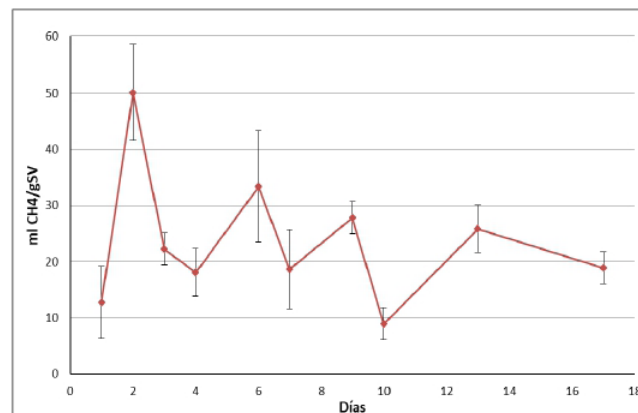


Fig. 1. Producción neta diaria de la producción de chile poblano con lodo activado de tostaditas blancas.

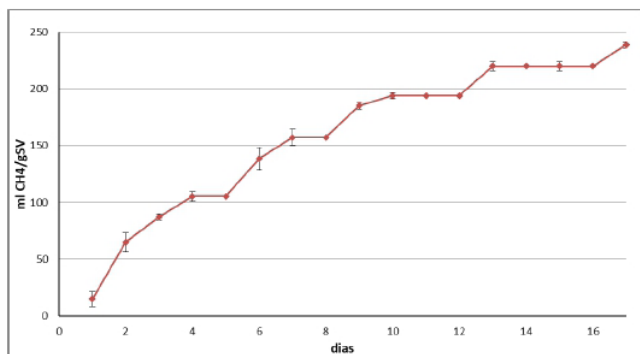


Fig. 2. Producción acumulada diaria de la producción de chile poblano con lodo activado de tostaditas blancas.

Del mismo modo, se presentan los resultados obtenidos en la digestión con inóculo obtenido de la empresa BeGaia, en la Fig. 3 y Fig. 4.

De acuerdo con los gráficos, para el inóculo de LATB se puede observar un comportamiento normal en este tipo de experimentos, donde la producción más importante de biometano se produce generalmente en los primeros días de la digestión y con el tiempo el biogás acumulado empieza a disminuir paulatinamente, por otro lado con el inóculo LABG mostró una fase de adaptación o de latencia en la que los primeros días no hubo generación importante de metano, si no que a partir del día 8 se generó una producción gradual conforme los días fueron transcurriendo y con ello, se obtuvo un mejor rendimiento del biogás [3,10].

La producción acumulada para la biomasa desgrasada de chile poblano fue de 238.81 ± 2.83 ml CH₄ /gSV para el inóculo LATB, y de 417.34 ± 1.15 ml CH₄/gSV para el inóculo LABG, se observa una clara diferencia (Fig. 5). Esta diferencia puede deberse posiblemente a una mayor afinidad del inóculo LABG por el tipo de sustrato que se procesa, es importante mencionar que no se conoce a ciencia cierta los consorcios bacterianos que forman a los inóculos y que ese es un factor muy importante para el rendimiento de metano en la digestión anaeróbica [9,10].

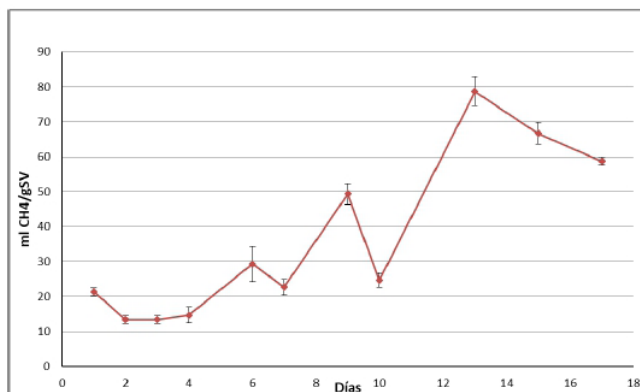


Fig. 3. Producción neta diaria de la producción de chile poblano con lodo activado de BeGaia.

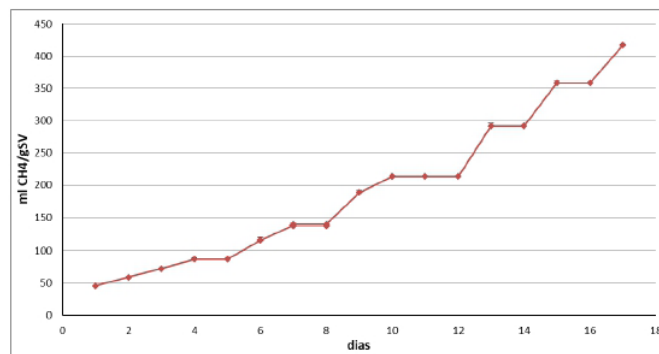


Fig. 4. Producción acumulada diaria de la producción de chile poblano con lodo activado de BeGaia.

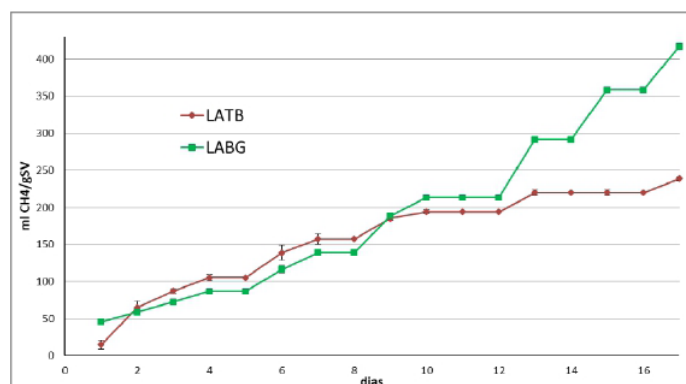


Fig. 5. Comparación de la producción acumulada de la producción de chile poblano con los lodos LATB y LABG.

III. CONCLUSIONES

El porcentaje de obtención de aceite indica que es posible explorar su uso para la generación de biodiésel, para lo cual, aún es necesario realizar análisis de perfil de ácidos grasos e índice de saponificación.

Por otro lado, los valores de ST y SV obtenidos en el trabajo, mostraron un buen contenido de materia orgánica disponible, lo que representa un buen potencial de las semillas desgrasadas de chile poblano para ser empleadas en la generación de biocombustibles; hecho que se demuestra en las pruebas de biogás, que se obtuvieron valores altos de potencial metanogénico.

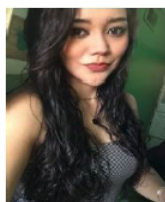
Uno de los puntos más importantes del trabajo es la posibilidad de conectar dos productos energéticos: la obtención de aceite con posibilidad de producir biodiésel; y biogás generado con la biomasa desgrasada, eso puede representar el desarrollo de una biorrefinería que permita el aprovechamiento integral de la biomasa.

El residuo generado del procesamiento del chile poblano es bastante prometedor, con este proyecto se han sentado las bases necesarias para que se continúe investigando el posible aprovechamiento de estos importantes residuos agroindustriales.

REFERENCIAS

- [1] J. P. Paredes, "Investigación en material de bioenergía para la industria energética" Redalyc, vol. 31, no. 4, pp. 709-716, oct., 2015.
- [2] V. Saynes, J. Etchevers y F. Paz, "Análisis de estrategias de manejo sobre las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del suelo" Terra Latinoamericana, vol. 34, no. 1, pp. 112-136, Mar., 2016.
- [3] E. A. Reyes, "Producción de biogás a partir de la Biomasa" Revista Científica de FAREM-Esteli. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano, vol. 5, no. 17, pp. 11-22, Mar. 2016.
- [4] S. K. Duran, "A review on oil extraction and biofuels production from various materials" Materials Today: Proceedings, vol. 53, pp. 265-278, 2016.
- [5] S.E. Mahesh, A. Ramanathan, K.M. S. Begum y A. Narayanan, "Biodiesel production from waste cooking oil using KBr impregnated CaO as catalyst" Energy Conversion and Management, vol. 7, no. 91, pp. 442-450, 2015.
- [6] 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>
- [7] H.E. Aguirre, O.V. Muñoz. 2015. El chile como alimento. México. Rev. Acad. Mex. Cienc. AC. 66(3):16-23.
- [8] K. Lee, S.K. Kieun, E. K. Yong, J. Eilhann, "Rapid biodiesel synthesis from waste pepper seeds without lipid isolation step" Bioresource Technology, vol. 239, pp. 17-20, 2017.
- [9] 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, Vol86 no. 7, pp. 1693-1706, 2022. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.294> [Online]
- [10] Y. Aguilera, M. C. Peña, "Potencial de residuos agroindustriales de chile poblano (*Capsicum annuum* var. Annuum "Poblano") como materia prima para biorrefinería" Congreso Internacional de Energía UG, Sep 2022.
- [11] 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 subproducto de chile Jalapeño. Cio.mx. Recuperado el 26 de agosto de 2022, http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/sesion5/S5-BCA30.pdf
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

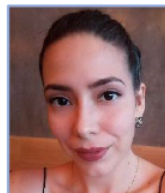
BIOGRAFÍAS



JOSELYN GUADALUPE LEZAMA ROSAS Estudiante de la licenciatura en Biotecnología en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con capacidad en el desarrollo de investigación aplicada. Ha trabajado en diversas áreas referentes a la biotecnología, tales como alimentos funcionales y nanomedicina, actualmente se encuentra trabajando en líneas celulares de cáncer.



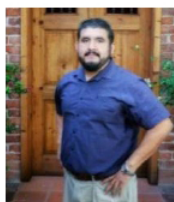
BRANDON ARMENTA MEDEL Estudiante de la Licenciatura en Biotecnología en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Con capacidad para el desarrollo de trabajo en el laboratorio, capacidad en la resolución de problemas críticos, experiencia en oferta y distribución de productos farmacológicos, certificado para el manejo del idioma inglés. Actualmente desarrollando investigación en el estudio del cáncer cérvicouterino con modelos de animales con una dieta hipercalórica.



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.



Técnicas de Preprocesamiento de Texto y su Impacto en la Métrica de Precisión utilizando el Algoritmo Random Forest y Reuters 21578

JOSE MANUEL ARENGAS ACOSTA, RAFAEL GUZMÁN CABRERA.

Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.
jm.arengasacosta@ugto.mx
guzmanr@ugto.mx

RESUMEN. En este estudio, se analiza el impacto de diversas técnicas de preprocesamiento de textos en la precisión del algoritmo Random Forest para la clasificación automática de textos utilizando la colección Reuter 21578. La metodología empleada crea escenarios combinando diferentes técnicas de preprocesamiento en la data seleccionada, con el objetivo de evaluar su efecto en la precisión durante el proceso de clasificación de textos. Los resultados muestran un efecto positivo de las técnicas de preprocesamiento en la métrica de precisión del algoritmo, mejorando la clasificación en el conjunto de datos estudiado. Estos hallazgos subrayan la relevancia de las técnicas de preprocesamiento en la clasificación automática de documentos y ofrecen perspectivas valiosas para futuras investigaciones en diversos campos prácticos relacionados con la clasificación de textos.

PALABRAS CLAVE — Preprocesamiento, aprendizaje automático, clasificación de textos.

I. INTRODUCCIÓN

La clasificación automática de textos es una de las áreas de investigación que ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años [1]. Con el aumento exponencial en la generación de documentos y textos en formato electrónico, nos encontramos frente a una gran cantidad de información que requiere ser tratada, organizada y clasificada de manera efectiva. En la gran cantidad de información existente, actualmente se pueden distinguir tres tipos principales de textos: los textos estructurados, los no estructurados y los semiestructurados, cada uno de los cuales presenta características particulares.

El preprocesamiento de datos desempeña un papel fundamental en el proceso de clasificación de documentos de texto [2]. Al llevar a cabo esta etapa, se logra una mejora significativa en la calidad de los datos, lo que tiene un impacto directo en la precisión del modelo de clasificación.

La clasificación de textos es una tarea fundamental que implica agrupar diversos tipos de información, como documentos, opiniones expresadas en redes sociales, correos electrónicos, facturas y currículums, entre otros, según un tema o característica de interés [3]. Esta labor sería prácticamente imposible de realizar de manera manual por un ser humano debido al gran volumen de información que debe tratarse. Además, sería una tarea costosa y tediosa, especialmente considerando que la cantidad de información continúa creciendo día a día.

Para abordar estas necesidades de clasificación, surgen los sistemas de clasificación automática de información [4]. Estos sistemas se presentan como una respuesta tecnológica que permite automatizar la tarea de clasificación, ahorrando tiempo y recursos.

En la actualidad, gracias a los avances recientes en el Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN) y la minería de texto, la comunidad científica está enfocada en desarrollar sistemas de información basados en inteligencia artificial. Estos sistemas aprovechan los métodos de aprendizaje automático para lograr un nivel de automatización inteligente en la gestión de la información, con niveles de precisión que pueden competir con la clasificación realizada por un anotador humano [5]–[9].

El algoritmo Random Forest (bosque Aleatorio), ha demostrado ser un método de aprendizaje automático supervisado efectivo en la clasificación automática de textos, y su importancia radica en su habilidad para abordar conjuntos de gran tamaño de datos [10].

Por consiguiente, se lleva a cabo un estudio sobre el impacto de técnicas de preprocesamiento de textos en la métrica de precisión de un algoritmo de clasificación de textos utilizando el modelo Random Forest y el corpus de datos Reuters 21578. Se emplea una metodología secuencial que combina diversas técnicas de preprocesamiento, y se observa el impacto de cada escenario planteado en la precisión del modelo de clasificación.

A. ANTECEDENTES

A continuación, se enumeran algunos estudios relevantes realizados en los últimos años en el campo de la clasificación de textos.

Patel [11] resalta el significativo avance que representa la clasificación automática de textos en el procesamiento de habla no estándar. Mediante el uso de diversos algoritmos de clasificación y la metodología de aprendizaje automático, se implementó un clasificador matemático para representar la información del texto. Los métodos de clasificación empleados incluyeron Árbol de Decisión (DT), Naïve Bayes (NB) y Vecinos más Cercanos (K-NN). La evaluación se basó en la métrica F1-Score, y los resultados evidenciaron una mejora en el rendimiento de la técnica de clasificación.

El trabajo de Duong y Nguyen [12] se enfocó en resumir y evaluar técnicas de preprocesamiento utilizadas para limpiar y normalizar datos, con el objetivo de mejorar el rendimiento en clasificación. Su principal contribución fue la evaluación de los efectos de estas técnicas y el aumento de datos en el contexto del idioma vietnamita.

El estudio [13] analiza las características y la efectividad de los algoritmos de preprocesamiento de eliminación de palabras vacías, derivación y lematización de texto utilizados en las bibliotecas NLTK y Spacy. Estas técnicas se aplican para preparar datos en aplicaciones de procesamiento de lenguaje natural y determinar el tema de publicaciones. Los resultados se basan en numerosos experimentos realizados en temas comunes de publicaciones web como deportes, economía y noticias.

B. TÉCNICAS DE PREPROCESAMIENTO

Las técnicas de preprocesamiento son relevantes en la clasificación automática de textos, ya que tienen el propósito de mejorar la calidad de los datos y optimizar la representación del texto antes de que sean utilizados por un algoritmo de clasificación. Estas técnicas ejercen un papel crucial al lograr un impacto positivo en los resultados de precisión de los algoritmos de clasificación durante el proceso de clasificación automática de textos [2], [13].

1. Tokenización.

Se utiliza para dividir un texto en unidades más pequeñas llamadas tokens. Un token puede ser una palabra, una frase, un párrafo o incluso un carácter individual, dependiendo del nivel de granularidad deseado. Esta técnica es uno de los pasos fundamentales en el procesamiento del lenguaje natural y es ampliamente utilizada en tareas de clasificación de textos.

2. Conversión a minúsculas.

Consiste en transformar todo el texto a letras minúsculas antes de su posterior procesamiento. Esta técnica se aplica

con el objetivo de homogeneizar el texto y reducir la complejidad de procesamiento. Por ejemplo, la oración "Este es un Ejemplo" se convertiría en "este es un ejemplo".

3. Eliminación de palabras vacías.

Las palabras vacías, como "el", "es", "y", son términos comunes que no aportan información relevante para la clasificación y pueden afectar negativamente el rendimiento del modelo. Al eliminar estas palabras vacías, se reduce el ruido y se mejora la eficiencia del algoritmo de clasificación.

4. Eliminación de caracteres especiales.

Al preprocesar los datos, se pueden eliminar caracteres especiales que no aportan información útil para la clasificación, como signos de puntuación, emojis, símbolos, números, etc.

5. Eliminación de palabras de frecuencia 1.

Esta técnica consiste en eliminar del conjunto de datos aquellas palabras que aparecen solo una vez en todo el corpus de textos. Se utiliza para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y eliminar palabras poco frecuentes que pueden no aportar información relevante para la clasificación o análisis de textos.

C. CORPUS REUTERS-21578

La colección Reuters-21578, es una colección estandarizada de textos para pruebas de clasificación. Son artículos de periódicos, de la agencia de noticias Reuters. Los textos vienen en una forma de lenguaje estándar de marcas extensibles (XML por sus siglas en inglés), este es un lenguaje abierto que sigue un estándar optimizado para su uso, utilizando etiquetas para definir el contenido y el significado de la información [14]. Un ejemplo se muestra en la Fig. 1.

```
<REUTERS TOPICS="YES" LEWISSPLIT="TRAIN" CGISPLIT="TRAINING-SET" OLDID="5611" NEWID="68">
  <DATE>26-FEB-1987 16:08:33.15</DATE>
  <TOPICS><D>acq</D></TOPICS>
  <PLACES><D>usa</D></PLACES>
  <PEOPLE></PEOPLE>
  <ORGS></ORGS>
  <EXCHANGES></EXCHANGES>
  <COMPANIES></COMPANIES>
  <UNKNOWN>
    &#38;#5;F
    &#22;&#22;&#1;f0b49&#31;reute
    r f BC-&lt;COFAB-INC>-BUYS-GULF 02-26 0066</UNKNOWN>
  <TEXT>&#2;
  <TITLE>&lt;COFAB INC> BUYS GULFEX FOR UNDISCLOSED AMOUNT</TITLE>
  <DATELINE> HOUSTON, Feb 26 - </DATELINE>
  <BODY>COFAB Inc said it acquired &lt;Gulfex Inc>,
    a Houston-based fabricator of custom high-pressure process
    vessels for the energy and petrochemical industries.
    COFAB said its group of companies manufacture specialized
    cooling and lubricating systems for the oil and gas,
    petrochemical, utility, pulp and paper and marine industries.
    Reuter
    &#3;
  </BODY>
</TEXT>
</REUTERS>
```

Fig. 1. Archivo de la colección Reuter-21578.

D. ALGORITMO DE CLASIFICACIÓN

Existen varios algoritmos de clasificación de textos utilizados en el campo del procesamiento del lenguaje natural (NLP) y aprendizaje automático. Estos algoritmos permiten asignar categorías o etiquetas a los textos en función de su contenido. Este estudio se realiza con el algoritmo Random Forest [1], [4], [15].

1. Random Forest.

Es un algoritmo que se basa en la idea de crear múltiples árboles de decisión y combina sus predicciones para obtener resultados más precisos en problemas de clasificación automática de textos. En primer lugar, el algoritmo parte de un conjunto de datos de entrenamiento, que consiste en documentos previamente etiquetados en diferentes categorías. Luego, se crean varios árboles dividiendo el conjunto de entrenamiento en subconjuntos más pequeños basados en las características del texto. Posteriormente, se realiza el muestreo aleatorio, donde se seleccionan diferentes subconjuntos del conjunto de entrenamiento de manera aleatoria para entrenar árboles individuales. Cada árbol se entrena con su subconjunto y busca características discriminativas para clasificar los textos. A partir de las predicciones de todos los árboles, se determina la clase final del texto [10], [16]. Finalmente, el modelo se pone a prueba con un nuevo texto para determinar su categoría o etiqueta. Se muestra un esquema en la Fig. 2.

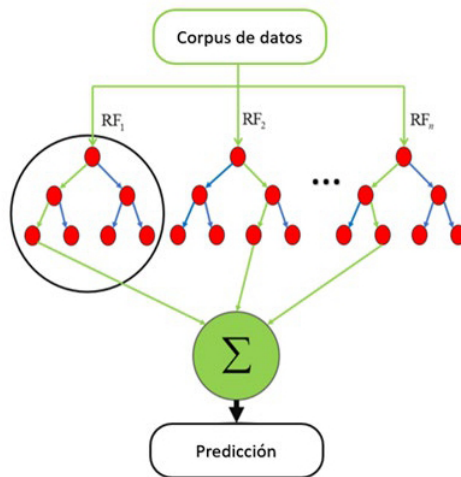


Fig. 2. Esquema de un diagrama de árbol típico.

E. MÉTRICA DE EVALUACIÓN

Las métricas de evaluación son medidas utilizadas para evaluar el rendimiento y la calidad de un modelo de aprendizaje automático. Estas métricas proporcionan información sobre qué tan bien el modelo está haciendo predicciones en comparación con los valores reales o las

etiquetas del conjunto de datos [15]. En este estudio se aborda la métrica de precisión.

1. Precisión.

Se utiliza para medir la proporción de ejemplos positivos clasificados correctamente por el modelo entre todos los ejemplos que el modelo predijo como positivos. En otras palabras, la precisión indica la capacidad del modelo para evitar clasificar incorrectamente ejemplos negativos como positivos.

La fórmula es:

$$\text{precisión} = \frac{\text{verdaderos positivos}}{\text{verdaderos positivos} + \text{falsos positivos}} = \frac{VP}{VP + FP} \quad (1)$$

Verdaderos Positivos (VP): Son los ejemplos que fueron clasificados correctamente como positivos por el modelo.

Falsos Positivos (FP): Son los ejemplos que fueron clasificados incorrectamente como positivos por el modelo, pero en realidad son negativos.

II. DESARROLLO

En el marco de esta investigación, se llevó a cabo la clasificación automática de documentos utilizando el algoritmo Random Forest y el Corpus Reuters-21578, empleando distintas combinaciones de técnicas de preprocesamiento.

La metodología empleada en este trabajo, consta de 4 fases, primera, selección de la data, segunda, preprocesamiento de la data, tercera, experimentos y finalmente evaluación de los resultados como se muestra en la Fig. 3.

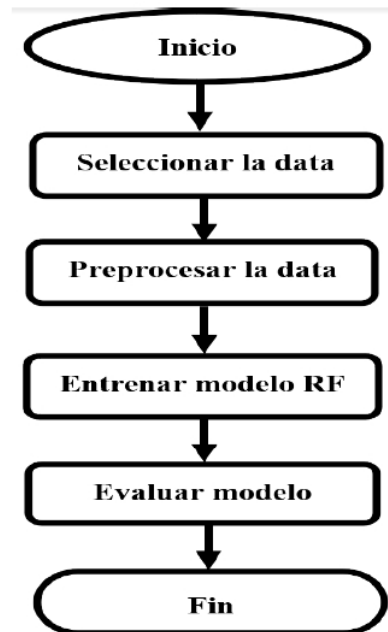


Fig. 3. Esquema de la metodología implementada.

A. FASE 1. SELECCIÓN DE LA DATA

Para el desarrollo del presente trabajo, se define una *data* balanceada formada de manera aleatoria con cinco categorías (grain, crude, interest, trade y wheat), con 50 documentos por categoría. La *data* definida para este estudio se presenta en la Tabla 1:

TABLA I. CATEGORÍAS LA DATA 1

Categoría	# de documentos por categoría
grain	50
crude	50
interest	50
trade	50
wheat	50

B. FASE 2. PREPROCESAMIENTO

El preprocesamiento es un conjunto de técnicas que tiene como objetivo limpiar, preparar y transformar el texto crudo en un formato más adecuado para su posterior proceso de clasificación. Las técnicas de preprocesamiento aplicadas en este estudio son cuatro:

Técnica 1: Extraer el texto útil. En este estudio, se define el texto útil como aquel que se encuentra dentro de la etiqueta <BODY> de cada documento de la data. Es decir, se toma exclusivamente el contenido del documento que está entre las etiquetas <BODY> y </BODY>, ya que esta es la parte del documento elegida para realizar el proceso de clasificación automática.

Técnica 2: Conversión a minúsculas. Se transforma todo el texto a letras minúsculas.

Técnica 3: Eliminación de palabras vacías, signos de puntuación y números. Para la eliminación, se crea una lista de palabras que contienen verbos, artículos, preposiciones, números, signos de puntuación, etc., las cuales son consideradas palabras vacías o sin relevancia en un tema específico. Con esta técnica, se busca obtener un texto más limpio, que contenga información verdaderamente representativa de cada texto.

Técnica 4: Eliminación de palabras de frecuencia uno. Del conjunto de datos, se eliminan aquellas palabras que aparecen solo una vez en todo el corpus de textos. Esta acción suprime palabras de poca frecuencia que podrían no aportar información relevante en el proceso de clasificación.

FASE 3. EXPERIMENTOS

En este estudio, se crean cuatro escenarios combinando técnicas de preprocesamiento, las cuales son aplicadas a la data para ser posteriormente procesada y evaluada Fig. 4. El objetivo es obtener los resultados del impacto de cada combinación de técnicas sobre la métrica de evaluación, precisión, del algoritmo Random Forest en la clasificación de la data de este estudio.

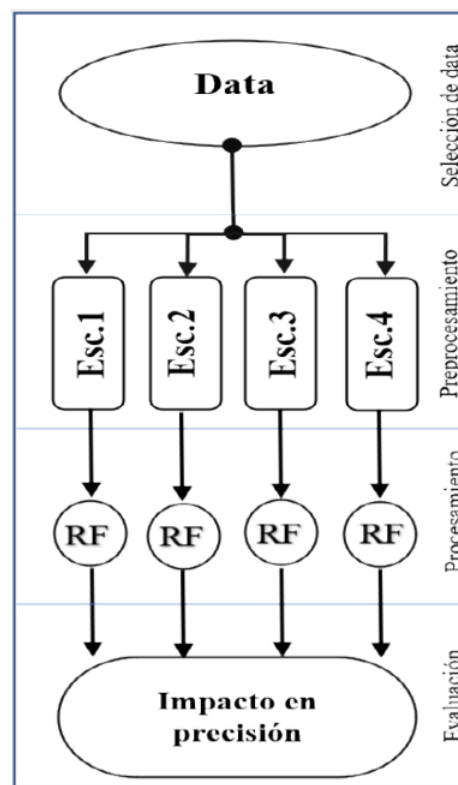


Fig. 4. Esquema de escenarios planteados.

A continuación, se describen los escenarios evaluados.

Escenario 1 (Esc.1). técnica 1. Se tokeniza la data.

Escenario 2 (Esc.2). técnica 1 + técnica 2. Se tokeniza la data y se convierten a minúsculas las palabras.

Escenario 3 (Esc.3). técnica 1 + técnica 2 + técnica 3. Se tokeniza la data, se convierten las palabras a minúsculas y se eliminan las palabras vacías (stopwords), signos de puntuación y números.

Escenario 4 (Esc.4). técnica 1+ técnica 2 + técnica 3+ técnica 4. Se tokeniza, se convierten a minúsculas y se eliminan las palabras vacías (stopwords), signos de puntuación y números y se eliminan las palabras de frecuencia igual a 1.

En cada escenario, los datos se someten a un proceso de preprocesamiento utilizando la configuración específica de técnicas de preprocesamiento del escenario. Posteriormente,

esta información preprocesada se procesa mediante el algoritmo Random Forest y, finalmente, se presentan los resultados obtenidos para la métrica de precisión correspondiente a cada caso.

FASE 4. RESULTADOS

Los datos obtenidos destacan el impacto significativo que ejercen las técnicas de preprocesamiento de texto en el proceso de clasificación automática de documentos. En Fig. 5. Se presentan los resultados de este estudio de clasificación automática de documentos utilizando el algoritmo Random Forest y el corpus Reuters 21578.

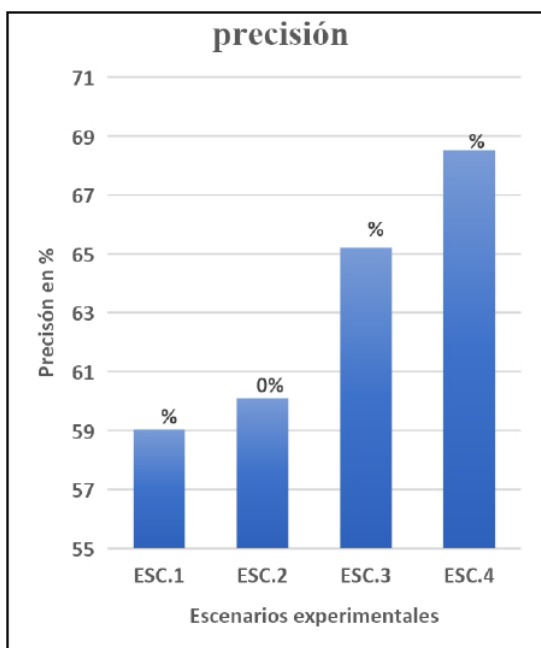


Fig. 5. Precisión de los escenarios planteados.

Como puede observarse en Fig. 5. Es en el Esc.4 donde obtiene el mayor grado de precisión de 68.51%. Esto nos permite notar que la elección adecuada de técnicas de preprocesamiento y el orden en que se aplican, favorecen el proceso de preparación y transformación de datos, lo que contribuye a una mayor efectividad y resultados favorables en la clasificación automática de documentos, aumentando la precisión en la clasificación o etiqueta de estos.

III. CONCLUSIONES

El impacto de las técnicas de preprocesamiento en la clasificación de textos resulta sumamente relevante, como se ha demostrado en este estudio. Se pudo observar una mejora total de 9.48% en la métrica de precisión a medida que se aumentaba el número de técnicas combinadas, partiendo desde el texto no preprocesado. No obstante, es importante destacar que no siempre un mayor número de técnicas empleadas conlleva a mejores resultados.

El proceso de preprocesamiento es indiscutiblemente crucial en la clasificación automática de textos; sin embargo, es fundamental ejercer cuidado en su implementación. Es necesario tener un conocimiento profundo de las características específicas de cada caso y del propio conjunto de datos. De esta manera, se podrá elegir y emplear una configuración de técnicas de preprocesamiento que sea adecuada y que ayude a tratar y transformar los datos de tal manera que el algoritmo de clasificación pueda contar con la información relevante y necesaria para llevar a cabo una labor efectiva de clasificación y etiquetado de los documentos.

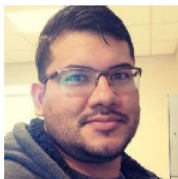
REFERENCIAS

- [1] J. M. Duarte y L. Berton, "A review of semi-supervised learning for text classification," *Artif Intell Rev*, vol. 56, no. 9, pp. 9401–9469, Sep. 2023, doi: 10.1007/s10462-023-10393-8.
- [2] D. Ji-Zhaxi, C. Zhi-Jie, C. Rang-Zhuoma, S. Maocuo, and B. Mabao, "A Corpus Preprocessing Method for Syllable-Level Tibetan Text Classification," in *2021 3rd International Conference on Natural Language Processing (ICNLP)*, IEEE, 2021, pp. 33–36. doi: 10.1109/ICNLP52887.2021.00011.
- [3] Q. Jiao, "A Brief Survey of Text Classification Methods," in *2023 IEEE 3rd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*, IEEE, 2023, pp. 1384–1389. doi: 10.1109/ICIBA56860.2023.10165621.
- [4] A. I. Kadhim, "Survey on supervised machine learning techniques for automatic text classification," *Artif Intell Rev*, vol. 52, no. 1, pp. 273–292, jun. 2019, doi: 10.1007/s10462-018-09677-1.
- [5] Y. Li, "Automatic Classification of Chinese Long Texts Based on Deep Transfer Learning Algorithm," in *2021 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE)*, IEEE, nov. 2021, pp. 17–20. doi: 10.1109/ICAICE54393.2021.00011.
- [6] D. Onita, "Active Learning Based on Transfer Learning Techniques for Text Classification," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 28751–28761, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3260771.
- [7] C. Liu, Y. Sheng, Z. Wei, and Y.-Q. Yang, "Research of Text Classification Based on Improved TF-IDF Algorithm," in *2018 IEEE International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE)*, IEEE, Aug. 2018, pp. 218–222. doi: 10.1109/IRCE.2018.8492945.
- [8] M. A. Tayal, V. Bajaj, A. Gore, P. Yadav, and V. Chouhan, "Automatic Domain Classification of Text using Machine Learning," in *2023 International Conference on Communication, Circuits, and Systems (IC3S)*, IEEE, May 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/IC3S57698.2023.10169470.
- [9] B. Zhang, "News Text Classification Algorithm Based on Machine Learning Technology," in *2022 International Conference on Education, Network and Information Technology (ICENIT)*, IEEE, Sep. 2022, pp. 182–186. doi: 10.1109/ICENIT57306.2022.00047.
- [10] J. J. Espinosa Zúñiga, "Aplicación de algoritmos Random Forest y XG Boost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 21, no. 3, pp. 1–16, jul. 2020, doi: 10.22201/ii.25940732e.2020.21.3.022.
- [11] A. Patel, S. Pathak, and M. I. Khan, "Automated Text Categorization," in *2021 3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC)*, IEEE, May 2021, pp. 16–20. doi: 10.1109/ICSPSC51351.2021.9451670.
- [12] H.-T. Duong and T.-A. Nguyen-Thi, "A review: preprocessing techniques and data augmentation for sentiment analysis," *Comput Soc Netw*, vol. 8, no. 1, p. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40649-020-00080-x.
- [13] K. Smelyakov, D. Karachevtsev, D. Kulemza, Y. Samoilenko, O. Patlan, and A. Chupryna, "Effectiveness of Preprocessing Algorithms for Natural Language Processing Applications," in *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, IEEE, oct. 2020, pp. 187–191. doi: 10.1109/PICST51311.2020.9467919.
- [14] J. J. Paniagua Medina, E. Vargas Rodríguez, and R. Guzmán Cabrera, "Machine learning and the reuters collection-21578 in document classification," *revista colombiana de tecnologías de avanzada (RCTA)*, vol. 2, no. 40, Jul. 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i40.2344.
- [15] M. M. Hijazi, A. Zeki, and A. Ismail, "A Review Study on Arabic Text Classification," in *2022 International Arab Conference on Information*

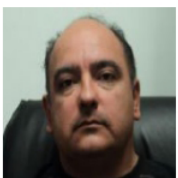


- Technology (ACIT)*, IEEE, nov. 2022, pp. 1–13. doi: 10.1109/ACIT57182.2022.9994124.
- [16] T. Salles, M. Gonçalves, V. Rodrigues, and L. Rocha, “Improving random forests by neighborhood projection for effective text classification,” *Inf Syst*, vol. 77, pp. 1–21, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.is.2018.05.006.

BIOGRAFÍAS



JOSE ARENGAS ACOSTA Estudiante de la Maestría en Administración de Tecnologías en el Departamento de Estudios Multidisciplinarios de Yuriria de la división de ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, México. Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Industrial de Santander, Colombia.



RAFAEL GUZMÁN CABRERA Profesor Titular del departamento de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías del campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato desde hace 23 años, Dr. en Reconocimiento de Formas e Inteligencia Artificial por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, SNI-1. Miembro del cuerpo académico de física aplicada y tecnologías avanzadas.

Estudio y comparativa de algoritmos para el análisis de sentimientos en opiniones de películas

JESUS ANDRES SIERRA RANGEL, RAFAEL GUZMÁN CABRERA, EVERARDO VARGAS RODRÍGUEZ.

Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, Departamento de Estudios Multidisciplinarios sede Yuriria.
ja.sierrarangel@ugto.mx
guzmanc@ugto.mx
evr@ugto.mx

RESUMEN El objetivo de este artículo es analizar los algoritmos: MSV, RL y Naïve Bayes, en base al corpus “large movie review dataset” viendo por medio de estadísticas los resultados obtenidos en pruebas realizadas por medio de un algoritmo de clasificación de opiniones de películas, descubriendo que el mejor método para realizar la clasificación de opiniones es usar NB.

PALABRAS CLAVE — Opiniones, sentimientos, análisis, aprendizaje, automático, películas.

I. INTRODUCCIÓN

La industria del entretenimiento actualmente es de los negocios con mayor volumen a nivel mundial, además de tener una situación social favorable que beneficia este medio desde la llegada de la pandemia que marcó un antes y después para la sociedad mundial [1], provocando un cambio en la interacción de los públicos al ser aislados, momento donde se aumentó los clientes de las plataformas de “streaming” (es la distribución digital de archivos a través de la difusión continua por una red informática [2]), creando sociedades en la red, donde cada persona publica su opinión sobre el producto al saber si le gusta o no, esto sumado a diferentes canales de información, como: redes sociales, canales dedicados, blogs, sitios web de reseñas de películas y series (Ej. Rotten Tomatoes, Internet Movie Database, Filmaffinity, etc.) provocó las creaciones de enormes cantidades de opiniones sobre un producto o servicio, la explotación de estos datos requiere de herramientas del área de una inteligencia que pueda extraer esta información [3]–[5].

Basado en el informe de “Global Digital Trends” el número de usuarios en el planeta para abril del 2023 es de aproximadamente 5,180 millones de usuarios, siendo un total del 64.6 % de la población mundial, donde en promedio pasan un total de 6 horas con 35 minutos por usuario en internet, y de esto el porcentaje de usuarios en internet de los 16 a los 64 años que desean ver algo por medio de “streaming” es del 90.1% [6].

A lo largo de los años se ha establecido el alto grado de causalidad que desempeñan las reseñas y los comentarios en línea sobre el resultado de una película. Frecuentemente, las opiniones tienen una gran influencia debido a que las personas deciden qué producto consumir tomando en consideración las evaluaciones y opiniones de una tercera persona [7]. Para el caso de productos como películas, se

genera una gran cantidad de datos de forma de “electronic word of mouth” (eWOM) que se refiere a la forma de definir un intercambio de información no comercial escrita. Una de las tareas que en años recientes se ha vuelto popular es el análisis de sentimientos [8], el cual involucra varias áreas como son: el procesamiento del lenguaje natural, el uso de minería de texto y el aprendizaje automático. La actividad de analizar el texto de opiniones o reseñas se trabaja con el objetivo de identificar la emoción detrás de la opinión (a favor, en contra, positivo, negativo, etc.). En este sentido, algunos autores definen como minería de opiniones, al proceso de identificar la emoción a partir de miles de comentarios de manera automática [9].

El análisis de opiniones es un tema que cada día va tomando más peso debido al creciente uso de las redes sociales, las sociedades en la red y los públicos, que producen y reproducen sus capacidades de creación de contenido, participan de manera activa en las discusiones de temas: sociales, políticos, deportivos, entretenimiento y servicios. [3]

Es por ello por lo que la actual producción científica va enfocada en la extracción de las emociones encontradas en las opiniones de la red, centrándose en un análisis de sentimiento como metodología basada en la minería de textos sobre el “big data” [1], [10].

El disponer de una fuente tan rica de información representa oportunidades para los interesados, pero también es una complicación del cual implica un análisis y una confiabilidad que brinden las herramientas dedicadas a solucionar de manera precisa la extracción de las opiniones [5].

Definir con precisión si un comentario es positivo o negativo requiere de un modelo supervisado, el cual tiene 2 características importantes: los algoritmos de clasificación a

usar, y un corpus que se encuentre manualmente etiquetado por expertos y que es usado para entrenar al sistema que clasifica la polaridad del comentario (positivo o negativo). Cabe mencionar que existen varios algoritmos entre los que se pueden mencionar: regresión logística, máquinas de soporte vectorial y Naive Bayes. [4]

El objetivo de este artículo es analizar la viabilidad de usar estos 3 algoritmos, en el corpus “large movie review dataset”. La viabilidad se determina con base en los resultados estadísticos obtenidos al aplicar diferentes pruebas de clasificación.

II. DESARROLLO

A. METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN

La metodología usada para la clasificación de opiniones (Fig. 1) comienza con la entrada de datos, seguido del preprocesamiento de texto, el cual tiene como fases: “tokenizar”, normalización (acentos, y transformación de las palabras en “lowercase”) y eliminación de “stop words”, además de hacer la bolsa de palabras. Posteriormente, se procede a realizar las pruebas y las puntuaciones, en el cual realizaremos escenarios de clasificación de muestreo aleatorio donde se tiene 80 % de entrenamiento y 20 % de prueba para los métodos de aprendizaje, los métodos utilizados en el algoritmo son: Naïve Bayes, Regresión Logística y Máquinas de Soporte Vectorial.



Fig. 1. Metodología de clasificación.

B. ENTRADA DE DATOS

La entrada de datos en el contexto de algoritmos de procesamiento de información constituye un proceso esencial que involucra la introducción de información a un sistema computacional con el propósito de su posterior análisis y manipulación. Este proceso implica una selección cuidadosa

de la cantidad de datos que serán objeto de análisis, así como la fuente de la cual se obtendrán dichos datos. La determinación de la fuente de datos puede abarcar la necesidad de recurrir a corpus lingüísticos o fuentes de datos almacenados en bases de datos, dependiendo de los requerimientos específicos de la tarea a realizar. Este procedimiento establece la base fundamental para la ejecución de algoritmos y el consecuente procesamiento de la información contenida en los datos de entrada, con el fin de derivar conclusiones, tomar decisiones o realizar análisis posteriores de relevancia científica o práctica.

C. PREPROCESAMIENTO

El preprocesamiento, consiste en una serie de pasos con los que se limpian los datos, para poder trabajar con las características esenciales de las opiniones. Se inicia con la tokenización, seguido de la transformación de palabras en lowercase, eliminación de stopwords para poder tener datos limpios y matrices de menor tamaño, para finalmente tener una bolsa de palabras por la frecuencia de las ocurrencias de esas palabras en el texto.

1. Tokenizar.

La tokenización de texto consiste en segmentar el texto en oraciones y palabras especificando las unidades lingüísticas básicas: palabras, números y puntuaciones, estas son normalmente separadas por espacios en blanco, al producto se le denomina token [1], [11].

2. Normalización.

Los tokens pasan por un proceso en el cual todas se quedan en un formato similar, en este caso se transforman en “lowercase”, es decir, todas las palabras a minúsculas y se elimina la puntuación, así disminuyendo las matrices de trabajo. [12]

3. Eliminación Stop Words.

Las “stop words” son palabras del lenguaje que no poseen riqueza semántica para el algoritmo, y solo agregan complejidad al análisis debido a que aumentan el tamaño de las matrices, es por eso por lo que este paso es esencial, al eliminar las palabras denominadas stop words, propician un proceso más ágil. [13].

4. Bolsa de palabras.

La relevancia de un término en un documento se evalúa mediante una métrica conocida como frecuencia de términos (tf, frecuencia de términos). Este proceso requiere la creación de una matriz de términos de documento (dtm), en la que las filas representan las apariciones de un término en un texto determinado y las columnas representan palabras presentes en el texto especificado. [14].

D. PRUEBAS Y PUNTUACIÓN

Se indica con qué tipo de métricas se utilizarán, y el resultado de esa métrica por cada escenario de clasificación

E. ESCENARIO DE CLASIFICACIÓN

Se indica con qué tipo de muestreo se realizarán los escenarios, cuántos datos se utilizarán para entrenamiento y cuántos de prueba.

F. NAÏVE BAYES

El clasificador Naïve Bayes (NB) se ha utilizado para el aprendizaje de etiquetas múltiples, donde tenemos varios datos de entrenamiento los cuales están vinculados entre dos etiquetas, el objetivo de este clasificador es predecir de una colección de datos sin etiquetar a qué categoría pertenecen [13], [15].

El clasificador Naïve Bayes es un método basado en el teorema de Bayes. Es uno de los clasificadores más usados debido a la independencia de cada condición, además de que el modelo se puede implementar con grandes volúmenes de datos [16]. La base del teorema utiliza la fórmula de Bayes, definida por la Ec. (1):

$$P(X) = \frac{P(C)P(X|C)}{P(X)} \quad (1)$$

donde X significa los atributos, C las clases, $P(C/X)$ la probabilidad de que sea par C dado X , $P(X/C)$ probabilidad de que sea par X dado C , $P(C)$ probabilidad de que sea C y finalmente $P(X)$ probabilidad de que sea X [15].

G. REGRESIÓN LOGÍSTICA

La Regresión Logística (RL) es un método de análisis multivariado, es utilizado cuando el objetivo es describir la relación entre una variable respuesta categórica, y un conjunto de variables explicativas que pueden ser categóricas o cuantitativas, para poder estimar que cierto evento ocurra teniendo en cuenta las demás variables [17], [18].

Su modelado está en función de $\pi(x)$, donde podemos obtener resultados de 0 a 1, siendo 0 la representación de un 0% probable de que un evento ocurra en el estudio y 1 significa que es 100% probable de que suceda. Esto se puede expresar por medio de la Ec. (2) [17], [18]:

$$P(y = 1|X) = \pi(x) = \frac{e^{g(x)}}{1+e^{g(x)}} \quad (2)$$

donde:

$$g(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (3)$$

donde β_0 es la constante del modelo o término independiente, p el número de covariables, β_i los coeficientes de las covariables, x_i las covariables que forman parte del modelo.

Si alguna de las variables independientes es una variable discreta con k niveles se debe incluir en el modelo como un conjunto de $k-1$ “variables de diseño” o “variables dummy”. El cociente de las probabilidades correspondientes a los dos niveles de la variable respuesta se denomina odds y su expresión es Ec. (4).

$$\frac{P(y=1|X)}{1-P(X)} = e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p} \quad (4)$$

Al aplicar el algoritmo natural, se obtiene el modelo de regresión logística, Ec. (5) [17]:

$$\log \log \left(\frac{P(y=1|X)}{1-P(X)} \right) = \log \log \left(e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p} \right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (5)$$

H. MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Las máquinas de soporte vectorial (MSV) son un modelo de aprendizaje supervisado. La idea de una máquina de soporte vectorial es generar un hiperplano que permita separar una clase de otra maximizando la distancia entre los puntos de diferentes clases y una función separadora [13].

Un MSV no lineal usa varias funciones kernel para estimar el margen (que es la distancia desde el punto más próximo de una clase a la función separadora). El principal objetivo de estas funciones kernel (Ej. lineal, polinomial, de base radial y sigmoidal) es maximizar el margen entre hiperplanos. La Ec. (6) permite aproximar y_t a través de la función:

$$y_t = b + \sum_{d=1}^D w_d * k(x_T, x_d) \quad (6)$$

donde x_T son los regresores o las variables que representan el problema, y D , el número de ejemplos representativos con los que cuenta la base de datos, b es una constante y w_d son los factores de ponderación de la función de núcleo $k(x_T, x_d)$. De esta forma, una MSV es la combinación lineal de la imagen de x_T en un espacio de características no lineal definido por los puntos x_d y la función de transformación no lineal $k(x_T, x_d)$. [19]

I. CORPUS

El corpus que se utiliza es “large movie review dataset” el cual contiene 50,000 opiniones, de las cuales 25,000 son positivas y 25,000 son negativas, logrando tener un corpus balanceado, se utiliza este corpus porque además de ser balanceado también es etiquetado, es decir, que se definió cuáles opiniones son negativas y cuáles positivas [20].

III. EXPERIMENTOS REALIZADOS

A. CONJUNTO DE DATOS

Partiendo de las 50,000 opiniones, se experimentó iniciando con 200 opiniones, y teniendo incrementos de 200 por experimento, siempre manteniendo el balance de negativos y positivos, donde se utilizaba un 80 % de entrenamiento y 20 % de prueba de los datos [20] hasta un total de 10 pruebas, siendo la última en la que utilizaron 2000 opiniones.

B. ESCENARIOS DE CLASIFICACIÓN

En el escenario de clasificación se utilizó el muestreo aleatorio, el cual tiene como fin tener equiprobabilidad, es decir que, utilizan métodos que buscan que todos los sujetos de una población tengan la misma probabilidad de aparecer y formar parte de la muestra [21]. En este caso se utiliza un 80% de los datos para el entrenamiento y solo el 20% restante para el uso de las pruebas, evaluando una métrica.

C. MÉTRICAS

La métrica con la que se evalúa el proceso es la exactitud. La cual está definida como la proporción de predicciones que el modelo realiza correctamente en comparación con el número total de artículos. Se puede expresar con la Ec. (7):

$$\text{Exactitud}(E) = \frac{(TP+TN)}{(TP+TN+FP+FN)} \quad (7)$$

donde *TP* es “true positive”, *FP* es “false positivo”, *TN* es “true negative” y *FN* es “false negative”. [11], [13], [22]

IV. RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados obtenidos de la experimentación, poniendo énfasis en la desviación estándar de las pruebas y promedios de la exactitud.

A. EXACTITUD

En las Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, se puede observar la exactitud de las 10 pruebas obtenidas al usar la metodología anteriormente señalada. Además, se puede destacar que el mejor resultado es usando el método de Naïve Bayes, logrando alcanzar un 95% en la exactitud en su segunda prueba, seguido de Regresión Logística con su mayor valor de 92.5% en la primera prueba, mientras que MSV su mejor resultado fue en la última prueba obteniendo un total de 89%. Adicionalmente, se puede observar en la Tabla I, que los valores promedio logran superar el margen del 80%, y de estos el de Naïve Bayes rompe el margen y logra alcanzar un promedio superior al 90%.

Exactitud

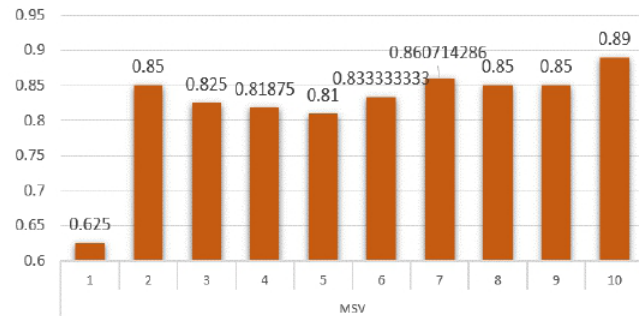


Fig. 2. Exactitud de MSV.

Exactitud

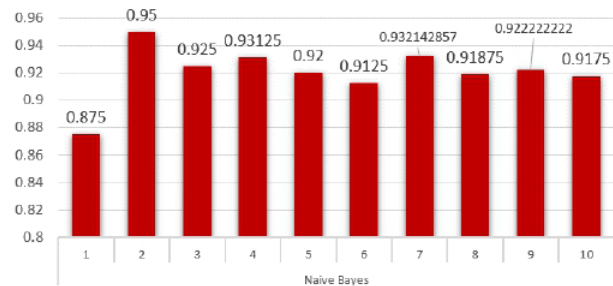


Fig. 3. Exactitud de NB.

Exactitud

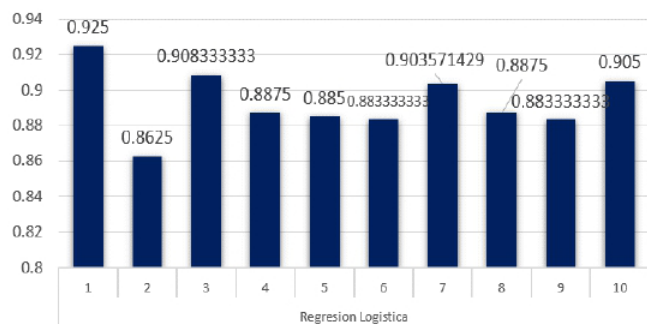


Fig. 4. Exactitud de RL.

TABLA I. PROMEDIOS DE EXACTITUD

Método	Promedio
MSV	0.821279762
Naïve Bayes	0.920436508
Regresión Logística	0.893107143

En la Tabla II se indica en la primera columna los métodos utilizados, después la desviación estándar, la cual nos indica la dispersión de los datos respecto a la media del conjunto utilizado en el caso de estudio, se puede observar que para los métodos Naïve Bayes y Regresión Logística son inferiores a 0.02 indicándonos que la mayoría de los datos se

encuentra dentro de la media, y no están dispersos, en diferencia con MSV es un método que nos indica una desviación del 0.07 que nos indica una mayor dispersión de los datos.

TABLA II. DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA EXACTITUD

Método	Desviación estándar
MSV	0.072702297
Naïve Bayes	0.019122723
Regresión Logística	0.017500445

V. CONCLUSIONES

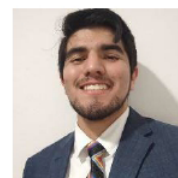
El método Naïve Bayes para el caso de películas, mantiene una exactitud muy elevada comparado a los demás métodos, siendo el más viable de analizar para mayores datos y otros tipos de corpus, a pesar de que la regresión logística mantiene más agrupamiento entre sus datos, tiene una diferencia de 3% respecto a Naïve Bayes, pero es viable utilizarlo como alternativa de estudio, mientras que MSV es uno de los que más dispersión tiene, es entendible, este método ocupa de más datos etiquetados, y que se pueda distinguir las clases de mayor relevancia para mejorar la exactitud, se puede lograr mucho con este método pero aún es necesario de más estudio de este.

REFERENCIAS

- [1] C. A. Arango Pastrana and C. F. Osorio Andrade, "Aislamiento social obligatorio: un análisis de sentimientos mediante machine learning," *Suma de Negocios*, vol. 12, no. 26, pp. 1–13, Dec. 2021, doi: 10.14349/SUMNEG/2021.V.12.N.26.A1.
- [2] Á. Pilao Rodríguez, la industria musical, la cibernetica y el 'streaming'. Un análisis de la evolución musical desde los años 80 a la actualidad," Universidad de Sevilla, Sevilla, 2020. Accessed: jun. 29, 2023. [Online]. Available: <https://idus.us.es/handle/11441/101474>.
- [3] K. Rodríguez-Díaz and Y. Haber-Guerra, "Análisis de sentimientos en Twitter aplicado al #impeachment de Donald Trump," *Revista Mediterránea de Comunicación*, vol. 11, no. 2, p. 199, jul. 2020, doi: 10.14198/MEDCOM2020.11.2.23.
- [4] S. Belén and A. Viteri, "Análisis de sentimientos para Twitter con Vader y Text Blob," *Revista Odigos*, vol. 2, no. 3, pp. 9–25, Oct. 2021, doi: 10.35290/RO.V2N3.2021.494.
- [5] J. C. Alcalde, D. Isem, A. Carles, and V. Royo, "Análisis de sentimiento de textos basado en opiniones de películas usando algoritmos de aprendizaje computacional," *Universitat Oberta de Catalunya*, 2021. Accessed: jun. 29, 2023. [Online]. Available: <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/132328>.
- [6] Meltwater and We Are Social, "Digital 2023 April Global Statshot Report — DataReportal — Global Digital Insights," Apr. 27, 2023. <https://datareportal.com/reports/digital-2023-april-global-statshot> (accessed jun. 29, 2023).
- [7] Y. Liu, "Word of Mouth for Movies: Its Dynamics and Impact on Box Office Revenue," *J Mark*, vol. 70, no. 3, pp. 74–89, oct. 2018, doi: 10.1509/JMK.70.3.074.
- [8] A. Constantin and R. Robert, "Addressing Sentiment Analysis Challenges within AI Media Platform: The Enabling Role of an AI Powered Chatbot," *Risk in Contemporary Economy*, pp. 399–406, 2021, Accessed: Mar. 22, 2023. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/a/ddj/fserec/y2021p399-406.html>.
- [9] K. Shah, H. Patel, D. Sanghvi, and M. Shah, "A Comparative Analysis of Logistic Regression, Random Forest and KNN Models for the Text Classification," *Augmented Human Research* 2020 5:1, vol. 5, no. 1, pp. 1–16, Mar. 2020, doi: 10.1007/S41133-020-00032-0.

- [10] K. Rodríguez-Díaz and Y. Haber-Guerra, "Sentiment analysis on Twitter applied to Donald Trump's #impeachment," *Revista Mediterránea de Comunicación*, vol. 11, no. 2, pp. 199–213, jul. 2020, doi: 10.14198/MEDCOM2020.11.2.23.
- [11] M. Yasen and S. Tedmori, "Movies reviews sentiment analysis and classification," 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology, JEEIT 2019 - Proceedings, pp. 860–865, May 2019, doi: 10.1109/JEEIT.2019.8717422.
- [12] P. A. Pauli, "Análisis de sentimiento: comparación de algoritmos predictivos y métodos utilizando un lexicón español," Instituto Tecnológico De Buenos Aires, Buenos Aires, 2019. Accessed: jul. 05, 2023. [Online]. Available: <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1782>.
- [13] M. Salina, J. Osio, M. Cappelletti, and M. Morales, "Técnicas de análisis de sentimientos aplicadas a la valoración de opiniones en el lenguaje español," *Memorias del Congreso Argentino en Ciencias de la Computación - CACIC* 2021, vol. 1, no. 1, pp. 31–40, 2021, Accessed: jul. 03, 2023. [Online]. Available: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/130344>.
- [14] J. Antonio. Gil Pascual, Minería de texto con R. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2021. Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Miner%C3%ADa_de_texto_con_R.html?hl=es&id=g95DEAAQBAJ.
- [15] N. Salmi and Z. Rustam, "Naïve Bayes Classifier Models for Predicting Colon Cancer," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 546, no. 5, p. 052068, jun. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/546/5/052068.
- [16] F. I. Adiba, T. Islam, M. S. Kaiser, M. Mahmud, and M. A. Rahman, "Effect of Corpora on Classification of Fake News using Naive Bayes Classifier," *International Journal of Automation, Artificial Intelligence and Machine Learning*, vol. 1, no. 1, pp. 80–92, oct. 2020, Accessed: jul. 05, 2023. [Online]. Available: <https://researchlakejournals.com/index.php/AAIML/article/view/45>.
- [17] C. Beltrán and I. Barbona, "Regresión Logística y Árboles de Clasificación. Un estudio de simulación para la comparación en el caso de grupos balanceados y desbalanceados," 2019, Accessed: jul. 02, 2023. [Online]. Available: <http://rephip.unr.edu.ar/xmlui/handle/2133/14285>.
- [18] R. Chaves, B. Guido, and V. Chavarria, "Clasificación de tumores mamarios utilizando regresión logística y KNN," *Revista Serengueti*, vol. 4, pp. 1–10, 2021, Accessed: jul. 02, 2023. [Online]. Available: <https://serengueti.fce.ucr.ac.cr/images/2023/03/16/Articulos/Estudio%20clasificacion%20tumores%20mamarios.pdf>.
- [19] E. A. Galindo, J. A. Perdomo, and J. C. Figueroa-García, "Estudio comparativo entre máquinas de soporte vectorial multiclase, redes neuronales artificiales y sistema de inferencia neuro-difuso autoorganizado para problemas de clasificación," *Información tecnológica*, vol. 31, no. 1, pp. 273–286, Feb. 2020, doi: 10.4067/S0718-07642020000100273.
- [20] A. L. Maas, R. E. Daly, P. T. Pham, D. Huang, A. Y. Ng, and C. Potts, "Learning Word Vectors for Sentiment Analysis," the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2011), pp. 142–150, 2011.
- [21] C. Hernández-Ávila, N. E.- Alerta, R. científica del, and undefined 2019, "Introducción a los tipos de muestreo," *camgirl.info*, 2019, doi: 10.5377/alerta.v2i1.7535.
- [22] L. Buitinck et al., "API design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project," Sep. 2013, Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1309.0238v1>.

BIOGRAFÍAS



JESUS ANDRES SIERRA RANGEL Ingeniero en Sistemas Computacionales egresado del Instituto Tecnológico de León, estudiante de la Maestría en Administración de Tecnologías, de la Universidad de Guanajuato. Actualmente enfocado en líneas de investigación de inteligencia artificial, sistemas de información y sistemas web.



EVERARDO VARGAS RODRÍGUEZ Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de Celaya, posteriormente obtuvo el grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, y realizó sus estudios de Doctorado en el Centro de Investigaciones en Optoelectrónica de la Universidad de Southampton del Reino Unido. En el año 2007 se incorporó a la Universidad de Guanajuato donde actualmente se desempeña como Profesor de Tiempo Completo Titular B. Ocupó el cargo de director del Departamento de Estudios Multidisciplinarios entre 2008 y 2016. Por su desempeño en actividades docentes actualmente cuenta con el reconocimiento de profesor con perfil deseable PRODEP de la SEP. Sus líneas de investigación se enfocan en el diseño e implementación de sensores opto-electrónicos, sistemas interferómetros, dispositivos de fibra óptica y modelado de sistemas. Ha publicado más de 35 artículos de investigación en revistas de reconocida calidad a nivel internacional. Por su

trabajo de investigación a nivel nacional tiene el reconocimiento como miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II del Consejo Nacional de Investigadores (CONACyT). Así mismo a nivel internacional desde el año 2018 es miembro del Comité de Editores Académicos del Journal of Sensors de la Editorial Hindawi.



RAFAEL GUZMÁN CABRERA Profesor Titular del departamento de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías del campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato desde hace 21 años, Dr. en Reconocimiento de Formas e Inteligencia Artificial por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, SNI-1. Miembro del cuerpo académico de física aplicada y tecnologías avanzadas.

Mapa de profundidad a partir de un sistema embebido

JAVIER RAMÓN DELGADO DURAN, MANUEL MOISÉS MIRANDA VELASCO, CARLOS GÓMEZ AGIS, HUMBERTO CERVANTES DE AVILA.

Universidad Autónoma de Baja California
javier.ramon.delgado.duran@uabc.edu.mx
mmiranda@uabc.edu.mx
cgomez@uabc.edu.mx
humberto.cervantes@uabc.edu.mx

RESUMEN En este trabajo se realiza una introducción a la visión estereoscópica, que es una herramienta mediante la cual se percibe la profundidad y la distancia utilizando dos imágenes capturadas desde diferentes posiciones sobre una línea epipolar. Este enfoque ha demostrado ser especialmente útil en aplicaciones como la detección de obstáculos donde se requiere información precisa sobre su distancia. Además, se evalúa el uso de la cámara Oak-D, la cual es un sistema estereoscópico con una unidad de procesamiento de visión capaz de procesar redes neuronales a nivel de hardware, lo que nos da la posibilidad de procesar imágenes en tiempo real, facilitando la aplicación práctica de la visión estereoscópica en la detección de obstáculos.

PALABRAS CLAVE — visión estereoscópica, mapa de disparidad, detección de obstáculos, OAK-D.

I. INTRODUCCIÓN

La capacidad de identificar y reconocer obstáculos de manera precisa y oportuna es fundamental para evitar colisiones, garantizar la seguridad de las personas y los equipos, además de permitir una navegación eficiente y libre de contratiempos. La detección de obstáculos es utilizada en numerosos campos y aplicaciones, como: la conducción autónoma, robótica, seguridad industrial, navegación de drones, entre otros.

La visión estereoscópica es una herramienta que permite una mejor detección de obstáculos debido a su capacidad para proporcionar información tridimensional del entorno. Al capturar imágenes desde diferentes posiciones sobre un eje llamado línea epipolar, la visión estereoscópica permite percibir la profundidad y la distancia al centroide de la posición de las cámaras y los objetos presentes. Lo cual es esencial para determinar si un objeto representa un obstáculo inmediato o está a una distancia segura. Esta información permite a los sistemas tomar decisiones rápidas y adecuadas, adaptando su comportamiento para evitar colisiones y garantizar la seguridad.

En resumen, la detección precisa de obstáculos es crucial en diversas aplicaciones, y la visión estereoscópica puede ser útil al proporcionar información tridimensional para mejorar esta tarea. Su capacidad para percibir la profundidad y la distancia permite una detección y reconocimiento más precisos de obstáculos, lo que contribuye a un mejor rendimiento y seguridad en una amplia gama de contextos y aplicaciones.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La visión estereoscópica es un proceso visual mediante el cual percibimos la profundidad y la tridimensionalidad del mundo que nos rodea. Nos permite percibir la distancia y la posición relativa de los objetos en el espacio, creando una sensación de inmersión y percepción de la profundidad. Se basa en el principio de la disparidad retinal, que es la diferencia en la ubicación de los puntos en una imagen proyectada en las retinas de ambos ojos. Cada ojo tiene una perspectiva ligeramente diferente del entorno debido a la separación física entre ellos, lo que resulta en imágenes ligeramente diferentes que se forman en las retinas.

El cerebro combina y procesa estas dos imágenes recibidas de los ojos, utilizando la disparidad retinal como una pista visual para calcular la distancia y la profundidad de los objetos. Al comparar las imágenes, el cerebro interpreta la disparidad de los puntos de la escena y calcula la diferencia de posición entre los objetos en las dos imágenes. Esta diferencia se traduce en una sensación de profundidad y nos permite percibir la distancia relativa de los objetos en el espacio tridimensional.

Para lograr la visión estereoscópica, se necesita tener una buena correspondencia entre los pares de puntos en las imágenes captadas por cada ojo. Esto se logra mediante la fusión de las imágenes en el cerebro, donde se ajustan las posiciones de los objetos para crear una representación coherente y tridimensional del entorno.

Además de la disparidad retinal, otros factores, como la convergencia ocular (el ángulo de los ojos al enfocar un

objeto) y la acomodación (ajuste del enfoque visual), también contribuyen a la experiencia de la visión estereoscópica.

A. PRINCIPIOS DE LA VISIÓN ESTEREOSCÓPICA

La percepción de la profundidad a partir de imágenes estereoscópicas se basa en varios principios fundamentales los cuales podemos desglosar en seis puntos clave.

- Adquisición de imágenes.
- Modelado geométrico del sistema.
- Extracción de las características.
- Correspondencia de las imágenes.
- Determinación de la distancia.
- Interpolación, cuando sea necesaria.

En conjunto, estos principios secuenciales permiten interpretar las diferencias de posición entre los objetos en las imágenes captadas y calcular la profundidad relativa de los objetos en el entorno. Siendo de gran utilidad en diversas aplicaciones donde la detección precisa de la profundidad es crucial.

1. Adquisición de imágenes.

Es el proceso de capturar y obtener imágenes de un objeto, escena o fenómeno utilizando un dispositivo de captura de imágenes. Este proceso implica la conversión de la luz reflejada por una escena tridimensional en una representación visual digital o analógica bidimensional. En el caso planteado para este trabajo nos enfocamos en la implementación de sensores de imagen presentes en el sistema Oak-D que convierte la luz que entra a través del objetivo en señales eléctricas. Estas señales se procesan y se convierten en imágenes digitales compuestas por píxeles. Cada píxel representa un elemento de imagen con información de escala de grises (o color según sea el caso) y su respectiva luminosidad.

2. Modelado geométrico del sistema.

El modelado geométrico para visión estereoscópica es un enfoque utilizado para representar y modelar la geometría tridimensional de una escena a partir de imágenes estereoscópicas. Este proceso implica la estimación de la posición y la forma de los objetos en el espacio tridimensional utilizando la información de disparidad obtenida de las imágenes estereoscópicas. La visión estereoscópica se basa en los principios de la geometría epipolar y la triangulación. Donde la geometría epipolar establece una relación entre las imágenes capturadas por cada cámara en un sistema estereoscópico, indicando las posiciones relativas de los puntos con un alto grado de similitud en las imágenes correspondientes, la triangulación es un método utilizado para estimar la posición tridimensional de los puntos con alto grado de similitud en el

espacio, a partir de las disparidades encontradas en las imágenes estereoscópicas.

En la Fig. 1 se muestra un modelo geométrico basado en dos cámaras estereoscópicas, donde se puede apreciar el eje sobre el cual las cámaras se desplazan (línea epipolar), se marca la distancia hasta el plano de enfoque (distancia focal), la distancia entre las cámaras.

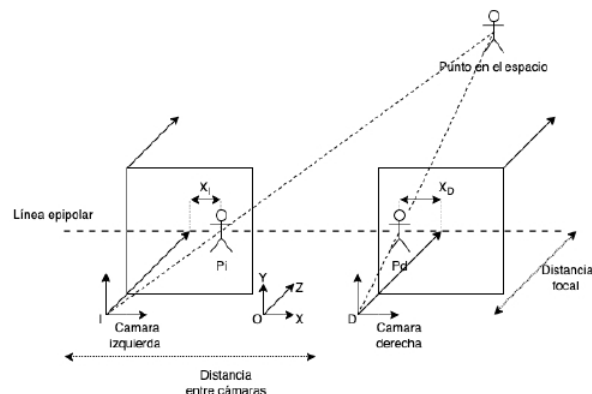


Fig. 1. Modelo geométrico de un sistema estereoscópico basado en dos cámaras.

En la Fig. 1 se descompone cómo se obtiene la disparidad en la proyección de un objeto sobre el plano de enfoque siendo la diferencia de la separación entre el punto proyectado en el plano de enfoque al centro de la imagen Ec. (1).

$$X_L - X_D = \text{Disparidad} \quad (1)$$

3. Extracción de características.

La extracción de características en visión estereoscópica se refiere al proceso de identificar y extraer características distintivas de las imágenes estereoscópicas que son relevantes para la correspondencia y la reconstrucción tridimensional. Estas características pueden ser puntos de interés, bordes, regiones texturizadas u otras propiedades visuales que son únicas y distinguibles en las imágenes.

4. Correspondencia de las imágenes.

Es el proceso de emparejar y asociar características similares entre las imágenes estereoscópicas capturadas por dos cámaras. Estas características pueden ser: puntos de interés, regiones texturizadas u otros descriptores visuales que han sido extraídos de las imágenes. El objetivo de la correspondencia de características es encontrar puntos correspondientes en las imágenes estereoscópicas, es decir, puntos que representan la misma ubicación o característica en la escena tridimensional. Al emparejar correctamente los puntos correspondientes, se puede calcular la disparidad y, a partir de ella, estimar la profundidad y la geometría

tridimensional de la escena. Los métodos de correspondencia basados en características tienden a generar mapas de disparidad dispersos, ya que las características de las imágenes suelen estar distribuidas irregularmente. Mientras que los métodos de correspondencia basados en el área son más apropiados para obtener mapas de profundidad densos, aunque la fiabilidad de la información puede ser menor.

5. Determinación de la distancia.

Una vez que se tiene la correspondencia de las imágenes estereoscópicas y se ha realizado el modelado geométrico con la distancia entre cámaras “ d ” y la distancia focal “ f ”, se puede calcular la distancia a partir de la disparidad entre los puntos correspondientes en las imágenes. La disparidad se relaciona con la diferencia de posición entre los puntos correspondientes en las imágenes estereoscópicas y se expresa en píxeles. Cuanto mayor sea la disparidad, mayor será la cercanía del objeto en relación con las cámaras, está relación de la disparidad respecto a la distancia se utiliza para estimar la distancia de un punto en el espacio utilizando la Ec. (2) como se muestra en la Fig. 1.

$$Distancia = \frac{d * f}{Disparidad} \quad (2)$$

Donde:

d Distancia entre las cámaras.

f Distancia focal de las cámaras.

Disparidad diferencia de posición entre los puntos correspondientes en las imágenes estereoscópicas.

Cabe resaltar que los valores: d, f son conocidos y el valor de la *Disparidad* puede ser estimado a través de diferentes algoritmos. Una vez obtenidos los valores de disparidad de cada píxel de la imagen se genera una matriz con dichos valores para obtener un mapa de disparidad. El cual se representa como una imagen de falsos colores.

6. Interpolación.

Es un proceso matemático utilizado para estimar valores desconocidos o faltantes entre puntos conocidos o datos disponibles. Consiste en calcular valores intermedios basados en la información proporcionada por los puntos existentes. En el contexto de la visión estereoscópica, la interpolación se refiere al proceso de estimar la disparidad o la profundidad en puntos intermedios, entre los pares de puntos correspondientes de las imágenes estereoscópicas, para obtener mapas de profundidad más densos cuando la información sobre las distancias es insuficiente. La densidad de un mapa de profundidad se refiere a la cantidad de información sobre la distancia por unidad de superficie. Es importante considerar estos puntos.

Un mapa de disparidad es considerado denso cuando proporciona valores de distancia para cada píxel de la imagen, lo que implica una mayor densidad de información sobre la profundidad. La interpolación se utiliza para transformar un mapa de disparidad disperso en uno más denso, tratándolo como un muestreo de una función de profundidad continua. Se pueden utilizar métodos de interpolación tradicionales como la interpolación de Lagrange, Hermite, Splines o wavelets para obtener una función continua de profundidad. Otra forma de abordar la interpolación es mediante el ajuste entre un modelo geométrico previo y la matriz dispersa de profundidades, utilizando técnicas de clustering para identificar los puntos destacados en la escena tridimensional.

B. MAPA DE PROFUNDIDAD.

Un mapa de profundidad (depth map en inglés), es una representación visual que muestra la distancia entre la cámara y cada punto de una escena tridimensional. Estos mapas se obtienen a partir de la información tridimensional cuando relacionas la disparidad presente en la imagen con la distancia a la que sucede la escena y permiten detectar obstáculos, ya que proporcionan información sobre la ubicación y la distancia de los objetos presentes en el entorno.

En la Fig. 2 se aprecia un mapa de disparidad con colores que varían gradualmente de rojo (más cerca) a azul (más lejano), este destaca las zonas donde cambia progresivamente la distancia, permitiendo una clara identificación de puntos de oclusión (estos se aprecian como puntos donde el cambio de color es abrupto) y proporcionando una visión detallada de la disposición espacial de los objetos. Asimismo, en este mapa se aprecian los obstáculos como puntos con valores de distancia más cortos en comparación con el fondo, lo que facilita una percepción precisa y confiable de los elementos presentes en la escena tridimensional. Generalmente, para detectar obstáculos mediante un mapa de profundidad, se siguen cinco pasos principales independientemente del método de procesar cada paso:

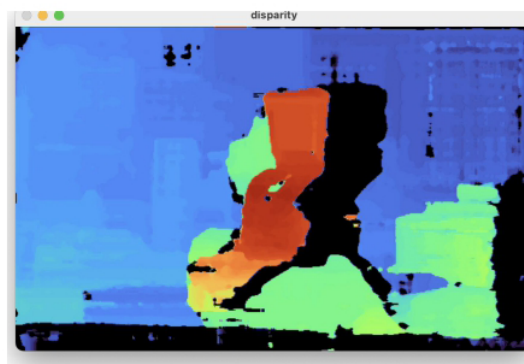


Fig. 2. Mapa de disparidad.

Generación del mapa de profundidad: Primero, se obtiene el depth map a partir de imágenes estereoscópicas capturadas por un sistema estereoscópico. El sistema calcula la disparidad (diferencia de coordenadas) entre los píxeles correspondientes en ambas imágenes, lo que permite estimar la distancia de cada punto en la escena a la cámara.

Segmentación y Filtrado: Una vez generado el depth map, se procede a segmentar y filtrar los objetos de interés, es decir, aquellos que pueden considerarse obstáculos. Esto se logra mediante la aplicación de algoritmos de procesamiento de imágenes y técnicas de segmentación que permiten identificar las regiones en el depth map que representan objetos cercanos y potenciales obstáculos.

Comparación con umbrales: El depth map puede convertirse en una representación binaria donde los píxeles correspondientes a los obstáculos se marcan como "1" y el resto como "0". Esto se logra estableciendo umbrales de distancia que determinen qué valores de disparidad se consideran como obstáculos en función de la aplicación específica.

Análisis de la Detección de Obstáculos: Una vez que se ha realizado la segmentación y filtrado, el sistema analiza la información obtenida en el depth map para determinar la presencia y posición de los obstáculos en la escena tridimensional. En función de los umbrales establecidos y las características de los objetos detectados, el sistema puede tomar decisiones, como activar alertas, tomar acciones evasivas o guiar el movimiento de una unidad móvil.

Integración con otros sensores: Para mejorar aún más la detección de obstáculos, es común combinar el depth map con información de otros sensores, como sensores LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), radares o ultrasonidos. La integración de múltiples fuentes de información proporciona una percepción más completa y precisa del entorno, lo que aumenta la fiabilidad del sistema de detección de obstáculos.

1. Obtención del mapa de profundidad.

Anteriormente se mostró un depth map en la Fig. 2 cuyo proceso de obtención puede ser descrito en dos grupos generales: la obtención de los paquetes de disparidad y el procesamiento de los datos a partir de los paquetes adquiridos.

Obtención de los paquetes de datos.

- Rectificación de imágenes lo que implica ajustar las imágenes para que las líneas epipolares (las líneas a lo largo de las cuales se proyecta un punto en ambas

imágenes) sean horizontales y paralelas entre las imágenes izquierda y derecha.

- Cálculo de disparidad mediante un algoritmo de coincidencia de características. Donde: Se identifican y extraen características visuales distintivas de las imágenes, Cada característica extraída se describe mediante un vector de características, Se comparan las descripciones de características entre las imágenes para encontrar correspondencias, estas correspondencias se utilizan para estimar la disparidad, que luego se pueden convertir en información de profundidad.
- Filtrado y corrección de disparidad mediante un filtro de media para reducir el ruido y mejorar la coherencia de los valores de disparidad.
- Generación de paquetes de disparidad los cuales contienen la información del entorno.

Procesado a partir de los paquetes obtenidos.

- Partiendo de un bucle while true para obtener y procesar continuamente los cuadros de disparidad.
- Obtiene el siguiente paquete de datos de disparidad desde la cola de salida.
- Normaliza los valores de disparidad.
- Aplica un mapa de colores.
- Despliega la imagen obtenida con el mapa de colores, para visualizar los datos de disparidad.

III. APLICACIÓN

Una vez adquirida una comprensión básica de los principios fundamentales de la visión estereoscópica, es crucial considerar los métodos para obtención de las imágenes que se usarán para extraer la información tridimensional de la escena, tomando en cuenta que pueden ser usadas dos o más cámaras para este propósito lo cual modificará el modelado geométrico del sistema. A esto se agrega que todas las imágenes deben ser capturadas en el mismo instante en el tiempo, deben compartir características ópticas y modo de captura ya sea que capturen todos los píxeles a la vez o capturen pixel a pixel.

A. HARDWARE PROPUESTO.

Una solución que sobresale por cumplir con los requisitos para obtener imágenes estereoscópicas de alta calidad es la utilización de un módulo, particularmente en este ámbito sobresale la Oak-D, la cual cuenta con un par de cámaras estereoscópicas laterales, una cámara central rojo verde y azul (RGB por sus siglas en inglés) y su método de captura de imágenes es con un obturador global sincronizado aumentando la fiabilidad de la información capturada pues al capturar todos los píxeles a la vez se evita que se presente un desfase entre la información captada por ellos a causa de la diferencia en el tiempo de captura del pixel 1 al pixel n. A

esto se suma un microprocesador único en su tipo el cual cuenta con motor informático neuronal, un acelerador de hardware especializado para una inferencia de red neuronal profunda. Por lo que es capaz de trabajar imágenes y obtener mapas de profundidad densos y precisos en tiempo real, brindando una visión detallada del entorno tridimensional.

La OAK tiene una línea de base de 7,5 cm, entre las cámaras monocromáticas laterales. La percepción mínima y máxima de equipo es dependiente del campo de visión (FOV), la resolución y la línea de base de la cámara. Los rangos donde puede realizar una evaluación de profundidad con precisión están descritos por la [Tabla I](#).

TABLA I. RANGO DE LA OAK-D

Alcance ideal	70 cm - 8 m
MinZ	~ 20 cm
MaxZ	~ 15 m con una variación del 10%

En la [Fig. 3](#) se puede apreciar como se ve el módulo de la Oak-D e incluye una imagen esquemática donde se especifican sus dimensiones en milímetros donde la medida más destacable es la separación entre los centros de los pinhole de las cámaras laterales (75 mm).

B. SOFTWARE Y FUNCIONAMIENTO

Como vimos anteriormente la OAK-D es una plataforma estereo desarrollada por Luxonis basados en el sistema DepthAI. Lo que se traduce a estar respaldada por un conjunto de herramientas que nos permiten procesar imagen en tiempo mediante código abierto, como lo son DepthAI SDK, su compatibilidad con OpenVINO y OpenCV, además de proporcionar un API que permite controlar y configurar las características del sistema sin olvidar el procesamiento de visión por computadora. Esto incluye ajustes para la generación de mapas de disparidad, detección de objetos y otras tareas. Sin olvidar que Luxonis proporciona actualizaciones de firmware para mejorar el rendimiento y agregar nuevas características a la OAK-D.

Ahora bien, la versatilidad de esta plataforma nos abre la puerta a una multitud de aplicaciones. Sin embargo, si buscamos ofrecer una descripción general de cómo opera, podemos resumir el proceso en los siguientes pasos:

En primer lugar, la OAK-D aprovecha la combinación de dos cámaras mono para capturar imágenes estéreo. Estas imágenes se utilizan como base para calcular tanto el mapa de disparidad como la profundidad de la escena.

Una vez capturadas las imágenes, la OAK-D pone en marcha un proceso de procesamiento en tiempo real. Este paso es fundamental para garantizar resultados precisos y en tiempo real en diversas aplicaciones.

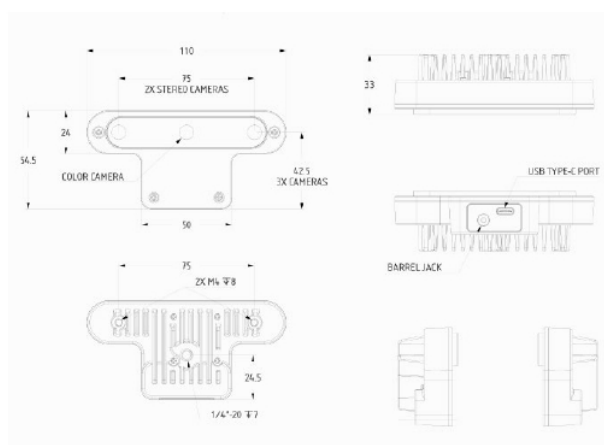


Fig. 3. Cámara Oak-D y sus dimensiones.

El proceso clave de generación de mapas de disparidad sigue a continuación. Aquí, se calcula la disparidad entre las imágenes capturadas por las cámaras mono izquierda y derecha. Esta disparidad se convierte en una valiosa información de profundidad, permitiendo entender la disposición tridimensional de los objetos.

La OAK-D también se destaca por su capacidad de detección de objetos eficiente. Esto se logra gracias a la combinación del SDK DepthAI y OpenVINO, que permiten ejecutar redes neuronales previamente entrenadas para la detección y análisis de objetos en tiempo real. Esto facilita la identificación precisa de objetos en el entorno.

Otra característica clave es la interacción y personalización. Los usuarios pueden interactuar con la OAK-D a través de interfaces de programación o interfaces de usuario que ellos mismos pueden desarrollar. Esto permite una adaptación completa a aplicaciones específicas y necesidades individuales.

Finalmente, los resultados del procesamiento, incluyendo los mapas de disparidad, datos de profundidad y las imágenes procesadas, pueden transmitirse en tiempo real a través de interfaces como USB, lo que nos permite integrar la OAK-D

a sistemas más complejos como una pieza más de los mismos.

IV. Resultados

De acuerdo con el procedimiento descrito en las secciones anteriores, se puede afirmar que el sistema presenta un tiempo de procesamiento que varía en un rango de 15 a 22 milisegundos para calcular y generar una matriz de disparidad, que se representa con un mapa de colores falsos para facilitar la comprensión de profundidad del observador.

En la Fig. 4 se muestran tres imágenes: (a) corresponde a la imagen obtenida con la cámara monocromática izquierda, (b) es la imagen capturada con la cámara monocromática derecha, (c) representa el mapa de disparidad obtenido a partir de las imágenes estéreo al que se le aplica un mapa de colores donde los valores más altos de disparidad están representados en rojo y los valores más bajos de disparidad en azul. Las áreas de pérdida de información entre las imágenes se reflejan en negro, indicando puntos de oclusión o regiones donde no se tiene información en ambas cámaras. Este fenómeno se observa en el fondo del mapa de disparidad debido a que se presenta una altura diferente en las cámaras monocromáticas, los objetos colocados en la mesa, así como en la derecha del mapa. Estas discrepancias se deben a la rectificación aplicada al obtener los datos de disparidad.

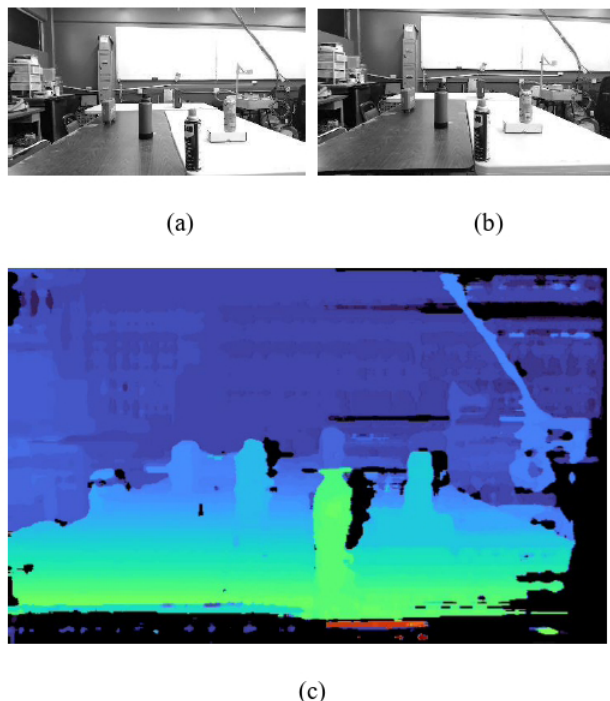


Fig. 4. Mapa de disparidad a color.

En la Fig. 5, se representan los tiempos de cálculo de las matrices de disparidad en dos imágenes distintas. La primera imagen muestra las primeras 50 iteraciones, que exhiben

variaciones en el tiempo de cálculo cuando el sistema se enciende inicialmente. A continuación, se presentan las iteraciones posteriores a partir de la iteración 50, las cuales muestran un tiempo de cálculo medio de las matrices de disparidad de 18.53 ms. Esto nos permite obtener una nueva imagen en tiempo real del entorno, además de marcar el tiempo máximo y mínimo del cálculo de las matrices y su respectiva desviación estándar.

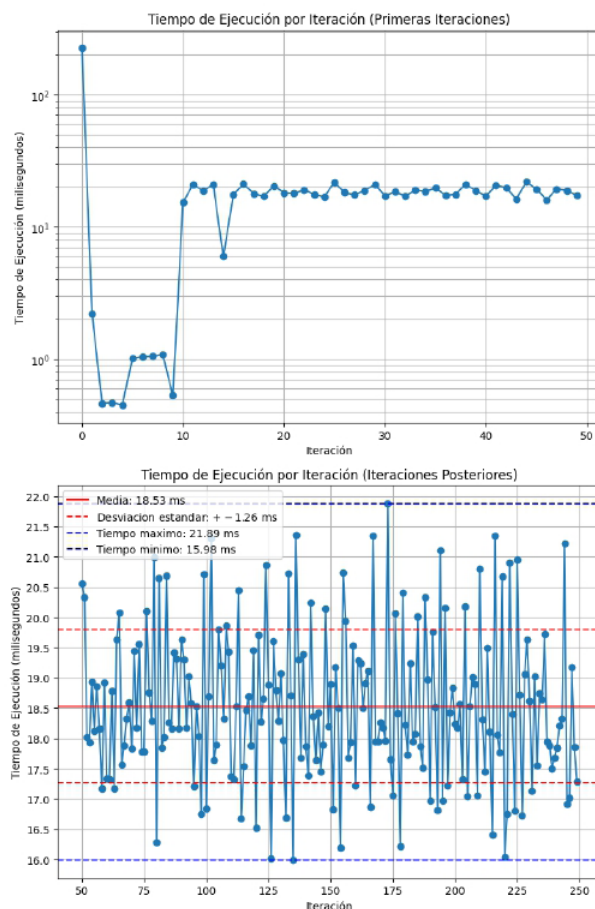


Fig. 5. Tiempo de generación de matrices de disparidad.

En la Fig. 6 se muestra un mapa de disparidad generado a partir de un par de imágenes estereoscópicas monocromáticas (a) y (b) previamente rectificadas lo que implica que su línea epipolar está perfectamente horizontal con respecto al eje x. (c) Representa el mapa de disparidad generado a partir del cálculo de una matriz producida a partir de (a) y (b) en escala de grises, (d) es el mapa de disparidad (c) con falso color producida en OpenCV con un tiempo de cálculo de 421.5 ms.

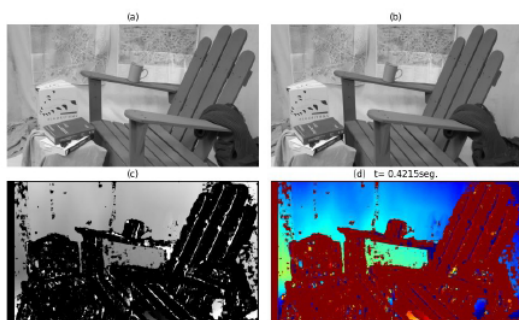


Fig. 6. Mapa de disparidad generado en ordenador a partir de un par de imágenes rectificadas.

V. CONCLUSIONES

La generación de mapas de profundidad con sistemas embebidos, como se ha planteado con la OAK-D, presenta una serie de ventajas, como eficiencia en tiempo de cálculo. Los sistemas embebidos, particularmente la OAK-D, pueden realizar cálculos complejos de generación de mapas de profundidad en tiempo real utilizando recursos limitados. Mostrando la capacidad del sistema propuesto para ejecutar algoritmos de procesamiento intensivos en entornos desafiantes.

Al generar mapas de profundidad en tiempo real el sistema propuesto nos permite aplicaciones de visión artificial, como la detección de obstáculos para reconocer el entorno.

La generación de los mapas de profundidad por medio del módulo Myriad X, perteneciente a la OAK-D, reduce la latencia al procesar los datos localmente en lugar de depender de servicios en la nube. Siendo relevante en aplicaciones donde la velocidad y la precisión son esenciales como en la detección de obstáculos en unidades móviles.

REFERENCIAS

- [1] M. Montalvo, "Técnicas de visión estereoscópica para determinar la estructura tridimensional de la escena", Tesis de Maestría, FdI, UCM, Madrid, 2010
- [2] J. D. Báez, "Detección y clasificación de obstáculos mediante visión estereó en la toma inteligente de decisiones para robots autónomos en espacios reducidos" Tesis de Maestría, ESIT, UNIR, Logroño, 2020
- [3] Luxonis. "Especificaciones del equipo." (2019), [Online]. dirección: <https://docs.luxonis.com/projects/hardware/en/latest/pages/BW1098OAK/>
- [4] Intel. "Unidad de procesamiento de visión Intel® Movidius™ Myriad™ X." (2019), [Online]. dirección: <https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/details/processors/movidius-vpu/movidius-myriad-x.html>
- [5] Mathworks. "Procesamiento de imágenes y visión artificial" [Online]. dirección: <https://la.mathworks.com/solutions/image-video-processing/object-recognition.html#:~:text=reconocimiento%20de%20objetos-%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20reconocimiento%20de%20objetos%3F,deep%20learning%20y%20machine%20learning.>
- [6] Luxonis. "StereoDepth" [Online]. dirección: https://docs.luxonis.com/projects/api/en/latest/components/nodes/stereo_depth/#
- [7] N. Bemini, M. Bertozzi, L. Castangia, M. Patander, y M. Sabbatelli, "Real-time obstacle detection using stereo vision for autonomous ground vehicles: A survey", Qingdao, China: IEEE, 2014. [Online]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6957799>
- [8] R. C. Gonzales y R. E. Woods, "Digital Image Fundamentals", en Digital Image processing, 4a ed. New York, Estados Unidos: Pearson, 2017, cap. 2, pp 48-83.

