Revista Energías Renovables, Año 10 Núm.54, SNES 2024
Certificado de reserva al uso exclusivo del Título:
No. 04-2014-101414142700-203
Registro ISSN: 2395-930
DOI: 10.59730/rer.v11n54m1

XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 LOS MOCHIS, SINALOA

ENERGÍA SOLAR
ENERGÍA SIN LÍMITES

PUBLICACIONES DE LA SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

ANES®

ISES International Solar Energy Society

Universidad Autónoma de Sinaloa
Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N
Fracc. Las Fuentes C.P. 81223

Ciudad de México 07 de Octubre 2024



Mensaje de Presidencia.

Estimada Comunidad ANES:

Es un gusto poder saludar a todos y cada uno de los que con nuestra participación hacemos posible la Semana Nacional de Energía Solar. Este año seguimos en el camino de la consolidación del sector de energías renovables. En esta edición convergen factores únicos como la atracción de grandes capitales de inversión en el sector industrial, que buscan cumplir con las metas de reducción de la emisión de gases efecto invernadero, por lo que es estratégico lograr los compromisos con nuestros socios comerciales como Estados Unidos y Canadá; pero el factor de más impacto es el inicio de una nueva administración pública federal que plantea entre sus 100 acciones de Gobierno, algunas primordiales como el que no nos someteremos a intereses extranjeros, lo cual nos alienta y da esperanza para trabajar en una soberanía nacional en el eje energético; plantea también el fortalecimiento de PEMEX y CFE, las dos empresas energéticas del Estado Mexicano encargadas de la producción y generación, transformación y distribución de energéticos en nuestro país, planteando el gran compromiso de generar el 54% de la energía eléctrica mediante el uso de energías renovables por parte de la CFE. El reto para México es realizar una transición hacia la sostenibilidad, que contemple el beneficio para la sociedad de

.

(...)

Mensaje de presidencia. (cont...)

manera directa e inmediata a través de una articulación estratégica entre los actores más relevantes tales como el gobierno, el sector empresarial, la investigación (la academia) y la sociedad. La generación de bienestar común no necesariamente implica el uso y adopción de alta tecnología, sino lograr que la sociedad goce de aquello que ayude a generar un bien común y sea adoptado, cuidado y preservado para beneficio colectivo.

En este contexto, este evento abona y aporta con nuestros asociados del sector empresarial y académico, generación de conocimiento de frontera y plantea acciones innovadoras para que las energías renovables y en especial la energía solar sea estratégica, productiva, competitiva e innovadora. Expreso mi felicidad y reconocimiento al Comité Organizador por esa entrega incondicional para el logro del objetivo que año con año nos planteamos: reunir al sector de energías renovables en un espacio boyante de conocimiento y entusiasmo que transforme a México.

.

Rafael García

¿Quiénes conforman a la ANES?

Aizailadema Altamirano,
Ana Rincón,
Antonio Ramos,
Araceli Hernández,
Carlos Pérez Rabago,
Daniel García,
Dulce Guevara,
Gilberto Sánchez,
Iván Salgado,
José Celis,
Jorge Montes,
Karen León,
Luis Martínez,
Margarita Castillo,
Marisol Oropeza,
Oscar Hernández,
Paula Isiordia,
Pedro Betancourt ,
Rafael Carmona,
Rafael García,
Ricardo Pérez,
Ricardo Rodríguez,
Yuridiana Galindo.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES

XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA

XXII CONSEJO DIRECTIVO NACIONAL 2022 - 2024

Rafael García
PRESIDENCIA

Margarita Castillo
VICEPRESIDENCIA

Ana Rincón
TESORERÍA

Aizailadema Altamirano
SECRETARÍA GENERAL

Gilberto Sánchez
SECRETARÍA PARA NORMATIVIDAD FOTOVOLTAICA

Rafael Carmona
SECRETARÍA PARA INNOVACIÓN Y EMPRENDIMIENTO

Paula Isiordia
SECRETARÍA DE PUBLICACIONES (FOMENTO Y PROMOCIÓN)

José Celis
SECRETARÍA DE ORGANIZACIÓN

Ricardo Pérez
SECRETARÍA DE ASUNTOS INTERNOS

Carlos Pérez Rabago
SECRETARÍA PARA VINCULACIÓN CIENTÍFICO-TECNOLÓGICA

Antonio Ramos
SECRETARÍA PARA VINCULACIÓN ACADÉMICA

Daniel García
SECRETARÍA PARA INDUSTRIA SOLAR TÉRMICA

Aracely Hernández
SECRETARÍA PARA PRESENCIA VIRTUAL

Ricardo Rodríguez
SECRETARÍA DE COMITÉ EDITORIAL

Luis Martínez
SECRETARÍA PARA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA

Pedro Betancourt
SECRETARÍA PARA ATENCIÓN REGIONAL

Jorge Arturo Montes
SECRETARÍA PARA VINCULACIÓN ESTUDIANTIL

Oscar Hernández
SECRETARÍA PARA INDUSTRIA ELÉCTRICA

Iván Salgado
SECRETARÍA PARA VINCULACIÓN SOCIAL

Marisol Oropeza
SECRETARÍA DE ASUNTOS INTERNACIONALES

Dulce Guevara
SECRETARÍA PARA INCLUSIÓN Y GÉNERO

Karen León
SECRETARÍA PARA RELACIONES ESTRATÉGICAS

Yuridiana Galindo
SECRETARÍA PARA NORMATIVIDAD TÉRMICA

snes48.anes.org.mx

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES

XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA

COMITÉ Organizador ANES Nacional

Dr. Rafael García
Dra. Margarita Castillo
Dra. Ana Rincón
Dra. Aizailadema Altamirano
Ing. Marianh Solis
Lic. Dafne Krinis

MODERADORES Conversatorios

Rody Abraham Soto Rojo
Brenda Rodríguez
Adriana Cruz Enríquez
Francisco J. Baldenebro López
Norma A. Rodríguez Muñoz
Eduwiges Gómez Zavala

COMITÉ Organizador Los Mochis

Dra. Laura Guadalupe Ceballos Mendívil
Dr. Rody Abraham Soto Rojo
Dr. Jesús Adrián Baldenebro López
Dr. Francisco Javier Baldenebro López
Dra. Adriana Cruz Enríquez
Dr. José de Jesús Campos Gaxiola
Dr. Samuel Guadalupe Soto Acosta
Dr. Miguel Armando Ávila Rubio
M.C. Guadalupe Daniel Ávila Rubio
Dr. Tomás de Jesús Delgado Montiel
Dra. Norma Alejandra Rodríguez Muñoz
Dr. Horacio Edgardo Garrafa Gálvez
M.C. Caree Abigail García Maro
Dr. Carlos Alberto Peñuelas Gámez
Ing. Luis Ángel Sánchez Castillo

ANES®

ISES International Solar Energy Society

Universidad Autónoma de Sinaloa
Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N
Fracc. Las Fuentes C.P. 81223

Publicaciones de la Semana Nacional de Energía Solar, año 10, No 10, Octubre 2024, es una publicación anual editada por la Asociación Nacional de Energía Solar A.C., Av. Insurgentes Sur, 1748 Desp. 303, Col. Florida, Delegación Álvaro Obregón, D.F. C.P.01030, Tel: (55)56613787, www.anes.org.mx, anes@anes.org.mx Editor responsable: Consejo de publicaciones ANES. Reserva de Derechos ante el Instituto de Nacional de Derechos de Autor. Certificado de Reserva al Uso Exclusivo No. 04-2015-082714164300-203, ISSN: 2448- 5543.

Presidencia: Dr. Rafael García Gutiérrez.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Asociación Nacional de Energía Solar A.C. OCTUBRE 2024.

Cocinas Solares, Secaderos, Destilación y Desinfección Solar/ Solar Térmica

ID	TÍTULO	PONENTE
16107	Análisis numérico y experimental de un destilador solar con aplicación de enfriamiento por aire.	Sandra Chávez Sánchez
16151	Secado solar: desarrollo de secadores solares para comunidades rurales	Octavio García Valladares
16153	Optical design of segmented secondary mirror to homogenize concentrated flux over a tubular solar reactor	Leopoldo Martínez Manuel
16108	Evaluación de las etapas de descontaminación de un sistema autónomo de potabilización solar de agua.	Pedro Reynaldo

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR CON APLICACIÓN DE ENFRIAMIENTO POR AIRE

Sandra Ch S, Hilario T P, René R R
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo Xalpa 180, San Martin Xochinahuac, Azcapotzalco, 02128 Ciudad de México, CDMX, Tel. 5318 9000, **scs@correo.azc.uam.mx**
Ignacio C M
Instituto Politécnico Nacional, ESIME-UPALM, Av. IPN s/n, 07738 Ciudad de México, Tel. 57296000 ext. 54884, icarvajal@ipn.mx

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del análisis numérico y experimental de un destilador solar que utiliza doble cubierta de vidrio. Esta configuración promueve la circulación de un flujo de aire en el canal formado por las cubiertas, debido a la convección natural, con el propósito de enfriar la superficie de condensación. El destilador solar fue experimentado en la Ciudad de México con una separación entre cubiertas de 1, 2 y 3 cm, se midió la radiación solar incidente y la temperatura en las superficies exterior e interior de cada una de las cubiertas de vidrio, del fluido y del recipiente absorbedor, mediante un piranómetro Eppley y termopares tipo K, respectivamente. El registro de los datos se hizo mediante módulos ADAM's y el software LabVIEW. En la simulación numérica se utilizó el software CFD de Autodesk para predecir la distribución de temperatura y velocidad del fluido en el canal formado por las cubiertas. Los resultados numéricos mostraron que el destilador solar con doble cubierta de vidrio alcanza una temperatura en la cubierta interna de vidrio de 65°C, 58°C y 45°C, para la separación de 1, 2 y 3 cm, respectivamente. Para estos mismos casos, en los resultados experimentales se alcanzaron temperaturas máximas de 66°C, 64°C y 60°C. Esta diferencia de aproximadamente un 12%, está asociada, entre otros factores, con las condiciones en las que ocurre la condensación del vapor de agua en el interior del destilador. Así mismo, numéricamente se obtuvo la distribución de velocidad entre las cubiertas, la cual alcanza 14 cm/s para los 3 casos, pero afectando una mayor o menor superficie de la cubierta según el caso. Finalmente, se obtuvo experimentalmente que la producción del destilador solar fue de 500 ml, 560 ml y 610 ml para la separación de 1, 2 y 3 cm respectivamente. A partir de los resultados numéricos y experimentales, se recomienda aplicar la configuración de doble cubierta de vidrio en la superficie del condensador con una separación de 3 cm para tener un mejor rendimiento en el destilador solar.

ABSTRACT

This work presents the results of the numerical and experimental analysis of a solar still that uses a double glass cover. This configuration promotes the circulation of an air flow in the channel formed by the covers, due to natural convection, with the purpose of cooling the condensation surface. The solar still was experimented in Mexico City with a separation between covers of 1, 2 and 3 cm, the incident solar radiation and the temperature were measured on the exterior and interior surfaces of each of the glass covers, the fluid and of the absorber plate, using an Eppley pyranometer and K-type thermocouples, respectively. Data logging was done using ADAM modules and LabVIEW software. In the numerical simulation, Autodesk CFD software was used to predict the temperature and velocity distribution of the fluid in the channel formed by the covers. The numerical results showed that the solar still with double glass cover reaches a temperature in the internal glass cover of 65°C, 58°C and 45°C, for the separation of 1, 2 and 3 cm, respectively. For these same cases, in the experimental results, maximum temperatures of 66°C, 64°C and 60°C were reached. This difference of approximately 12% is associated, among other factors, with the conditions under which water vapor condensation occurs inside the distiller. Likewise, numerically, the velocity distribution between the decks was obtained, which reaches 14 cm/s for the 3 cases but affecting a greater or lesser surface of the deck depending on the case. Finally, it was experimentally obtained that the yield of the solar still was 500 ml, 560 ml and 610 ml for the separation of 1, 2 and 3 cm respectively. From the numerical and experimental results, it is recommended to apply the double glass cover configuration on the surface of the condenser with a separation of 3 cm to have a better performance in the solar still.

Palabras claves: Destilación solar, Enfriamiento, Temperatura, Velocidad del flujo, Simulación numérica

INTRODUCCIÓN

El agua potable es uno de los recursos más importantes para el ser humano, además de que juega un papel vital en aplicaciones industriales y agrícolas. Actualmente la población y la industrialización ha ido en crecimiento generándose una brecha cada vez mayor entre el suministro y el consumo de agua potable, por lo tanto, la escasez de agua potable debe considerarse un problema grave y deben desarrollarse sistemas de desalinización de bajo costo y energéticamente eficientes. Para superar tal desafío, la aplicación del uso de destiladores solares en la desalinización del agua ha sido una solución potencial, por ser una tecnología ecológica y económica y que por muchos años se ha utilizado para convertir agua salina en agua dulce potable.

Se han realizado estudios previos de forma experimental y teórica para la evaluación del rendimiento y la mejora de los diferentes tipos de destiladores solares. Sin embargo, se han realizado relativamente pocos análisis numéricos utilizando el enfoque CFD. Los métodos experimentales requieren mucho tiempo, mientras que los análisis teóricos son computacionalmente muy rápidos. El uso y la aplicación de las simulaciones por CFD son más exigentes que los modelos teóricos, tienen un gran potencial para predecir de manera realista varios procesos físicos en el destilador solar y producir información valiosa sobre el efecto de los cambios en el diseño y las condiciones operativas. Hoy en día, el enfoque CFD es uno de los mejores métodos para investigar en el campo de la destilación solar, debido a la

evolución en la velocidad computacional y las estrategias numéricas eficientes.

Varios investigadores han presentado valiosos artículos de revisión sobre el uso de CFD en destiladores solares, Setoodeh et al. (2011), realizaron la simulación sobre la evaporación y condensación en un destilador solar. Calcularon los coeficientes de transferencia de calor por convección y evaporación basándose en la correlación de Dunkle y los modelos de Kumar y Tiwari comparándolos con datos experimentales, los valores de 'c' y 'n' fueron 2.054 y 0.166 para el modelo mediante CFD y 2.056 y 0.159 para los datos experimentales. Validaron los resultados experimentales sobre la producción de destilado y la temperatura del agua empleando modelos que incluyen las zonas de agua líquida y aire húmedo, donde la tasa de producción y la temperatura del agua tienen errores promedio de 7.79% y 14.48%, respectivamente. Por su parte Yan et al. (2020) han buscado validar los resultados experimentales de un destilador solar tubular que incluyen solo la zona de aire húmedo, calcularon el rendimiento para diferentes valores de humedad relativa utilizando la presión de funcionamiento dentro del destilador solar, encontrando que las desviaciones promedio y máxima entre la simulación por CFD y la tasa de rendimiento del destilado experimental fueron 14.1% y 32.4%, respectivamente. Mahmood et al. (2017) utilizaron el método de CFD para simular la operación de un destilador solar de una vertiente, con paredes laterales de madera, y un recipiente absorbedor metálico. Realizaron mediciones de temperatura en la cubierta de vidrio, el recipiente, y del agua a la entrada y a la salida del destilador solar. En el software Fluent de Ansys crearon un modelo del destilador, y se llevaron a cabo simulaciones para cada hora. Los datos de producción de agua destilada en la simulación se compararon con los datos experimentales. Los resultados mostraron una alta concordancia entre ambos conjuntos de datos y revelaron que el programa es una herramienta potente y confiable para analizar la eficiencia de los nuevos diseños de sistemas de destilación solar. Balachandran et al. (2019) desarrollaron un modelo 3D de 2 fases utilizando ANSYS y compararon los resultados numéricos con los resultados experimentales para la temperatura del agua, del vidrio y la radiación solar. La cantidad total de rendimiento y temperatura del vidrio obtenida de la experimentación fue 3.5 L/día y 54 °C respectivamente, mientras que los resultados de la simulación correspondientes fueron 3.69 L/día y 56 °C. Rashid et al (2020) llevaron a cabo simulaciones en un modelo 3D de un destilador solar utilizando ANSYS-CFD para validar los resultados experimentales tomados en las condiciones climáticas de la ciudad de Karbala, Irak (32.6°N, 44.02°E). Los resultados de la simulación, como la temperatura del agua, del recipiente, del vapor y de la superficie interna de la tapa de vidrio, se compararon con los resultados experimentales. Mostafa et al. (2020) trabajaron en mejorar el proceso de desalinización de un destilador solar convencional utilizando una chimenea solar. El modelo 2D fue desarrollado en Fluent 6.3 para simular el flujo de aire y la distribución de temperatura dentro de la chimenea. Estudiaron analítica y numéricamente el comportamiento del flujo de aire en la chimenea y recomiendan que el sistema de desalinización probado funcionara en condiciones operativas permitidas en días soleados, con profundidades de agua bajas que oscilaban entre (1 y 2 cm) y concentraciones bajas de sal que oscilaban entre el 3.5 y el 8 %. Los datos modelados mostraron una desviación del 14% de los datos experimentales. Los hallazgos de CFD estimaron que la desalinización del agua mejora en un 30% mediante la instalación de chimeneas solares en comparación con un destilador solar convencional.

De lo antes descrito, se puede ver que la simulación numérica, CFD, es una herramienta útil para analizar nuevas configuraciones de destiladores solares. Con esta perspectiva, en el presente trabajo se muestra el estudio numérico y experimental de un destilador solar que utiliza doble cubierta de vidrio, la cual tiene el propósito de promover la circulación de un flujo de aire en el canal formado por las cubiertas, debido a la convección natural, para enfriar la superficie donde ocurre la condensación del vapor de agua.

DESARROLLO

El destilador solar que se utilizó durante las pruebas experimentales es de dos vertientes y con doble cubierta de vidrio con un ángulo de inclinación de 30°, Fig. 1. En su interior se tiene un recipiente absorbedor pintado de negro mate con un área superficial de 0.15 m^2 en donde se dispone de 1L de agua para destilar, en sus paredes tiene integradas 4 canaletas de vidrio donde se recolecta el fluido condensado de la cubierta.

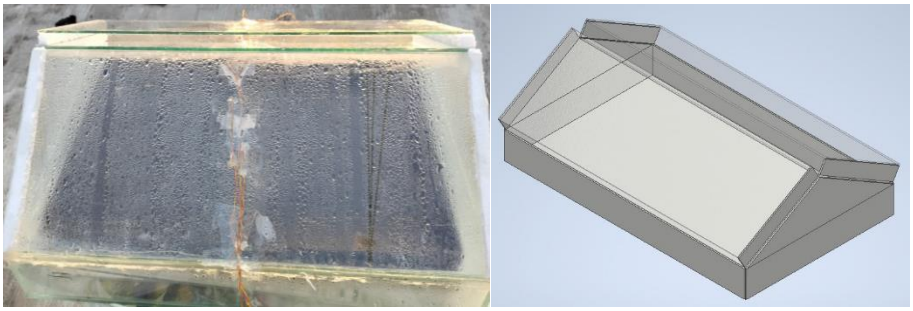


Figura 1. Destilador solar de doble vertiente

El destilador solar se operó en la Ciudad de México durante el mes de marzo del 2024, realizando 3 pruebas experimentales con variación en la separación entre cubiertas de 1, 2 y 3 cm. Para cada prueba se registraron mediciones de temperatura y radiación solar incidente mediante termopares tipo K, un piranómetro Eppley y un conjunto de módulos ADAM'S, que se procesaron con la interfaz de LabVIEW. Se obtuvieron datos en un intervalo de las 10:00 a las 18:00 horas, en lapsos de 10 minutos. Las temperaturas medidas fueron las del ambiente, superficie del recipiente, cubierta de vidrio por la parte interna y externa y del fluido.

Para realizar el análisis de CFD se utilizó el software CFD de Autodesk, en donde se creó la geometría del destilador solar de los tres casos estudiados para modelar la dinámica del flujo de aire que circula entre las dos cubiertas. Después de la creación de la geometría, el siguiente paso fue generar la malla del dominio, para el caso de estudio se utilizó el mallado estándar del software formado por elementos tetraédricos como se muestra en la Fig. 2.

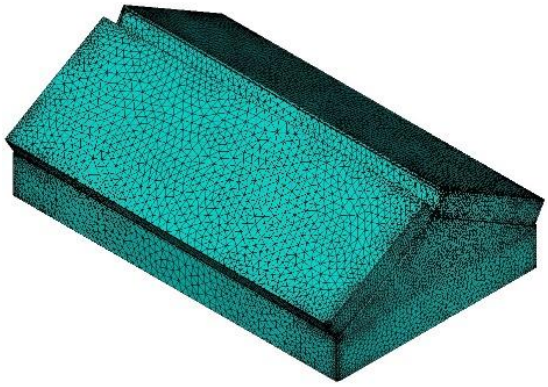


Figura 2. Mallado generado con el software CFD para el destilador solar.

Después de hacer el mallado se asignaron las condiciones de frontera de la simulación. Se agregó un modelo de radiación por ordenadas discretas, utilizando las coordenadas geográficas de la Ciudad de México y la insolación medida con el piranómetro. Por otro lado, las temperaturas determinadas por los termopares se fijaron como temperaturas medias de la superficie de las cubiertas de vidrio y la temperatura ambiente. Es importante indicar que en la simulación se utilizó el enfoque de estado estacionario, porque se consideró que después de cada hora de funcionamiento, el destilador alcanzaba condiciones estacionarias de operación por un periodo de tiempo, siguiendo el enfoque propuesto por algunos investigadores (Panchal y Shah, 2011). Lo anterior implica que los valores de temperatura y radiación eran constantes durante ese periodo. Para la validación del modelado usando CFD, los resultados de la temperatura de la cubierta, obtenidos con la simulación numérica, se compararon con medidos experimentalmente.

RESULTADOS

En base a las pruebas experimentales, se logró obtener los datos de la temperatura interna y externa de cada una de las cubiertas de vidrio, con 1 cm, 2 cm y 3 cm de separación entre ellas, tal y como se muestra en la Fig. 3.

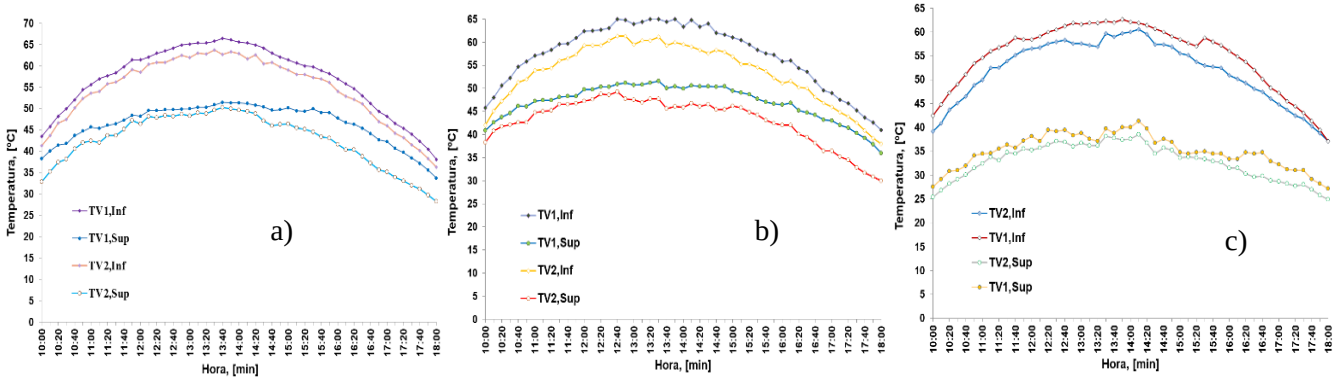


Figura 3. Distribución de temperaturas de la doble cubierta de vidrio para una separación de a) 1 cm, b) 2 cm, c) 3 cm.

En la Fig. 3 se observa el comportamiento de la temperatura de las cubiertas de vidrio, se nota el incremento con el paso del tiempo, alcanzando su valor más alto en el periodo de 12:30 a 15:00 hrs. La temperatura de la superficie interna de la primer cubierta de vidrio (T_{V1inf}), la cual es la que se encuentra en contacto con el proceso de evaporación-condensación que ocurre en el interior del destilador solar, registró valores de 66°C, 64°C y 60°C, para una separación de 1cm, 2cm y 3cm, respectivamente. Por otra parte, la superficie interna de la segunda cubierta de vidrio (T_{V2inf}), registró valores máximos de 62°C, 60°C y 58°C, por lo tanto, se tiene una diferencia de aproximadamente 4°C entre ambas cubiertas. Cabe resaltar que, para los 3 casos, la temperatura de la superficie superior de cada una de las cubiertas de vidrio (T_{V1sup} y T_{V2sup}), alcanzan valores de 35 a 40°C para 1 cm y 2 cm de separación, y de 30 a 35°C para la separación de 3cm. Esto es debido a que el aire que se encuentra entre las dos cubiertas de vidrio se calienta por lo que se reduce su densidad y por el efecto de la fuerza de flotación tiende a ascender provocando el movimiento natural del fluido, que es el principio de funcionamiento de una chimenea solar, Sherif et al (2023). De esta forma, por convección natural se tiene un enfriamiento de la cubierta interna del vidrio con

la finalidad de intensificar el proceso de condensación y con ello generar más volumen de destilado. Conforme se aumentó la separación entre cubiertas, se registró un incremento, mediante probetas graduadas, de 500 ml, 560 ml y 610 ml para la separación de 1, 2 y 3 cm, respectivamente, para un volumen inicial de 1000 ml que se ingresaron al destilador solar. Las variaciones de la temperatura que se observan en la Fig. 3, se deben a que la radiación solar sufre alteraciones por periodos de nubosidad, polvo, contaminación etc.

Para evaluar el enfriamiento de la superficie del condensador variando la distancia entre las dos cubiertas de vidrio en el destilador solar, se realizaron simulaciones numéricas de su operación a partir de los datos de la temperatura, obtenidos experimentalmente, en las diferentes ubicaciones, los cuales se utilizaron como condiciones de frontera en el modelo 3D que se realizó particularmente para la simulación.

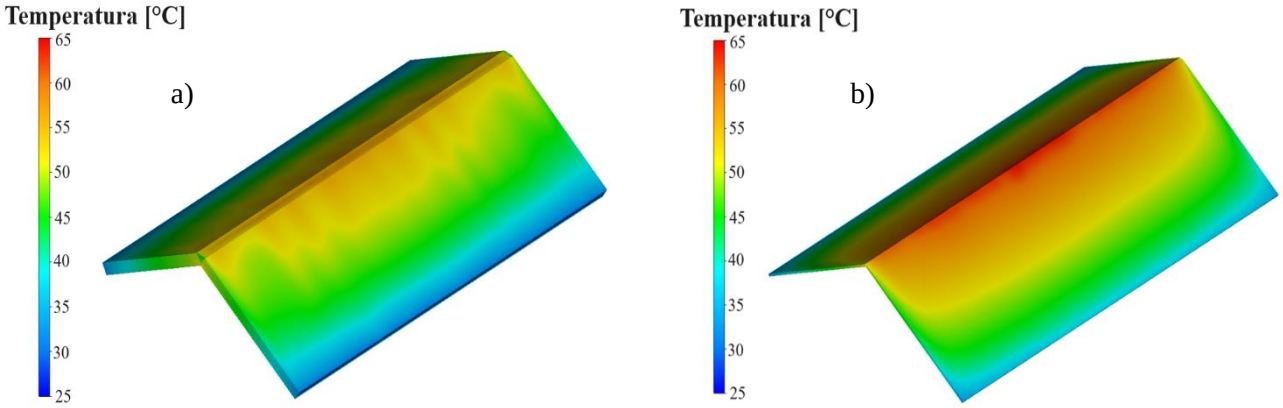


Figura 4. Distribución de temperatura de la cubierta de vidrio con separación de 1 cm. a) cubierta superior, b) cubierta inferior.

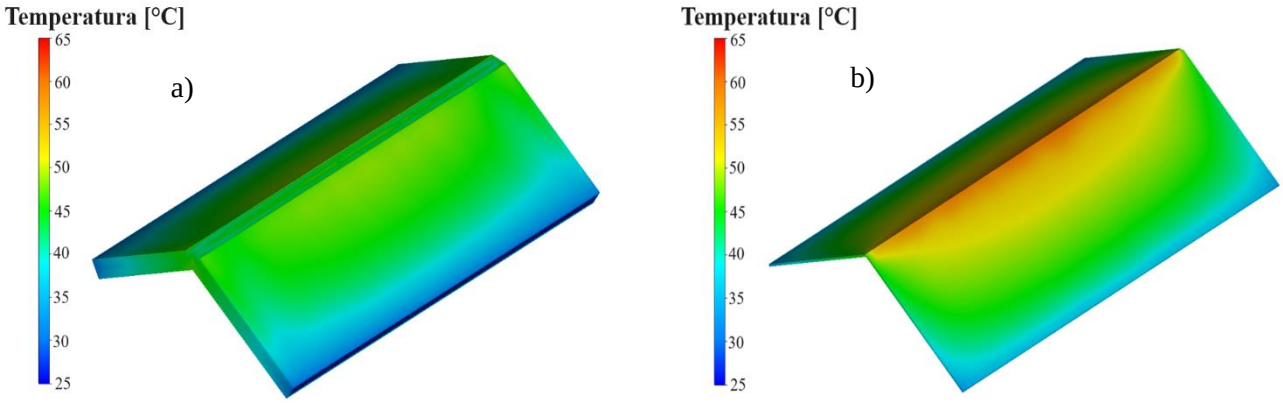


Figura 5. Distribución de temperatura de la cubierta de vidrio con separación de 2 cm. a) cubierta superior, b) cubierta inferior

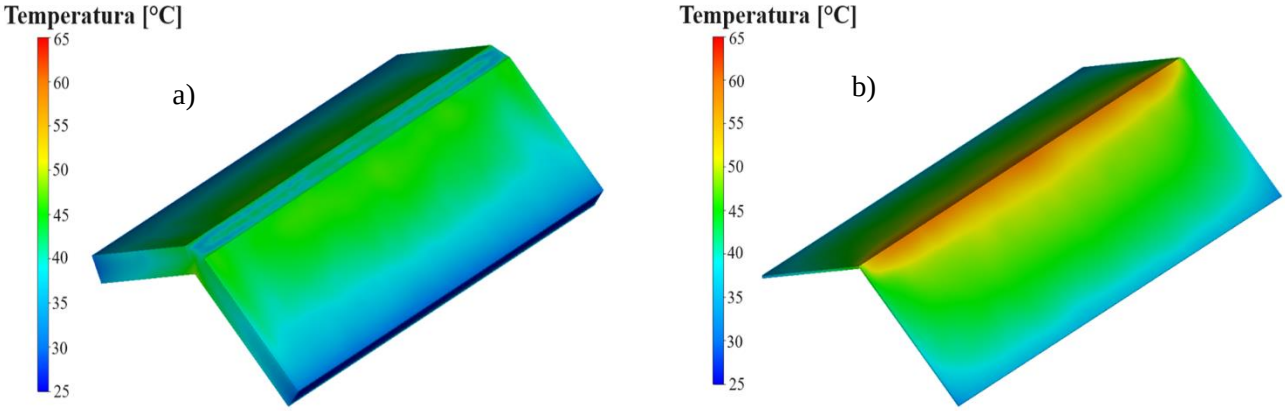


Figura 6. Distribución de temperatura de la cubierta de vidrio con separación de 3 cm. a) cubierta superior, b) cubierta inferior

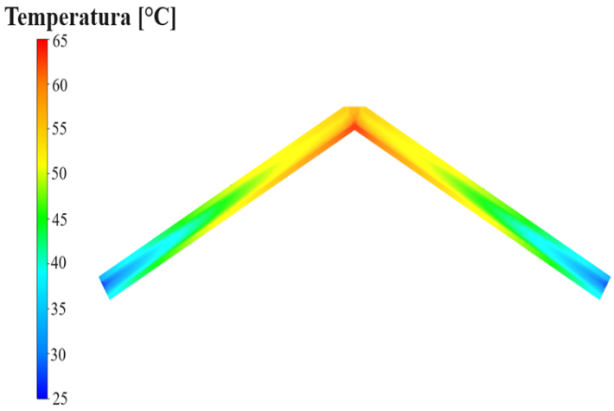


Figura 7. Distribución de temperatura del aire que circula en el interior de la doble cubierta con 1 cm de separación.

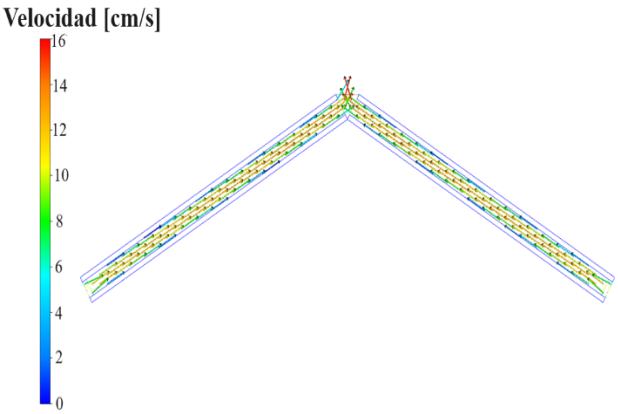


Figura 8. Distribución de velocidades del aire que circula en el interior de la doble cubierta con 1 cm de separación.

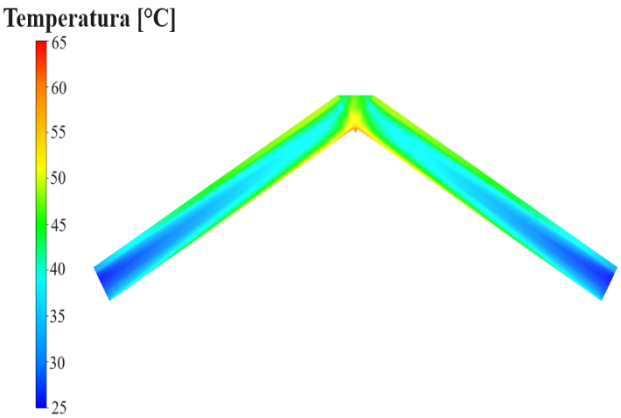


Figura 9. Distribución de temperatura del aire que circula en el interior de la doble cubierta con 2 cm de separación.

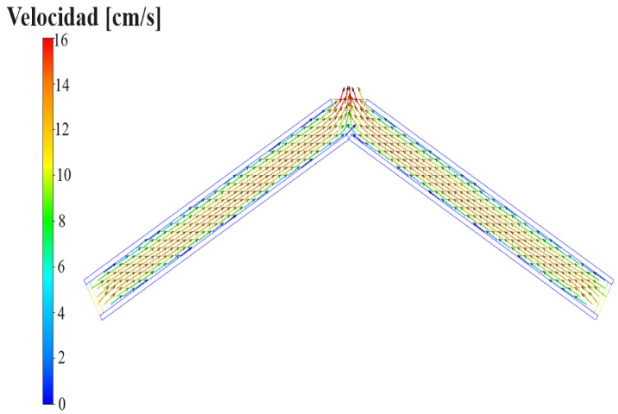


Figura 10. Distribución de velocidades del aire que circula en el interior de la doble cubierta con 2 cm de separación.

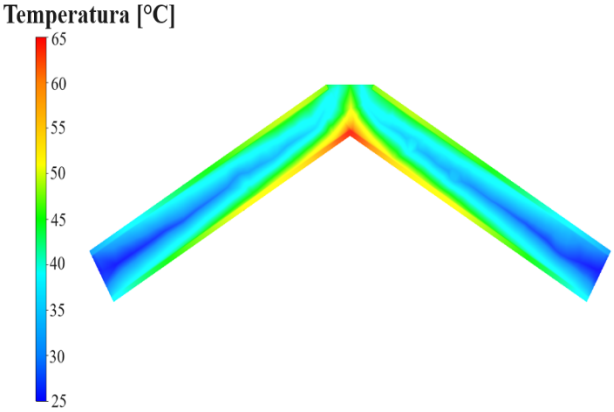


Figura 11. Distribución de temperatura del aire que circula en el interior de la doble cubierta con 3 cm de separación.

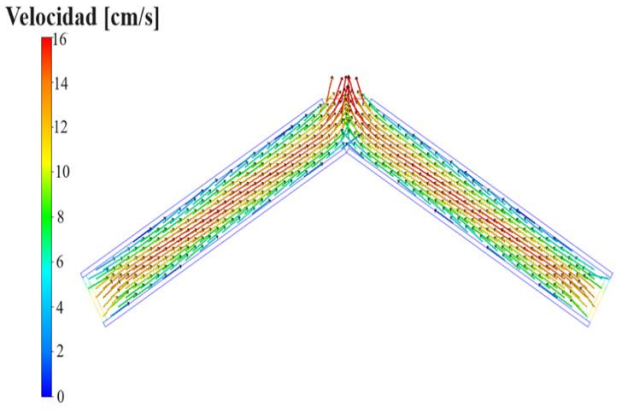


Figura 12. Distribución de velocidades del aire que circula en el interior de la doble cubierta con 3 cm de separación.

En la Fig. 4 se muestra la distribución de temperatura en las cubiertas de vidrio con una separación de 1cm, alcanzando la temperatura más alta en la unión de las dos vertientes de 55°C y de 45 a 50°C en el área de la región central para la segunda cubierta, mientras que para la primer cubierta se alcanzan 65°C como máximo en el vértice de la unión de las dos pendiente y de 53 a 57°C en el área central. Por su parte, al incrementar la separación a 2 cm, las temperaturas comienzan a disminuir alcanzando la temperatura máxima de 48°C y de 45 en casi toda el área de la segunda cubierta, mientras que en la primer cubierta se alcanzan 58°C como máximo y de 45°C en el área central.

Finalmente, para la separación de 3cm se obtuvo una temperatura de 35 a 45°C en la segunda cubierta y de 40 a 45°C para la primer cubierta, teniendo una diferencia de 15 a 20°C de diferencia entre la separación de 1cm a 3cm. Estos resultados de la simulación numérica indican que al aumentar la separación entre cubiertas se produce un enfriamiento por aire de la primer cubierta de vidrio lo que en principio intensificaría la condensación en la superficie interna del destilador solar.

En la figura 7, 9 y 11, se muestra la distribución de la temperatura en el volumen de aire que se encuentra en el canal formado por las dos cubiertas de vidrio. Se observa que, para los 3 casos, con la condición de frontera de temperatura del aire a la entrada de 25°C, se genera un flujo de aire que circula por el canal por convección natural ascendiendo hacia la salida que se encuentra en la parte superior. El máximo efecto de enfriamiento se logra con una separación de 3cm, en el que se alcanza una temperatura de 38°C, mientras que para la separación de 2cm se llega a 45°C y para 1 cm, 55°C.

En las figuras 8, 10 y 12, se presenta la distribución de la velocidad del aire en el canal formado por las cubiertas. Se observa que, en todos los casos, el campo de velocidades tiene la misma apariencia. El comportamiento del flujo de aire es el esperado, en la zona central del canal se alcanza la máxima velocidad de 16 cm/s mientras que los valores mínimos de velocidad ocurren sobre las paredes de las cubiertas con velocidades de 4 a 8 cm/s. A medida que aumenta la separación entre las cubiertas, el volumen de aire que se desplaza es mayor, removiendo más calor y por lo tanto, enfriando en mayor medida a la primer cubierta.

Es importante señalar que en el interior del destilador se simuló un volumen de aire debido a la dificultad para modelar el proceso de cambio de fase evaporación-condensación. Por este y otros factores que no se consideraron en la simulación numérica, es que se presenta una diferencia de aproximadamente un 12% al comparar los resultados numéricos y experimentales. Sin embargo, esta diferencia es relativamente baja y los resultados obtenidos sobre la implementación de la doble cubierta en el destilador solar pueden ser útiles para el diseño de este tipo de equipos.

CONCLUSIONES

En este estudio se obtuvieron resultados que muestran el proceso de enfriamiento mediante aire al utilizar una doble cubierta de vidrio con separación de 1cm, 2cm, y 3 cm, en un destilador solar. A partir de los resultados de la simulación numérica, se encontró que se logra el máximo enfriamiento para la separación de 3cm entre cubiertas. Sin embargo, los resultados experimentales no mostraron un efecto significativo del enfriamiento, principalmente debido a que la primera cubierta fue la que registró la temperatura más alta, lo que se debe a factores internos relacionados con el proceso de evaporación-condensación, los cuales no fueron contemplados en la simulación numérica. La diferencia entre los resultados numéricos y experimentales para los 3 casos estudiados fue aproximadamente de 12% en promedio.

El análisis de la distribución de velocidades en el canal formado por las cubiertas mostró que el destilador con una separación de 3cm es más efectivo, usando el criterio de que al tener un mayor flujo másico circulando por el canal se transfiere más calor desde la superficie hacia el flujo de aire, enfriando en mayor medida a la primer cubierta. Con la dinámica de fluidos computacional se logró visualizar cómo ocurre el enfriamiento por aire en la primer cubierta de vidrio, así como la distribución de temperaturas entre las dos cubiertas, lo que permite distinguir las zonas de mayor calentamiento entre ellas. Los resultados de las investigaciones numérica y experimental permiten identificar áreas de mejora para el desarrollo de este tipo de dispositivos y de esta forma, tener un mayor aprovechamiento de la energía solar.

REFERENCIAS

Balachandran G, David P.W, Akbar M.N. (2019). Modeling of " V " type slope solar still using ANSYS-CFD simulation. In: Twenty-second International Water Technology Conference, IWTC22. p. 286–297

Mahmood T. Naz M. Y. Sulaiman S. A. Jamil Y. Shukrullah S. Zahid M. Inayat M., (2017). CFD Modeling and Experimental Validation of a Solar Still, MATEC Web of Conference. Vol. 131.

Mostafa M. Abdullah H.M. Mohamed M.A. (2020). Modeling and experimental investigation of solar stills for enhancing water desalination process. IEEE Access. Vol 8, p. 219457-219472.

Panchal H. N. and Shah P. K. (2011). Modeling and verification of single slope solar still using ANSYS-CFX, International Journal of Energy and Environment, Vol. 2, p. 985-998.

Rashid L.F. Shareef A.S. Alwan H.F. (2020). Performance enhancement of a new passive solar still design for water desalination. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments; Vol 43, p. 75-85

Setoodeh N, Rahimi R, Ameri A. (2011). Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD, Desalination, Vol 268, p. 103-110.

Sherif S. A, Bengtson, Harlan H. (2023). Solar chimneys. Salem Press Encyclopedia of Science, Research Starters

Yan T, Xie G, Liu H. (2020). CFD investigation of vapor transportation in a tubular solar still operating under vacuum. International Journal Heat Mass Transfer, Vol 156, p. 1-13.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

SECADO SOLAR: DESARROLLO DE SECADORES SOLARES PARA COMUNIDADES RURALES

Octavio García Valladares, Víctor Hugo Gómez Espinoza, Alfredo Domínguez Niño, Paulina Guillén Velázquez, Daniel Hernández Tamayo, Juan Pablo Hernández Jerónimo, Rocío Carmen Martina Cortés Popoca
Instituto de Energías Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Privada Xochicalco s/n Col. Centro, CP 62580, Temixco, Morelos, México
ogv@ier.unam.mx

RESUMEN

La tecnología termosolar generada por el Instituto de Energías Renovables de la UNAM en secado solar de alimentos, han servido como base para diseñar acciones de trabajo relacionadas con los diversos problemas alimentarios del pueblo indígena de Hueyapan, Morelos. Los secadores solares desarrollados y presentados en este artículo son evaluados experimentalmente y han sido una herramienta eficiente porque está impactando en la reducción del desperdicio de alimentos y, asimismo, fortalece el desarrollo económico comunitario del pueblo y de la región. El proyecto ofrece la oportunidad social de aumentar la producción y disposición de productos nutritivos en el mercado y en la mesa de las familias de la región.

El centro comunitario para el secado solar de alimentos se ha convertido en el espacio generador de trabajo social, y el lugar para vivir la experiencia de transformar los alimentos que se han desechado durante años. La fusión entre la tecnología de los secadores solares y el aprendizaje de las personas para usar correctamente esta tecnología, da paso a la disminución de la desigualdad social, la pobreza y el hambre.

ABSTRACT

The solar thermal technology generated by the Renewable Energy Institute (UNAM) in solar food drying has served as a basis for designing work actions related to the various food problems of the indigenous people of Hueyapan, Morelos. The solar dryers developed and presented in this article are experimentally evaluated and have been an efficient tool because it is impacting the reduction of food waste and, likewise, strengthens the community economic development of the town and the region. The project offers the social opportunity to increase the production and availability of nutritious products in the market and on the tables of families in the region.

The community center for solar food drying has become the space that generates social work, and the place to live the experience of transforming food that has been discarded for years. The fusion between solar dryer technology and people's learning to correctly use this technology gives way to the reduction of social inequality, poverty and hunger.

Palabras claves: energía solar, secado solar, deshidratación solar, tecnología, alimentos.

INTRODUCCIÓN

Cada año a nivel mundial de acuerdo a la FAO, se pierden 1,300 millones de toneladas de alimentos lo que se traduce a emitir aproximadamente el 8% de los gases de efecto invernadero [FAO, 2015]. En México se desperdicia un 37% de la producción nacional, lo que equivale a 20 millones de toneladas de alimentos al año y de acuerdo a estas cifras se estima que más de 25 millones de mexicanos viven en pobreza alimentaria, dicho con otras palabras, no tienen acceso a una dieta nutritiva y suficiente [FAO, 2023]. Esta situación compleja requiere de acciones contundentes que permitan no solo la reducción de desperdicios, sino también consolide las condiciones para una seguridad alimentaria a fin de lograr que las personas tengan acceso a una nutrición adecuada.

Una técnica que permite reducir el desperdicio de alimentos de una manera sostenible, es el secado solar de alimentos, el cual utiliza la radiación solar como fuente de energía para disminuir la cantidad de agua presente en un alimento; se considera una de las aplicaciones de la energía solar ancestral (secado a cielo abierto).

En el pueblo indígena de Hueyapan, Morelos, México, el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM, implementó un proyecto social que atendió la problemática alimentaria, ambiental y social del lugar. En el proyecto se diseñó, construyó y puso en operación un centro comunitario para el deshidratado solar de productos agropecuarios de pequeños productores indígenas de Hueyapan, Morelos con el objetivo para reducir el desperdicio de alimentos, buscando contribuir en la disminución del impacto ambiental, incrementar el desarrollo económico comunitario de la región, así como una mayor producción y disposición de productos nutritivos en el mercado y en la mesa de las familias de la región.

La finalidad del centro es, consolidar un espacio de trabajo comunitario y el acopio de alimentos (frutas, verduras, hierbas aromáticas y medicinales) para lograr revalorizar los productos que están dejando de consumirse y generar un impacto alimentario, social, cultural, ambiental y económico. Específicamente, el presente artículo describe las características de la tecnología de los secadores solares y su apropiación social para ser usados por mujeres, hombres, niñas, niños y juventudes de Hueyapan para la conservación alimentaria. Los secadores solares, permitieron que las personas aprendieran a manejar las tecnologías generadas en un contexto de economía circular.

TECNOLOGÍA DE SECADO SOLAR DESARROLLADA

Secador solar para uso doméstico y capacitación de niños, jóvenes y adultos.

En estos secadores, los rayos solares son transformados en calor a través del efecto invernadero en un secador solar (Figura 1a), que tiene los siguientes elementos: a) una superficie que se debe orientar hacia la dirección del Sol, que recibe y absorbe los rayos luminosos; b) una cubierta transparente, que deja pasar la radiación solar y evita el escape del calor; c) elementos aislantes en todo su cuerpo para evitar que el calor generado se pierda al ambiente.

Está construido con materiales ligeros, con una buena transmitancia a la radiación solar y que actúa a su vez como aislante térmico con efecto de invernadero. Cuenta con un área de secado de 0.3 m^2 (una capacidad entre 0.5 y 1 kg de producto fresco dependiendo de la presentación en que se seque el alimento); son para uso doméstico y son comerciales. Se han empleado de forma exitosa para la capacitación inicial de personas productoras indígenas, así como en la enseñanza (ver Figura 1b) en el sector educativo (jardín de niños, primaria y secundaria), ya que son pequeños y fáciles de transportar. Y se han dejado en las bibliotecas de las escuelas para que los alumnos los puedan sacar prestados y utilizarlos en sus casas.

Estos secadores han sido evaluados con diferentes plantas y frutas comestible utilizando diferentes cubiertas (vidrio, policarbonato, acrílico, polietileno y superficie selectiva), para evaluar el tiempo de secado del alimento y como afectan estas cubiertas las propiedades nutrimentales y el color final del alimento.



Figura 1 a) *Secador solar uso doméstico b) enseñanza a nivel básico utilizando estos secadores c)secador con diferentes cubiertas*

Como ejemplo de alguno de los trabajos realizados con estos equipos, se tiene el de "Efecto del uso de un secador solar modificado sobre las propiedades fisicoquímicas del fruto de carambola (Averrhoa carambola L.)" [García-Valladares et al., 2022], donde se analiza cómo las condiciones óptimas de secado dependen del material de la cubierta del secador. En dicho trabajo, se modificó la cubierta un secador solar con cuatro materiales diferentes: vidrio, acrílico, policarbonato y polietileno (Figura 1c). El contenido de humedad de las rodajas de carambola se redujo de 89.23% a un contenido de humedad final entre 2.2% y 5.9% en un tiempo máximo de 650 min. La actividad de agua final de las muestras secas varió de 0.310 a 0.414. Se obtuvo que la degradación del ácido ascórbico es menor en los secadores de vidrio (159.50 mg/100 g base seca) y superiores en secadores de polietileno (124.37 mg/100 g base seca) y la menor diferencia de color (13.83) obtenido por los parámetros de Hunter L, a y b entre el producto fresco y seco se obtuvo con la cubierta de policarbonato donde también se obtuvo la mayor cantidad de carotenoides (4.26 mg/g base seca). Mientras que desde el punto de vista de la rapidez del secado el orden de menor tiempo a mayor fue: vidrio, acrílico, policarbonato y polietileno.

Secador solar tipo gabinete (secador mixto) para pequeños productores.

El secador solar cuenta con 10 bandejas de 43 x 63 cm en el interior (un área de secado de 2.7 m^2 con una capacidad aproximada de entre 5 y 10 kg de producto fresco dependiendo de la presentación en que se desee secar el alimento), un captador solar para calentamiento de aire y un pequeño ventilador fotovoltaico, lo que lo hace totalmente autónomo (ver Figura 2a). El equipo puede funcionar como un secado mixto (directo e indirecto) de los productos agropecuarios o puede convertirse en un secador indirecto si se cubre el gabinete con una malla sombra o algún otro material para utilizarse con productos donde el color o propiedades puedan ser degradados por los efectos de exposición directa a la radiación solar.

Este secador se puede desarmar y trasladar fácilmente en una pequeña camioneta, en caso de ser necesario, para instalarse en huertos y hacer pruebas locales de deshidratación solar o se puede emplear para dar cursos de capacitación en diferentes lugares o comunidades (Figura 2b). Uno de los trabajos de investigación realizados con este secado es la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y colorimétricas de Zompantle (Erythrina americana). Para lo cual fue operado en diferentes formas con malla sombra para cubrir el gabinete (modo indirecto) y sin ella sombra (modo directo), y variando el flujo de aire (convección natural y convección forzada). Se obtuvo que para conservar mejor las propiedades de la flor se debía usar la malla sombra. En estas condiciones, la eficiencia total de secado (calculada con base a la energía necesaria para evaporar el agua del producto dividida entre la energía solar total recibida por el secador [García-Valladares et al., 2022]) fue 17.10%, la temperatura máxima alcanzada fue de 62.28 °C, las proteínas completas en el producto deshidratado fueron 7.65%, grasas 2.30%, fibra 4.93%, cenizas 8.08% y sólidos solubles totales 36°Brix. Bajo estas condiciones también se asegura un color rojo en el zompantle deshidratado. Con lo que se sugiere utilizar el secador solar en modo indirecto sin exposición a la radiación solar. Las flores de Zompantle deshidratadas pueden tener varias aplicaciones prácticas, por ejemplo, como aditivo no sólo en la cocina tradicional mexicana sino también para platos como pastas, cremas, harinas e incluso formulados alimentos [García-Valladares et al., 2022].



Figura 2 a) Secador solar tipo gabinete. b)

Secador solar tipo túnel (secador mixto).

Se diseñó y construyó un secador solar tipo túnel de 40 charolas de 43 x 63 cm con un área de secado de 10.8 m^2 y una capacidad aproximada de entre 25 y 50 kg de producto fresco dependiendo de la presentación en que se quiera secar el alimento. Cuenta con 4 captadores solares para calentamiento de aire en serie (de 1.7 m^2, los presentados en la subsección 2.2) y un ventilador accionado por un sistema fotovoltaico lo que le permite operar sin necesidad estar conectado a la red eléctrica (Figura 4a) o bien con electricidad (Figura 4b). Al igual que el anterior se puede utilizar como secador mixto o indirecto.



Figura 3 a) Secador solar tipo túnel ventilador fotovoltaico b) secador solar tipo túnel ventilador eléctrico

En la investigación de las aplicaciones del secador solar tipo túnel, se han realizado entre otras cosas la evaluación térmica de un secador bajo diferentes condiciones de operación, una de ellas por ejemplo con 40 charolas de agua con medio litro cada una (20 kg de agua en total), para evaluar la eficiencia de secado y del secador, así como para observar cómo se comporta las diferentes áreas de secado del secador. Las pruebas se realizaron desde las 11 a las 15 horas (hora solar), obteniéndose una eficiencia de los 4 colectores conectados de serie de 35% y una eficiencia de secado de 16.5% [Hernández Tamayo et al., 2022] con temperaturas en el secador tipo túnel de 45 a 65 °C. Al final de la prueba de secado con el agua, se midió el agua contenida en cada charola, para ver la cantidad de agua que se había evaporado durante el transcurso de la prueba, la cual fue de 9.82 kg, con una insolación es ese periodo de 12.3 MJ/m^2. Los resultados de la evaporación del agua se pueden ver en la Figura 4, donde como era de esperarse la cantidad de agua evaporada fue mayor en las charolas de arriba que reciben directamente los rayos del sol y en las charolas de la entrada del aire caliente, lo que da la pauta para dos conclusiones u observaciones, a la mitad del proceso de secado de alimentos deberían rotarse las charolas de arriba hacia abajo y las más alejadas de la entrada de aire caliente hacia la entrada de aire (o bien si tomamos como referencia la Tabla 1, las casillas pintadas de color rojo y naranja hacia las posiciones amarillas y verdes) para poder obtener un secado más homogéneo. Adicionalmente se trabajará en rediseñar la entrada de aire al túnel para intentar que se tenga un secado más homogéneo a lo largo de todo el túnel [Hernández Tamayo et al., 2022].

Tabla 1. Representación esquemática de las charolas a lo largo y alto de secador y los gramos de agua evaporada en cada una.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	446	460	433	448	444	494	437	438
2	107	165	150	158	188	260	180	188
3	169	133	131	169	174	192	187	177
4	161	160	153	191	129	224	223	142
5	312	293	240	275	241	267	216	270



Figura 4 Secador solar tipo túnel en un prueba de secado con irradiación de 12.3 MJ/m^2, humedad relativa ambiental de 48.6 % y una temperatura ambiente de 34.2 °C.

Secador solar tipo invernadero (secador mixto).

El secador solar tipo invernadero está conformado por una nave curva con dimensiones de 8 m de largo x 8 m de ancho y 2.5 m en la parte más alta del domo; tiene un volumen aproximado de 160 m^3. En el interior del secador por la parte inferior se instalaron 4 ductos para la distribución del aire caliente proveniente de los captadores solares, tiene una capacidad de alojar cerca de 200 kg de producto fresco (160 charolas de 43 x 63 cm). En la Figura 5 se muestra el secador solar tipo invernadero.

El sistema solar está conformado por 16 captadores solares para calentamiento de aire de 1.7 m^2 obteniendo un área total de captación de 27.2 m^2; el arreglo de los captadores está distribuido en cuatro hileras en paralelo, con cuatro captadores acoplados en serie para cada una de las hileras. El banco de captadores solares está acoplado e interconectado al secador tipo invernadero mediante ductos circulares. El aire a temperatura ambiente es inducido a través de los captadores solares mediante un extractor-ventilador centrífugo para después ser ingresado al secador solar. El sistema solar fotovoltaico (SFV) para la generación de la energía eléctrica requerida, está constituido por 8 paneles solares fotovoltaicos, donde cada panel tiene un área de captación de 2.56 m^2 y 550 W de potencia eléctrica máxima, lo que da un área total de captación de 20.4 m^2 con 4400 W de potencia máxima. El SFV opera de manera continua acoplado al secador durante los periodos con suficiente radiación. El sistema cuenta con 8 baterías de carga para proporcionar una autonomía de operación al ventilador de hasta 4 h.

Centro Comunitario para el deshidratado solar de productos agropecuarios de pequeños productores indígenas de Hueyapan.

La planta comunitaria de secado solar de alimentos de Hueyapan (ver Figura 6) cuenta con: 4 secadores solares tipo gabinete; 2 secadores solares tipo túnel; un secador solar tipo invernadero mixto y un cuarto de procesamiento de alimentos 64 m^2 con la infraestructura necesaria para la selección, el lavado y desinfectado, el procesamiento, el empaque y el almacenamiento de los productos que se van a secar, producir y comercializar. Cuenta con un sistema solar de 150 litros para calentamiento de agua, la cual es usada para los procesos de limpieza y desinfección. Los sistemas de secado solar instalados actualmente tienen una capacidad de 280 charolas (de 43 x 63 cm), lo que representa un área de secado solar de alimento equivalente a 75.6 m^2. Esto permite que en un buen día de sol se pueda secar aproximadamente 170 kg de manzanas, peras o duraznos frescos en rebanadas de 3 mm de espesor, lo que producirá cerca de 17 kg de manzanas, peras o duraznos deshidratados equivalentes a una producción diaria de alrededor de 500 bolsas comerciales de 35 g o bien una producción mensual estimada de unas 10,000 bolsas.



Figura 5 *Secador solar tipo invernadero*



Figura 6 Vista área del Centro Comunitario para el Deshidratado Solar de Productos Agropecuarios de Pequeños Productores Indígenas de Hueyapan. Video: https://www.youtube.com/watch?v=CWS7ZeNf29c

EL INTERCAMBIO DE SABERES PARA LA TRANSFORMACIÓN AMBIENTAL Y ALIMENTARIA.

La responsabilidad social para conservar un medioambiente sano, en favor de las personas y el planeta, es fundamental para lograr erradicar la pobreza. Para lograr estos objetivos, el IER con el apoyo de Conahcyt, crearon este proyecto que permitió establecer un diálogo, para promover nuevas prácticas alimentarias con base a la enseñanza del secado solar.

Hueyapan está en Morelos, en las estribaciones del Volcán Popocatépetl. Sus tierras son muy fértiles y cuentan con un excelente suministro de agua, lo cual genera una alta producción de cultivos agrícolas durante todo el año, que terminan clasificándose como desperdicio alimentario. Los desperdicios alimentarios representan un impacto negativo en el medio ambiente porque nadie los consumirá. [FAO, 2015]

El trabajo del Centro Comunitario se sustentó el empleo de metodologías participativas para asegurar el respeto cultural y ecológico. Para lograr los objetivos, se establecieron 4 componentes:

a. ***Creación de una planta de secado solar de alimentos.*** Es un espacio de trabajo donde dialogan la ciencia y la visión cultural, social, climática, histórica y geográfica, porque en él se realizan las prácticas de transformación de las frutas. Se creo la cooperativa FRUtas FREscas DEShidratadas para la COmercialización (FruFreDesCo) de carácter productivo y social; con base al respeto de las decisiones y a la cultura organizacional de los productores. La cooperativa cuenta con 8 mujeres y 7 hombres, encabezados por una presidenta elegida por unanimidad.

b. ***Ejecución de programas educativos.*** El manejo de la tecnología generadora de energía limpia para el secado de alimentos, fue el medio para valorar sus saberes y sabores culturales promoviendo un pensamiento crítico en las y los alumnos de educación básica (jardín de niños, primaria y secundaria). Los programas educativos y de capacitación sobre la deshidratación solar de alimentos, higiene y valores nutrimentales de productos locales, son acordes con los procesos culturales alimentarios y cuidado del ambiente y se adaptan al nuevo modelo educativo; además de con el interés suscitado se hicieron también talleres para los padres de familia con perspectiva de género, cada destacar la mayor participación y empuje de las mujeres en estos talleres. Para lo anterior cabe destacar la elaboración del libro tipo cuento "El secreto de Julia para secar alimentos con el sol", el cual abre la oportunidad de desarrollar el interés y la intención de manejar estrategias de conservación y transformación de los alimentos. El libro ha sido traducido al náhuatl de Hueyapan por integrantes de la cooperativa; trae en la parte final un instructivo para el armado de un secador solar (Figura 7a). Además, se han utilizado medios masivos de divulgación como el TikTok para fomentar entre los más jóvenes en interés por el secado solar de alimentos (como ejemplo Figura 7b: https://www.tiktok.com/@secado_solar_ier.unam/video/7170108264296893702).

c. ***Tecnología generadora de energía limpia para el deshidratado de alimentos en un contexto de economía circular*****.** Se logró que los pequeños productores indígenas, valoraran el uso del secado solar de sus alimentos para el mejoramiento de su contexto aplicando las tecnologías de secado solar de alimentos realizadas de acuerdo al clima de la región y a los productos que se van a secar, utilizando tecnología 100% nacional, fácil de usar y dada la capacitación adecuada para que se apropien de estas tecnologías.

d. ***Cadenas rentables y justas de comercialización, poniendo énfasis en la transformación alimentaria de las frutas consideradas como desperdicio*****.** La planta fortaleció el trabajo colectivo para garantizar que los pequeños productores, realicen una justa comercialización de los productos deshidratados y reciban los beneficios sociales, económicos y alimentarios. Se creó y registró la marca HUELIC ("sabroso" en náhuatl, ver Figura 7c), así como el diseño de su empaque final con los sellos, tabla nutrimental y demás requisitos para su venta masiva. Con lo anterior se ha iniciado su venta en diferentes mercados ecológicos y en algunas plazas donde se ha dado a conocer con bastantes buenos resultados, aunque aún se espera ampliar los puntos de venta y la venta de los mismos en un futuro cercano para lo cual se llevan a cabo con los productores indígenas de la cooperativa

talleres sobre marketing, producto, precio, plaza y promoción con el objetivo de ayudar a consolidar el proyecto y hacerlo viable a largo plazo.



Figura 7 a) Libro bilingüe español-náhuatl "El secreto de Julia para secar alimentos con el sol". Descarga gratuita del libro: https://doi.org/10.22201/ier.9786073066525e.2022 b) TikTok ¿Cómo se deshidratan las frutas? c)Producto HUELIC

CONCLUSIONES

La tecnología generada, instalada y evaluada por investigadores del Instituto de Energías Renovables de la UNAM en secado solar de alimentos, han servido como base para diseñar acciones de trabajo relacionadas con los diversos problemas alimentarios de comunidades rurales, poniendo como ejemplo el pueblo indígena de Hueyapan, Morelos. La tecnología desarrollada ha sido diseñada, evaluada y se han obtenido buenos rendimientos térmicos. Su implementación está impactando en la reducción del desperdicio de alimentos y, asimismo, fortalece el desarrollo económico comunitario del pueblo y de la región. La tecnología ofrece la oportunidad social de aumentar la producción y disposición de productos nutritivos en el mercado y en la mesa de las familias de la región.

El Centro Comunitario se ha convertido en el espacio generador de trabajo social, y el lugar para vivir la experiencia de transformar los alimentos que se han desechado durante años en Hueyapan. También es el espacio que cobra un significado social para el cuidado de la riqueza agrícola y alimentaria del pueblo. La fusión entre la tecnología de los secadores solares y el aprendizaje de las personas para usar correctamente esta tecnología, da paso a la disminución de la desigualdad social, la pobreza y el hambre.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por proyecto CONAHCyT 319188: Centro Comunitario para el Deshidratado Solar de Productos Agropecuarios de Pequeños Productores Indígenas de Hueyapan, Morelos.

REFERENCIAS

FAO (2015). Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos. Recuperado de: https://www.fao.org/3/i4068s/i4068s.pdf

FAO (2023). Alimentación y agricultura sostenibles. Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved December 29, from https://www.fao.org/sustainability/es/

O. García-Valladares, A.L. Cesar-Munguia, E.C. López-Vidaña, B. Castillo-Téllez, C.A. Ortiz-Sánchez, F.I. Lizama-Tzec, A. Domínguez-Niño (2022). Effect by using a modified solar dryer on physicochemical properties of carambola fruit (Averrhoa carambola L.). Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 21, No. 1, Alim2650. https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2650

O. García-Valladares, Alfredo Domínguez-Niño, Ana María Lucho-Gómez, Andrea Gail Jiménez-Montiel, Arcel Siareth Rodríguez-Mendoza, Beatriz Castillo-Téllez, Mario Luna-Flores, Margarita Castillo-Téllez (2024). Mixed-Mode Solar Drying and its Effect on Physicochemical and Colorimetric Properties of Zompantle (*Erythrina Americana*). Plant Foods for Human Nutrition. Vol. 79 pp 194-201. https://doi.org/10.1007/s11130-024-01147-0

D. Hernández Tamayo, R. Pérez-Espinoza, O. García Valladares (2022). Evaluación térmica de un deshidratador solar tipo túnel mixto bajo diferentes condiciones de operación. 3er congreso nacional de secado, cocción y refrigeración solar de alimentos, Campeche, México.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

OPTICAL DESIGN OF SEGMENTED SECONDARY MIRROR TO HOMOGENIZE CONCENTRATED FLUX OVER A TUBULAR SOLAR REACTOR

Leopoldo Martínez-Manuel, Javier Diaz Millan, Camilo A. Arancibia-Bulnes, Heidi I. Villafán Vidales.
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.
leomar@ier.unam.mx.

RESUMEN

El proceso hidrotermal (HT) es un método ampliamente utilizado para producir biocombustibles mediante la transformación de biomasa con presiones superiores a la saturación. Para cubrir el aporte de calor en procesamiento HT, las tecnologías de energía solar concentrada (CSP) resultan sistemas atractivos porque cumplen con el rango de temperatura requerido (150-350 ºC). Sin embargo, gradientes térmicos son producidos debido a la no uniformidad de irradiancia que típicamente se obtiene de los sistemas CSP, ocasionando así la degradación del reactor. Este estudio presenta el diseño de un espejo secundario (SM) colocado cerca del punto focal de un horno solar para homogeneizar la distribución del flujo sobre las paredes cilíndricas del reactor. El método de trazado de rayos Monte Carlo es utilizado para analizar el rendimiento óptico del espejo propuesto. Mediante análisis paramétrico, los parámetros de diseño del espejo son evaluados en detalle para optimizar el nivel de uniformidad de flujo sobre el receptor. Los resultados del modelo óptico muestran que la integración del espejo secundario puede generar una reducción sustancial del flujo pico sobre el reactor de hasta 93.88%, de 18 MW/m^2 a 1.1 MW/m^2 y lograr un nivel de uniformidad de flujo de 81.66%. Acoplando un espejo homogeneizador dentro de un sistema CSP, tensiones térmicas sobre el reactor pueden ser reducidas eficientemente, mejorando así el rendimiento del calor solar para aplicaciones HT.

Palabras claves: Espejo secundario, flujo solar uniforme, trazado de rayos, horno solar, proceso hidrotermal.

ABSTRACT

The hydrothermal (HT) process is a well-known method to produce biofuels through biomass transformation with pressures above saturation. To cover the heat input, concentrating solar power (CSP) technologies are attractive systems because they can meet the temperature range in HT applications (150−350 ºC). However, uneven thermal loads and potential material degradation can occur over the tubular reactor due to the non-uniformity of concentrated solar irradiance that point-focus CSP systems typically produce. This study is aimed to design a segmented secondary mirror (SM) positioned near the focal point of a solar furnace to homogenize the flux distribution over the cylindrical reactor walls. The Monte Carlo ray tracing method is employed to analyze the optical performance of the proposed SM. By parametric analysis, mirror design parameters are assessed in detail for optimizing the flux uniformity level over the target. Results of the optical modeling show that the integration of the secondary mirror can produce a substantial reduction in peak flux on the reactor of 93.88%, from 18 MW/m^2 to 1.1 MW/m^2 and achieve a sustained flux uniformity level of 81.66%. Accordingly, the thermal stresses onto the reactor can be efficiently reduced by coupling an SM within the CSP system, enhancing performances of solar heat for HT applications.

Keywords: Secondary mirror, flux uniformity, ray tracing, solar furnace, hydrothermal process.

INTRODUCTION

Currently, the most consumed energy sources worldwide come from fossil fuels, which are finite and generate a negative environmental impact due to the release of greenhouse gases [Shahzad, 2012]. As an alternative, today different technologies based on renewable resources are developed to promote a sustainable economy. In particular, hydrothermal (HT) processing of biomass seeks to obtain biofuels or other high-value materials from agricultural waste and other second and third generation biomass [Kan et al., 2015]. For instance, in hydrothermal liquefaction, in the absence of oxygen, biomass is suspended in water and compressed with temperatures between 200 to 350 ºC and pressures between 10 to 25 MPa for producing bio-crude [Xu et al., 2018]; similar process to the geological formation of fossil fuels.

Currently, the Instituto de Energías Renovables, IER-UNAM, carries out solar thermochemistry research at medium and high temperature, including pyrolysis processes and hydrothermal processing of biomass using a batch reactor [Martínez-Casillas et al., 2019]. To carry out these thermochemical developments, the main research tool is the IER-UNAM Solar Furnace (HoSIER) [Perez-Enciso, 2015]. Essentially, the HoSIER consists of a heliostat, a concentrator, and a shutter. This facility can deliver a solar peak flux of 18,000 kW/m^2 and a thermal power of up to 30 kW on a spot of approximately 10 cm in diameter, reaching temperatures of approximately 3400 ºC [Perez-Enciso, 2015].

Despite the benefit of using a solar furnace, this system typically produces thermal stress on the receiver walls due to the temperature gradients induced by the non-uniform flux distribution. Besides, to conduct biomass transformation, the internal walls of the batch reactor must operate at high pressures, subjecting them to very demanding operating conditions, which means that the reactor thickness must be increased [Ayala-Cortés et al. al., 2022]. However, the increase in thickness reduces heat transfer, and thus the reactor efficiency.

Alternatively, a secondary mirror (SM) design is proposed to help homogenize the concentrated flux onto the reactor walls. To do this, the SM is positioned at the reactor rear zone to redirect the reflected solar rays toward the side not illuminated by the HoSIER's concentrator. The Monte Carlo ray tracing method is utilized for the optical performance assessment of the proposed mirror. The geometric design of the system is evaluated through parametric analysis for optimizing the flux uniformity level onto the reactor. The uniform distribution of solar flux implies an adequate distribution of thermal loads, contributing to more stable operating conditions for the HT reactor.

---

[1] Este documento corresponde al Formato 1.

METHODOLOGY

Optical design

The methodology for solar flux homogenization consists of moving the reactor out of the solar furnace focus to allow a certain number of rays to pass above the reactor and, subsequently, redirect those rays towards the reactor back side (side not illuminated) with the help of a SM. Figure 1 illustrates schematically the solar furnace concentrator, where the reactor is moved along the optical axis and a flat mirror is placed near the focal point. The law of optical reflection indicates that, if a flat mirror is placed on the furnace focal point, the solar rays will be reflected with an angle θ_r, approximately equal to the incidence angle θ_i with respect to the normal $\hat{n}$ (see Figure 1a); the solar incidence angle θ_i is equal to the concentrator rim angle φ_r= 45.68º. Therefore, the reflection angle will be approximately 45º for the ray that travels the longest optical path (edge ray), so the rays will not hit the reactor wall. Conversely, if the mirror is tilted at an angle θ_m, the incidence angle with respect to the normal will be reduced, so reducing the angle θ_r as a function of θ_m, as presented schematically in Figure 1b. In this way, the reflected rays can be directed toward the reactor by modifying the mirror angle θ_m appropriately.

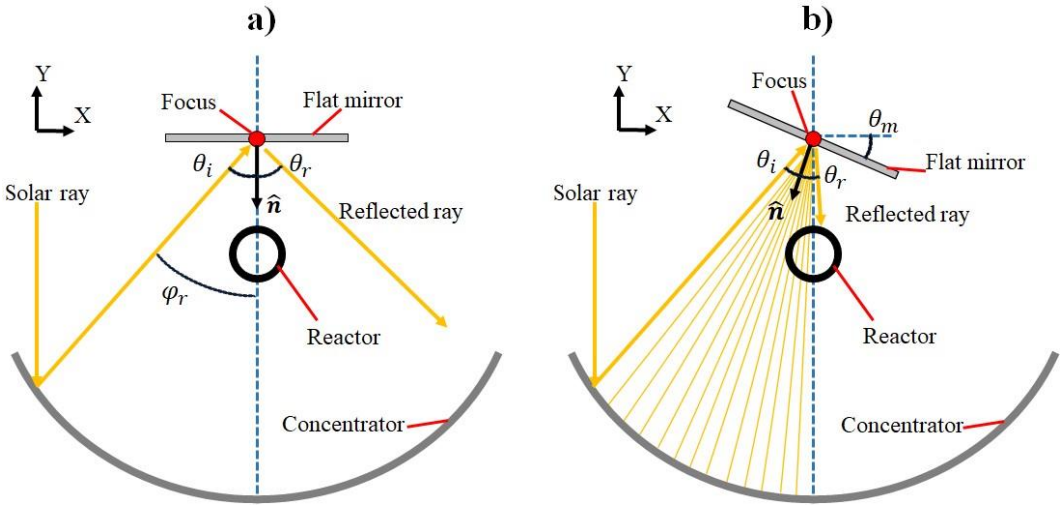


Figure 1. 2D scheme of the primary concentrator and flat secondary mirror exhibiting the law of light reflection: a) horizontal flat mirror; b) tilted flat mirror at an angle θ_m.

Figure 2a illustrates the scheme of the concentrator and a flat V-shaped facet mirror, showing design parameters such as the facet tilt angle θ_m, facet width S_m, and the distances d_1 and d_2, which indicate the distance from the furnace vertex to the SM and to the reactor, respectively. Based on the law of reflection, the V-shaped mirror will only reflect a certain number of rays towards the required direction, since the rays that impinge near to the concentrator vertex will have an angle θ_i smaller than the edge ray. To obtain a more precise flux distribution, several facets are required to control different tilt angles θ_m. Figure 2b shows a simplified layout of a segmented mirror composed of multiple flat facets *M*. Since a simple design of segmented SM, in terms of manufacturing, is required, the number of facets is set to a maximum of 3 per side. Besides, two lateral flat facets are considered for modeling a cavity-like mirror, as shown in Figure 2c.

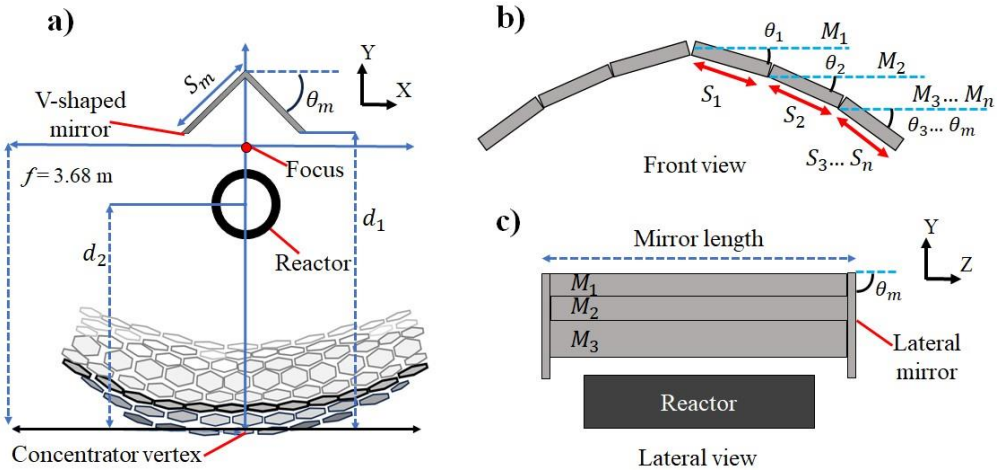


Figure 2. a) Scheme of solar furnace concentrator and V-shaped mirror with main design parameters; b) symmetric segmented mirror composed of several facets; c) lateral view of segmented mirror.

[1] Este documento corresponde al Formato 1.

To optimize the level of flux homogenization with minimum optical losses, the geometric design of the SM is carried out through a parametric analysis, thus evaluating key design parameters such as the tilt angle θ_m for each facet, the facet width S_m, as well as the distances d_1 and d_2, shown in Figure 2.a. The main design parameters to assess are the optical efficiency and the flux uniformity. The optical efficiency, described in Equation (1), is the ratio between the solar power absorbed in the receiver Q_{abs} and the solar power entering the concentrator system Q_{in}, that is, the power incident on the aperture area of the furnace concentrator [Kalogirou, 2013]. Likewise, the solar flux uniformity U is determined by Equation (2), where σ_q is the standard deviation of the concentrated solar flux distribution, and $\bar{q}$ is the average solar flux over the surface under analysis. Thus, as the standard deviation decreases, the variation factor $\sigma_q/\bar{q}$ will tend to zero and the uniformity U will increase to the unity; conversely, if $\sigma_q \geq \bar{q}$, then $U = 0$. In particular, the main design objective is to be able to achieve a theoretical flux uniformity level greater than 70%.

$$\eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{in}} \tag{1}$$

$$U = \begin{cases} 1 - \dfrac{\sigma_q}{\bar{q}} & , \quad \sigma_q < \bar{q} \\ 0 & , \quad \sigma_q \geq \bar{q} \end{cases} \tag{2}$$

Ray tracing analysis

In this study, the free license software Tonatiuh is used as the main tool to perform the optical analysis of the segmented secondary mirror design. The Tonatiuh Software uses a statistical method that generates solar rays randomly above the optical system under study called Monte Carlo ray tracing method, thus emulating the behavior of CSP systems [Jafrancesco et al., 2018]. For the optical modeling of the solar furnace, a rectangular parabolic surface of 6.2 m × 6.2 m in aperture area is considered. Regarding the reactor modeling, its dimensions are 6.5 cm in diameter by 10 cm in cylinder length.

To perform the ray tracing analysis, a direct normal irradiance of 1000 W/m^2 over the concentrator aperture was considered. The shape of the sun was established as CSR 0.2, with 100 million rays per simulation. Regarding optical properties, a specular reflectance of 0.68 was used for the primary mirror and 0.92 for the secondary mirror. The value of 0.68 is a factor known as Furnace Factor, which takes into account radiative losses due to obstruction of structures such as the curtain, optical influence of the heliostat and facet alignment errors [Pérez-Enciso, 2015]; besides the slope error is configured at 1.1 mrad. Regarding the reactor, being an opaque material, it only absorbs or reflects radiation; therefore, the reactor is configured with a reflectivity of 0, e. i., a perfect absorber. The global parameters used in the simulation are presented in Table 1.

Tabla 1. Global parameters for the optical modeling of the system in Tonatiuh.

Element	Dimensions	Reflectivity	Geometry
Concentrator	6.2 m × 6.2 m	0.68	Rectangular parabola
Reactor	0.065 m Diam × 0.1 m	0 (Perfect absorber)	Cylinder

RESULTS

Optical design

As a first step, the reactor displacement along the concentrator optical axis is analyzed without SM. The objective is to allow a certain number of rays to pass over the reactor, and by using a SM, to be able to redirect those rays towards the reactor back zone. To obtain a homogeneous solar flux, approximately 50% of the power delivered by the furnace must be absorbed, while the remaining 50% must reach the SM, thus ensuring that the energy is distributed homogeneously over the reactor.

Table 2 shows the power absorbed by the reactor and the percentage of power losses as a function of the reactor displacement along the optical axis without SM. From this result, a peak flux of 17.9 MW/m^2 and an absorbed power of 23.25 kW at the focus were estimated, producing an efficiency of 60% [Equation (1)]. As expected, by moving the reactor towards the concentrator vertex, the power decreases, while radiative losses increase. Since the objective value of the analysis is to have a reduction in power of approximately 50%, the most appropriate reactor position was determined at 3.618 m, estimating a power of 11.89 kW and losses of 51.12%.

Table 2. Theoretical absorbed power and energy losses as a function of the reactor displacement without SM.

	Focus (3.68 m)	**3.66 m**	**3.64 m**	**3.62 m**	**3.618 m**	**3.60 m**
Power (kW)	23.25	23.09	18.41	12.45	11.89	6.16
Losses (%)	0	0.51	20.67	46.37	51.12	73.44

Based on the law of reflection, to redirect the spilled rays towards the reactor, it is necessary to tilt the flat mirror at an angle θ_m. Due to the symmetry, it is convenient to employ a V-shaped mirror called M_1, see Figure 2a. First, a facet width S_1 of 5 cm and a facet length (see Figure 2c) of 14 cm are established arbitrarily to cover the reactor area completely.

Figure 3 shows the behavior of efficiency (blue line) and flux uniformity (red line) as a function of the tilt angle in a range from 15º to 27º. A maximum value of uniformity is observed at 18º with a subsequent reduction, while the efficiency tends to increase with increasing tilt angle, reaching a maximum of approximately 42% at 24º. In this study, the parameter of interest is the flux uniformity over efficiency;

[1] Este documento corresponde al Formato 1.

therefore, the angle θ_1 is selected at 18º, producing a uniformity level of 64.32% with an efficiency of 40.97%. Because the facet M_1 is useful at a certain dimension, a facet width analysis S_1 is performed. Figure 3b shows the efficiency and flux uniformity as a function of facet width in a range of 2−6 cm. It is observed that efficiency and uniformity remain almost constant for facet widths at 4−6 cm, which implies that even if the width increases, it will no longer provide any benefit. For facet widths between 2−3 cm, the efficiency and uniformity values decrease rapidly, which implies that a significant amount of radiation is not being reflected. Therefore, the facet design M_1 is determined with a width of 3.2 cm, estimating a power of 15.74 kW, efficiency of 40.94%, and flux uniformity level of 64.28%.

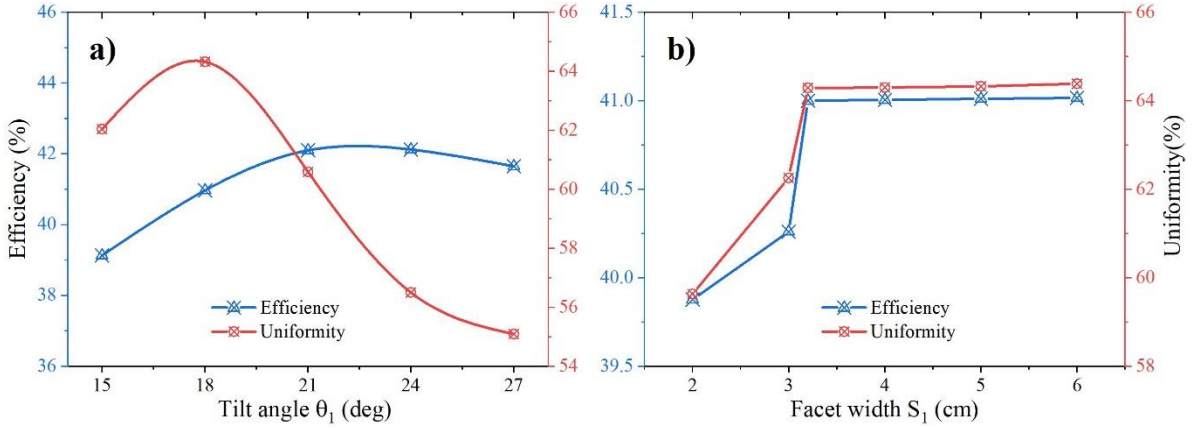


Figure 3. Estimation of efficiency and flux uniformity: a) as a function of the tilt angle θ_1; b) as a function of the facet width S_1.

It is considered to join the facet M_1 with a second facet called M_2 (see Figure 2b) whose tilt angle θ_2 is evaluated in a range greater than the angle θ_1. Similar to M_1, the initial dimensions are a width and length of 5 cm × 14 cm. Figure 4a shows the estimated efficiency and flux uniformity with respect to the tilt angle θ_2 in a range of 25−40º. A small increase in both efficiency and uniformity is observed when increasing the angle from 25 to 28º, and subsequently decrease. Although the oscillation of efficiency and uniformity does not vary by more than 3%, it can be seen that the angle 28º provides the best result. Thus, a flux uniformity level of 65.77% and an efficiency of 42.09% are estimated. Correspondingly, a facet width assessment was carried out for M_2 in which no significant variation was found in the facet width S_2 for values longer than 2 cm as depicted in Figure 4b, thus selecting this value. Below 2 cm, efficiency and uniformity are reduced, while a longer value does not increase them, making the use of more reflective material unnecessary.

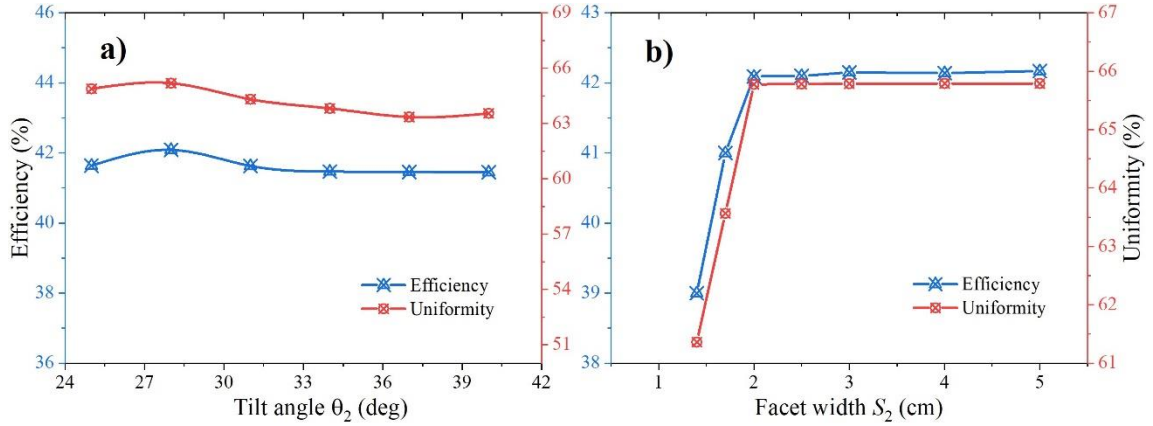


Figure 4. Estimation of efficiency and flux uniformity: a) as a function of the tilt angle θ_2; b) as a function of the facet width S_2.

Because the flux uniformity level is below the limit established, a third facet M_3 is used. For this design, dimensions of 2.5 cm × 14 cm in width and length were assigned, with an initial tilt angle θ_3 of 70º; smaller angles do not exhibit an improvement in performance. Figure 5a shows the estimated efficiency and flux uniformity as a function of the tilt angle θ_3 in a range of 70−85º. An improvement in flux uniformity of approximately 73% is observed, having a peak at 76º and subsequently decreasing; while the efficiency ranges between 42.5−43.5% throughout the analyzed range. As a result, the tilt angle that provides the best performance is 76º with a flux uniformity of 73.06% and efficiency of 43.42%. Figure 5b shows the estimated flux uniformity and efficiency with respect to the variation of facet width S_3 in a range from 2−3 cm, with steps of 0.2 cm. A gradual increase in the level of uniformity is observed until reaching a level of 73% at 2.72 cm, and subsequently decreasing. On the other hand, the behavior of efficiency throughout the analysis does not show a significant change, but it is observed that the highest efficiency coincides with the maximum level of uniformity. In this way, a facet width of 2.72 cm was determined, obtaining a flux uniformity of 73.15% and efficiency of 43.45%.

[1] Este documento corresponde al Formato 1.

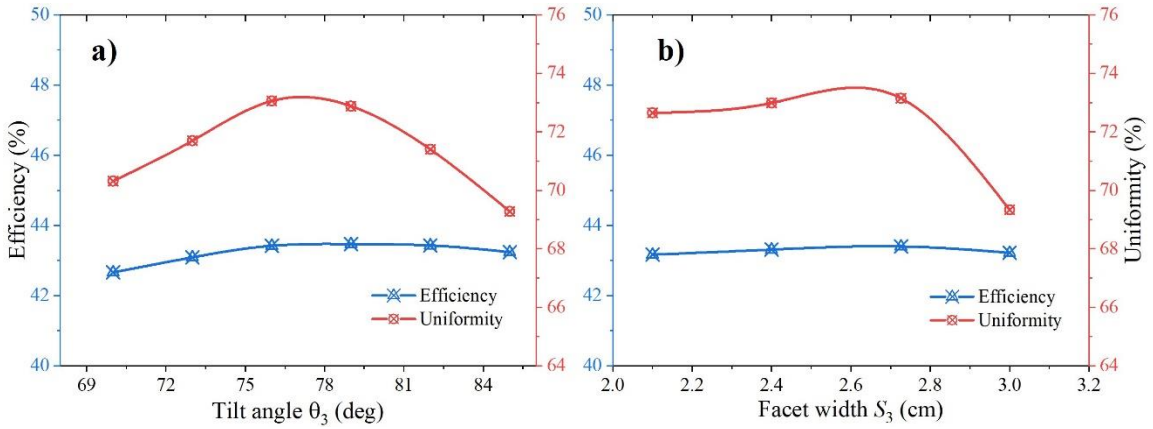


Figure 5. Estimation of efficiency and flux uniformity: a) as a function of the tilt angle θ_3; b) as a function of the facet width S_3.

Owing to the fact that the radiation is concentrated by a point-focusing system, there is radiation that is not reflected by the segmented mirror, which is a trough-type mirror. Therefore, the use of facets placed laterally (on the Z plane) is proposed, see Figure 2c. For the analysis, 2 symmetrical planar facets called M_4 are used, whose facet width is set to 6 cm.

Figure 6 shows the estimated flux uniformity level and efficiency as a function of the tilt angle θ_4, in an analysis range of 78−90º. The estimated efficiency is approximately 44%, while the uniformity increases with the increase of θ_4, having a maximum of 75.58% at 87º and subsequently decreasing slightly. For simplicity of design, an angle of 90º was selected, thus estimating a flux uniformity of 75.37% and efficiency of 44.05%. At the moment, the mirror consists of a length of 14 cm for the facets M_1, M_2 y M_3. In order to design the reactor-mirror assembly more compact, an analysis of the mirror length (see Figure 2c) is carried out. Figure 6b shows the efficiency and uniformity as a function of the facet mirror length in an analysis range of 10−14 cm; the reactor has a length of 10 cm. It is observed that both efficiency and uniformity decrease as the mirror length increases, but with the particularity that the length of 10.8 cm results in the highest percentage of solar flux uniformity with 79.08%. On the other hand, the highest level of efficiency is estimated at a length of 10 cm with 46.20%. Due to space constraints, the length of 10 cm is chosen since the uniformity only decreases 0.33% at that point with respect to the maximum. As a result, a flux uniformity level of 78.75% and efficiency of 46.20% are estimated.

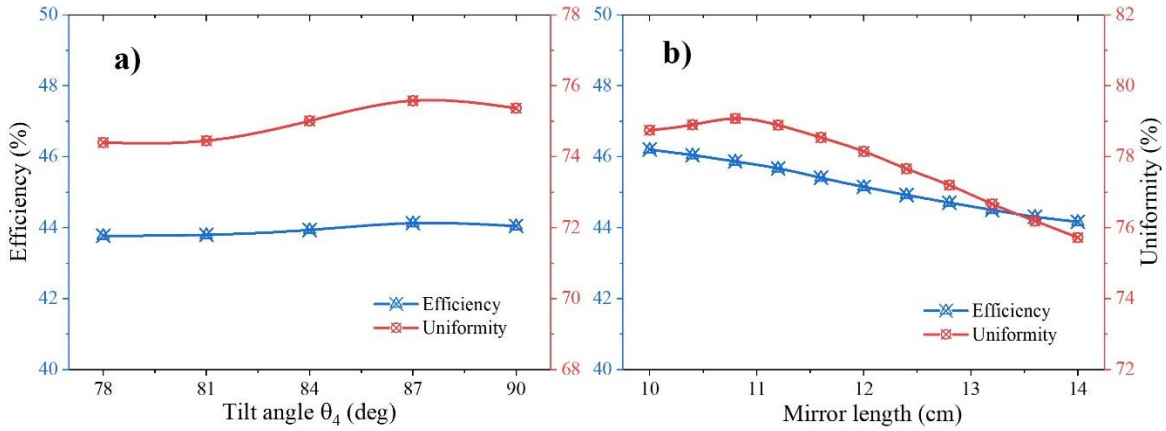


Figure 6. Estimation of efficiency and flux uniformity: a) as a function of the tilt angle θ_4; b) as a function of the mirror length.

Previously, the angle θ_4 was determined for facet M_4, but a facet width S_4 was not established. An analysis of the facet width is proposed together with the variation of distance d_2 from the reactor to the concentrator vertex.

Figure 7a shows the solar flux uniformity as a function of the displacement of the reactor along the optical axis of the system in a range of 3.612−3.618 m for facet widths of 4.8−5.6 cm. It is observed that uniformity increases with increasing facet width, having maximum uniformity values between 3.613 m and 3.616 m for a facet width S_4 of 5.6 cm. As a result, the best performance with a facet width of 5.6 cm and a reactor position of 3.615 m, provides a theoretical flux uniformity of 81.66% and efficiency of 45.10%; regarding efficiency, it remains at 45% ±1.5% throughout the analysis range, which is why its graph is omitted. Furthermore, Figure 7b shows the flux map estimated over the reactor wall by using the final version of the segmented SM. Table 3 shows the final dimensions of the SM, in addition to the estimated performance when implementing the SM together with the solar furnace.

[1] Este documento corresponde al Formato 1.

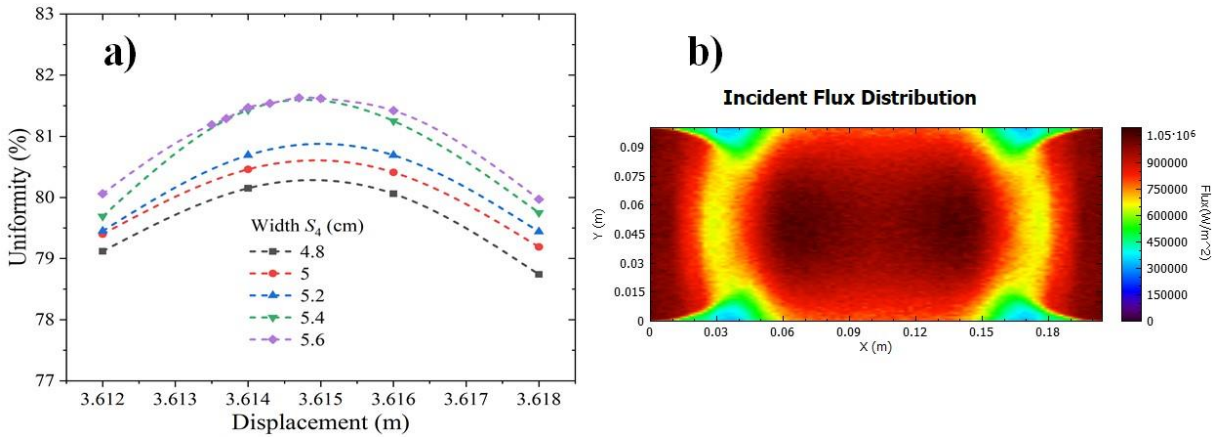


Figure 7. a) flux uniformity analysis as a function of the reactor displacement and facet width; b) flux map estimated with final SM.

Table 3. Global design parameters and performance of segmented SM design.

Segmented secondary mirror	Dimensions, angles and performance
M_1 (S_1, L_1, θ_1)	0.032 m × 0.10 m; 18º
M_2 (S_2, L_2, θ_2)	0.020 m × 0.10 m; 28º
M_3 (S_3, L_3, θ_3)	0.027 m × 0.10 m; 76º
M_4 (S_4, L_4, θ_4)	0.056 m × 0.11 m; 90º
Efficiency	45.10%
Flux uniformity	81.66%

CONCLUSIONS

In the present study, the flux uniformity level over a solar reactor was theoretically demonstrated by adapting a secondary mirror. This flattening of solar irradiance can help to reduce the thermal loads and deceleration of material failure. By implementing the secondary mirror, the flux homogenization was increased up to 81.66% with an efficiency of 45.10%. The SM proposed is small in size and simple in terms of manufacturing since curved facets are avoided. With the SM design, a decrease in the peak flux of 93.88% over the reactor is estimated, so implying an improvement in the operating conditions of the solar reactor and the efficiency of biomass conversion to biofuels.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors want to acknowledge DGAPA-PAPIIT-UNAM for the support provided to carry out this research through the grant IN107923 “Licuefacción hidrotérmica solar de biomasa residual”.

REFERENCES

Ayala-Cortés, A., Arcelus-Arrillaga, P., Millan, M., Okoye, P. U., Arancibia-Bulnes, C. A., Pacheco-Catalán, D. E., Villafán-Vidales, H. I. (2022). Solar hydrothermal processing of agave bagasse: Insights on the effect of operational parameters, Renewable Energy, 192, 14-23.

Jafrancesco D., Cardoso J.P., Mutuberria A., Leonardi E., Les I., Sansoni P., Francini F., and Fontani, D. (2018). Optical simulation of a central receiver system: Comparison of different software tools, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 792-803.

Kalogirou S.A. (2013). Solar energy engineering: processes and systems. Academic press.

Kan T. and Strezov V. (2015). Hydrothermal Processing of Biomass. In Biomass Processing Technologies (pp. 168-189). CRC Press.

Martínez-Casillas D.C., Mascorro-Gutiérrez I., Arreola-Ramos C.E., Villafán-Vidales H.I., Arancibia-Bulnes C.A., Ramos-Sánchez V.H., Cuentas-Gallegos A.K. (2019). A sustainable approach to produce activated carbons from pecan nutshell waste for environmentally friendly supercapacitors, Carbon**, 148**, 403-412.

Pérez Enciso, R. (2015). Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER. México: Universidad Autónoma de México.

Shahzad, U. (2012). The need for renewable energy sources, energy, 2(1), 16-18.

Xu D., Lin G., Guo S., Wang S., Guo Y., and Jing Z. (2018). Catalytic hydrothermal liquefaction of algae and upgrading of biocrude: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 97, 103-118.

[1] Este documento corresponde al Formato 1.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DE LAS ETAPAS DE DESCONTAMINACIÓN DE UN SISTEMA AUTÓNOMO DE POTABILIZACIÓN SOLAR DE AGUA

Pedro Reynaldo Martínez Manuel, Carlos A. Pineda Arellano, Miguel Ángel Hernández Barajas
Departamento de química solar, Centro de Investigaciones en Óptica A.C, Unidad Aguascalientes, Calle Prolongación Constitución, Aguascalientes, Aguascalientes, C.P. 20200, México, 6461357565, **preynaldom.m@cio.mx**

RESUMEN

La limitada accesibilidad al agua potable en comunidades vulnerables de México aunado a la carencia de infraestructura hidráulicas adecuada las ha forzado a depender directamente de fuentes hídricas superficiales, con riesgos significativos para la salud debido a la alta concentración de contaminantes presentes en estas fuentes. Aunque las tecnologías convencionales de desinfección de agua cumplen tal función, su implementación requiere de equipos sofisticados y personal especializado, dificultando su aplicación en áreas rurales remotas.

Atendiendo tal problemática, en éste trabajo se busca evaluar un sistema de tratamiento de agua innovador y accesible basado en avances en energías renovables, siendo la energía solar la principal fuente para su funcionamiento, abordando así los desafíos de acceso a la electricidad en áreas remotas. El potabilizador incluye etapas de desalación (filtro y ósmosis inversa) y un reactor fotocatalítico (con colectores solares CPC) funcionando con dióxido de titanio, el cual ha demostrado ser altamente efectivo en la eliminación de bacterias, pesticidas y otros contaminantes. Además, cuenta con un control automatizado alimentado por módulos fotovoltaicos dispuestos en modo isla, garantizando su autonomía incluso en entornos sin acceso a la red eléctrica.

Se realiza una validación experimental de las funciones y etapas del prototipo potabilizador, tratando agua de pozo del estado de Aguascalientes a través de su distribución hidráulica, circulando por sus filtros para después fluir por el reactor y finalmente obtener el producto el cual se analizará antes y después del proceso. Los resultados obtenidos nos permitirán evaluar el sistema de monitoreo y control mediante el sensado (en tiempo real) de los niveles de conductividad, flujo, oxígeno disuelto y pH del agua, así como el rendimiento del sistema en términos de desinfección, descontaminación y calidad del agua, mediante la determinación de parámetros establecidos por la norma mexicana NOM-127 de agua para uso y consumo humano con el propósito de obtener agua de calidad.

ABSTRACT

Limited access to potable water in vulnerable communities in Mexico, combined with a lack of adequate hydraulic infrastructure, has forced them to rely directly on surface water sources, which pose significant health risks due to the high concentration of contaminants present in these sources. Although conventional water disinfection technologies fulfill this function, their implementation requires sophisticated equipment and specialized personnel, making it difficult to apply them in remote rural areas.

Addressing this issue, this study aims to evaluate an innovative and accessible water treatment system based on improvement in renewable energy, with solar energy as a main source for its operation. This approach addresses the challenges of electricity access in remote areas. The potabilizer includes a desalination stage (filtration and reverse osmosis) and a photocatalytic reactor (with CPC solar collectors) operating with titanium dioxide, which has proven highly effective in removing bacteria, pesticides, and other contaminants. Additionally, it features an automated control system powered by photovoltaic modules configured in an island mode, ensuring its autonomy even in environments without access to the electrical grid.

Experimental validation of the functions and stages of the potabilizer prototype is conducted by treating well water from the state of Aguascalientes through its hydraulic distribution system, circulating through its filters, and then flowing through the reactor to obtain the final product, which is analyzed before and after the process. The results will allow us to evaluate the monitoring and control system through real-time sensing of conductivity, flow, dissolved oxygen, and pH levels of the water, as well as the system's performance in terms of disinfection, decontamination, and water quality. This evaluation is based on parameters established by the Mexican standard NOM-127 for water used for human consumption, to produce high-quality water.

Palabras claves: CPC collector, Photovoltaic modules, Photoreactor, Reverse osmosis, Solar energy, Water decontamination.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la calidad del agua superficial es crucial para proteger la salud pública y la sostenibilidad ambiental. En México, esta evaluación abarca ocho parámetros esenciales, incluyendo la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Coliformes Fecales (CF), entre otros. La extensa "Red Nacional de Monitoreo del Agua" supervisó 1,723 sitios en 2022, proporcionando información invaluable sobre la calidad del agua en todo el país [1]. El análisis de estos parámetros reveló disparidades significativas, con una parte sustancial de los sitios monitoreados que no cumplen con los estándares de calidad establecidos, por ejemplo, los CF varían de contaminados a extremadamente contaminados en más del 80% de los sitios monitoreados. Esto denota la necesidad urgente de estrategias efectivas de tratamiento del agua para mitigar la contaminación y asegurar el acceso al recurso de agua

limpia.

Los métodos convencionales de tratamiento del agua, como la coagulación, la floculación y la cloración, se han empleado durante mucho tiempo para abordar la contaminación del agua. Sin embargo, estos métodos a menudo implican altos costos operativos y pueden generar subproductos dañinos, lo que requiere la exploración de tecnologías de tratamiento alternativas [1]. Por otra parte, la desalación es un proceso confiable y factible para obtener agua potable. Además, hoy en día se ha convertido en la principal alternativa de suministro de agua para muchos países en desarrollo. La ósmosis inversa es, en la actualidad, un método ampliamente utilizado y sus configuraciones se han expandido para mejorar las tecnologías que contribuyen a la realización del tratamiento del agua. En algunos estudios como el de Benavides et al. en 2017 [2], utilizan una combinación de ósmosis inversa suministrada con un sistema eléctrico solar independiente compuesto por paneles fotovoltaicos. Esto se debe a que algunas regiones (mayormente desprovistas de agua dulce) se encuentran aisladas de la red eléctrica.

En las últimas décadas, la investigación científica ha impulsado el desarrollo de tecnologías innovadoras de tratamiento del agua, provocadas por el potencial inagotable de la energía solar. La fotocatálisis solar ha surgido como un enfoque prometedor, aprovechando la luz solar para impulsar reacciones químicas que desinfectan el agua de manera efectiva y degradan los contaminantes [3]. La desinfección solar (SODIS) representa una de estas aplicaciones, ofreciendo un método rentable y ambientalmente sostenible para tratar pequeños volúmenes de agua. Al exponer contenedores transparentes de agua a la luz solar, SODIS puede inactivar patógenos y mejorar la calidad del agua. Además, la utilización de materiales fotocatalíticos, como el dióxido de titanio (TiO_2), ha revolucionado el tratamiento solar del agua. La fotocatálisis basada en TiO_2 explota las propiedades fotocatalíticas del material para contribuir en la degradación de contaminantes orgánicos y patógenos microbianos bajo radiación solar [4].

Los avances recientes también se han centrado en la optimización del diseño y el rendimiento de los reactores fotocatalíticos solares. Los estudios han explorado configuraciones novedosas de reactores y diseños de colectores para maximizar la eficiencia de recolección de UV solar y mejorar los resultados de desinfección [5]. En este contexto, los CPC (colector parabólico compuesto) son concentradores de no imagen constituidos por reflectores parabólicos que conducen la radiación solar desde su apertura hasta el absorbedor. Éstos colectores, se emplean ampliamente en muchas aplicaciones solares [6], y algunas concretas [7–10], siendo su uso particular en la descontaminación del agua.

En los últimos años, se han construido y evaluado diferentes sistemas de reactores solares para el tratamiento del agua basados en colectores. La primera aplicación exitosa de desinfección del agua utilizando luz solar se publicó en 1980 [11]. La desinfección solar ha demostrado ser un método de tratamiento efectivo, práctico y con bajos costos operativos. La técnica SODIS ha sido verificada con éxito en el campo real para aplicaciones en diferentes proyectos alrededor del mundo [12–15]. Mientras tanto, la investigación sobre la desinfección con TiO_2 pasó de estudios de laboratorio básicos a los primeros ensayos con aplicaciones reales de desinfección [16]. Hace un par de décadas, solo se conocían dos demostraciones de tratamiento/purificación de agua utilizando radiación solar a escala industrial, una para el tratamiento de aguas subterráneas en los Estados Unidos [17] y otra para el tratamiento de aguas residuales en la Plataforma Solar de Almería, España [18]. Desde entonces, se han construido e instalado diversos sistemas de ingeniería [19–21], donde la necesidad de innovación en la entrega de luz, el diseño de fotoreactores y la desinfección de aguas residuales fueron esenciales.

En los últimos años, han surgido técnicas de fabricación muy innovadoras que son notables para mencionar y que han sido útiles en el proceso de construcción y diseño del sistema de tratamiento de agua. De esta manera, los estudios de investigación en el área del reactor fotocatalítico han sido considerados, destacando el trabajo de Sacco en 2018 [22], quien, utilizando un reactor con colectores solares tipo CPC de baja concentración, logra inactivar E. Coli en aguas residuales municipales. Además, Terrón et al., en 2018, demostraron a través de simulaciones de trazado de rayos el uso y la comparación de diferentes configuraciones de tubos para ser dispuestas en un reactor fotocatalítico, donde estudiaron el mejor rendimiento dado los posibles patrones [23].

Finalmente, se consideraron los estudios trascendentales en la construcción de estos sistemas donde el control/automatización y el reactor con colector CPC fueron las principales características, como en Salgado I. et al. en 2015, quienes investigaron la fabricación de colectores y su disposición para tubos soportados por TiO_2, o Augugliaro en 2005, que demuestra un reactor híbrido utilizando colectores CPC y membranas [24]. No obstante, los sistemas antes mencionados no son autónomos o requieren estar conectados a la línea eléctrica para completar sus funciones. Algunos otros tienen las etapas separadas, requiriendo llevar el agua a procesos subsecuentes, lo cual se vuelve inviable en comunidades rurales. Además, el reactor solar con colector CPC generalmente se fabrica de manera artesanal, lo que lo hace impreciso e ineficiente para una recolección óptima de UV solar. En este sentido, el potabilizador de agua logra combinar estas tecnologías con las ventajas del uso de la energía solar como fuente de energía limpia.

METODOLOGÍA

Para conocer el proceso del potabilizador en todas sus etapas, se presenta un esquema general de su funcionamiento en la Figura 1. Se muestra el proceso para purificar agua no tratada de pozos locales y/o de presas, que se analiza previamente para después ser conducida a través de la planta de tratamiento de agua. Este sistema incorpora un conjunto de módulos fotovoltaicos para energizar eléctricamente el sistema. Primero, la muestra de agua pasa por la etapa de desalación, que consiste en membranas de ósmosis inversa para eliminar sales y minerales. A continuación, se circula a través de un fotoreactor tubular para inhibir microorganismos recalcitrantes y especies químicas en el agua que podrían haber pasado a través del sistema de desalación. El potabilizador incluye un sistema de control para la supervisión y automatización del proceso. Asimismo, se incluyen sensores específicos para la detección de los principales parámetros de calidad del agua potable, con el fin de establecer si el agua tratada cumple con las condiciones requeridas según estos factores. Finalmente, se obtiene un producto óptimo y no contaminado, donde se realizarán análisis de muestreo finales para garantizar la conformidad con las

regulaciones mexicanas establecidas.

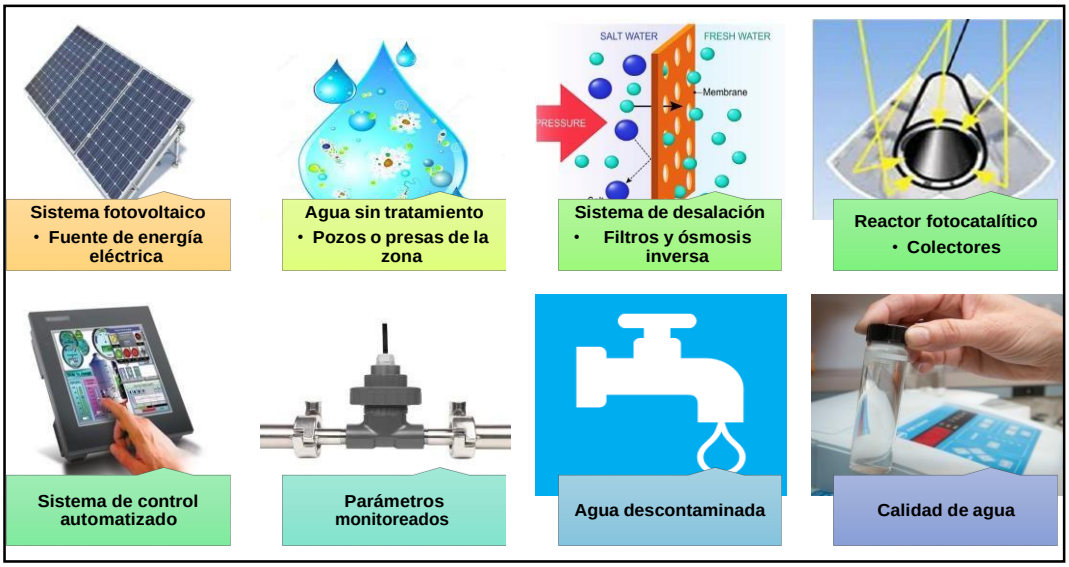


Figura 1.- Esquema general de la secuencia de las etapas del potabilizador.

Etapa de Control

Esta etapa involucra, por un lado, el control del sistema para la monitorización y detección del agua y, por otro lado, el circuito de potencia relacionado con los dispositivos de alta potencia utilizados en todo el proceso de flujo de agua. Por lo tanto, la etapa se divide en control digital y control del circuito de potencia, siendo el control digital operado por aquellos dispositivos que utilizan señales digitales y voltaje de baja potencia. En consecuencia, los siguientes dispositivos de detección e instrumentos de potencia (descritos en la Tabla 1) fueron esenciales de acuerdo con los requisitos principales para alcanzar los parámetros de calidad.

Tabla 1.- Componentes principales de la etapa de control del potabilizador.

Dispositivo	Lectura
Sonda de pH	pH
Sonda de oxígeno disuelto	mg/L
Medidor de flujo de 1/2"	L/min
Sonda de conductividad	µS/cm
Bombas dosificadoras de pH	mL/min
Sensores de nivel	V
Válvulas de 3 vías	V
Placa Arduino Mega	16 puertos An., 54 puertos D.
Relé de 4 canales	4 CH
Pantalla HMI Nextion®	Señal I/O
Fuente de alimentación 5 VDC	-
Fuente de alimentación 24 VDC	-
2 contactores TeSys Deca	-
2 botones de inicio verdes	Normalmente abierto (NO)
1 botón de parada rojo	Normalmente cerrado (NC)
1 botón de parada de emergencia	Normalmente cerrado (NC)

Para esquematizar el sistema de control completo, se presenta una representación gráfica de la interconexión de componentes en la Figura 2, donde la ruta principal de automatización se divide en dos dispositivos: una placa con microcontrolador Arduino Mega® y un relé de 4 canales. La placa Arduino recibe las señales (digitales y analógicas) provenientes de los sensores de pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, flujo y nivel. Posteriormente, la placa Arduino envía señales programadas a los dispositivos de actuación (bombas, válvulas, etc.) al módulo de 4 canales, el cual recibe las tareas asignadas según el estado del agua (nivel del tanque o calidad) e inicia la tarea de abrir/cerrar válvula o de encender/parar bomba según el caso. Además, la automatización del sistema muestra el estado

de cada sensor y ciclo de agua en la pantalla HMI Nextion® previamente configurada y programada.

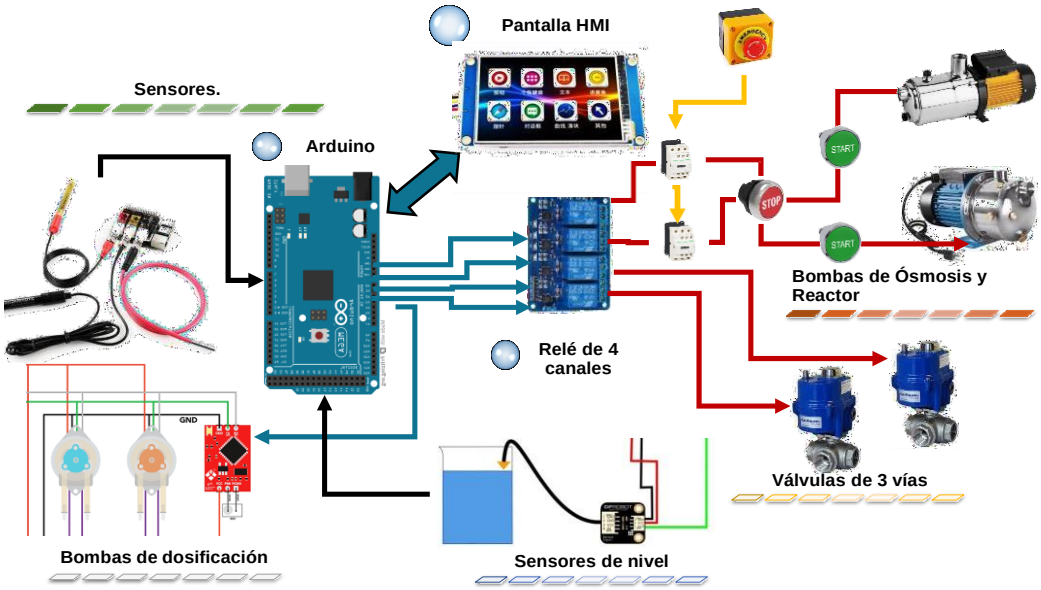


Figura 2.- Gráfico de los componentes principales del sistema de control del potabilizador

La etapa de control incorpora sensores de nivel (alto y bajo) conectados a cada tanque de almacenamiento. Inicialmente, el tanque de alimentación de RO está lleno y el sistema comienza a activar la bomba RO. En esta etapa, el proceso de desalación recircula el agua contaminada a través de las membranas de RO para obtener agua permeada; por lo cual el parámetro a leer es la conductividad. Mientras este factor sea ≥ 800 µS/cm (para agua de uso doméstico), el agua se recircula a través de una válvula de 3 vías de ½ (cerrada) al tanque de alimentación de RO. Una vez que se lee un valor menor a 800 µS/cm, la válvula de 3 vías de ½ abre la línea hacia el tanque de fotoreactor hasta llenarlo (detectado por un sensor de nivel alto). Una vista general (frontal) del prototipo se presenta en la figura 3, en donde se puede observar los tanques de almacenamiento de las distintas etapas, así como los paneles fotovoltaicos que suministran al sistema de energía eléctrica.



Figura 3.- Prototipo sistema potabilizador

RESULTADOS

Inicialmente, los sensores de nivel controlan el llenado de los tanques al activar o desactivar el funcionamiento de las bombas de agua y las válvulas de 3 vías. Una vez que el sistema de control detecta un nivel alto de agua en el tanque de alimentación, la bomba de ósmosis inversa (RO) inicia su funcionamiento y el sensor de conductividad envía la lectura al HMI, donde un valor de conductividad menor a 800 µS acciona la válvula de 3 vías y cambia su flujo de recirculación de agua hacia el tanque del reactor. Los datos del dispositivo de

detección en este punto se muestran en la tabla 2, donde se observa una conductividad decreciente, lo que corresponde al rendimiento de desmineralización de la membrana RO. Recordando el parámetro de conductividad establecido para el agua potable (400 y 800 µS/cm).

Llenado el tanque del reactor y los sensores de nivel detectan agua en nivel alto, la bomba del reactor comenzó a hacer fluir el agua a través del reactor. En éste momento, los sensores de pH, temperatura y oxígeno disuelto (OD) miden la calidad del agua. Una vez que los valores de OD fueron superiores a 6 mg/L (Recordando que la norma establece un rango mínimo de OD entre 6-8 mg/L), la segunda válvula de 3 vías actuó, cambiando el flujo del agua de recirculación hacia el tanque final. En la tabla 2 se muestra el rendimiento de la etapa del reactor según las lecturas de los dispositivos de detección. Se observa que el OD aumenta como resultado de la descontaminación realizada por el reactor. Mientras tanto, el pH disminuye debido a la desmineralización ocurrida en la desalación por ósmosis inversa y a la eliminación de restos de minerales disueltos en el reactor. Finalmente, el aumento de la temperatura es consecuencia de la exposición a la radiación solar; sin embargo, al ser colectores de baja concentración, no aumenta de manera considerable. Se hace mención que los resultados obtenidos se lograron en un lapso de 45 minutos (llegado al final del proceso), después de esto, los valores fueron estables.

Tabla 2.- Resultados de lectura tomados por los sensores del sistema potabilizador.

Parámetro	*Lectura inicial*	*Lectura final*	*Rango nominal (norma)*
Conductividad	1400 µS	51 µS	400 - 800 µS/cm
pH	8.3	5	6.5-8.5
Oxígeno disuelto (DO)	0.34 mg/l	8.4 mg/l	≥ 6-8 mg/l
Temperatura	26.3 °C	37 °C	-

CONCLUSIONES

Se evaluó un prototipo de potabilizador de agua con una capacidad de producción de 1 m³/día. Este sistema de tratamiento de agua es alimentado eléctricamente por una etapa de energía solar fotovoltaica, proporcionando la energía necesaria para todo el control y los dispositivos eléctricos. Así, se logra autonomía del sistema, dado su capacidad para operar todo el proceso sin requerir supervisión humana. Lo cual, representa un avance significativo tanto en términos científicos como en sostenibilidad. La integración de tecnologías solares para la alimentación del sistema no solo reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables, sino que también asegura la viabilidad del sistema en áreas remotas o con acceso limitado a la red eléctrica. Además, la combinación de tratamiento de agua con procesos fotocatalíticos innovadores mejora la eficiencia en la eliminación de contaminantes y cumple con las normas mexicanas de calidad del agua, garantizando un recurso vital y seguro.

Asimismo, se realizó una evaluación del sistema de control mediante el sensado en tiempo real de CE, OD, pH y temperatura en función del tiempo, que muestran el funcionamiento de todas las etapas acopladas. De esta manera, se logró la calidad de agua requerida (según el comportamiento de los dispositivos de detección). El sistema automatizado y el uso de tecnologías de control basadas en Arduino permiten una gestión precisa y eficiente del proceso, minimizando la necesidad de intervención humana y optimizando el rendimiento del sistema. Este enfoque contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas accesibles que pueden ser adaptadas a diferentes contextos y necesidades, promoviendo así un mayor acceso al agua potable de calidad. Finalmente, la evaluación al prototipo no solo cumple con su objetivo, sino que también ofrece una solución sostenible y replicable para enfrentar los desafíos globales en el acceso a agua limpia, con un impacto positivo en la preservación ambiental y en la calidad de vida de las comunidades.

Observaciones

Como se puede observar en la tabla 2, los valores de conductividad y pH requieren ser ajustados para estar dentro del rango nominal de agua de uso doméstico. Por lo cual el sistema cuenta con bombas de dosificación de pH para que automáticamente el sistema detecte cuando se está fuera de ellos y ajuste tal parámetro.

Finalmente, al evaluar el prototipo del potabilizador quedan valores por asegurar para entrar en rango, como lo es la conductividad, por lo cual se recomiendan bombas de dosificación. Por otra parte, la evaluación del reactor también debe tomarse en cuenta, por lo cual se debe observar el rendimiento del efecto de desinfección solar mediante el semiconductor fotocatalítico. Además, algo que se busca es realizar una comparativa de la calidad de agua reportada en un laboratorio acreditado contra los valores obtenidos en el prototipo por lo cual, es necesario realizarla.

REFERENCIAS

1. COMISIÓN NACIONAL DE AGUA, *Diseño De Plantas Potabilizadoras Tipo De Tecnología Simplificada* (2007).
2. M. S. Benavides and M. M. Miranda, *Desalación de Agua de Mar Mediante Sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica Para Provisión de Agua Potable En Isla Damas, Región de Coquimbo* (n.d.).
3. J. M. Herrmann, "Photocatalysis fundamentals revisited to avoid several misconceptions," Appl. Catal. B Environ. **99**, 461–468 (2010).
4. S. Malato, P. Fernández-Ibáñez, M. I. Maldonado, I. Oller, and A. Zapata, "Solar Detoxification solar detoxification and Disinfection of Water solar disinfection of water," in *Solar Energy* (Springer New York, 2013), pp. 495–520.

5. I. Salgado-Tránsito, A. E. Jiménez-González, M. L. Ramón-García, C. A. Pineda-Arellano, and C. A. Estrada-Gasca, "Design of a novel CPC collector for the photodegradation of carbaryl pesticides as a function of the solar concentration ratio," Sol. Energy **115**, 537–551 (2015).
6. M. Tian, Y. Su, H. Zheng, G. Pei, G. Li, and S. Riffat, "A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications," Renew. Sustain. Energy Rev. **82**, 1272–1296 (2018).
7. M. Antonelli, A. Baccioli, M. Francesconi, U. Desideri, and L. Martorano, "Electrical production of a small size Concentrated Solar Power plant with compound parabolic collectors," Renew. Energy **83**, 1110–1118 (2015).
8. D. Tiwari, A. F. Sherwani, D. Atheaya, and A. Arora, "Energy and exergy analysis of solar driven recuperated organic Rankine cycle using glazed reverse absorber conventional compound parabolic concentrator (GRACCPC) system," Sol. Energy **155**, 1431–1442 (2017).
9. M. Elashmawy, "An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still," Desalination **411**, 1–8 (2017).
10. X. Xue, H. Zheng, Y. Su, and H. Kang, "Study of a novel sunlight concentrating and optical fibre guiding system," Sol. Energy **85**, 1364–1370 (2011).
11. A. Acra, Y. Karahagopian, Z. Raffoul, and R. Dajani, "Disinfection of Oral Rehydration Solutions By Sunlight," Lancet **316**, 1257–1258 (1980).
12. M. A. Fendrich, A. Quaranta, M. Orlandi, M. Bettonte, and A. Miotello, "Solar concentration for wastewaters remediation: A review of materials and technologies," Appl. Sci. **9**, (2018).
13. S. Dong, J. Feng, M. Fan, Y. Pi, L. Hu, and X. Han, "Recent developments in heterogeneous photocatalytic water treatment using visible light- responsive photocatalysts : a review," RSC Adv. **5**, 14610–14630 (2015).
14. Y. Abdel-Maksoud, E. Imam, and A. Ramadan, "TiO2 solar photocatalytic reactor systems: Selection of reactor design for scale-up and commercialization—analytical review," Catalysts **6**, (2016).
15. A. O. Ibhadon and P. Fitzpatrick, "Heterogeneous photocatalysis: Recent advances and applications," Catalysts **3**, 189–218 (2013).
16. J. A. Herrera Melián, J. M. Doña Rodríguez, A. Viera Suárez, E. Tello Rendón, C. Valdés Do Campo, J. Arana, and J. Pérez Peña, "The photocatalytic disinfection of urban waste waters," Chemosphere **41**, 323–327 (2000).
17. J. C. Crittenden, R. P. S. Suri, D. L. Perram, and D. W. Hand, "Decontamination of water using adsorption and photocatalysis," Water Res. **31**, 411–418 (1997).
18. P. A. S. S. Marques, M. F. Rosa, F. Mendes, M. Collares Pereira, J. Blanco, and S. Malato, "Wastewater detoxification of organic and inorganic toxic compounds with solar collectors," Desalination **108**, 213–220 (1997).
19. H. O. Neal, S. Garcia-segura, K. Hristovski, and P. Westerhoff, "Science of the Total Environment Compact light-emitting diode optical fi ber immobilized TiO 2 reactor for photocatalytic water treatment," Sci. Total Environ. **613**–**614**, 1331–1338 (2018).
20. H. Yu, L. Song, Y. Hao, N. Lu, X. Quan, S. Chen, Y. Zhang, and Y. Feng, "Fabrication of pilot-scale photocatalytic disinfection device by installing TiO 2 coated helical support into UV annular reactor for strengthening sterilization," **283**, 1506–1513 (2016).
21. H. C. J. Casalins-blanco, "353549828006.Pdf," (2016).
22. O. Sacco, V. Vaiano, L. Rizzo, and D. Sannino, "Photocatalytic activity of a visible light active structured photocatalyst developed for municipal wastewater treatment," J. Clean. Prod. **175**, 38–49 (2018).
23. M. Terrón-Hernández, M. I. Peña-Cruz, J. G. Carrillo, U. Diego-Ayala, and V. Flores, "Solar Ray Tracing Analysis to Determine Energy Availability in a CPC Designed for Use as a Residential Water Heater," (n.d.).
24. V. Augugliaro, E. García-López, V. Loddo, S. Malato-Rodríguez, I. Maldonado, G. Marcì, R. Molinari, and L. Palmisano, "Degradation of lincomycin in aqueous medium: Coupling of solar photocatalysis and membrane separation," Sol. Energy **79**, 402–408 (2005).
25. O. Gómez, "Desalinización De Agua Para Aplicaciones De Potabilización Mediante El Desarrollo De Tecnología Solar Sustentable," 12–50 (2018).
26. P. R. Martínez-Manuel, L. M. Valentín-Coronado, I. Salgado-Transito, M. I. Peña-Cruz, F. Martell-Chávez, J. G. Carrillo-Baeza, and C. A. Pineda-Arellano, "Optical Evaluation of 3D Printed Cpc By Coupling Photogrammetry and Ray Tracing Analysis," J. Appl. Eng. Sci. 1–11 (2022).

Tecnología y Sistemas Fotovoltaicos/ Edificios Bioclimáticos

ID	TÍTULO	PONENTE
16056	Prospectiva Agrovoltaica para México: Agricultura y Energía en el mismo terreno.	Aarón Sánchez Juárez
16074	Propuesta de vivienda productiva en clima semiárido templado: comportamiento térmico y energético.	Norma Rodríguez Muñoz
16080	Diseño, construcción y caracterización de sistema fotovoltaico aislado con baterías y portátil para uso doméstico en comunidades aisladas del estado de Durango.	Jesús María Carrillo
16092	Diseño de espacio recreativo con arquitectura bioclimática; implementación de sistema fotovoltaico aislado como techo para recargar dispositivos electrónicos en escuelas públicas de nivel superior y postgrado del estado de Durango.	Fernando Meraz Becerra

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

PROSPECTIVA AGROVOLTAICA PARA MÉXICO: AGRICULTURA Y ENERGÍA EN EL MISMO TERRENO

Miguel Ángel Guevara Nieto y Aarón Sánchez Juárez
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,
Priv. de Xochicalco s/n Col. Centro, Temixco, Morelos; CP 62580, México;
Tel: 55 5622 9716; e-mail: **asj@ier.unam.mx**

RESUMEN

Los Sistemas Agrovoltaicos representan un paradigma sobre el uso de la tierra: representan el aprovechamiento dual del terreno tanto para generar electricidad solar fotovoltaica como para el crecimiento de cultivos. Para tener este concepto, los arreglos fotovoltaicos se elevan sobre del suelo y bajo ellos, se siembra especies de cultivo que han demostrado que pueden crecer bajo una sombra, como aquellos que integran el concepto de Agricultura Protegida en nuestro país. Dichos cultivos son los candidatos a sembrarse bajo la sombra que producen los módulos fotovoltaicos elevados.

En este trabajo se evalúa el potencial de generación de electricidad por medio de los sistemas agrovoltaicos con base en la información siguiente: superficie en uso en la Agricultura Protegida; Recurso Solar Promedio diario Mensual de México; y el factor de llenado máximo del arreglo fotovoltaico sobre la superficie disponible. Con dicha información se determinó que la magnitud de la Potencia Fotovoltaica factible a ser instalada en la superficie que se está dedicando a la Agricultura Protegida es tres veces mayor a la potencia fotovoltaica instalada actualmente, incluyendo tanto las grandes Plantas de Generación Eléctrica Solar Fotovoltaica como aquellos Sistemas Fotovoltaicos clasificados como Generación Distribuida. Adicionalmente, la generación de energía eléctrica que podrían suministrarse al Sistema Eléctrico Nacional sería el equivalente al 29% de la energía que se consumió en el año 2022.

ABSTRACT

Agrovoltaic Systems represent a paradigm on land use: they represent the dual use of the land both to generate photovoltaic solar electricity and crops growth. To achieve this concept, photovoltaic arrays raised above the ground and crop species that have proven that they can grow under shade beneath them, such as those that make up the concept of Protected Agriculture in our country. These crops are candidates to plant under the shade produced by elevated photovoltaic modules.

This paper evaluates the potential for electricity generation through agrovoltaic systems based on the following information: surface area in use in Protected Agriculture; Average daily monthly solar resource in Mexico; and the maximum fill factor of the photovoltaic array on the available surface. With this information, it was determined that the magnitude of the feasible Photovoltaic Power to be installed on the surface that is being dedicated to Protected Agriculture is three times greater than the currently installed photovoltaic power, including both the large Photovoltaic Solar Electric Generation Plants and those Photovoltaic Systems classified as Distributed Generation. Additionally, the generation of electrical energy that could be supplied to the National Electrical System would be equivalent to 29% of the energy that was consumed in 2022.

Palabras clave:
Sistemas Fotovoltaicos; Sistemas Agrovoltaico; Agricultura Protegida, Cubierta fotovoltaica

INTRODUCCIÓN

Un Sistema Fotovoltaico (SFV) es la integración de equipos, partes y componentes que absorben la luz solar, la transforman en electricidad y la acondicionan para que pueda ser usada por las cargas o aparatos eléctricos convencionales. Los SFV han sido la tecnología más eficaz para producir electricidad tanto en el medio rural en donde no existe la red eléctrica convencional, así como, en el ámbito suburbano y urbano. En nuestro país, los SFV interconectados al Sistema Eléctrico Nacional, o Plantas de Generación Eléctrica Solar Fotovoltaica (PGESFV), han tenido una penetración desde 2007 al 2023 que, a la fecha han acumulado una potencia pico de 10,479 MW [1,2,3]. En el caso de las aplicaciones agropecuarias [1], las buenas experiencias han traído como consecuencia ingresos considerables para los productores dando constancia de la bondad y beneficios de su implementación; sin embargo, en ninguno de los proyectos instalados, se consideró que el área bajo las cubiertas FV son improductivas ya que, en su diseño, no se tomó en cuenta dicho aspecto. Considerando la capacidad de SFV operando en México, éstos ocupan más de 10,000 ha de terreno sin vocación agrícola. Es más, se conoce por datos de la SENER **[2, 3]**, que en nuestro país hay 7,524.35 MW en sistemas de gran potencia de tecnología FV instalada, que a una tasa de ocupación de terreno de 1 MW por hectárea, da como resultado una ocupación de 7 mil hectáreas de terreno que no es productivo desde el punto de vista agrícola.

Una manera de tener un área agrícola productiva que al mismo tiempo se produzca electricidad es a través de la implementación del concepto Agrovoltaico **[4]**, el cual se crea cuando, en una parcela o zona de cultivo, se coloca encima de ella placas fotovoltaicas que podrían producir la electricidad que requiere el agricultor para mejorar sus procesos agrícolas; o bien, usar los pasillos de mantenimiento para sembrar productos agrícolas en una PGESFV. Para el primer caso, se requiere una estructura metálica elevada que sirva de soporte para instalar las placas fotovoltaicas quedando bajo ellas los cultivos; en el segundo caso, los cultivos se pueden sembrar en los pasillos estando expuestos a cielo abierto para su crecimiento, tal y como se considera en los cultivos tradicionales.

Los Sistemas Agrovoltaicos (SAV) ofrecen una alternativa para producir electricidad y cultivar alimentos en un mismo terreno de una manera amigable tanto para el usuario como para el ambiente. Los módulos fotovoltaicos (MFV) instalados arriba de los cultivos, crean

durante el día sombras sobre ellos atenuando o reduciendo la intensidad de la radiación solar y su efecto es tal que, se disminuye el estrés térmico luminoso al que las plantas se someten diariamente al estar expuestas directamente a los rayos del sol y como consecuencia, se obtienen mejoras en su crecimiento, disminución en la demanda de agua, reducen los riesgos de las inclemencias del clima; y adicionalmente, mejora el rendimiento del AFV debido al enfriamiento de los MFV propiciado por los cultivos bajo de ellos; entre otras bondades ya identificadas **[5, 9]**.

Es importante considerar que no todos los cultivos son viables para las aplicaciones agrovoltaicas ya que muchos de ellos requieren toda la radiación solar disponible al día, cosa que no se tiene abajo de las cubiertas FV debido al sombreamiento que producen los MFV al estar elevados sobre el terreno.

En las zonas rurales así como aquellas declaradas como áreas de conservación, la carencia de electricidad requerida para procesos agropecuarios se vuelve una barrera que impide el desarrollo económico sustentable en ellas, encontrándose como factor común el uso de tecnologías convencionales para generar electricidad (motogeneradores) o bombeo de agua (motobombas) las cuales traen consigo problemas de contaminación y gastos económicos fuertes asociados al mantenimiento, consumo de combustible fósil y reposición periódica de equipos. Sin embargo, se ha comprobado con los proyectos mencionados que la mayor parte de los problemas energéticos en el campo, se pueden resolver mediante el uso de las tecnologías Fotovoltaicas comerciales, las cuales ofrecen electricidad para migrar del uso de equipos que consumen combustibles fósiles a equipos eléctricos que puedan ser energizados con tecnología FV, reduciendo los gastos por la compra de gasolina, mantenimiento y sus emisiones contaminantes.

La instalación de sistemas FV en zonas rurales bajo el concepto Agrovoltaico (AFV) no interfiere con las actividades agrícolas del usuario, por el contrario, le puede brindar al agricultor la energía eléctrica necesaria que permite incrementar el rendimiento de crecimiento de los cultivos, el volumen de las cosechas y la calidad de estos, teniéndose productos más competitivos en el mercado e incremento en sus ingresos monetarios, y consecuentemente una mejor calidad de vida para los agricultores **[6, 7].**

Sin embargo, si se desea usar el concepto agrovoltaico con los módulos elevados sobre el terreno, se debe tener presente que no todos los vegetales se benefician al estar sombreados, solo aquellos que estando en la sombra crecen adecuadamente. A la actividad de crecer especies vegetales bajo una sombra producida por mallas especiales se le llama Agricultura Protegida.

En el presente artículo se estima la magnitud de la potencia fotovoltaica a instalar para la posible implementación de sistemas AFV en nuestro país en zonas geográficas en donde se desarrollan actividades agrícolas bajo los siguientes escenarios:

a) Esquema de Agricultura Protegida, como un marco de referencia para estimar el potencial de uso del concepto agrovoltaico.

b) Espacios disponibles en Sistemas fotovoltaicos interconectados a las redes generales de distribución de CFE bajo el esquema de Generación Distribuida.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO FOTOVOLTAICO

Es conocido que México cuenta con un alto recurso de radiación solar recibiendo un monto de energía, promedio diario anual de 5.5 kWh/m^2, lo cual, lo hace que sea muy atractivo para la implementación de proyectos de generación de electricidad mediante el uso de la tecnología fotovoltaica. Esta radiación tan abundante hace que, en algunas regiones del país, se usen cubiertas tipo malla sombra o plásticos "transparentes" que atenúen la intensidad de la luz solar para proteger a las plantas de la excesiva radiación solar; así que esta acción de protección, se puede lograr mediante el uso de una cubierta fotovoltaica.

La mayoría de las instalaciones fotovoltaicas para generación máxima de electricidad al año, se diseñan de tal manera que los MFV se instalan sobre el terreno en una estructura fija (sembrado) creando hileras que, corren de Este a Oeste, con su cara frontal viendo hacia el Sur y con un ángulo de inclinación igual a la Latitud del lugar; y entre cada hilera, se deja un espacio con un ancho necesario para que la hilera del frente no sombre a la hilera inmediata trasera para el día 21 de diciembre (día para el cual se tiene el ángulo de elevación solar más pequeño). Para el caso de estructuras con seguimiento polar, las hileras de MFV corren de Norte a Sur, pudiendo tener su eje de seguimiento horizontal o inclinado a la latitud de lugar o al ángulo de diseño que maximiza la producción de energía eléctrica al año. Los MFV siguen al Sol en su trayectoria diaria aparente y las hileras deben estar separadas la distancia pertinente para que no haya sombreamiento entre hileras vecinas, tanto por la mañana como por la tarde, para el día 21 de diciembre.

Si los MFV se elevan una altura pertinente, durante un día despejado, la distribución del "sembrado" de hileras hace que los MFV bloquen los rayos directos del Sol y el espaciamiento entre ellos permite el paso de la luz solar; y de esta manera, sobre el suelo se proyectan tanto una sombra como un haz de luz, ambos de forma romboidal, cuyo ancho varía de acuerdo al ancho de la hilera (normalmente una o dos veces la longitud del MFV), al ancho de la separación entre hileras y de la posición del sol en la bóveda celeste de acuerdo al tránsito anual de la Tierra alrededor del Sol. En la **Figura 1** se muestran tres fotografías tomadas para diferentes días del año en el proyecto Parcela Agrovoltaica, Sostenible y Educacional, el cual es un Laboratorio para el estudio de la fenología de crecimiento de especies vegetales sembrados bajo una cubierta fotovoltaica **[11]**. El SFV en dicho proyecto se diseñó para satisfacer las necesidades energéticas de dos plantas de tratamiento de agua dando una potencia fotovoltaica de 39.36 kW que es suministrada por 72 MFV instalados en una configuración de 6 hileras, cada una integrada por 12 MFV colocados en posición de retrato.

Bajo ese concepto de "sembrado" para los MFV, hileras-espaciamiento, se requiere de un diseño que se adecue a los cultivos, es decir, la sombra que produzcan los MFV no afecten su crecimiento fenológico y que maximicen la energía eléctrica a generar. Dicho espaciamiento dependerá del requerimiento del cultivo y las condiciones climatológicas locales. Sin embargo, si se tiene que generalizar el diseño del sembrado de los MFV para cultivar diferentes especies y no afectar los cultivos, se puede optar por un diseño que no supere el umbral del 50% de sombreamiento, puesto que, cuando a una planta se le priva de más del 50% de la radiación solar incidente, se presentan repercusiones significativas en el desarrollo de la mayoría de las especies **[12]**.

Para calcular el potencial de aplicación que tiene la tecnología agrovoltaica en México, es necesario conocer la manera en la que se calcula el potencial de aplicación de esta tecnología por unidad de área. Para este proceso es necesario conocer 3 datos vitales:

1) La superficie total disponible S_D para implementar el proyecto AFV
2) El Factor de Ocupación del Arreglo **Ff** respecto del área total disponible cuya superficie activa es S_A
3) La eficiencia de conversión de la tecnología fotovoltaica que se vaya a instalar referida a la irradiancia solar bajo condiciones Estándares de Prueba (STC por sus siglas en inglés) para fines de cálculo



Figura 1: Efecto de luz y sombra proyectado por un arreglo fotovoltaico de 6 hileras, cada una con 12 MFV, espaciadas 1.45 m a una altura de 3.54 m

El área total disponible S_D va a variar dependiendo de cada proyecto, pero es la superficie que se está cultivando. Para fines ilustrativos, se va a considerar un caso típico para una hectárea agrícola disponible (10,000.0 m^2).

En lo que respecta al factor de ocupación (**Ff**=S_A/S_D) en un proyecto agrovoltaico, los MFV instalados en estructuras elevadas en forma de hileras siguen la misma lógica de los sistemas fotovoltaicos instalados a ras de piso: Se debe dejar espacios entre las hileras para evitar el sombreamiento muto entre ellas. Este espaciamiento puede llegar a representar hasta el 50% del área disponible en el terreno de cultivo. Esto quiere decir que, si se cuenta con un terreno de 10,000.0 m^2, el sistema fotovoltaico solo podrá ocupar, 5,000.0 m^2 (50% del área total disponible).

Por fines de homologación y facilidad de cálculos, se tiene estandarizado a nivel mundial el valor pico de la irradiancia G_P (máxima densidad de potencia de la radiación solar) con una magnitud de 1,000 W/m^2. En consecuencia, una superficie de 5,000.0 m^2 de área, recibirá una potencia de la radiación solar de 5,000.0 kW. ¿Cuánta potencia FV se puede instalar? La respuesta depende de la eficiencia de conversión de la tecnología FV seleccionada. Con base en la Tabla de Eficiencias publicada por el National Renewable Energy Laboratory 2023 **[13]**, las celdas solares de silicio monocristalino han alcanzado eficiencias de conversión del 26.1% mientas que las de silicio multicristalino han llegado al 23.3%.

Para fines prácticos, consideremos que se tiene disponible comercialmente MFV con una eficiencia de conversión del 20.0%; valor típico de la oferta comercial, medida bajo condiciones STC (Irradiancia de 1,000.0 W/m^2; AM1.5 y Tc=25°C)). Esto quiere decir que, si se instala 1 m^2 de tecnología solar fotovoltaica con una eficiencia de conversión de 20%, vamos a obtener una potencia eléctrica de 200 Watts (0.20 kW), equivalentes al 20% de 1,000 Watts por cada metro cuadrado (referente a la irradiancia estándar de 1,000 W/m^2).

En forma general, por definición de eficiencia de conversión (η), se tiene que **[14]**:

$$\eta=\frac{P_P}{G_P\, S_A} \qquad (1)$$

En la Ecuación (1), P_P es la Potencia Pico del Arreglo Fotovoltaico (AFV); G_P es la irradiancia pico (G_P=1,000.0 W/m^2); S_A es la superficie activa del AFV.

Considerando la Ecuación (1), para una superficie agrícola disponible (S_D) de 1.0 ha, un factor de ocupación del AFV al 50% de la S_D y una eficiencia de conversión del 20%, la Potencia Pico que se puede instalar es

$$P_P=1.0 \text{ MW} \qquad (2)$$

Si se usan MFV de 500.0 W pico, el total de MFV es 2,000 unidades que se deben instalar en una estructura elevada sobre la superficie agrícola. El "sembrado" de esa cantidad de MFV dependerá de las dimensiones geométricas de la superficie disponible S_D, de la clasificación del sistema fotovoltaico (autónomo o interconectado a la red de distribución eléctrica), de los acondicionadores de potencia y de las cargas eléctricas a energizar.

Ahora bien, la pregunta es: ¿Cuántas unidades de producción de 1.0 ha o fracción de ella hay en el país? Conociendo dicho valor, se puede estimar el potencial en potencia pico de proyectos agrovoltaicos.

POTENCIAL DE APLICACIÓN DE SISTEMAS AGROVOLTAICOS EN MÉXICO

Según el CENSO agropecuario realizado por el INEGI durante el 2022, se han cuantificado 32.1 millones de hectáreas con vocación agrícola, sobre las cuales, virtualmente, se podría llegar a instalar del orden de 32.1×10^3 GW de tecnología FV y convertir toda la superficie en proyectos AFV **[15]**. Sin embargo, es necesario considerar que no todos los cultivos son viables para las aplicaciones agrovoltaicas pues, algunos de ellos requieren niveles de radiación solar que solo se obtienen a cielo abierto y no son candidatos a crecer bajo el concepto AFV debido al sombreamiento generado por los MFV elevados. De los tipos de cultivos agrícolas manejados en México tales como: frutales, productos industriales, cereales, hortalizas, tuberosas, forrajeras, etc., aquellos cultivos que tienen las mejores oportunidades de éxito en aplicaciones agrovoltaicas, son aquellos que ya están siendo cultivados en condiciones de sombreamiento, estos son, los cultivos protegidos, específicamente, hortalizas.

La Agricultura Protegida es aquella en la que los cultivos se encuentran resguardados con cubiertas plásticas, malla sombra u otro tipo de material que permiten tener un control de condiciones ambientales como la temperatura, humedad y luz. Los sistemas de Agricultura Protegida más comunes son: cubiertas tipo malla sombra, túnel, micro túnel e invernadero. La **Figura 3** muestra fotografías ilustrativas de dichas cubiertas.



Figura 3: Tipos de cubierta empleada en la agricultura protegida. Arriba a la izquierda: Malla sombra. Arriba a la derecha: Micro túnel. Abajo a la izquierda: Túnel. Abajo a la derecha: Invernadero.

La diferencia entre el túnel y el micro túnel es que, en el primero se tiene la altura suficiente para caminar erguido y en el segundo, no; mientras que la diferencia entre el túnel y el invernadero es que, en el túnel solo se busca proteger al cultivo mediante una cubierta, mientras que en el invernadero se suelen implementar otros tipos de control de las condiciones climáticas como la temperatura, el viento, la humedad, la luz, el medio de cultivo que no necesariamente se encuentra directamente sembrado en el suelo.

Al considerar únicamente los datos de las áreas destinadas a la Agricultura Protegida, se estará considerando aquellas especies que requieren bajos niveles de radiación solar directa, las cuales, son candidatas (las áreas) a tener un sistema fotovoltaico elevado y convertir dicha Agricultura Protegida en Sistemas de producción Agrovoltaica (SAV). Con un buen diseño del ”sembrado” de los MFV elevados, la sombra que estos proyecten sobre los cultivos serán de bajo impacto en el crecimiento de ellos.

Para estimar el potencial en Potencia Pico de SAV asociados a la Agricultura Protegida se debe considerar, la información proporcionada por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural con respecto a la superficie que se dedica a dicha actividad. Según sus datos, en México se tienen 32,015.09 ha dedicadas a dicho proceso, de las cuales, en la modalidad de Malla Sombra hay 15,027.18 ha; en la modalidad de Invernadero hay 13,450.94 ha; en la modalidad de Macro Túnel hay 3,536.97 ha. Los datos fueron extraídos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera **[16, 17]**. Estas son las únicas hectáreas que realmente se pueden considerar como candidatas para instalar sistemas agrovoltaicos que no perjudiquen al cultivo de manera significativa.

De todos las especies que se cultivan bajo el concepto de Agricultura Protegida, las hortalizas son las que más se producen en México, con el 59% de la superficie, que representa alrededor de 28 mil hectáreas, seguida de los frutales, con 35% y una cobertura de 16 mil hectáreas.

La **Tabla 1** muestra los Estados de la República Mexicana en donde se desarrolla la Agricultura Protegida, la cantidad de hectáreas así como el valor de la producción de estas actividades, además de datos energéticos asociados a cada uno de los estados; en ella se puede identificar a los Estados Federativos con más hectáreas de cultivo con los diferentes métodos tecnológicos. Destacan Baja California, Baja

California Sur, San Luis Potosí, Sinaloa y Sonora en cultivos con Malla Sombra; Sinaloa, seguido de Jalisco, Guanajuato y Puebla destacan en el uso de Invernaderos, cada uno con más de 1,000 ha; y Michoacán destaca por el uso de Macro Túnel con 3,069.5 ha.

Considerando el clima de dichos Estados, se determina que algunos de ellos presentan climas desérticos y secos con baja humedad relativa, y esta característica, los hace candidatos a convertir su técnica de cultivo a SAV dado que se ha demostrado, a partir de diferentes estudios, que dichos sistemas en zonas áridas tiene un potencial de uso muy grande por todos los beneficios que conlleva hacia los cultivos [**7**].

Tabla 1: Datos de la cantidad de hectáreas (ha) que se cultivan en la Agricultura Protegida (Anuario estadístico de la producción Agrícola Protegida. Fuente Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera **[16, 17]**); Potencia Pico que se puede instalar con los supuestos considerados, Recurso solar considerando la fuente de información de la NASA y el Rendimiento Térmico en la Potencia Pico de módulos fotovoltaicos construidos con silicio cristalino.

	MALLA SOMBRA						INVERNADEROS				MACRO TÚNEL				AGRICULTURA PROTEGIDA: INVERNADERO, MALLA SOMBRA, MACRO TÚNEL		ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ANUAL
ESTADO	MALLA SOMBRA (ha)	VALOR DE LA PRODUCCIÓN MILES $	POTENCIA PICO (MW)	R_S (PDA) kWh/m^2	R_T (PDA)	ENERGÍA (PDA) MWh	INVERNADERO (ha)	VALOR DE LA PRODUCCIÓN MILES $	POTENCIA PICO (MW)	ENERGÍA (PDA) MWh	MACRO TÚNEL (ha)	VALOR DE LA PRODUCCIÓN MILES $	POTENCIA PICO (MW)	ENERGÍA (PDA) MWh	POTENCIA PICO (MW)	ENERGÍA (PDA) MWh	ENERGÍA ANUAL MWh
AGUASCALIENTES	7.50	$4,355.98	7.5	6.27	0.881	41.4	130.44	$492,128.53	130.44	720.3	97.87	$88,252.64	97.87	540.47	235.81	1,302.21	475,308.17
BAJA CALIFORNIA	764.72	$1,962,539.73	764.7	6.42	0.881	4,324.0	123.15	$211,064.58	123.15	696.3					887.87	5,020.39	1,832,440.69
BAJA CALIFORNIA SUR	**1,659.00**	$1,366,565.06	1,659.0	6.26	0.864	8,969.3	510.25	$227,382.11	510.25	2,758.6	3.00	$454.50	3	16.22	2,172.25	11,744.16	4,286,617.98
CAMPECHE	SIN DATOS						SIN DATOS			0.0	SIN DATOS				0.00	0.00	0.00
COAHUILA	271.50	$395,072.16	271.5	5.65	0.873	1,338.6	527.20	$989,690.77	527.2	2,599.3	SIN DATOS				798.70	3,937.97	1,437,358.46
COLIMA	SIN DATOS			5.87	0.852		142.75	$165,363.39	142.75	713.9	SIN DATOS				142.75	713.89	260,568.07
CHIAPAS	121.03	$75,750.67	121.0	5.39	0.865	564.6	41.09	$26,040.36	41.09	191.7	SIN DATOS				162.12	756.25	276,032.49
CHIHUAHUA	87.00	$124,010.91	87.0	6.31	0.885	485.7	17.60	$129,988.39	17.6	98.3	SIN DATOS				104.60	583.99	213,156.72
CDMX	SIN DATOS			5.64	0.897		137.80	$410,839.86	137.8	697.1	SIN DATOS				137.80	697.10	254,442.36
DURANGO	10.00	$14,814.15	10.0	6.25	0.882	55.1	334.32	$516,670.25	334.32	1,843.1	SIN DATOS				344.32	1,898.28	692,871.91
GUANAJUATO	28.50	$30,889.94	28.5	6.15	0.879	154.1	**1,243.55**	$1,974,403.26	1243.55	6,722.1	6.00	$3,768.54	6	32.43	1,278.05	6,908.55	2,521,622.06
GUERRERO	1.21	$292.99	1.2	6.06	0.856	6.3	99.46	$29,476.06	99.46	516.2	SIN DATOS				100.67	522.49	190,707.41
HIDALGO	SIN DATOS			5.12	0.890		301.59	$498,476.93	301.59	1,374.6	SIN DATOS				301.59	1,374.59	501,726.86
JALISCO	111.00	$171,888.39	111.0	6.13	0.869	591.0	**1,539.04**	$2,528,565.45	1539.04	8,194.6	283.50	$331,589.52	283.50	1,509.50	1,933.54	10,295.17	3,757,736.51
MEXICO	SIN DATOS			5.64	0.901		987.75	$1,684,109.74	987.75	5,019.4	53.00	$58,991.41	53.00	269.33	1,040.75	5,288.72	1,930,381.64
MICHOACAN	SIN DATOS			5.84	0.879		681.63	$1,266,168.84	681.63	3,500.6	3,069.50	$3,306,818.79	3069.5	15,764.02	3,751.13	19,264.66	7,031,602.12
MORELOS	SIN DATOS			6.21	0.869		881.50	$1,439,318.30	881.5	4,754.8	SIN DATOS				881.50	4,754.82	1,735,507.95
NAYARIT	SIN DATOS			5.93	0.852		114.50	$114,164.44	114.5	578.8	SIN DATOS				114.50	578.77	211,249.89
NUEVO LEÓN	10.00	$13,919.04	10.0	5.31	0.874	46.4	142.00	$523,767.86	142	659.4	SIN DATOS				152.00	705.79	257,611.92
OAXACA	SIN DATOS			5.69	0.873		570.83	$913,376.10	570.83	2,835.8	SIN DATOS				570.83	2,835.85	1,035,084.75
PUEBLA	7.00	$1,642.56	7.0	5.2	0.887	32.3	**1,134.44**	$1,213,476.71	1134.44	5,230.1	1.85	$2,259.86	1.85	8.53	1,143.29	5,270.93	1,923,890.45
QUERÉTARO	SIN DATOS			6.05	0.885		341.13	$1,488,270.87	341.13	1,826.1	SIN DATOS				341.13	1,826.08	666,520.13
QUINTANA ROO	SIN DATOS			5.2	0.859		27.85	$136,482.29	27.85	124.4	SIN DATOS				27.85	124.36	45,390.28
SAN LUIS POTOSI	**1,719.74**	$4,015,591.71	1,719.7	5.82	0.870	8,707.2	631.70	$1,571,364.76	631.7	3,198.4	SIN DATOS				2,351.44	11,905.60	4,345,542.91
SINALOA	**6,905.48**	$5,265,341.14	6,905.5	6.24	0.853	36,749.5	**1,908.53**	$2,252,981.31	1908.53	10,156.8	SIN DATOS				8,814.01	46,906.26	17,120,783.95
SONORA	**2,997.50**	$2,437,748.19	2,997.5	6.53	0.858	16,799.1	188.10	$214,393.47	188.1	1,054.2	SIN DATOS				3,185.60	17,853.29	6,516,450.50
TABASCO	SIN DATOS						SIN DATOS			0.0	SIN DATOS				0.00	0.00	0.00
TAMAULIPAS	220.00	$100,403.25	220.0	5.29	0.865	1,006.2	SIN DATOS			0.0	18.00	$32,502.24	18.00	82.32	238.00	1,088.49	397,297.30
TLAXCALA	SIN DATOS			5.71	0.898		42.50	$60,344.58	42.5	217.9	SIN DATOS				42.50	217.89	79,528.30
VERACRUZ	SIN DATOS			4.59	0.871		34.00	$43,799.48	34	136.0	SIN DATOS				34.00	135.98	49,630.90
YUCATAN	21.00	$9,420.42	21.0	5.44	0.853	97.5	20.78	$10,389.67	20.78	96.5	SIN DATOS				41.78	193.94	70,788.38
ZACATECAS	85.00	$121,591.69	85.0	6.25	0.883	468.9	595.46	$561,246.39	595.46	3,284.5	4.25	$2,208.32	4.25	23.44	684.71	3,776.82	1,378,538.41
TOTALES	**15,027.18**	**$16,111,837.98**	**15,027.2**			**80,437.2**	**13,450.94**	**$21,693,744.74**	**13,197.35**	69,799.8	**3,536.97**	**$3,826,845.83**	**3,536.97**	**18,246.26**	**32,015.09**	**168,483.26**	**61,496,389.45**

De acuerdo a la **Tabla 1**, el volumen de negocio de los tres métodos de cultivos supera los $41,632 millones de pesos anuales; y sin lugar a dudas, todas las unidades productivas que se desarrollan en los Estados Federativos considerados, requieren electricidad para sus diversos procesos agrícolas. La mayoría de las unidades productivas, si no es que todas, cuentan con el suministro de energía eléctrica provisto por la Comisión Federal de Electricidad (CFE); y en consecuencia, se presenta un nicho de oportunidad para los SAV: la energía requerida puede ser provista por Sistemas Fotovoltaicos elevados diseñados para la Interconexión a la Red General de Distribución (RGD) de CFE bajo cualquiera de los esquemas que permiten las Regulaciones Gubernamentales emitidas por la Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).

Ahora bien, considerando que los cultivos en la Agricultura Protegida requieren cierto nivel de radiación solar, la arquitectura de los Sistemas Fotovoltaicos aplicados hacia los SAV deben diseñarse con base en dicho requerimiento y determinar cuál es el valor óptimo o adecuado del Factor de Ocupación **Ff** entre la Superficie Activa (S_A) del AFV proyectada sobre el suelo y la Superficie Disponible (S_D).

Una de las grandes ventajas de la tecnología fotovoltaica es su modularidad, así que el espaciamiento entre hileras de módulos o el espaciamiento entre módulos vecinos, y el incremento de la altura de estos sobre el terreno, proporciona múltiples soluciones de "sembrado" con estructuras fijas; y es más, el uso de seguidores solares de un solo eje y elevación de la altura de los módulos para permitir el uso de maquinaria agrícola convencional, son alternativas que ya se han usado [**18**].

Con base en los datos de la **Tabla 1** en donde se encuentran las superficies destinadas a la Agricultura Protegida y usando un Factor de Ocupación del 50% para los arreglos fotovoltaicos (S_A =0.5 S_D) con MFV con una eficiencia del 20%, la Potencia Pico que se puede instalar sobre estructuras elevadas se presenta en la misma **Tabla 1, cuarta columna**.

Para el caso de especies cultivadas con **malla sombra**, se puede instalar **15,027.18 MW** de potencia Fotovoltaica; para especies cultivadas en **invernaderos,** el cálculo arroja **13,450.54 MW**; y para **macro túnel**, la cantidad es de **3,536.97 MW**; los tres métodos de cultivo arrojan una Potencia Pico Total con una capacidad de 32,015.09 MW; es decir, **del orden de 32 GW**.

Cabe destacar que para el cierre de 2023, la SENER reporta que se tienen alrededor de 10.5 GW de capacidad instalada fotovoltaica en México, por lo que, el potencial de instalación de Sistemas Agrovoltaicos para la Agricultura Protegida es casi 3 veces mayor a todo lo que se ha instalado de tecnología solar fotovoltaica convencional dentro de territorio nacional.

Conociendo el perfil de temperatura ambiente y el Recurso Solar en las Entidades Federativas, valores que se obtienen de la climatología del lugar, se puede estimar la magnitud de la Energía Eléctrica Fotovoltaica, E_G, que se puede generar para una estructura fija con los MFV orientados hacia el Sur verdadero a un ángulo de inclinación igual a la Latitud del lugar, que son las condiciones para maximizar la energía al año [**15**]. En forma general, dicha energía se puede estimar, de manera simplificada, con la siguiente ecuación:

$$E_G = P_P * R_S * R_T \quad (3)$$

en la cual, no se ha considerado las pérdidas asociadas al ensuciamiento, desacoplamiento entre MFVs y las pérdidas inherentes a la tecnología consideradas por el fabricante en su especificación de garantía; tampoco se consideran las posibles degradaciones asociadas a la exposición por luz (LID), altas temperaturas (LETID) y potenciales eléctricos inducidos (PID). En la ecuación anterior, P_P representa la potencia pico a instalar; R_S es el Recurso Solar de la localidad, promedio diario anual (Wh/m^2); R_T es el Rendimiento Térmico en la Potencia máxima de la tecnología fotovoltaica calculado con base en la climatología de la localidad (irradiancia, temperatura ambiente media y velocidad de viento) y su Coeficiente de Pérdida por Temperatura en la Potencia (γ). En la Ecuación (3) no se está considerando también las pérdidas asociadas a: mala orientación y ángulo de inclinación no óptimo; efectos por la aparición de puntos calientes; micro fracturas; u otro tipo de defecto no identificado visualmente.

Para los fines propios de la estimación de la energía que se pude generar en aquellas zonas del país dedicadas a la Agricultura Protegida en sus tres variantes, Malla Sombra, Invernadero y Macro Túnel, se decidió ubicar dichos sitios en lugares cercanos a fuentes de agua o cuencas hidrológicas tomando como base la información gubernamental de la Secretaría del Media Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) [**19**]. Habiendo identificados dichos sitios y su ubicación geográfica (Latitud, Longitud y altitud) se procedió a seleccionar una fuente de información, de acceso gratuito y confiable que proporcione la Base de Datos para el Recurso Solar (R_S) de cada uno de los sitios seleccionados. Dentro de las disponibles, la más confiable es la que proporciona la NASA en su respectiva página electrónica [**20**].

Por otra parte, la determinación del Rendimiento Térmico de la Tecnología Fotovoltaica (R_T), para cada una de las localidades, se realizó seleccionando la TFV de silicio monocristalino por ser la de mayor eficiencia de conversión FV con un valor para γ=-0.45%/°C, usando los datos de temperatura promedio máxima la información proporcionada por el Sistema meteorológico Nacional [**21, 22**].

Los valores del Recurso Solar y el Rendimiento Térmico para cada uno de los sitios seleccionados se muestran en la **Tabla 1**. Con ellos y usando la Potencia Pico calculada para cada una de las zonas dedicadas a la Agricultura Protegida y a partir de la Ecuación (3) se estimó la Energía Eléctrica que se puede generar si se aprovecha las zonas agrícolas anteriores como superficies agrovoltaicas.

Como podrá identificarse, la magnitud de la energía disponible puede fácilmente proveer la electricidad requerida para los fines productivos asociados al cultivo agrícola.

Con base en información de la Secretaría de Energía SENER [Tabla 2.2 Ref. **23**], la venta anual de energía eléctrica en el año 2022 de suministro básico para los sectores Comercial, Industrial, Agrícola, Domestico y Servicios, fue de 214,594 GWh. Si se compara dicho valor con aquel mostrado en la Tabla 3 que totalizó un valor anual aproximado de 61,496.4 GWh, se tiene que, si las zonas dedicadas a la Agricultura Protegida se convierten en Sistemas Agrovoltaicos, éstas pueden suministrar al Sistema Eléctrico Nacional una aportación del 29% de la energía que se consumió en el año 2022.

El resultado anterior da una idea de la gran importancia energética que tienen los Sistemas de aprovechamiento dual de las superficies dedicadas a la Agricultura Controlada convirtiéndolas en Sistemas Agrovoltaicos. Es claro que se debe realizar un estudio económico completo así como los estudios sociales pertinentes para la implementación y adopción de este tipo de tecnología.

CONCLUSIONES

Los Recursos de Energía Solar son abundantes en México, ofreciendo nichos de oportunidad para la generación de electricidad en el ámbito rural y urbano mediante la implementación de Sistemas Fotovoltaicos. Estos son una alternativa tecnológica económica y ecológica para la generación de electricidad en el ámbito rural fortaleciendo las actividades agropecuarias. Estos sistemas deben diseñarse a partir de requerimientos y necesidades energéticas específicas propias de cada proyecto de forma.

El uso de los Sistemas Fotovoltaicos bajo el concepto Agrovoltaico proporciona todos los beneficios mencionados anteriormente con el plus extra de que la tierra abajo de la cubierta fotovoltaica es usada como zona de cultivo de alto rendimiento para determinadas especies vegetales; aspecto que ha sido demostrado con los diferentes proyectos reportados a nivel mundial.

Las especies vegetales comestibles que se desarrollan bajo el concepto de Agricultura Protegida, son las mejores candidatas a ser cultivadas bajo el concepto agrovoltaico; para ellas, con base en la cantidad de hectáreas dedicadas a dicha actividad se determinó la magnitud de la Potencia Pico de los Sistemas Fotovoltaicos que se pueden instalar bajo el concepto agrovoltaico. Usando un Factor de Ocupación del 50% para los arreglos fotovoltaicos (S_A =0.5 S_D) con MFV con una eficiencia del 20%, la Potencia Pico que se puede instalar sobre estructuras elevadas es la siguiente:

Para el caso de especies cultivadas con **malla sombra**, se puede instalar **15,027.18 MW** de potencia Fotovoltaica; para especies cultivadas en **invernaderos,** el cálculo arroja **13,450.54 MW**; y para **macro túnel**, la cantidad es de **3,536.97 MW**; los tres métodos de cultivo arrojan una Potencia Pico Total con una capacidad de 32,015.09 MW; es decir, **del orden de 32 GW**.

Cabe destacar que, para el cierre de 2023, la SENER reporta que se tienen alrededor de 10.5 GW de capacidad instalada fotovoltaica en México, por lo que, el potencial de instalación de Sistemas Agrovoltaicos para la Agricultura Protegida es casi tres veces mayor a todo lo que se ha instalado de tecnología solar fotovoltaica convencional dentro de territorio nacional.

Con base en datos climatológicos para cada estado, se ha estimado una generación anual de energía agrovoltaica aproximada de 61,496.4 GWh. Así mismo, de acuerdo con información de la Secretaría de Energía SENER [Tabla 2.2 Ref. **23**], la venta anual de energía eléctrica en el año 2022 de suministro básico para los sectores Comercial, Industrial, Agrícola, Domestico y Servicios, fue de 214,594 GWh. Si se compara dicho valor con el valor estimado agrovoltaico, se tiene que, si las zonas dedicadas a la Agricultura Protegida se convierten en Sistemas Agrovoltaicos, éstas pueden suministrar al Sistema Eléctrico Nacional una aportación del 29% de la energía que se consumió en el año 2022.

Por lo anterior, la transformación de los espacios cotidianos libres en espacios destinados a la Generación Agrovoltaica Distribuida es una vía para combatir la contaminación, el cambio climático, la falta de empleo, la falta de alimento y la creciente demanda eléctrica. Así, los sistemas agrovoltaicos representan una alternativa para la sustentabilidad energética y alimentaria, de nuestro país.

No obstante, a los resultados de este trabajo, se debe realizar un análisis económico completo, así como los estudios sociales pertinentes para la implementación y adopción de este tipo de tecnología. Un avance en esto lo representa el proyecto PASE que se está implementando y desarrollando en el CEPIPSA–FMVZ bajo la dirección de investigadores del IER, ambas, dependencias de la UNAM, con el financiamiento de la SECTEI–CDMX. Este es un proyecto que proporcionará los alcances descritos anteriormente, pero sobre todo que servirá como base para el desarrollo de muchos proyectos en las parcelas agrícolas ubicadas en aquellas zonas que han sido catalogadas como de conservación como lo es el área chinampera de Xochimilco y Tláhuac.

REFERENCIAS

[1]. FIRCO-SAGARPA Fideicomiso de Riesgo Compartido (agosto, 2016). Energía Renovable y Eficiencia Energética en el Agro Mexicano. Consultado en abril de 2024 en: https://www.gob.mx/firco/articulos/energia-renovable-y-eficiencia-energetica-en-el-agro-mexicano

[2]. CRE, Comisión Reguladora de Energía (2023). Estadísticas al Primer Trimestre 2023; Comisión Reguladora de Energía: *Solicitudes de Interconexión de Centrales Eléctricas con Capacidad Menor a 0.5 MW. Contratos de Interconexión de Pequeña y Mediana Escala y Generación Distribuida*. Consultado en abril de 2024 en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/850976/Estad_sticas_GD_2023_Primer_Semestre_2023.pdf

[3]. Francovigh Gabriela (Marzo, 2024). *Inventario Asolmex. La capacidad fotovoltaica en México alcanzó los 10,479 MW*. Energía Estratégica. Consultado en abril de 2024 en: https://www.energiaestrategica.com/inventario-asolmex-la-capacidad-fotovoltaica-en-mexico-alcanzo-los-10479-mw/ https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022.pdf ¨

[4]. Goetzberger A, Zastrow A (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. Int J Solar Energy. 1:55–69. https://doi.org/10.1080/01425918208909875

[5]. Marrou H, Wery J, Dufour L, Dupraz C (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European J Agron*. 44: 54–66. https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003

[6]. Greg A. Barron-Gafford, et al: (2019) Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in draylands. *Nature Sustainability*. 2: 848–855. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5

[7]. Dinesh H y Pearce J M (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renew Sust Energ Rev*. 54:299–308. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024

[8]. Eco Inventos, green technology (Julio, 2022). Los invernaderos solares, el futuro de la energía agrovoltaica. Consultado en abril de 2024 en: https://ecoinventos.com/invernaderos-solares-energia-agrovoltaica/

[9]. Electro Solar Ibiza. Agricultura y Energía solar, un matrimonio feliz. Consultado en marzo de 2024 en: https://www.electrosolaribiza.es/blog/agricultura-y-energia-solar-un-matrimonio-feliz/

[10]. Embajada de México en Estados Unidos, Secretaría de Relaciones Exteriores (2020). Acerca de México. Consultado en abril de 2024 en: https://embamex.sre.gob.mx/eua/index.php/es/enterate/391-acerca-de-mexico

[11]. Sánchez Juárez, A. (Febrero, 2024). Parcela Agrovoltaica, Sostenible y Educacional, "PASE". *Informe estado actual del proyecto. IER-UNAM*. (www.parcelaagrovoltaica.com.mx)

[12]. Touil, S., Richa, A., Fizir, M., y Bingwa, B. (Marzo, 2021). Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production. *Environ Sci Biotechnol.* 20: 281–296. https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2

[13]. NREL, National Renewable Energy Laboratory (Marzo, 2024). Best Research-Cell Efficiency Chart. Consultado en abril de 2024 en: https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[14]. Sánchez Juárez A., Martínez Escobar D., Santos Magdaleno R. L., Ortega Cruz J. y Sánchez Pérez P. A. (2017). Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar en los sectores residencial, servicio e industrial: Dimensionamiento y diseño de sistemas fotovoltaicos. Instituto de Energías Renovables UNAM. ISBN: 978-523-04-1732-3. Publicado en la web: http://www.fordecyt.ier.unam.mx/html/produccion_cientifica_libro_fotovoltaico_4.html

[15]. INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Noviembre, 2023). Resultados Definitivos del Censo Agropecuario 2022. Comunicado de prensa No. 667/23. Consultado en abril de 2024 en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022.pdf

[16]. SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

[17]. Imagen Agropecuaria (Agosto, 2023). Agricultura protegida crece en México y aporta alimentos y ornamentales. Consultado en abril de 2024 en: https://imagenagropecuaria.com/2023/agricultura-protegida-crece-en-mexico-y-aporta-alimentos-y-ornamentales/

[18]. Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S. et al. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev*. 39, 35. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3

[19]. SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). AGUA. Consultado en abril de 2024 en: https://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador/enlace/atlas2010/atlas_agua.pdf

[20]. NASA, National Aeronautics and Space Administration. Base de datos del Recurso Solar. Consultado en abril de 2024 en: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

[21]. CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2022). Sistema Meteorológico Nacional. Temperatura Media por Entidad Federativa y Nacional 2022. Consultado en abril de 2024 en: https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMED/2022.pdf

[22]. CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2000). Sistema Meteorológico Nacional. Temperatura Media por Entidad Federativa y Nacional 2000. Consultado en abril de 2024 en: https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMAX/2000.pdf

[23]. SENER, Secretaría de Energía. Prospectivas del Sector Eléctrico 2023-2027. Consultado en abril de 2024 en: https://base.energia.gob.mx/Prospectivas23/PSE_23-37_VF.pdf

[24]. Banco Mundial (2020) Promedio detallado de precipitaciones (mm anuales) – Mexico. Consultado en abril de 2024 en: https://datos.bancomundial.org/indicator/AG.LND.PRCP.MM?locations=MX

[25]. CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Promedio detallado de precipitaciones (mm anuales) – Mexico (1990-1992). Consultado en abril de 2024 en: http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/preci4mgw

[26]. CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2022). Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional 2022. Consultado en abril de 2024 en: https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2022.pdf

[27]. BASCOMEX (Julio, 2023). ¿Cuántos litros de agua se necesitan para regar una hectárea. Consultado en abril de 2024 en: https://bascomex.com/blogs/news/cuantos-litros-de-agua-se-necesitan-para-regar-una-hectarea

[28]. SENER, Secretaría de Energía. (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2023-2037. Consultado en abril de 2024 en: https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037

[29]. AMIF, ANES, ASOLMEX y GIZ (Octubre, 2021). Monitor de información comercial e Índice de Precios de Generación Solar Distribuida en México. Segunda Edición. Consultado en abril de 2024 en: https://asolmex.org/intranet/Micrositio_GSD/Monitor-Indice-de-Precios/Monitor_precios_GSD_reporte2aedicion_oct2021.pdf

[30]. Greensess-Energy-Private-Limited. (2021). IndiaMART - Roof Top On Grid Solar Power Systems. Consultado en abril de 2024 en: https://m.indiamart.com/proddetail/roof-top-on-grid-solar-power-systems-24750106991.html?pos=8&pla=n

[31]. Iberdrola. (2023). Qué es un huerto urbano -Descubre cómo hacer un huerto urbano en casa y cuáles son sus ventajas. Consultado en abril en: https://www.iberdrola.com/compromiso-social/que-es-un-huerto-urbano#:~:text=La%20Organizaci%C3%B3n%20de%20las%20Naciones,de%20alimentos%20por%20m2

[32]. El Financiero. (2016). ¿Quieres ahorrar en comida? Pon un huerto. Consultado en abril en: https://www.elfinanciero.com.mx/mis-finanzas/quieres-ahorrar-en-comida-pon-un-huerto/

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

PROPUESTA DE VIVIENDA PRODUCTIVA EN CLIMA SEMIÁRIDO TEMPLADO: COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y ENERGÉTICO

Javier Leal Bueno, Evaristo Álvarez Mendoza
Departamento de Arquitectura, Instituto Tecnológico de Durango. Blvd. Felipe Pescador 1830, Durango, Durango, 34000, México. **19040576@itdurango.edu.mx, arqarte01@hotmail.com**

Norma Alejandra Rodríguez Muñoz
CONAHCYT Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Calle CIMAV 110, Durango, Durango, 34147, México.
norma.rodriguez@cimav.edu.mx

RESUMEN

El crecimiento desestructurado de las ciudades ha ocasionado problemas relacionados a cambios en el uso de suelo, consumo energético desmedido, emisiones contaminantes y una consecuente degradación ambiental. De acuerdo con el Objetivo 11 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), —que aborda las problemáticas actuales de las "Ciudades y comunidades sostenibles", se ha reconocido la importancia de desarrollar ciudades compactas y de usos múltiples. Una solución que aporta a este precepto es el desarrollo de edificaciones de uso mixto, como lo son las que contemplan usos comerciales y residenciales bajo un mismo techo. En esta investigación se propone una edificación con un local comercial en la planta baja, y una planta de uso residencial ubicada en la zona centro de la ciudad de Durango, México. La edificación propuesta fue evaluada durante un año, calculándose el nivel de confort térmico y su requerimiento energético anual por concepto de aire acondicionado y calefacción. A través de la evaluación de comportamiento térmico inicial se obtuvo que ambas plantas presentan ligero disconfort térmico por frío y calor, teniéndose una tendencia a una sensación ligeramente calurosa en la planta comercial en las orientaciones este y oeste. De acuerdo con estos hallazgos, se implementaron cambios en la envolvente, aislándose los muros exteriores de la edificación y aplicando un impermeabilizante color terracota para incrementar las ganancias de calor a través del techo. Una vez implementados los cambios de envolvente a la edificación, se observa que es posible reducir el requerimiento energético global del edificio hasta en 48%. La planta comercial requiere poca energía de climatización por metro de construcción (6.64 – 14.52 kWh/m^2-año), mientras que la planta residencial demanda entre 24.23 – 59.09 kWh/m^2-año, dependiendo de su orientación. Finalmente, de manera general se recomendaría construir esta edificación con una orientación hacia el sur, con la reserva de cuantificar los costos asociados al combustible utilizado para calentar las plantas y de acuerdo con las tarifas de electricidad aplicables, especialmente a la planta comercial.

ABSTRACT

The unstructured growth of cities has caused problems related to changes in land use, excessive energy consumption, polluting emissions, and consequent environmental degradation. According to Goal 11 of the Sustainable Development Goals (SDGs), which addresses the current problems of "Sustainable Cities and Communities," the importance of developing compact and multi-use cities has been recognized. A solution contributing to this precept is the development of mixed-use buildings, such as those that contemplate commercial and residential uses under the same roof. This research proposes a building configuration that incorporates commercial premises on the ground floor and one or two floors for residential use in the downtown area of Durango, Mexico. The proposed building was evaluated for one year, calculating the level of thermal comfort and its annual energy requirement for air conditioning and heating. Through the evaluation of initial thermal behavior, it was obtained that both floors present slight thermal discomfort due to cold and heat, with a tendency towards a slightly hot sensation in the commercial floor in the east and west orientations. According to these findings, changes in the building's envelope were implemented: insulating the exterior walls of the building and applying terracotta-colored waterproofing to increase heat gains through the roof. Once the building envelope changes have been implemented, it is observed that it is possible to reduce the energy requirement of the building by up to 48%. The commercial plant requires less energy per construction meter (6.64 – 14.52 kWh/m^2-year), while the residential plant demands 24.23 – 59.09 kWh/m^2-year, depending on its orientation. Finally, in general, it would be recommended to build such a building with an orientation towards the south, with the reservation of quantifying the costs associated with the fuel used to heat the plants and according to the applicable electricity rates, especially for the commercial plant.

Palabras claves: vivienda productiva, HVAC, ciudades sostenibles, ODS 11.

INTRODUCCIÓN

El consumo energético en las edificaciones residenciales representa alrededor del 21.47% del consumo energético mundial, mientras que en México representa el 17.43% (SENER, 2022). Asimismo, dependiendo de la ubicación geográfica de la edificación, las necesidades energéticas serán distintas, como es el caso de las edificaciones localizadas en climas cálidos versus las construidas en climas templados (CONUEE - SENER, 2020). Dentro de los hogares, los electrodomésticos representan una parte del consumo de energía, mientras que el resto está relacionado a las necesidades de iluminación y la climatización. Adicionalmente, el uso de energía por climatización en los hogares se ha incrementado teniendo en cuenta las actuales tendencias relacionadas al trabajo desde casa y al aumento en la incidencia de las temperaturas máximas de años anteriores (Gámez García, 2023). Esta situación ha provocado saturaciones en las líneas de abastecimiento eléctrico causando apagones e intermitencias en el servicio eléctrico, generando problemas no solo en las viviendas sino también, en negocios o empresas (Arzate, 2024). Como consecuencia, se ha evidenciado la necesidad de reducir el requerimiento energético

de las edificaciones, el cual puede ser logrado con mejoras en la envolvente y el uso de fuentes de energía renovable.

El diseño y construcción de edificios en los que se busca mejorar el comportamiento térmico y una reducción en el uso energético puede ser complementado de manera satisfactoria con proyectos que permiten el aprovechamiento del espacio. Una estrategia para apoyar en esta premisa es la reorganización y el aprovechamiento del espacio urbano, el cual desde hace décadas es un tema pertinente debido a un visible crecimiento de las manchas urbanas de las ciudades (Montejano-Escamilla et al., 2023; ONU-HABITAT, 2016). La expansión de la mancha urbana ha provocado, entre otros retos, que los tiempos de traslado entre las nuevas construcciones residenciales y los centros de las ciudades vayan en aumento. De forma adicional, se deben tomar en cuenta factores como incrementos en los costos de transporte, infraestructura urbana y la compleja tarea de la proveeduría de servicios básicos para las viviendas nuevas.

Por medio de estrategias novedosas que permitan el adecuado desarrollo urbano de las ciudades, se ha buscado minimizar el crecimiento urbano para dar paso a un crecimiento urbano de calidad de manera sostenible (GIZ-Mexico, 2024). El crecimiento urbano es necesario para el desarrollo económico de una ciudad, sin embargo, es necesario repensar la estructura de las ciudades a futuro tomando en cuenta parámetros de sostenibilidad (Estrella, 1997; Gomez Torres Neri, 2014; Machline et al., 2023; Puntel & Barreto, 2021; Ryckewaert et al., 2021; Santander Patiño, 2003).

Como alternativa para mitigar esta problemática, las edificaciones de uso mixto, –es decir con espacio comercial y habitacional, se presentan como una opción viable para el aprovechamiento del espacio en las ciudades y para brindar posibilidades de autoempleo o generación de un ingreso extra para las familias que las habitan (Estrella, 1997; Productive Homes: Self Help Housing, n.d.; Puntel & Barreto, 2021; Santander Patiño, 2003). En estas edificaciones convive el espacio residencial con espacios destinados para locales comerciales, consultorios u oficinas dando como resultado el aprovechamiento de áreas que originalmente tienen un solo uso de suelo, evitándose modificaciones irregulares por parte de los propietarios que requieren adaptar los espacios a sus necesidades. Las edificaciones de uso mixto, también conocidas como productivas (Puntel, 2017; Ryckewaert et al., 2021; Utami et al., 2012), traen consigo diversos beneficios que se ven reflejados en el vecindario en donde son construidas y su entorno, como un mejor aspecto y percepción del área, mejores oportunidades para invertir, además de una mejora en la sostenibilidad de la edificación y su consumo energético (SOHOInmobiliaria, 2023).

En este documento se describe una propuesta de diseño de edificación de uso mixto o productiva para la zona centro de la Ciudad de Victoria de Durango y la evaluación de su desempeño térmico a través de un año de uso. La edificación propuesta consta de una planta comercial y una planta con uso residencial y se encuentra ubicada en un clima del tipo semiárido frío BSk, según la clasificación de Köppen-Geiger. La edificación propuesta se modeló tomando en cuenta materiales de construcción utilizados en la región, estimando el requerimiento energético por concepto de uso de aire acondicionado y calefacción.

MÉTODOS

La sección de métodos comprende dos partes, la primera está relacionada a la realización de una propuesta de programa arquitectónico para la vivienda de uso mixto, mientras que la segunda corresponde a los parámetros utilizados para la simulación de la vivienda.

Arquitectónico

La propuesta arquitectónica de la vivienda se realizó pensando en el máximo aprovechamiento del espacio buscando un diseño vertical en dos plantas en un terreno de 60 m^2. La distribución de la edificación y la fachada puede observarse en la Figura 1. El diseño arquitectónico de la edificación se realizó cumpliendo con las dimensiones mínimas para cada una de las áreas, las cuales están establecidas en el Capítulo II (Habitacional) y Capítulo VII (Comercio) de la Gaceta Municipal de Durango (Reglamento de Construcciones y Desarrollo Urbano Para El Municipio de Durango, 2023).

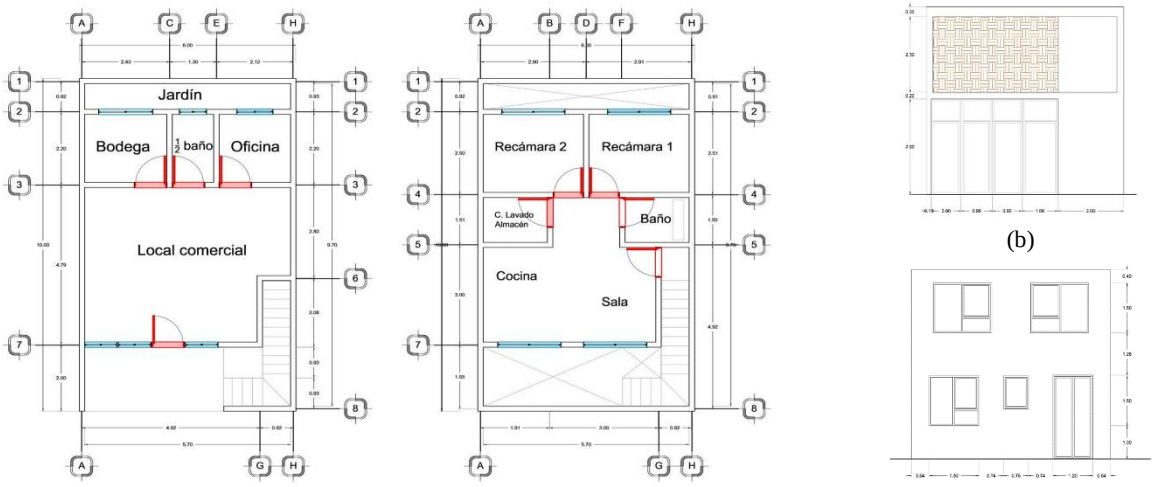


Figura 1. Edificación propuesta. (a) Planta comercial y planta residencial, (b) Fachada frontal, (c) Fachada posterior.

La primera planta estará destinada exclusivamente para el área comercial, por lo que el diseño se realizó con la finalidad de tener un fácil

acceso al comercio procurando privacidad en el acceso a la parte habitacional. La parte comercial de la edificación consta de 42 m^2 de construcción con un espacio comercial, medio baño, bodega y jardín o cubo de luz. Mientras que la planta residencial consta de 40 m^2 y tienen zona de sala-comedor-cocina, baño completo, cuarto de servicio, dos recámaras y balcón. La altura de la planta comercial es de 3.10 m y la altura de la zona residencial de 2.8 m a nivel de losa terminada.

Las fachadas fueron plasmadas por medio de bocetos proponiendo materiales, alturas y la volumetría. Se colocó un cubo de escaleras el cual ayudó a hacer juego en los volúmenes y evitar que la fachada sea plana. Por otro lado, la parte comercial está arremetida en el terreno y cuenta con un pequeño jardín al lado del acceso al comercio y las escaleras. Para la parte superior de la fachada se propuso una celosía con la finalidad de generar un muro en el frente que permita tener privacidad a las áreas de la sala y la cocina, sin quitarles ventilación ni iluminación. Esto abre la posibilidad de ampliar la ventana de la sala hacia parte de la cocina, sin generar molestias a los residentes. Todas las ventanas de la fachada posterior se pueden abrir hacia afuera, excepto la ventana de la oficina que es corrediza. La parte frontal de la primera planta de vivienda se encuentra en el límite del terreno, por lo que se propone una ventana amplia entre el comedor y la sala, procurándose tener espacios ventilados e iluminados, sin quitar privacidad.

Simulación

La vivienda está ubicada en la zona centro de Durango con una elevación sobre el nivel del mar de 1,890 msnm, fuera del sector considerado como histórico, evitando la necesidad del cumplimiento de especificaciones y criterios aplicables. La edificación fue modelada en el programa Design Builder y fue analizada con la fachada orientada hacia el norte, sur, este y oeste.

Condiciones climáticas. Se estableció un nivel de exposición al viento resguardado y la edificación se consideró adosada teniendo colindancia con edificaciones de dos y tres plantas. Los parámetros relacionados a la climatología de la ciudad se obtuvieron del programa Meteonorm y se muestran en la Figura 2.

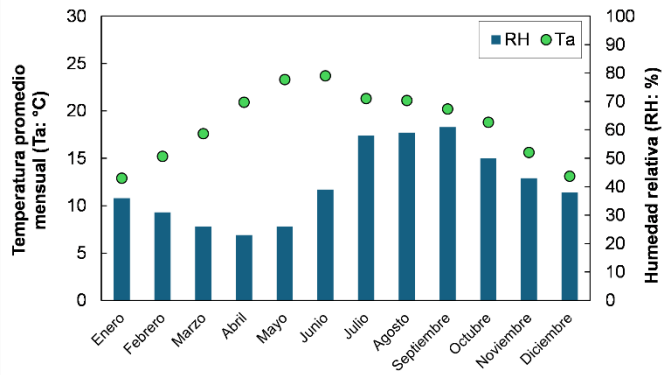


Figura 2. Temperatura promedio mensual y humedad relativa de la Ciudad de Durango, Dgo.

Materiales. En la Tabla 1, se muestran los materiales base y propuestos que se implementaron en la edificación. Ambas edificaciones tuvieron la misma configuración de materiales en la losa de entrepiso y el firme. Para la edificación con materiales base, los muros se componen de tabique rojo recocido, con acabado de mortero-arena en el exterior y de yeso en el interior y están pintados con pintura blanca; mientras que en la edificación mejorada se incorporó una pintura aislante y una placa de poliestireno extruido de una pulgada. Por otro lado, la edificación que consta de sistemas constructivos mejorados tiene una losa de azotea que incorpora adicionalmente el sistema de maceteado utilizado comúnmente en la región una placa de poliestireno extruido.

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

	Sistema constructivo	Materiales	Espesor (m)	Valor U ($W/m^2 \cdot K$)
Materiales base	Muro exterior	Pintura blanca, mortero-arena, tabique rojo recocido, mortero-arena, yeso	0.1800	1.406
	Losa de entrepiso	Piso cerámico, concreto armado, mortero-arena, yeso	0.1860	3.081
	Losa de azotea	Lechada cemento-arena, impermeabilizante terracota, maceteado, relleno de tezontle, concreto armado, mortero-arena, yeso	0.2673	0.774
	Firme	Piso cerámico, concreto	0.1254	2.895
Materiales propuestos	Muro exterior	Pintura aislante, Mortero-arena, poliestireno extruido, tabique rojo recocido, mortero-arena, yeso	0.2052	0.528
	Losa de entrepiso	Piso cerámico, concreto armado, mortero-arena, yeso	0.1860	3.081
	Losa de azotea	Impermeabilizante terracota, maceteado, relleno de tezontle, concreto armado, poliestireno extruido, mortero-arena, yeso	0.3380	0.721
	Firme	Piso cerámico, concreto	0.1254	2.895

Finalmente, las ventanas en la edificación base se colocaron ventanas de cristal sencillo claro de 3 mm, marco de aluminio y una puerta

exterior de metal. Por otro lado, en la edificación mejorada se tuvieron ventanas de cristal sencillo de 6 mm, marco de aluminio y una puerta exterior de roble.

Equipamiento y ocupación. Las edificaciones se analizaron en dos escenarios: con encendido de sistemas de acondicionamiento de aire y con el encendido de los sistemas. Se utilizó un sistema tipo minisplit sin la incorporación de ventilación mecánica del exterior. El equipo tuvo temperaturas para encendido y apagado de equipos de aire acondicionado y calefacción de 28°C y 20°C, respectivamente. La zona comercial tuvo un horario de ocupación de lunes a viernes de 9:30 a 19:30 h y fines de semana de 10:00 a 17:00 h, mientras que la zona habitacional de 17:00 h a 9:30 y fines de semana 24 horas. Ambas plantas tuvieron una ocupación de 4 personas con un metabolismo correspondiente a una actividad ligera caminando o la de una persona de pie (0.9 Met) y un arropamiento de 1.0 Clo.

RESULTADOS

El índice de confort térmico (PMV: valor medio previsto) promedio anual se muestra en la Figura 3. A través de la evaluación de comportamiento térmico inicial, se encontró que ambas plantas presentan un muy ligero disconfort térmico por frío y calor. Aunque este valor representa el comportamiento promedio anual de la edificación, se logra observar la tendencia de confort térmico para la edificación en las distintas orientaciones. También se puede notar una tendencia hacia una sensación ligeramente calurosa en la planta comercial de la edificación orientada hacia el este y el oeste, y una sensación muy ligeramente fresca en las plantas residenciales del edificio orientado hacia el norte y sur.

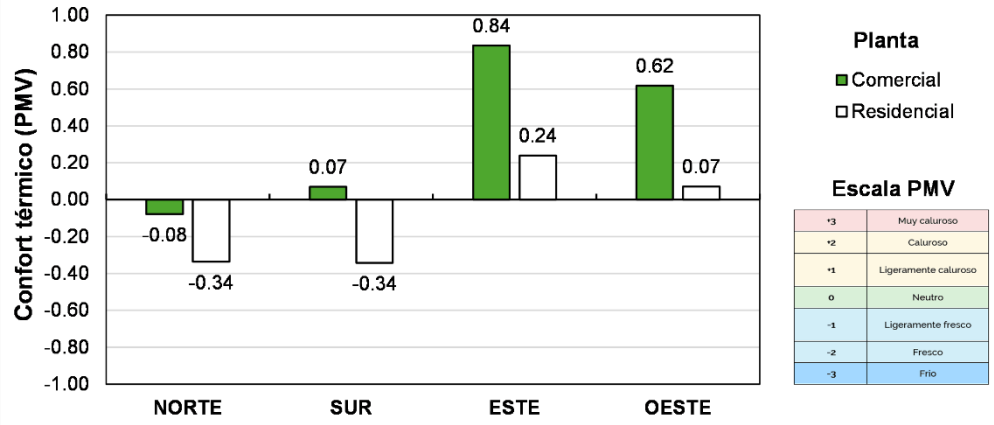


Figura 3. Confort térmico de la edificación con materiales convencionales en envolvente.

Una vez implementados los cambios de los materiales que componen la envolvente de la edificación, se cuantificó el requerimiento de energía asociado al uso de sistemas de climatización (enfriamiento y calefacción). En la Figura 4, se muestran los resultados relacionados al requerimiento energético anual de la edificación (kWh), mientras que en la Tabla 2 se muestra con respecto al área de construcción (kWh/m^2). A continuación, se analiza el comportamiento energético de la edificación con los materiales convencionales (base) y materiales propuestos (propuesta), con respecto a la orientación en la cual se encuentra la fachada principal.

NORTE: se calculó un requerimiento de 429 kWh con los materiales base, los cuales fueron reducidos a 300 kWh con los materiales propuestos. Esto representa una reducción del 30% del requerimiento anual de la edificación. Sin embargo, se observa que en la planta residencial se tuvo un aumento en el requerimiento energético del 33%, impulsado principalmente por el aumento en el requerimiento de calefacción.

SUR: se tuvo un requerimiento total anual para la planta comercial de 484 kWh (base) y esta se incrementa hasta 610 kWh con los materiales propuestos (+26%), mientras que para la planta residencial se tiene un requerimiento total de 1612 kWh (base) y 969 kWh (propuesta), lográndose una reducción del 40% en el requerimiento energético anual. Se observa que en ambos casos se tiene un incremento en el requerimiento del uso de aire acondicionado y una reducción sustancial del requerimiento para el uso de la calefacción.

ESTE: para esta orientación se tuvo una reducción en el uso energético en la planta comercial del 88% anual. Aunque se tuvo un incremento importante en el requerimiento de calefacción (165% +) en la planta comercial, se logra reducir en 97% el requerimiento por enfriamiento que era dominante del uso energético de esta planta. Por otro lado, la planta residencial queda casi con el mismo requerimiento energético, independientemente del uso de materiales base o los propuestos. Se logra reducir el uso de aire acondicionado, pero se tiene un incremento sustancial en el uso de calefacción (65% +), eliminando el beneficio de los materiales propuestos en el balance anual.

OESTE: finalmente, en esta orientación, la planta comercial tuvo una reducción de hasta 98% del uso de energía anual, teniéndose reducciones tanto en el requerimiento de enfriamiento (93%) y calefacción (70%). Por otro lado, en la planta residencial, se tuvo una reducción general de 7% en el uso de energía, teniéndose una disminución en el uso de aire acondicionado de 96%, pero con un aumento en la carga de calefacción de 35%, mitigándose los beneficios del cambio de materiales.

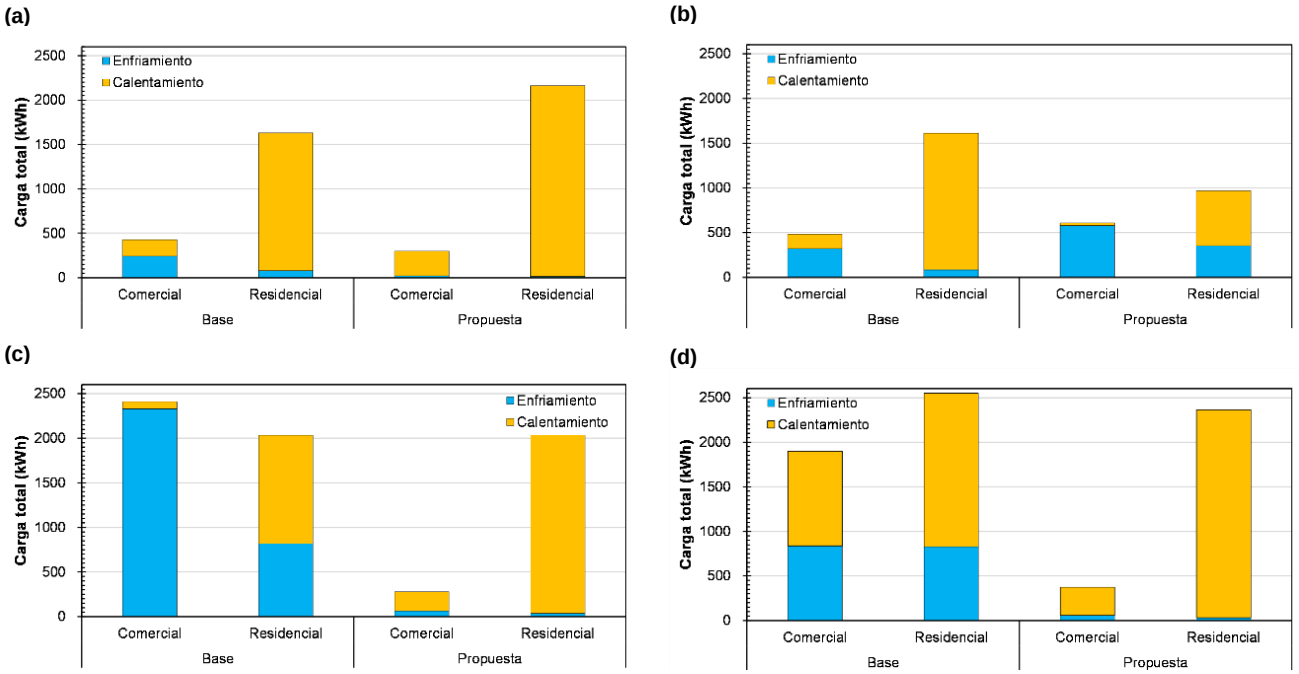


Figura 4. Cargas de enfriamiento y calentamiento anuales. (a) Norte, (b) Sur, (c) Este y (d) Oeste.

Con respecto a los requerimientos anuales de la edificación en sus distintas orientaciones, en la Tabla 2 se muestran los requerimientos energéticos unitarios (kWh/m^2-año). Se observa que la orientación *sur* es la que logra tener menor requerimiento total anual (38.75 kWh/m^2). Cuando se analiza el requerimiento energético por planta, es notable que, en la orientación *este*, se tendría un menor uso de energía en la planta comercial y para la planta residencial esto ocurre cuando la edificación está orientada hacia el *sur*. Se observa que se logran disminuciones en el uso de energía total anual al implementar los materiales propuestos, con excepción del edificio orientado hacia el *norte* (20%+).

Tabla 2. Requerimientos energéticos de vivienda con materiales base y propuestos (kWh/m^2-año).

	Materiales base			**Materiales propuestos**		
Orientación	Planta comercial	Planta residencial	Total anual	Planta comercial	Planta residencial	Total anual
NORTE	10.21	40.78	50.99	7.15	54.05	61.20
SUR	11.51	40.30	51.81	14.52	24.23	**38.75**
ESTE	57.39	50.83	108.22	6.64	50.91	57.55
OESTE	45.23	63.74	108.97	8.92	59.09	68.01

CONCLUSIONES

Se realizó una propuesta de diseño de edificación de uso mixto o productiva de dos plantas en una ciudad con clima semiárido frío (Durango, Dgo.) a la cual se le cuantificó su requerimiento energético anual por climatización. El edificio fue analizado implementando materiales de construcción comúnmente utilizados en la región (pintura blanca, muro de tabique rojo, losa con maceteado, lechada cemento-arena) y una combinación de materiales propuestos (pintura aislante, muro aislado de tabique rojo, losa con maceteado, impermeabilizante terracota) con el fin de reducir los requerimientos energéticos asociados al uso de aire acondicionado y calefacción.

En este ejercicio exploratorio, se tuvo un aprendizaje con respecto a los efectos que tiene el clima sobre el comportamiento térmico de una edificación de uso mixto. Una enseñanza se dio con respecto a la aplicación de ciertas estrategias de diseño pasivo y sobre la implementación de diversas combinaciones de materiales. Ya que al tratarse de un clima que presenta temporadas que resultan tanto en disconfort térmico por frío como por calor, se debe mantener un balance entre promover las ganancias de calor durante el invierno y el evitarlas durante la temporada de calor.

De acuerdo con los resultados encontrados, se recomendaría construir la edificación con una orientación hacia el *sur*, ya que esta presenta un requerimiento energético menor. Sin embargo, es pertinente realizar una cuantificación del costo asociado al uso de energía de esta edificación con respecto al combustible o energético utilizado para operar los equipos de calefacción y a la tarifa de electricidad aplicable para el uso del aire acondicionado. Asimismo, se hace notar que es posible que la orientación señalada como la más atractiva de acuerdo

con el requerimiento energético sea distinta cuando se cuantifique el costo aplicando las tarifas pertinentes en cada planta de la edificación. Esto debido a que la tarifa de electricidad aplicable a la planta comercial tiene un costo significativamente mayor que la aplicable a la planta residencial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Ismael Hernández Landeros por el apoyo técnico brindado para el uso del centro de cómputo de CIMAV.

REFERENCIAS

Arzate, E. (2024, May 16). Sector eléctrico mexicano, con bajo margen para operar; el riesgo de apagones persiste, con bajo margen para operar; el riesgo de apagones persiste. *Forbes México*.

CONUEE - SENER. (2020). *Cuaderno 5. Eficiencia energética en el confort térmico de viviendas de clima cálido en México*. https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvociclo.pdf

Estrella, F. (1997). Posibilidades de la vivienda y el urbanismo productivo en la lucha contra la pobreza y en la generación de empleo. *Estudios Del Hábitat*, *II*(5), 101–109. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46128

Gámez García, D. (2023, August). Consumo energético en viviendas. *Revista Construye - Centro Occidente*, 1–107.

GIZ-Mexico. (2024). *Desarrollo Urbano Sostenible*. Ciudades y Transporte Sustentable.

Gomez Torres Neri, K. del R. (2014). Re-densificación con base a la vivienda vertical: una apuesta por la calidad de vida. *Legado*, *16*, 81–91. https://www.redalyc.org/pdf/4779/477947304006.pdf

Machline, E., Pearlmutter, D., Cohen, C., & Schwartz, M. (2023). COVID-19: a catalyst for revitalizing mixed-use urban centers? The case of Paris. *Building Research & Information*, *51*(Issue 1: Towards a Circular Transition of the Built Environment: Systemic and Transdisciplinary Models, Methods and Perspectives), 3955. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09613218.2022.2149451

Montejano-Escamilla, J. A., Caudillo-Cos, C. A., Ávila-Jiménez, F. G., Tapia-McClung, R., & Barrera-Alarcón, I. G. (2023). Expansión y crecimiento urbanos en México, 1975-2020. *Región y Sociedad*, *35*, e1734. https://doi.org/10.22198/rys2023/35/1734

ONU-HABITAT. (2016). *Nueva Agenda Urbana*. https://onu-habitat.org/index.php/la-nueva-agenda-urbana-en-espanol

Productive homes: self help housing. (n.d.). Retrieved August 20, 2024, from https://www.basehabitat.org/perch/resources/botswanateufl.pdf

Puntel, M. L. (2017). La vivienda productiva de interés social. Avances del marco teórico de una investigación en curso. *ADNea: Revista de Arquitectura y Diseño Del Nordeste Argentino*, *5*(5). https://doi.org/https://doi.org/10.30972/adn.052336

Puntel, M. L., & Barreto, M. Á. (2021). Live and work: habitability conditions in productive housings of the Gran Resistencia (Argentina). *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, *53*(210), 1073–1092. https://doi.org/10.37230/CyTET.2021.210.10

Reglamento de Construcciones y Desarrollo Urbano Para El Municipio de Durango, Gaceta Municipal 1 (2023). www.municipiodurango.gob.mx

Ryckewaert, M., Zaman, J., & De Boeck, S. (2021). Variable arrangements between residential and productive activities: Conceiving mixed-use for urban development in brussels. *Urban Planning*, *6*(3), 334–349. https://doi.org/10.17645/up.v6i3.4274

Santander Patiño, M. F. (2003). *La vivienda productiva como instrumento de progreso económico familiar*. Universidad de los Andes.

SENER. (2022). *Balance Nacional de Energía*. https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnergía2022.pdf

SOHOInmobiliaria. (2023). *¿Qué es un edificio de usos mixtos y cuáles son sus beneficios?* Https://Soho.Pe/Blog/Que-Es-Edificio-Usos-Mixtos-Beneficios/#:~:Text=Un%20edificio%20de%20usos%20mixtos%20tiene%20como%20objetivo%20combinar%20tres,Edificio%20o%20un%20%C3%A1rea%20peque%C3%B1a.

Utami, A. S. P. R., Santosa, H. R., & Antaryama, I. G. N. (2012). Productive housing: domestic space and productive space with passive solar energy utilization. *Journal of Architecture&ENVIRONMENT*, *11*(2), 173. https://doi.org/10.12962/j2355262x.v11i2.a524

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO CON BATERÍAS Y PORTÁTIL PARA USO DOMÉSTICO EN COMUNIDADES AISLADAS DEL ESTADO DE DURANGO

Belinda Teresa López Villa, Fernando Meraz Becerra, Jesús María Carrillo Martínez, Lia Yelile Ponce Sandoval.
Departamento de Energías Renovables, Universidad Tecnológica de La Laguna Durango, Carretera Federal Torreón - Ciudad Juárez, Ejido Las Cuevas, Durango, C.P. 35185, México, 8713362979, fernando.meraz@utlaguna.edu.mx

RESUMEN

El acceso a la energía eléctrica en las zonas rurales del estado de Durango, México, representa un desafío significativo, especialmente en áreas remotas donde la conexión al sistema eléctrico nacional es económicamente inviable debido a su lejanía de los grandes centros de consumo y de las centrales de generación eléctrica. En respuesta a esta problemática, este estudio presenta el diseño, construcción y caracterización de un sistema fotovoltaico aislado, portátil y con baterías, destinado a satisfacer las necesidades eléctricas básicas de una vivienda para cuatro personas, con una demanda energética de 1000 Wh diarios. El sistema está montado en un carro de carga especialmente diseñado para facilitar su desplazamiento en terrenos irregulares y asegurar su durabilidad y eficiencia en entornos rurales.

El carro de carga se ha fabricado utilizando PTR de 32 mm y 25 mm con un grosor de 3.2 mm, y solera de 38 mm con un grosor de 1.6 mm, todos de acero al carbón. Este diseño estructural proporciona una combinación óptima de resistencia y peso, resultando en un total de 40 kg y una capacidad de carga de 400 kg, que puede ser ampliada a 800 kg mediante la modificación de las ruedas. La ergonomía del carro permite que una sola persona pueda manejarlo fácilmente, incluso en terrenos accidentados. Además, cuenta con un sistema de soporte para los paneles solares, diseñado para ajustar el ángulo de inclinación según las condiciones solares, y un armazón que protege los componentes eléctricos y facilita la ventilación y el enfriamiento del sistema durante su operación.

Las pruebas de campo realizadas en diversos terrenos confirman que el sistema fotovoltaico aislado no solo satisface la demanda eléctrica básica de una vivienda estándar, sino que también ofrece un diseño mecánico robusto y eficiente que asegura la estabilidad y el rendimiento del sistema bajo condiciones difíciles. La configuración modular del sistema facilita su mantenimiento y permite su adaptación a diferentes necesidades energéticas y geográficas.

Este desarrollo tecnológico proporciona una solución viable y sostenible para llevar electricidad a las comunidades rurales más remotas de Durango, mejorando la calidad de vida de sus habitantes y promoviendo el uso de energías renovables. Además, el diseño innovador del carro de carga con su sistema fotovoltaico integrado puede servir como modelo para futuras aplicaciones en otras regiones con características similares, alineándose con los objetivos del Programa Sectorial de Energía 2020-2024 de México para reducir la pobreza energética y mejorar el acceso a la energía en zonas aisladas.

ABSTRACT

Access to electricity in rural areas of Durango, Mexico, represents a significant challenge, particularly in remote locations where the connection with the national electrical grid is economically unfeasible due to their distance from major consumption centers and power generation plants. To address this issue, this study presents the design, construction, and characterization of a portable off-grid photovoltaic system with batteries, designed to meet the basic electrical needs of a household for four people, with a energy demand of 1000 Wh per day. The system is mounted on a custom-designed cart to facilitate movement across rough terrain and ensure durability and efficiency in rural environments.

The cart is constructed using 32 mm and 25 mm PTR with a thickness of 3.2 mm, and 38 mm flat bar with a thickness of 1.6 mm, all made of carbon steel. This structural design provides an optimal combination of strength and weight, resulting in a total weight of 40 kg and a load capacity of 400 kg, which can be increased to 800 kg by modifying the wheels. The cart's ergonomic design allows a single person to handle it easily, even on uneven terrain. Additionally, it includes a support system for the solar panels, designed to adjust the tilt angle according to solar conditions, and a frame that protects the electrical components and facilitates ventilation and cooling of the system during operation.

Field tests conducted on various terrains confirm that the off-grid photovoltaic system not only meets the basic electrical demand of a standard household but also offers a robust and efficient mechanical design that ensures the stability and performance of the system under challenging conditions. The modular configuration of the system simplifies maintenance and allows adaptation to different energy and geographic needs.

This technological development provides a viable and sustainable solution to bring electricity to the most remote rural communities of Durango, improving the quality of life of its inhabitants and promoting the use of renewable energy. Furthermore, the innovative design of the cart with its integrated photovoltaic system can serve as a model for future applications in other regions with similar characteristics, aligning with the objectives of Mexico's 2020-2024 Sectoral Energy Program to reduce energy poverty and improve access to energy in isolated areas.

Palabras claves: Energía eléctrica, sistema aislado, sistema fotovoltaico, carro de carga.

INTRODUCCIÓN

La transición hacia un modelo energético más sostenible es uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI. En este contexto, el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 (ODS 7) de las Naciones Unidas se centra en "garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos" (United Nations, 2021). Este objetivo incluye metas como garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos para 2030 (meta 7.1), aumentar significativamente la proporción de energías renovables en la matriz energética global (meta 7.2), promover la inversión en infraestructura y tecnología para la energía limpia (meta 7.a), y mejorar las capacidades

tecnológicas para proporcionar estos servicios (meta 7.b) (United Nations, 2021).

En México, el Programa Sectorial de Energía 2020-2024 establece estrategias clave para mejorar el suministro eléctrico en todo el país. Una de las prioridades, la estrategia 5.1, se centra en implementar mecanismos para disminuir la pobreza energética entre las poblaciones con rezago social y económico (Secretaría de Energía [SENER], 2020). Estas estrategias buscan no solo mejorar la infraestructura energética, sino también asegurar que las comunidades más vulnerables tengan acceso a fuentes de energía sostenibles.

Alineado con estos objetivos globales y nacionales, este artículo analiza el desarrollo y los resultados de un proyecto innovador: el diseño y construcción de un carro industrial equipado con un sistema fotovoltaico aislado. Este proyecto ofrece una solución energética portátil y sostenible para comunidades aisladas en el estado de Durango, donde el acceso a la red eléctrica convencional es limitado o inexistente.

El dimensionado de un sistema fotovoltaico implica calcular el tamaño óptimo de la instalación, garantizando la fiabilidad del sistema y minimizando los fallos. En este caso, el sistema debe ser diseñado de manera que la probabilidad de fallos sea lo más baja posible, dentro de ciertos márgenes específicos según el tipo de sistema. Los pasos principales en el dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo incluyen la estimación del consumo, el dimensionado del sistema de acumulación, del generador fotovoltaico, del regulador, de los sistemas de protección, y del inversor (Messenger & Ventre, 2010).

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II, se describen los cálculos y pasos específicos seguidos para determinar la capacidad de carga del carro fotovoltaico. La sección III presenta los resultados del diseño, construcción y caracterización del sistema, con un análisis de su eficiencia y potencial aplicación en contextos domésticos. Finalmente, la sección IV discute las conclusiones y evalúa el impacto potencial de esta tecnología en la mejora del acceso a la energía en comunidades remotas.

METODOLOGÍA

Concepto Visual del Carro de Carga con un Sistema Fotovoltaico Aislado para Distintos Entornos

La figura 01 muestra el diseño conceptual del carro de carga, donde se visualiza su forma, algunas de las partes mecánicas principales, y los elementos eléctricos que se utilizarán. Este diseño permite evaluar todas las necesidades operativas que el prototipo debe cumplir, así como la distribución precisa de cada uno de sus componentes. A partir de este diseño preliminar, se concluyó que el carro de carga debía contar con dos plataformas. Aunque esto incrementa el peso y afecta la estética general del proyecto, tiene una función operativa crucial: al ubicar el inversor y el controlador de carga en la repisa superior, estos proporcionan sombra al conjunto de baterías situado en la plataforma inferior, contribuyendo así a evitar su sobrecalentamiento. Además, se eligió estratégicamente la altura del soporte para los paneles, de manera que ofrezca cobertura ante la irradiación solar tanto al inversor como al controlador de carga, reduciendo así su calentamiento. Finalmente, se analizó el tipo y la altura de la agarradera, optándose por una agarradera cuadrada que recorre toda la parte trasera del carro, en lugar de las clásicas agarraderas tubulares situadas en los extremos. En cuanto a la altura, se seleccionó una medida intermedia de 125 cm, ergonómica para la mayoría de los usuarios.

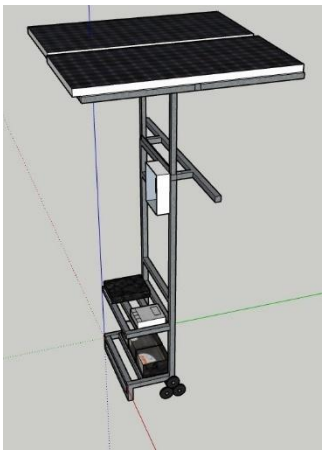


Figura 1. Concepto visual del prototipo a construir.

Diseño Mecánico del Carro de Carga

El diseño mecánico del carro se dividió en dos segmentos. El primero corresponde a la estructura principal del carro de carga, donde estarán ubicadas las ruedas, las plataformas y todos los componentes del sistema eléctrico, a excepción de los paneles solares. El segundo segmento se refiere al soporte para los paneles solares y al sistema mecánico diseñado para ajustarlos a distintos ángulos con respecto al suelo. En la Figura 2 se presenta el diseño mecánico de la estructura principal del carro de carga, elaborado en SolidWorks, donde se muestran algunas de las dimensiones principales utilizadas durante el proceso de construcción. Esta parte del carro tiene una masa total de 82.21 kg, una superficie de 30482 cm^2 y un volumen de 10473 cm^3.

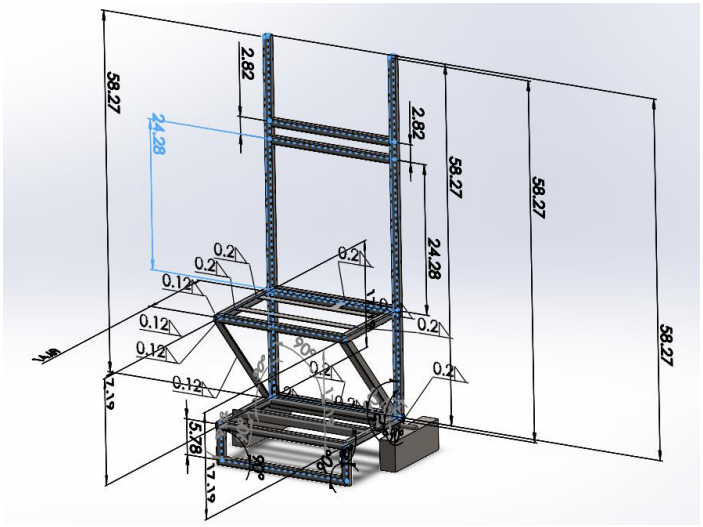


Figura 2. Cuerpo principal de carro de carga para el sistema fotovoltaico.

En la Figura 3 se muestra el soporte de los paneles solares y el sistema mecánico para modificar la inclinación de los mismos. Para este sistema de inclinación se optó por un el uso de 4 bisagras de 4 pulgadas de lardo por 3 pulgadas de ancho con un espeso de $\frac{1}{8}$ in distribuidas de manera uniforme a lo largo del eje en el que rotaria parcialmente el soporte de los paneles. Esta parte del sistema presentó un peso total de 3.03 Kg.

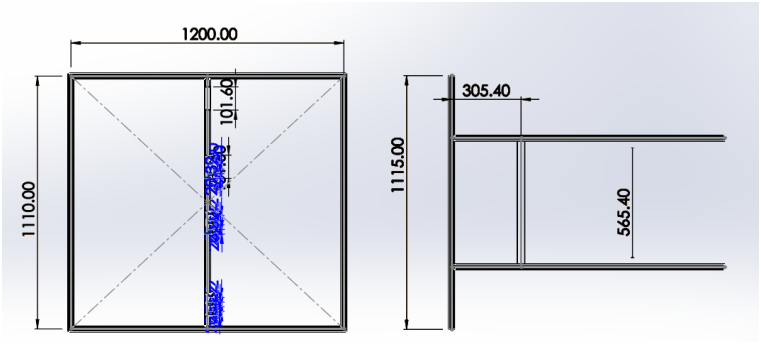


Figura 3. Mecanismos para soportar y orientar los paneles solares.

Dimensiones de los Elementos del Sistema Fotovoltaico

Para asegurar que el carro de carga tuviera las características estructurales necesarias para soportar el peso de todos los componentes del sistema fotovoltaico mientras se desplazaba por terrenos irregulares, y que además contara con las dimensiones adecuadas para una distribución eficiente de dichos elementos, se analizaron las características físicas de cada componente a integrar. En la Tabla 1 se presentan las especificaciones de la batería, cuyo peso es de 27.7 kg. Este dato es relevante porque el sistema incluye dos baterías, lo que resulta en una masa combinada de 54.4 kg, constituyendo la parte que más peso ejercerá del sistema fotovoltaico. Cada panel solar tiene un peso de 10.8 kg (Tabla 2), sumando un total de 21.6 kg para los dos paneles. El inversor tiene un peso de 4 kg (Tabla 3), el controlador de carga pesa 0.96 kg (Tabla 4), el botón de paro de emergencia 0.4 kg, el gabinete para los fusibles fotovoltaicos 0.58 kg, y los 5 metros de cable THW calibre 8 AWG utilizados para la interconexión pesan 0.52 kg en total (SYSCOM, 2024). Así, el peso total del sistema fotovoltaico completo es de 83.46 kg.

Tabla 1. Características físicas de la batería solar utilizada (LTH, 2019)

Bacteria LTH L-31T/S-190M			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
330 mm	172 mm	238 mm	27.7 kg

Tabla 2. Características físicas del módulo solar de silicio policristalino utilizado (SYSCOM, 2014)

Módulo Solar de Silicio Policristalino SYSCOM PRO15012			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
670 mm	35 mm	1476 mm	10.8 kg

Tabla 3. Características físicas del inversor utilizado (Samlex America, 2014)

Inversor Samlex America PST-1000-24			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
238 mm	397 mm	82 mm	4 kg

Tabla 4. Características físicas del controlador de carga EPEVER XTRA 2206N (EPEVER, 2022)

Controlador de Carga EPEVER XTRA 2206N			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
158 mm	217 mm	56.5 mm	0.96 kg

Dimensionamiento de Sistema Fotovoltaico

Estimación del consumo

La demanda energetica determina muchas de las características de la instalación, por lo que, en la planificación de las necesidades, es fundamental registrar toda la información relacionada con los distintos aparatos eléctricos que constituirán la carga del sistema. En primer lugar, es necesario calcular la energía que el usuario requerirá diariamente. Para ello, se debe identificar la potencia de cada aparato incluido en la instalación, así como el tiempo promedio de uso de cada uno. La fórmula para calcular la energía requerida se presenta en la ecuación 1 (Alexander & Sadiku, 2019).

$$Etotal = PT * t \tag{1}$$

Donde PT representa la potencia total de todos los dispositivos del sistema y t su tiempo de uso. Dado que este proyecto no está diseñado para suministrar energía a una carga específica debido a su naturaleza móvil, se decidió, por necesidades de dimensionamiento, que el sistema sea capaz de suministrar energía a una carga con una $Etotal$ de 1000 Wh diariamente.

Dimensionado del Sistema de Acumulación de Energía

Para definir el tamaño del acumulador, es necesario considerar varios parámetros clave. La profundidad de descarga máxima es el nivel máximo de descarga permitido para la batería antes de que el regulador la desconecte, con el fin de proteger su vida útil. El tiempo de autonomía se refiere a la cantidad de horas consecutivas que el sistema de almacenamiento puede suministrar energía en ausencia de sol, sin exceder la profundidad de descarga máxima de la batería. Finalmente, la capacidad de las baterías es la cantidad de energía que deben ser capaces de almacenar para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. La ecuación 2 presenta la fórmula para calcular este valor (Kalogirou, 2013).

$$Capacidad_{bat} = \frac{Etotal}{PD_{max} * V_{bat} * FCT} \tag{2}$$

Donde $Etotal$ es la energía calculada con la ecuación 1, $PDmax$ es la profundidad de descarga máxima del sistema, $Vbat$ el voltaje nominal de la batería y FCT el factor de corrección por temperatura con un valor de 0.77 (Skoplaki & Palyvos, 2009). El esquema de baterías seleccionado para este sistema es de un voltaje nominal de 24 V, con una profundidad de descarga del 50%. Aplicando la ecuación 3 bajo estas condiciones, se obtiene que:

$$Capacidad_{bat} = \frac{1000\ W/h}{0.5 * 24V * 0.77} = 108.22\ Ah \tag{3}$$

Se implementó un arreglo de dos baterías de ciclo profundo marca LTH, modelo L-31T/S-190M, diseñadas para aplicaciones solares, cada una con un voltaje de 12 V y una capacidad de 115 Ah (Tabla 5). Estas baterías se conectaron en serie para cumplir con los requisitos de voltaje nominal de 24 V establecidos para el sistema.

Tabla 5. Características eléctricas de la batería solar utilizada (LTH, 2019)

Bacteria LTH L-31T/S-190M													
Amper / Hora				**Descarga (A)**				**Capacidad de Reserva (min)**			**Energía en (kWh)**		
5 h	***10 h***	***20 h***	***100h***	***5 h***	***10 h***	***20 h***	***100h***	***25 A***	***56 A***	***75 A***	***5 h***	***20 h***	***100 h***
87	100	115	159	17.4	10	5.8	1.6	190	69	48	1.0	1.4	1.9

Dimensionado del generador fotovoltaico

Utilizando los parámetros eléctricos proporcionados por los fabricantes bajo condiciones de prueba estándar (SCT), que son más representativas de las condiciones climáticas reales del área de estudio en comparación con las condiciones de operación normal de la célula (NOCT), se procederá a calcular la potencia fotovoltaica necesaria para el arreglo. Esto se debe a que el área de estudio es una zona esteparia con un alto índice de irradiación y temperaturas elevadas. El cálculo se realizará aplicando la ecuación 4 (Aguilera et al., 2011).

$$P_{FV} = \frac{Etotal}{HSP * FCT} \tag{4}$$

Donde HSP (Horas Sol Pico) se refiere al número de horas en un día durante las cuales se recibe una radiación solar de $1000\ W/m^2$ (Dunlop, 2012).

Para determinar el valor de HSP, se utilizó el valor mínimo mensual promedio proporcionado por la aplicación POWER de la NASA, seleccionando la opción de módulo con una inclinación igual a la latitud y orientado hacia el sur, como se ilustra en la Figura 4 (NASA, 2024).

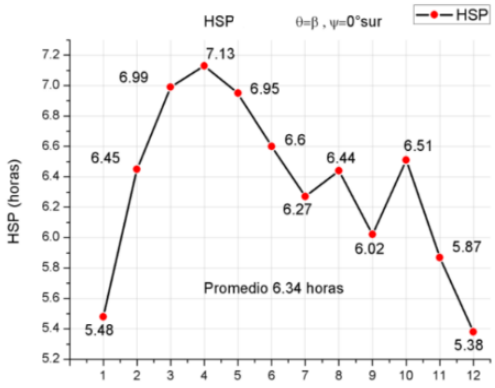


Figura 4. HSP de la región a través de un año.

Dicho valor mínimo de 5.38 HSP corresponde al mes de diciembre por lo que con fines de seguridad será tomado sin decimales para la realización de los cálculos.

$$P_{FV} = \frac{1000\,Wh}{5h*0.77} = 259.74\,W \tag{5}$$

De acuerdo con la ecuación 5, se requiere un arreglo fotovoltaico (FV) con una producción mínima de 259.74 W para poder cargar la batería del sistema durante las Horas Sol Pico (HSP). Por lo tanto, dos módulos FV Epcom PRO-150-12, con una potencia individual de 150 W conectados en serie, serán más que suficientes para cubrir esta demanda, proporcionando una potencia total de 300 W. Las características principales de estos módulos FV se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características eléctricas del módulo solar de silicio policristalino utilizado (SYSCOM, 2014)

Inversor Samlex America PST-1500-12				
Voltaje de Circuito Abierto (Voc)	**Corriente de Circuito Abierto (Isc)**	**Potencia Máxima (Pm)**	**Voltaje a Máxima Potencia (Pmax)**	**Corriente a Máxima Potencia (Pmax)**
22.7 V ($\pm$ 3%)	8.2 A ($\pm$ 3%)	150 W ($\pm$ 3%)	18.3 V ($\pm$ 3%)	8.1 A ($\pm$ 3%)

Dimensionado del Controlador de Carga

Al dimensionar un regulador, el objetivo principal es determinar la corriente máxima que circulará por la instalación. Para ello, es necesario calcular tanto la corriente generada por los módulos fotovoltaicos como la corriente consumida por la carga. El regulador debe ser capaz de soportar la mayor de estas dos corrientes durante su funcionamiento. La corriente de corte, es decir, el punto en el que el regulador debe actuar para proteger el sistema, se establecerá en el propio dispositivo. No obstante, el regulador debe estar preparado para soportar la corriente máxima que pueda producirse en la instalación, esta corriente máxima corresponde a la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico (Moreno, 2016).

$$I_{int} = Isc * NP * 1.25 \tag{6}$$

Donde Isc es la corriente de cortocircuito del módulo y Np es el número de ramas en paralelo del generador. En la expresión anterior, es recomendable incluir un factor de seguridad de 1.25 para tener en cuenta los aumentos de irradiancia que pueden ocurrir en días nublados durante breves intervalos de tiempo. La implementación de la fórmula 6 de acuerdo con el prototipo diseñado se detalla en la Ecuación 7, obteniendo una corriente máxima producida por los módulos fotovoltaicos es de 10.725 A.

$$I_{int} = 8.58A * 1 * 1.25 \ = 10.725A \tag{7}$$

La intensidad de corriente máxima que consume la carga, también denominada corriente de salida (I_{out}) se determina mediante la Ecuación 8 (Aguilera et al., 2011).

$$I_{out} = \frac{Ptotal*1.25}{V_{bat}} \tag{8}$$

Donde P_{total} es la potencia consumida por la carga y V_{bat} es la tensión nominal de la batería.

Para determinar la capacidad máxima de corriente que debe soportar el regulador de carga, se considera tanto la corriente máxima que pueden producir los módulos fotovoltaicos (I_{int}) como la corriente de salida consumida por la carga (I_{out}). Basado en estos valores, se selecciona el regulador de carga adecuado. En el caso del prototipo desarrollado, se utilizó la corriente de entrada calculada (I_{int}) como criterio principal para la selección del controlador, asegurándose de que el rango de voltaje del regulador abarcara el rango de voltaje del arreglo de baterías. Con estas condiciones, se optó por el controlador MPPT XTRA-2206N de la marca EPEVER, que tiene una capacidad de 20A. Las características eléctricas del controlador seleccionado se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Características eléctricas del controlador de carga EPEVER XTRA 2206N (EPEVER, 2022)

Controlador de Carga EPEVER XTRA 2206N			
Corriente de Carga Nominal	**Rango de Voltaje de la Batería**	**Rango de Voltaje del MPPT**	**Máxima Entrada de Potencia Fotovoltaica**
$20\ A$	$8\ V - 32\ V$	$Voltaje\ de\ la\ batería + 2\ V\ a\ 36V$	$260\ W\ a\ 12\ V$ $520\ W\ a\ 24\ V$

Finalmente, la potencia del controlador de carga que está definida por la Ecuación 9. Donde I_{MPPT} es la corriente nominal del MPPT, v_{bat} es el voltaje nominal del arreglo de baterías (Irwin & Nelms, 2015).

$$P_{mppt} = I_{MPPT} * v_{bat} \tag{9}$$

Al resolver la ecuación 9 se obtuvo una entregada por el controlador de carga de 480 W (Ecuación 10), lo que comprueba la efectividad del sistema de control al ser esta mayor a la potencia máxima suministrada por el arreglo fotovoltaico.

$$P_{mppt} = 20A * 24V = 480\ W \tag{10}$$

Dimensionamiento del Sistema de Protección

Siguiendo la normativa vigente los interruptores de seguridad de corriente directa para sistemas fotovoltaicos deberán ser calculados como el 125% de la corriente máxima del arreglo FV, siendo en sí misma dicha corriente el 125% de la corriente de corto circuito del arreglo FV, por lo que se puede expresar la ampacidad necesaria de las protecciones como se muestra en la Ecuación 11 (SENER, 2018).

$$Ampacidad = ISC * 1.25 * 1.25 \tag{11}$$

En este caso al ser un arreglo en serie de los módulos FV la corriente de corto circuito corresponderá a la suministrada por el fabricante en su ficha técnica (Ecuación 12).

$$Ampacidad = 8.58\ A * 1.25 * 1.25 = 13.40\ A \tag{12}$$

La ampacidad necesaria para los sistemas de protección en corriente continua se calculó en 13.40 A. Sin embargo, dado que no existe una pastilla comercial con esta ampacidad exacta y siguiendo la normativa vigente, se seleccionó el siguiente valor inmediato superior disponible: una pastilla comercial de 15 A.

Selección del Inversor

En cuanto al inversor, se optó por el modelo PST-1000-24 de onda sinusoidal pura, con una potencia nominal de 1000 W y un rango de entrada de voltaje de $21.4\ Vcd - 33\ Vcd$. Este inversor cumple con los requerimientos del arreglo de baterías planteado. Sus especificaciones técnicas se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Características eléctricas del inversor **Samlex America PST-1000-24** (Samlex America, 2014)

Parámetros de Salida del Inversor Samlex America PST-1000-24						
Voltaje de Salida	**Corriente de Salida**	**Frecuencia de Salida**	**Potencia de Salida Máxima**	**Voltaje Nominal de Entrada**	**Rango de Voltaje de Entrada**	**Corriente Máxima de Entrada**
$120\ Vca$	$8.5\ A$	$60\ Hz$	$1000\ W$	$24\ Vcd$	$21.4\ Vcd - 33\ Vcd$	$80\ A$

RESULTADOS

La Figura 5 muestra el prototipo final en pleno funcionamiento. El vehículo de carga, con una masa total de 85.3 kg, demostró una resistencia mecánica adecuada para transportar el sistema fotovoltaico, que tiene una masa total de 83.43 kg, en diversas superficies. Además, la altura de los paneles y la estructura que los soporta presentaron una alta resistencia frente a fuerzas externas. El centro de masa ubicado en la base, junto con la correcta distribución de los elementos del sistema fotovoltaico, hace que el carro de carga sea extremadamente resistente a fuerzas de arrastre y levantamiento cuando está desplegado verticalmente.

Con un arreglo de paneles solares de 300 W que proporciona una energía diaria de 1500 Wh (considerando un promedio de 5 horas de sol pico, HSP, por día en la región), se estima que el tiempo necesario para recargar completamente un banco de baterías con una capacidad de 2760 Wh es de aproximadamente 9.2 horas. Sin embargo, dado que el esquema de descarga del sistema está diseñado para utilizar solo el 50% de la capacidad total de la batería, la energía recargable efectiva es de 1380 Wh. Esta cantidad de energía puede recargarse en aproximadamente 4.6 HSP, lo que es viable incluso en los meses de menor insolación en la región. Además, el sistema está diseñado para proporcionar una autonomía de 10 horas, entregando una energía de 138 Wh de acuerdo con las especificaciones del sistema de almacenamiento.



Figura 5. Prototipo concluido y en pleno funcionamiento.

CONCLUSIÓN

Este estudio ha demostrado la viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico aislado y portátil, diseñado para proporcionar energía eléctrica a comunidades rurales aisladas en el estado de Durango. El prototipo desarrollado, montado sobre un carro de carga especialmente diseñado, ha mostrado ser robusto y eficiente, capaz de satisfacer las necesidades energéticas básicas de una vivienda estándar de cuatro personas en terrenos irregulares.

El diseño del sistema, que incluye paneles solares de alta eficiencia, baterías con capacidad adecuada para almacenamiento de energía, y una estructura mecánica resistente, permite que una sola persona pueda transportar y operar el sistema en diversos entornos. Los resultados de las pruebas confirman que este sistema es una solución práctica y sostenible para llevar electricidad a las zonas más remotas de Durango, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y acceso universal a la energía definidos por el Programa Sectorial de Energía 2020-2024 de México.

Además, este desarrollo tecnológico no solo tiene el potencial de mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales al proporcionar un acceso confiable a la electricidad, sino que también promueve el uso de energías renovables y la reducción del impacto ambiental en regiones donde la interconexión con la red eléctrica nacional es económicamente inviable.

REFERENCIAS

Aguilera, J., Hontoria, L., & Muñoz, F. J. (2011). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos*. Grupo Idea, Departamento de electrónica, Escuela politécnica superior, Universidad de Jaén.

Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2019). *Fundamentos de circuitos eléctricos* (7ª ed.). McGraw-Hill Education.

Dunlop, J. P. (2012). *Photovoltaic systems* (3rd ed.). American Technical Publishers.

EPEVER. (2022). *Hoja de datos del controlador de carga solar MPPT de la serie XTRA*. Recuperado de www.epever.com

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Estadísticas de vivienda y electrificación en Durango. INEGI.

Irwin, J. D., & Nelms, R. M. (2015). *Basic Engineering Circuit Analysis* (12th ed.). Wiley.

Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2nd ed.). Academic Press.

López Villa, B. T., Meraz Becerra, F., & Ponce Sandoval, L. Y. (2024). Estimación del recurso eólico en la Reserva de la Biósfera de Mapimí utilizando tres métodos para la aproximación de la velocidad del viento promedio a distintas alturas. Universidad Tecnológica de La Laguna Durango.

LTH. (2019). *Especificaciones técnicas batería L-31T/S-190M*. LTH. Recuperado de: https://www.lth.com.mx/productos/especificaciones-t%C3%A9cnicas/171028.

Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic Systems Engineering* (3rd ed.). CRC Press.

Moreno Martín, A. (2016). *Dimensionado de una instalación fotovoltaica para una vivienda rural aislada* [Trabajo de fin de grado, Universidad Carlos III de Madrid]. Repositorio de la Universidad Carlos III de Madrid.

Mukerjee, A. K., & Thakur, N. (2011). *Photovoltaic Systems: Analysis and Design*. PHI Learning Pvt. Ltd.

NASA. (2024.). *Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)*. NASA Langley Research Center. https://power.larc.nasa.gov/

Samlex America. (2014). *Inversor CD-CA de Onda Sinusoidal Pura: Modelos PST-1500-12 y PST-1500-24 - Hoja de Datos*. Recuperado de www.samlexamerica.com

Secretaría de Energía (SENER). (2018). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2018, Instalaciones Eléctricas, Capítulo 690, Sistemas Solares Fotovoltaicos* (pp. 825-841).

Secretaría de Energía [SENER]. (2020). Programa Sectorial de Energía 2020-2024. Gobierno de México.

Secretaría de Energía [SENER]. (2020). Programa Sectorial de Energía 2020-2024. Gobierno de México.

Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*. Solar Energy, 83(5), 614-624.

Style, O. (2012). *Energía Solar Autónoma: Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. Oliver Style.

SYSCOM. (2014). Módulo Solar de Silicio Policristalino PRO15012: Hoja de Datos. Talleres Gráficos de SYSCOM. Recuperado de https://www.syscom.mx/producto/PRO-150-12-EPCOM-POWER-LINE-167894.html

SYSCOM. (2024). *SLY-296-GRN-IN*. https://www.syscom.mx/producto/SLY-296-GRN-INDIANA-84917.html

United Nations. (2021). Sustainable Development Goal 7. https://sdgs.un.org/goals/goal7

United Nations. (2021). Sustainable Development Goal 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. Recuperado de: https://sdgs.un.org/goals/goal7.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO DE ESPACIO RECREATIVO CON ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA; IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO COMO TECHO PARA RECARGAR DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS EN ESCUELAS PÚBLICAS DE NIVEL SUPERIOR Y POSTGRADO DEL ESTADO DE DURANGO

Fernando Meraz Becerra, Jeremy Isaí Silva Negrete, José Eduardo Lujan Maciel, Natalia Lizeth Moreno Rodríguez.
Departamento de Energías Renovables, Universidad Tecnológica de La Laguna Durango,
Carretera Federal Torreón - Ciudad Juárez, Ejido Las Cuevas, Durango, C.P. 35185, México,
8714824622, **st21030577@utlaguna.edu.mx**

RESUMEN

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, hasta 2022 existían 49 escuelas públicas de nivel superior y posgrado en el estado de Durango, muchas de las cuales carecen de áreas recreativas comunitarias que promuevan la convivencia, la comunicación entre estudiantes de distintas carreras y el desarrollo de actividades culturales. Además, la infraestructura recreativa existente generalmente no cuenta con tomas eléctricas para recargar dispositivos electrónicos, cobertura de internet inalámbrico ni sistemas de climatización, lo que contribuye al desuso de estos espacios y al aislamiento social de los estudiantes. Con el objetivo de mejorar y ampliar estas áreas recreativas en las universidades del estado, favoreciendo así una mejor integración social de los estudiantes, este artículo describe el diseño, construcción y caracterización de un sistema recreativo con arquitectura bioclimática y un sistema fotovoltaico aislado de 750 W, utilizado como techo para recargar dispositivos electrónicos. El espacio recreativo incluye una mesa central de 1 m de ancho por 2 m de largo con capacidad para ocho estudiantes, distribuidos en dos bancas y dos columpios individuales. El sistema fotovoltaico consta de tres paneles de 250W, un controlador de carga de 40A, cuatro baterías de 12 voltios y 115 Ah, y un inversor de 1000W. Este sistema permite alimentar un ventilador de 306 W durante el día, así como cargar dos celulares de 50W, dos computadoras portátiles de 120W y un repetidor para proporcionar conexión a internet inalámbrica de 15W. El sistema de baterías ofrece una autonomía de 3 horas con una energía máxima de 2000 Wh, permitiendo alimentar los ventiladores o los dispositivos electrónicos mencionados, garantizando siempre el suministro eléctrico para el repetidor WiFi. En conclusión, el área recreativa desarrollada cumple con el objetivo planteado, funcionando como un punto de reunión climatizado, con acceso a internet inalámbrico y la infraestructura eléctrica necesaria para satisfacer las necesidades de los estudiantes.

ABSTRACT

According to the National Institute of Statistics and Geography, as of 2022, there were 49 public higher education and postgraduate institutions in the state of Durango, many of which lack community recreational areas that promote interaction, communication among students from different fields, and the development of cultural activities. Additionally, the existing recreational infrastructure generally does not have electrical outlets for charging electronic devices, wireless internet coverage, or climate control systems, which contributes to the disuse of these spaces and the social isolation of students. With the aim of improving and expanding these recreational areas in the universities of the state, thus fostering better social integration among students, this article describes the design, construction, and characterization of a recreational system with bioclimatic architecture and an isolated 1500 W photovoltaic system used as a roof for charging electronic devices. The recreational space includes a central table measuring 1 meter wide by 2 meters long, with a capacity for eight students, distributed across two benches and two individual swings. The photovoltaic system consists of three 250 W panels, a 40A charge controller, four 12-volt, 115 Ah batteries, and one 1000 W inverters. This system allows for the operation of one 306 W fan during the day, as well as the charging of two 50 W cell phones, two 120 W laptops, and a 15W repeater to provide wireless internet connection. The battery system offers 3 hours of autonomy with a maximum energy of 2000 Wh, allowing the fan or the mentioned electronic devices to be powered, while always ensuring the power supply for the WiFi repeater. In conclusion, the developed recreational area meets the intended goal, functioning as a climate-controlled gathering point with wireless internet access and the necessary electrical infrastructure to meet students' needs.

Palabras claves: Arquitectura bioclimática, áreas recreativas comunitarias, sistema fotovoltaico aislado.

INTRODUCCIÓN

La energía solar ha emergido como una de las fuentes más relevantes de energía a nivel global, tanto por su capacidad para generar electricidad de manera limpia como por su papel en la promoción del desarrollo sostenible (Gómez, 2024). En este contexto, la arquitectura bioclimática ha ganado terreno al integrar la sostenibilidad en el diseño de edificaciones, utilizando las condiciones climáticas locales para reducir el consumo energético y mejorar el confort térmico de los ocupantes (Pacheco & Sánchez, 2020). Este enfoque no solo contribuye a la eficiencia energética, sino que también promueve una armonía con el entorno natural.

En México, y específicamente en el estado de Durango, se han implementado numerosos proyectos enfocados en la sostenibilidad, destacando el uso de tecnologías renovables como los paneles solares en construcciones tanto residenciales como institucionales (Ithaca, 2019). El estado cuenta con un considerable potencial para la generación de energía solar, alcanzando hasta 1.028 GWh/a, lo que lo convierte en un escenario

ideal para la implementación de tecnologías sostenibles en diversos sectores, incluyendo el ámbito educativo (García & López, 2021).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), hasta 2022 existían 49 escuelas públicas de nivel superior y posgrado en el estado de Durango (INEGI, 2022). Sin embargo, muchas de estas instituciones carecen de áreas recreativas comunitarias que promuevan la sana convivencia, la comunicación entre estudiantes de distintas carreras y el desarrollo de actividades culturales (Luna & Rivera, 2022). Además, la infraestructura recreativa existente suele carecer de elementos básicos como tomas eléctricas, cobertura de internet inalámbrico y sistemas de climatización, lo que lleva al desuso de estos espacios y contribuye al aislamiento social de los estudiantes (Mendoza et al., 2021).

Este artículo aborda la problemática y propone una solución innovadora: el diseño de un espacio recreativo con arquitectura bioclimática, que incorpora un sistema fotovoltaico aislado de 1500 W como techo para recargar dispositivos electrónicos. El objetivo principal es mejorar la infraestructura recreativa en las universidades del estado de Durango, favoreciendo la interacción social y la integración de energías limpias como parte de la formación académica. A través de este proyecto, se busca no solo crear un espacio funcional y sostenible, sino también generar conciencia entre los estudiantes sobre la importancia de las energías renovables en el contexto actual de sostenibilidad y cambio climático (Rodríguez & Fernández, 2023).

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II, se detallan los cálculos y los pasos seguidos para determinar la capacidad de carga de la estructura del espacio recreativo. La sección III presenta el dimensionamiento del sistema fotovoltaico. En la sección IV, se exponen los resultados obtenidos, y finalmente, en la sección V, se discuten las conclusiones y se evalúa el impacto potencial de esta tecnología en la mejora de los espacios recreativos en las escuelas públicas de nivel superior.

METODOLOGÍA

Concepto Visual del Carro de Carga con un Sistema Fotovoltaico Aislado para Distintos Entornos

Inicialmente, se propuso instalar dos columpios en lugar de cada banco, lo que permitiría una capacidad máxima de seis personas y ofrecería un espacio recreativo innovador para instituciones de nivel superior, dado que existen pocos espacios con columpios destinados a adultos. Esta idea fue bien recibida por la comunidad estudiantil, lo que llevó a la construcción de una primera estructura con seis columpios. Las vistas frontal y lateral de este diseño preliminar se presentan en las Figuras 01 y 02. Durante las pruebas, se observó que el diseño presentaba poca estabilidad cuando los estudiantes se balanceaban simultáneamente, debido a la distribución irregular del peso, ya que el grupo de usuarios variaba en masa de manera aleatoria. Se consideró necesaria la modificación de las secciones frontal y lateral del diseño, especialmente porque el prototipo había sido probado sin el sistema fotovoltaico que aumentaría 40 cm la altura total de la estructura, lo que elevaría su centro de masa y mejoraría su estabilidad.



Figura 1. Vista frontal del primer prototipo construido.

Para corregir este problema, se propuso reemplazar cada par de columpios en los lados frontal y trasero por un columpio alargado de 2 metros de longitud, capaz de acomodar hasta tres estudiantes, lo que ayudaría a evitar movimientos bruscos. Sin embargo, se concluyó que este modelo no resultaría cómodo a menos que se distribuya uniformemente el peso entre los ocupantes.



Figura 2. Vista lateral del primer prototipo construido.

Por lo tanto, se descartó la construcción del espacio recreativo sin un diseño adecuado y se desarrolló un diseño conceptual utilizando el programa SketchUp. En la Figura 03 se presenta el diseño conceptual final, que muestra la forma general de la estructura, algunas de sus partes mecánicas principales y los elementos eléctricos que se emplearán. Este diseño permite evaluar todas las necesidades operativas que debe cumplir el prototipo, así como la distribución precisa de cada uno de sus componentes.

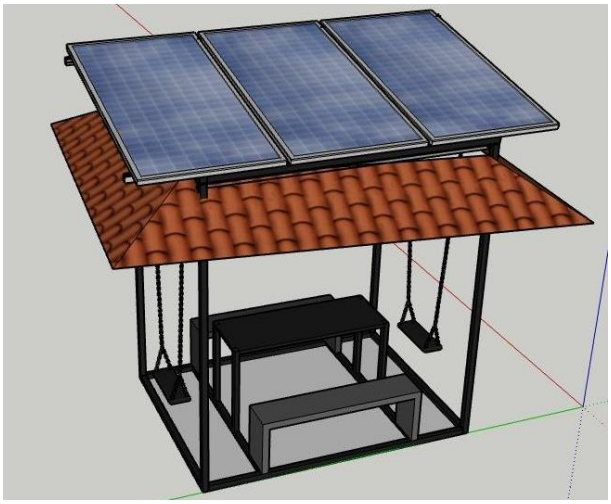


Figura 3. Concepto visual del prototipo a construir.

A partir del diseño preliminar, se concluyó que la estructura debía incluir dos bancos largos de [x] metros de ancho, con capacidad para tres personas cada uno, además de dos columpios en los laterales para ofrecer dinamismo y una opción de juego a los estudiantes sin comprometer la estabilidad de la estructura. Asimismo, se determinó que los paneles solares no proporcionarían la sombra esperada, por lo que se propuso instalar un pretil de 1 metro de ancho a lo largo de todo el perímetro superior del espacio recreativo, que serviría además como soporte para los paneles solares. Otra consideración importante fue el espacio destinado a alojar la batería solar y el inversor del sistema fotovoltaico, para lo cual se añadieron soportes en el techo, asegurando que estos componentes quedaran protegidos de las condiciones climáticas bajo los paneles solares (Figura 04).



Figura 4. Diseño de los soportes necesarios para el inversor, el controlador de carga y las baterías en el techo del espacio recreativo.

Finalmente, dado que el espacio recreativo fue diseñado para proporcionar energía eléctrica que cubra las necesidades básicas de confort de los estudiantes, aprovechando el potencial solar de la región, se instalaron tres paneles solares de 250W. Estos paneles fueron montados en un riel de aluminio con un ángulo óptimo de 25°, lo que maximiza la captación de energía solar en la región de Lerdo, Durango. Para asegurar la durabilidad de la estructura y prevenir problemas de corrosión, se incorporó un soporte tipo L-foot con neopreno en la unión entre el aluminio y el PTR (Figura 5).

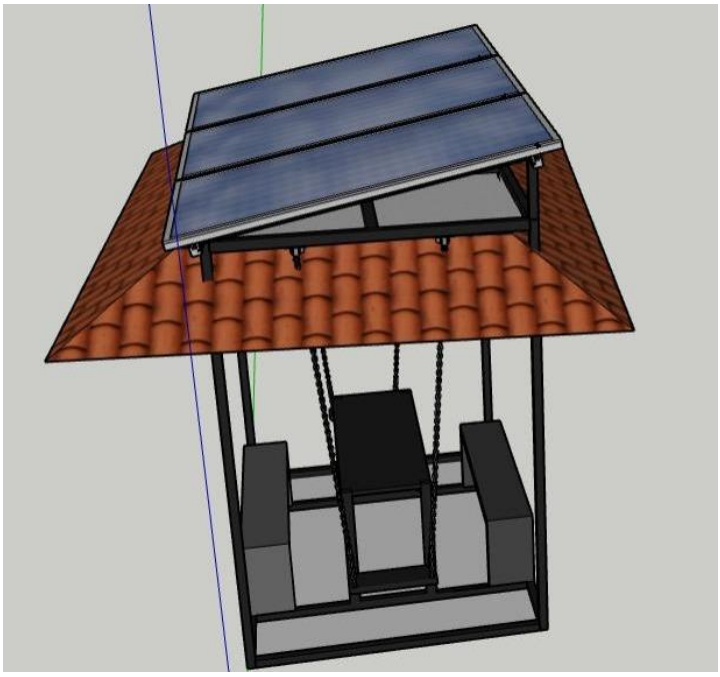


Figura 5. Modelo 3D en SketchUp vista lateral con enfoque en la inclinación de los módulos fotovoltaicos.

Diseño Mecánico del Espacio Recreativo

El espacio recreativo se construyó utilizando Perfil Tubular Rectangular (PTR) de 2 pulgadas con un grosor de 1/8 de pulgada, de acuerdo con el fabricante, el PTR está construido a partir de hacer A36. En la Figura 6 se muestra el diseño mecánico de la estructura principal, elaborado en SolidWorks, donde se visualizan las dimensiones clave empleadas durante su construcción. La estructura incluye un columpio en cada lateral y un banco para tres personas tanto en la parte frontal como en la trasera. Esta sección del espacio recreativo tiene una masa total de 82.21 kg, una superficie de 30,482 cm² y un volumen de 10,473 cm³.

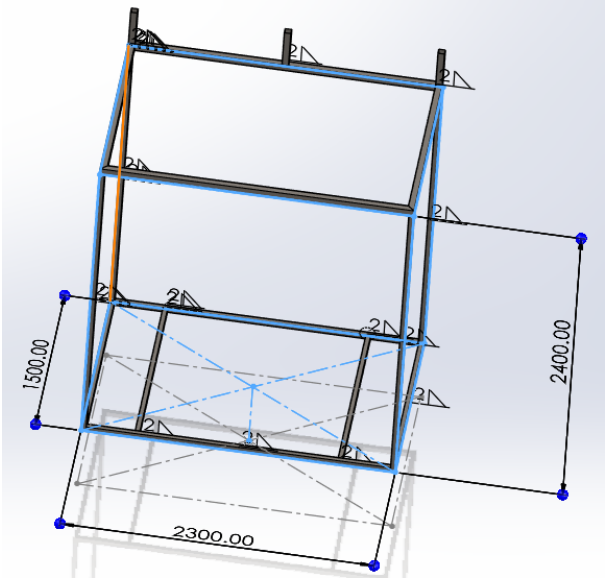


Figura 6. Dimensiones de la estructura del sistema recreativo.

Dimensiones de los Elementos del Sistema Fotovoltaico

Para asegurar que el carro de carga tuviera las características estructurales necesarias para soportar el peso de todos los componentes del sistema fotovoltaico mientras se desplazaba por terrenos irregulares, y que además contará con las dimensiones adecuadas para una distribución eficiente de dichos elementos, se analizaron las características físicas de cada componente a integrar. En la Tabla 1 se presentan las especificaciones de la batería, cuyo peso es de 27.7 kg. Este dato es relevante porque el sistema incluirá cuatro baterías, lo que resulta en una masa combinada de 110.8 kg constituyendo la parte que más peso ejercerá del sistema fotovoltaico. Cada panel solar tiene un peso de 18 kg (Tabla 2), sumando un total de 56 kg para los tres paneles. El inversor tiene un peso de 4 kg (Tabla 3), el controlador de carga pesa 2.47 kg (Tabla 4), el botón de paro de emergencia 0.4 kg, el gabinete para los fusibles fotovoltaicos 0.58 kg, los 40 metros de cable THW calibre 8 AWG utilizados para la interconexión pesan 4.16 kg en total (INDIANA, 2024), las 6 cajas rectangulares de aluminio de 3 in x 2 in para exteriores de 1/2 in pesan en total 1.47 kg y los 6 contactos dobles con un peso combinado de 0.318kg. Así, el peso total del sistema fotovoltaico completo es de 237.618 kg.

Tabla 1. Características físicas de la batería solar utilizada (LTH, 2019)

Bacteria LTH L-31T/S-190M			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
330 mm	172 mm	238 mm	27.7 kg

Tabla 2. Características físicas del módulo solar de silicio policristalino utilizado (EnergyPal, 2024)

Módulo Solar de Silicio Policristalino DQ250PSC			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
990 mm	35 mm	1640 mm	18 kg

Tabla 3. Características físicas del inversor utilizado (Samlex America, 2014)

Inversor Samlex America PST-1000-24			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
238 mm	397 mm	82 mm	4 kg

Tabla 4. Características físicas del controlador de carga EPEVER XTRA 2206N (EPEVER, 2022)

Controlador de Carga EPEVER XTRA 4415N			
Largo	**Ancho**	**Alto**	**Peso**
255 mm	189 mm	83.2 mm	2.47 kg

Dimensionamiento de Sistema Fotovoltaico

Horas solar Pico y Tiempo de Autonomía

El primer paso para el dimensionamiento será obtener las HSP específicas para la región donde se asentará el sistema. Donde HSP (Horas Sol Pico) se refiere al número de horas en un día durante las cuales se recibe una radiación solar de $1000\ W/m^2$ (Dunlop, 2012).

Para determinar el valor de HSP, se utilizó el valor mínimo mensual promedio proporcionado por la aplicación POWER de la NASA, seleccionando la opción de módulo con una inclinación igual a la latitud y orientado hacia el sur, como se ilustra en la Figura 4 (NASA, 2024).

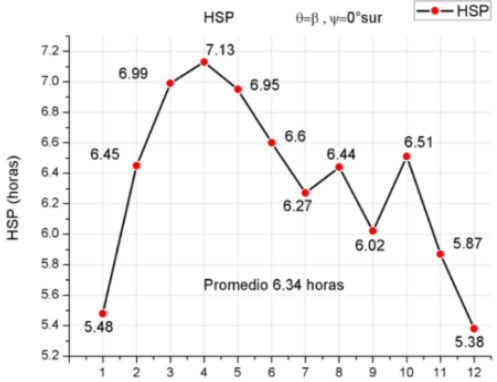


Figura 7. HSP de la región a través de un año.

Dicho valor mínimo de 5.38 HSP corresponde al mes de diciembre por lo que con fines de seguridad será tomado sin decimales para la realización de los cálculos, dando como valor final de HSP 5 horas.

El tiempo de autonomía se refiere a la cantidad de horas consecutivas que el sistema de almacenamiento puede suministrar energía en ausencia de sol, sin exceder la profundidad de descarga máxima de la batería. (Kalogirou, 2013). La autonomía necesaria del sistema será calculada mediante la diferencia entre el tiempo total que se requiere que el sistema esté en funcionamiento y las HSP mínimas de la región, para este caso específico el sistema se espera tener en funcionamiento las 8 horas que se mantiene abierta la institución restando las 5 horas de HSP previamente establecidas se obtiene que el tiempo de autonomía del sistema es de 3 horas.

Estimación del consumo

La demanda energética determina muchas de las características de la instalación, por lo que, en la planificación de las necesidades, es fundamental registrar toda la información relacionada con los distintos aparatos eléctricos que constituirán la carga del sistema. En primer lugar, es necesario calcular la energía que el usuario requerirá diariamente. Para ello, se debe identificar la potencia de cada aparato incluido en la instalación, así como el tiempo promedio de uso de cada uno. La fórmula para calcular la energía requerida se presenta en la ecuación 1 (Alexander & Sadiku, 2019).

$$Etotal = PT * t \tag{1}$$

Donde PT representa la potencia total de todos los dispositivos del sistema y t su tiempo de autonomía. El sistema se diseñará para poder mantener un ventilador de 306 W, 2 dispositivos celulares de 50W, dos computadoras portátiles de 120W y un repetidor para proporcionar conexión a internet inalámbrica de 15W, sumando una potencia total de 661 W.

$$Etotal = (306\,W + 15W + (2 * 50W) + (2 * 120W)) * 3h = 1983\ \text{Wh} \tag{2}$$

Obteniendo una energía total del sistema de 1983 Wh como se muestra en la ecuación 2.

Dimensionado del Sistema de Acumulación de Energía

Para definir el tamaño del acumulador, es necesario considerar varios parámetros clave. La profundidad de descarga máxima es el nivel máximo de descarga permitido para la batería antes de que el regulador la desconecte, con el fin de proteger su vida útil.. Finalmente, la capacidad de las baterías es la cantidad de energía que deben ser capaces de almacenar para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. La ecuación 3 presenta la fórmula para calcular este valor (Kalogirou, 2013).

$$Capacidad_{bat} = \frac{Etotal}{PD_{max} * V_{bat} * FCT} \tag{3}$$

Donde $Etotal$ es la energía calculada con la ecuación 1, $PDmax$ es la profundidad de descarga máxima del sistema, $Vbat$ el voltaje nominal de la batería y FCT el factor de corrección por temperatura con un valor de 0.77 (Skoplaki & Palyvos, 2009). El esquema de baterías seleccionado para este sistema es de un voltaje nominal de 24V, con una profundidad de descarga del 50%. Aplicando la ecuación 3 bajo estas condiciones, se obtiene que:

$$Capacidad_{bat} = \frac{1983\ W/h}{0.5 * 24V * 0.77} = 214.61\ Ah \tag{4}$$

Se implementó un arreglo de cuatro baterías de ciclo profundo marca LTH, modelo L-31T/S-190M, diseñadas para aplicaciones solares, cada una con un voltaje de 12V y una capacidad de 115 Ah (Tabla 5). Estas baterías se conectan en dos arreglos en serie para cumplir con los requisitos de voltaje nominal de 24V, los cuales se conectarán en paralelo obteniendo una energía de 230 Ah cumpliendo con los requisitos del sistema.

Tabla 5. Características eléctricas de la batería solar utilizada (LTH, 2019)

Bacteria LTH L-31T/S-190M													
Amper / Hora				**Descarga (A)**				**Capacidad de Reserva (min)**			**Energía en (kWh)**		
5 h	***10 h***	***20 h***	***100h***	***5 h***	***10 h***	***20 h***	***100h***	***25 A***	***56 A***	***75 A***	***5 h***	***20 h***	***100 h***
87	100	115	159	17.4	10	5.8	1.6	190	69	48	1.0	1.4	1.9

Dimensionado del generador fotovoltaico

Utilizando los parámetros eléctricos proporcionados por los fabricantes bajo condiciones de prueba estándar (SCT), que son más representativas de las condiciones climáticas reales del área de estudio en comparación con las condiciones de operación normal de la célula (NOCT), se procederá a calcular la potencia fotovoltaica necesaria para el arreglo. Esto se debe a que el área de estudio es una zona esteparia con un alto índice de irradiación y temperaturas elevadas. El cálculo se realizará aplicando la ecuación 5. (Aguilera et al., 2011).

$$P_{FV} = \frac{Etotal}{HSP * FCT} \tag{5}$$

$$P_{FV} = \frac{1968\ Wh}{5h * 0.77} = 515.06\ W \tag{6}$$

De acuerdo con la ecuación 6, se requiere un arreglo fotovoltaico (FV) con una producción mínima de 515.06 W para poder cargar la batería del sistema durante las Horas Sol Pico (HSP). Por lo tanto, tres módulos FV DQ250PSC, con una potencia individual de 250 W conectados en

serie, serán más que suficientes para cubrir esta demanda, proporcionando una potencia total de 750 W. Las características principales de estos módulos FV se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características eléctricas del módulo solar de silicio policristalino utilizado (SYSCOM, 2014)

Inversor Samlex America PST-1500-12				
Voltaje de Circuito Abierto (Voc)	**Corriente de corto Circuito (Isc)**	**Potencia Máxima (Pm)**	**Voltaje a Máxima Potencia (Pmax)**	**Corriente a Máxima Potencia (Pmax)**
37.3 V ($\pm$ 3%)	8.72 A ($\pm$ 3%)	250 W ($\pm$ 3%)	30.5 V ($\pm$ 3%)	8.2 A ($\pm$ 3%)

Dimensionado del Controlador de Carga

Al dimensionar un regulador, el objetivo principal es determinar la corriente máxima que circulará por la instalación. Para ello, es necesario calcular tanto la corriente generada por los módulos fotovoltaicos como la corriente consumida por la carga. El regulador debe ser capaz de soportar la mayor de estas dos corrientes durante su funcionamiento. La corriente de corte, es decir, el punto en el que el regulador debe actuar para proteger el sistema, se establecerá en el propio dispositivo. No obstante, el regulador debe estar preparado para soportar la corriente máxima que pueda producirse en la instalación, esta corriente máxima corresponde a la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico (Moreno, 2016).

$$I_{int} = Isc * NP * 1.25 \tag{7}$$

Donde Isc es la corriente de cortocircuito del módulo y Np es el número de ramas en paralelo del generador. En la expresión anterior, es recomendable incluir un factor de seguridad de 1.25 para tener en cuenta los aumentos de irradiancia que pueden ocurrir en días nublados durante breves intervalos de tiempo. La implementación de la ecuación 7 de acuerdo con el prototipo diseñado se detalla en la Ecuación 8, obteniendo una corriente máxima producida por los módulos fotovoltaicos es de 10.9 A.

$$I_{int} = 8.72A * 1 * 1.25 \ = 10.9A \tag{8}$$

La intensidad de corriente máxima que consume la carga, también denominada corriente de salida (I_{out}) se determina mediante la Ecuación 9 (Aguilera et al., 2011).

$$I_{out} = \frac{Ptotal*1.25}{V_{bat}} \tag{9}$$

Donde P_{total} es la potencia consumida por la carga y V_{bat} es la tensión nominal de la batería.

$$I_{out} = \frac{661\ W*1.25}{24V} = \ 34.42\text{A} \tag{10}$$

Para determinar la capacidad máxima de corriente que debe soportar el regulador de carga, se considera tanto la corriente máxima que pueden producir los módulos fotovoltaicos (I_{int}) como la corriente de salida consumida por la carga (I_{out}). Basado en estos valores, se selecciona el regulador de carga adecuado. En el caso del prototipo desarrollado, se utilizó la corriente de entrada calculada ($I_{out} = 34.42A$) como criterio principal para la selección del controlador, asegurándose de que el rango de voltaje del regulador abarcara el rango de voltaje del arreglo de baterías. Con estas condiciones, se optó por el controlador MPPT XTRA 4415N de la marca EPEVER, que tiene una capacidad de 40A. Las características eléctricas del controlador seleccionado se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Características eléctricas del controlador de carga EPEVER XTRA 3415N (EPEVER, 2022)

Controlador de Carga EPEVER XTRA 3415N				
Corriente de Carga Nominal	**Rango de Voltaje de la Batería**	**Voltaje nominal del Sistema**	**Rango de Voltaje del MPPT**	**Máxima Entrada de Potencia Fotovoltaica**
40 A	8 V − 68 V	12/24/36/48 VDC/Auto	Voltaje de la batería +2v - 108 V	520W/12V 1040W/24V 1560W/36V 2080W/48V

Finalmente, la potencia del controlador de carga que está definida por la Ecuación 11. Donde I_{MPPT} es la corriente nominal del MPPT, v_{bat} es el voltaje nominal del arreglo de baterías (Irwin & Nelms, 2015).

$$P_{mppt} = I_{MPPT} * v_{bat} \tag{11}$$

Al resolver la ecuación 11 se obtuvo una potencia entregada por el controlador de carga de 960 W (Ecuación 10), lo que comprueba la efectividad del sistema de control al ser esta mayor a la potencia máxima suministrada por el arreglo fotovoltaico.

$$P_{mppt} = 40A * 24V = 960\ W \quad (12)$$

Dimensionamiento del Sistema de Protección

Siguiendo la normativa vigente los interruptores de seguridad de corriente directa para sistemas fotovoltaicos deberán ser calculados como el 125% de la corriente máxima del arreglo FV, siendo en sí misma dicha corriente el 125% de la corriente de corto circuito del arreglo FV, por lo que se puede expresar la ampacidad necesaria de las protecciones como se muestra en la Ecuación 13 (SENER, 2018).

$$Ampacidad = ISC * 1.25 * 1.25 \quad (13)$$

En este caso al ser un arreglo en serie de los módulos FV la corriente de corto circuito corresponderá a la suministrada por el fabricante en su ficha técnica (Ecuación 14).

$$Ampacidad = 8.72\ A * 1.25 * 1.25 = 13.625\ A \quad (14)$$

La ampacidad necesaria para los sistemas de protección en corriente continua se calculó en 13.625 A. Sin embargo, dado que no existe una pastilla comercial con esta ampacidad exacta y siguiendo la normativa vigente, se seleccionó el siguiente valor inmediato superior disponible: una pastilla comercial de 15 A.

Selección del Inversor

En cuanto al inversor, se optó por el modelo PST-1000-24 de onda sinusoidal pura, con una potencia nominal de 1000 W y un rango de entrada de voltaje de $21.4\ Vcd - 33\ Vcd$. Este inversor cumple con los requerimientos del arreglo de baterías planteado. Sus especificaciones técnicas se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Características eléctricas del inversor **Samlex America PST-1000-24** (Samlex America, 2014)

Parámetros de Salida del Inversor Samlex America PST-1000-24						
Voltaje de Salida	**Corriente de Salida**	**Frecuencia de Salida**	**Potencia de Salida Máxima**	**Voltaje Nominal de Entrada**	**Rango de Voltaje de Entrada**	**Corriente Máxima de Entrada**
$120\ Vca$	$8.5\ A$	$60\ Hz$	$1000\ W$	$24\ Vcd$	$21.4\ Vcd - 33\ Vcd$	$80\ A$

RESULTADOS

El diseño fue exitoso, ya que la estructura soporta con holgura el peso del sistema fotovoltaico y de los ocupantes, incluso cuando todos los asientos están ocupados. Al momento de redactar este artículo, el proyecto aún no ha sido concluido debido a su complejidad y costo. No obstante, la estructura está casi terminada y los paneles solares ya han sido instalados en su lugar (Figura 08).



Figura 8. Soportes instalados en las esquinas superiores.

Las Figuras 09 y 10 muestran parte del proceso de construcción del proyecto, destacando los soportes colocados en las esquinas superiores e inferiores para aumentar la estabilidad de la estructura cuando los estudiantes se balancean en los columpios laterales. Estos soportes están fabricados con acero A36, utilizando ángulos de 1.5 pulgadas de ancho y 1/8 de pulgada de grosor.



Figura 9. Soportes instalados en las esquinas superiores.



Figura 10. Soportes instalados en las esquinas inferiores.

Por último, en la Figura 11 se muestra el soporte soldado en una de las esquinas del techo del espacio recreativo, diseñado para sostener el inversor y el controlador de carga de baterías. Al momento de redactar este artículo, solo se ha instalado el inversor y aún se analiza el mejor lugar para colocar las baterías.



Figura 11. Soporte instalado en el techo para sostener el inversor, el controlador de carga y las baterías.

CONCLUSIÓN

El diseño y construcción de un espacio recreativo con arquitectura bioclimática y un sistema fotovoltaico aislado ha demostrado ser una solución innovadora y eficiente para abordar la carencia de infraestructura recreativa adecuada en las instituciones de educación superior en el estado de Durango. Este proyecto no solo satisface las necesidades inmediatas de los estudiantes, proporcionando un espacio climatizado y con acceso a internet, sino que también fomenta la integración social y el uso de energías limpias.

La implementación de un sistema fotovoltaico de 1500 W ha permitido generar un entorno autosuficiente desde el punto de vista energético, lo cual resulta fundamental en el contexto de sostenibilidad actual. Los paneles solares y el sistema de almacenamiento garantizan que los estudiantes puedan recargar dispositivos electrónicos y acceder a servicios esenciales como ventilación e internet inalámbrico, incluso en áreas donde la infraestructura eléctrica es limitada.

Desde el punto de vista estructural, la estabilidad del espacio recreativo ha sido asegurada mediante el uso de materiales resistentes y técnicas de ingeniería avanzada, como el análisis de fuerzas en SolidWorks. Esto garantiza la durabilidad del proyecto, incluso bajo condiciones climáticas adversas, lo que refuerza su funcionalidad a largo plazo.

El impacto potencial de este tipo de tecnología va más allá del diseño recreativo. Este proyecto es un modelo replicable que puede aplicarse a otras instituciones educativas, especialmente en áreas rurales o marginadas donde el acceso a energía confiable es limitado. Además, al incorporar energías renovables en la vida diaria de los estudiantes, se fomenta la conciencia sobre el uso de tecnologías limpias, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad.

En resumen, el espacio recreativo desarrollado no solo cumple con su propósito funcional, sino que también contribuye de manera significativa al bienestar y la integración social de los estudiantes. Este enfoque innovador en el diseño de infraestructura educativa refuerza la importancia de la sostenibilidad en la formación académica, sentando un precedente para futuros proyectos en este ámbito.

REFERENCIAS

Aguilera, J., Hontoria, L., & Muñoz, F. J. (2011). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos*. Grupo Idea, Departamento de electrónica, Escuela politécnica superior, Universidad de Jaén.

Alba, M. (...) Cassio, E. (...) Rangel, L. (...) Villanueva, R. (2020). Programa de Energías Renovables del Estado de Durango. Pag.III. PERED.pdf

Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2019). *Fundamentos de circuitos eléctricos* (7ª ed.). McGraw-Hill Education.

Barranco, O. (2015). La arquitectura bioclimática. Módulo Arquitectura CUC, Vol.14 N°2 31-40. Doi: La_arquitectura_bioclimatica.pdf

Dunlop, J. P. (2012). *Photovoltaic systems* (3rd ed.). American Technical Publishers.

EPEVER. (2022). *Hoja de datos del controlador de carga solar MPPT de la serie XTRA*. Recuperado de www.epever.com

García, A., & López, M. (2021). Evaluación del potencial solar en Durango: Un enfoque sostenible. Revista Mexicana de Energías Renovables, 15(2), 45-58.

Gómez, R. (2024). Energía solar: La clave para un futuro sostenible. Editorial Solar.

Indiana. (2024). *Alambres y cables tipo THW-LS/THHW-LS deslizable* [Ficha técnica]. Euroeléctrica. Recuperado de https://euroelectrica.com.mx/descargas/FICHA-TECNICA-THW-INDIANA.PDF

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Estadísticas de educación en Durango. INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Estadísticas de vivienda y electrificación en Durango. INEGI.

Irwin, J. D., & Nelms, R. M. (2015). *Basic Engineering Circuit Analysis* (12th ed.). Wiley.

Ithaca, J. (2019). Potencial de energías renovables en Durango. Revista de Energías Renovables, 12(3), 34-47.

Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2nd ed.). Academic Press.

López Villa, B. T., Meraz Becerra, F., & Ponce Sandoval, L. Y. (2024). Estimación del recurso eólico en la Reserva de la Biósfera de Mapimí utilizando tres métodos para la aproximación de la velocidad del viento promedio a distintas alturas. Universidad Tecnológica de La Laguna Durango.

LTH. (2019). *Especificaciones técnicas batería L-31T/S-190M*. LTH. Recuperado de: https://www.lth.com.mx/productos/especificaciones-t%C3%A9cnicas/171028.

Luna, P., & Rivera, J. (2022). Infraestructura educativa en Durango: Un análisis de necesidades. Editorial Universitaria.

Mendoza, R., Pacheco, L., & Sánchez, E. (2021). Infraestructura recreativa y su impacto en el bienestar estudiantil. Universidad Nacional Autónoma de México.

Moreno Martín, A. (2016). *Dimensionado de una instalación fotovoltaica para una vivienda rural aislada* [Trabajo de fin de grado, Universidad Carlos III de Madrid]. Repositorio de la Universidad Carlos III de Madrid.

Mukerjee, A. K., & Thakur, N. (2011). *Photovoltaic Systems: Analysis and Design*. PHI Learning Pvt. Ltd.

NASA. (2024.). *Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)*. NASA Langley Research Center. https://power.larc.nasa.gov/

Pacheco, L., & Sánchez, E. (2020). Arquitectura bioclimática en zonas áridas de México. Revista de Arquitectura Sustentable, 18(1), 23-36.

Rodríguez, C., & Fernández, L. (2023). Energías renovables y educación: Un enfoque práctico en la implementación de tecnologías limpias. Universidad Tecnológica de México.

Samlex America. (2014). *Inversor CD-CA de Onda Sinusoidal Pura: Modelos PST-1500-12 y PST-1500-24 - Hoja de Datos*. Recuperado de www.samlexamerica.com

Secretaría de Energía (SENER). (2018). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2018, Instalaciones Eléctricas, Capítulo 690, Sistemas Solares Fotovoltaicos* (pp. 825-841).

Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*. Solar Energy, 83(5), 614-624.

Style, O. (2012). *Energía Solar Autónoma: Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. Oliver Style.

Tamex. (2024). *Caja rectangular 3 entradas de aluminio para uso intemperie de 1/2" Eaton*. Tamex. Recuperado de https://tamex.mx/producto/caja-rectangular-3-entradas-de-aluminio-para-uso-intemperie-de-1-2-eaton/?srsltid=AfmBOoqxnnm9a7_frWDn4mhY-nJCtCnNA9N4Wo4METXO0rTuevJ81ila

Energía y Sociedad/ Energía Eólica/ Energía y Género

ID	TÍTULO	PONENTE
16075	Estimación del recurso eólico en la reserva de la Biósfera de Mapimí utilizando tres métodos para la aproximación de la velocidad del viento promedio a distintas alturas	Fernando Meraz Becerra
16102	Inclusión de Criterios Sociotécnicos en la Medición de Resiliencia Energética	Tiare Robles Bonilla
16133	Análisis de la demanda del Sistema Energético Nacional y las propuestas Gubernamentales de la Transición Energética Soberana	Alan Juan de la Rosa Albino

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA DE MAPIMÍ UTILIZANDO TRES MÉTODOS PARA LA APROXIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO A DISTINTAS ALTURAS

Fernando Meraz Becerra, Jesús M. Carrillo Martínez
Departamento de Energías Renovables, Universidad Tecnológica de La Laguna Durango,
Carretera Federal Torreón - Ciudad Juárez, Ejido Las Cuevas, Durango, C.P. 35185, México,
8713362979, fernando.meraz@utlaguna.edu.mx

RESUMEN

La Reserva de la Biósfera Mapimí, situada en el desierto chihuahuense y abarcando partes de los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango en México, enfrenta desafíos energéticos debido a sus condiciones ambientales extremas y ubicación remota, lo que impide su interconexión con el sistema eléctrico nacional. La sede de la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP) requiere un sistema de generación eléctrica aislado para el monitoreo y resguardo de la flora y fauna de la reserva. El objetivo del presente estudio es evaluar la factibilidad técnica y económica de instalar un aerogenerador de baja potencia en la Reserva de la Biósfera Mapimí mediante la estimación del recurso eólico de la región, minimizando el impacto ecológico en comparación con un sistema solar fotovoltaico. En 2023, se realizó un estudio del recurso eólico utilizando datos de 2022 de la Estación Meteorológica Automática del ejido La Flor, operada por la Comisión Nacional del Agua, ubicada a las afueras de la reserva (Latitud: 26.55, Longitud: -103.99). Se analizaron las velocidades del viento promedio a diversas alturas para determinar la viabilidad de la instalación de aerogeneradores de baja potencia. La velocidad del viento promedio a 10 m de altura fue de 3.1 m/s, insuficiente para justificar técnicamente la instalación de un aerogenerador. Sin embargo, al estimar velocidades promedio a mayores alturas, se obtuvieron resultados prometedores: 3.6 m/s a 20 m, 3.9 m/s a 30 m, 4.1 m/s a 40 m y 4.3 m/s a 50 m. Se concluye que la instalación de aerogeneradores de baja potencia es técnicamente viable a partir de los 30 m de altura. Además, la factibilidad económica es favorable debido a la orografía irregular de la región, que permite utilizar sitios elevados cercanos a las oficinas de la CONANP sin necesidad de construir grandes torres para que los aerogeneradores alcancen la altura necesaria.

ABSTRACT

The Mapimí Biosphere Reserve, located in the Chihuahuan Desert and spanning parts of the Mexican states of Chihuahua, Coahuila, and Durango, faces energy challenges due to its extreme environmental conditions and remote location, which prevent its connection to the national electrical grid. The headquarters of the Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP) requires an isolated power generation system to monitor and protect the reserve's flora and fauna. The aim of this study is to evaluate the technical and economic feasibility of installing a low-power wind turbine in the Mapimí Biosphere Reserve by estimating the region's wind resource, minimizing the ecological impact compared to a solar photovoltaic system. In 2023, a wind resource study was conducted using data from 2022 from the La Flor ejido Automatic Weather Station, operated by the National Water Commission, located outside the reserve (Latitude: 26.55, Longitude: -103.99). Average wind speeds at various heights were analyzed to determine the feasibility of installing low-power wind turbines. The average wind speed at 10 meters was 3.1 m/s, insufficient to technically justify the installation of a wind turbine. However, when estimating average speeds at higher altitudes, promising results were obtained: 3.6 m/s at 20 meters, 3.9 m/s at 30 meters, 4.1 m/s at 40 meters, and 4.3 m/s at 50 meters. It is concluded that the installation of low-power wind turbines is technically feasible from 30 meters in height. Furthermore, economic feasibility is favorable due to the region's irregular topography, which allows the use of elevated sites near the CONANP offices without the need to build large towers for the wind turbines to reach the required height.

Palabras claves: Energía Eólica, Recurso Eólico, Asentamiento Eólico, CONANP, Biósfera de Mapimí.

INTRODUCCIÓN

La Reserva de la Biósfera de Mapimí es una zona protegida que se extiende por los estados de Durango, Coahuila de Zaragoza, y Chihuahua en México, cubriendo una superficie de aproximadamente 340,000 hectáreas con un clima desértico característico del desierto chihuahuense (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2023). Esta área es de vital importancia para la conservación de la biodiversidad debido a su diversidad de ecosistemas y especies endémicas. La reserva alberga más de 400 especies de plantas, principalmente distribuidas en dos tipos de vegetación: el matorral xerófilo, compuesto por especies como gobernadora, mezquite, nopal rastrero y huizache, y el pastizal halófilo, con especies como el zacate de agua y el pasto sabaneta.

En términos de fauna, la reserva es hogar de aproximadamente 450 especies, incluyendo 5 especies de anfibios, 18 de lagartijas, alrededor de 400 de aves, 13 de roedores, 2 de lagomorfos, 2 de felinos, y 2 de ungulados. Entre las especies en peligro de extinción que habitan esta área se encuentran el berrendo, la tortuga del bolsón de Mapimí y la zorrita del desierto, todas ellas bajo constante vigilancia debido a las amenazas ambientales y humanas (INECOL, 2023).

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) es la entidad encargada de resguardar este invaluable patrimonio natural, enfrentándose a desafíos como la explotación minera, la urbanización descontrolada, el deterioro ambiental, el ecoturismo irresponsable y la caza furtiva. Para llevar a cabo sus funciones de monitoreo y gestión, la CONANP mantiene un sitio en la reserva compuesto por oficinas y un albergue para investigadores y visitantes. Sin embargo, estas instalaciones no están conectadas al sistema eléctrico nacional debido a su difícil acceso, situado a 20 km de Ceballos, Durango, la comunidad más cercana.

Para superar esta limitación energética, la CONANP está desarrollando una propuesta para instalar un sistema aislado de generación de energía eléctrica que aproveche el recurso eólico de la región. La presencia de numerosos molinos de viento utilizados para la extracción de agua subterránea sugiere un potencial significativo para la generación de energía eólica. Sin embargo, es imprescindible llevar a cabo un estudio detallado del recurso eólico que determine la densidad energética promedio del viento en la región, así como la dirección predominante del mismo, para descartar la presencia de turbulencias que podrían dificultar la instalación de aerogeneradores de eje horizontal.

Para este análisis, se han considerado datos recientes proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), que aportan información valiosa sobre las condiciones climáticas locales y las tendencias de viento (CONAGUA, 2023; INECC, 2023). Además, se ha consultado la literatura especializada y estudios previos realizados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) sobre el potencial de la energía eólica en regiones áridas (IRENA, 2023).

Este artículo presenta el desarrollo y los resultados del estudio mencionado, que no solo busca establecer la viabilidad técnica y económica de la energía eólica en la reserva, sino también contribuir a una gestión ambiental más sostenible, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y minimizando el impacto ecológico comparado con otras fuentes de energía renovable. El resto del artículo se organiza como sigue: en la sección II, se abordan las dos metodologías exactas utilizadas para calcular la densidad de energía media del viento (DEMV), en la sección III se describen tres métodos para estimar la velocidad del viento a distintas alturas, la sección IV aborda los resultados obtenidos del análisis del recurso eólico en la Reserva de la Biosfera de Mapimí a distintas alturas, finalmente el trabajo concluye en la sección V.

METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO A DISTINTAS ALTURAS

El potencial energético del viento puede estimarse mediante métodos empíricos precisos o a través de métodos numéricos que aproximan los parámetros de interés en una región específica. Los métodos empíricos requieren analizar las velocidades del viento registradas al menos cada 10 minutos durante un período mínimo de un año, lo cual permite calcular la densidad de energía promedio anual del viento. Esta información, junto con la gráfica de la dirección del viento, permite determinar el potencial eólico de la zona. Por otro lado, los métodos numéricos utilizan funciones de densidad de probabilidad (FDP), como la distribución de Weibull, para modelar el comportamiento del viento y, a partir de ello, estimar el potencial eólico de la región. En el presente artículo, el recurso eólico de la Reserva de la Biósfera de Mapimí se calculará utilizando dos métodos empíricos: la densidad de energía media extraída del viento a través de la raíz de la velocidad cúbica media y la integración de la curva de potencia instantánea.

Densidad de Energía Media Extraída del Viento Obtenida a Través de la Raíz de la Velocidad Cúbica Media (DEM_VRMC)

La DEM_VRMC mide el potencial energético del viento en una ubicación específica mediante la media cúbica de las velocidades del viento registradas. Este método es más preciso que un promedio simple, ya que la energía eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Se utiliza en estudios de viabilidad para aerogeneradores porque proporciona una mejor estimación de la energía disponible, crucial para evaluar el potencial eólico de un sitio.

Potencia instantánea de la corriente de aire libre. La potencia instantánea del viento aprovechada por un aerogenerador calcula la energía que puede extraer una turbina en un momento dado, basada en la diferencia de velocidades del viento antes y después de interactuar con las palas del rotor. Esta medida es fundamental para evaluar la eficiencia y capacidad de generación de los aerogeneradores, ayudando en el diseño y optimización de sistemas de energía eólica. La energía cinética (Ec) en el aire de masa m, que se mueve con velocidad V, es (Patel, 2006):

$$Ec = \frac{1}{2}\, m\, V^2 \tag{1}$$

La potencia disponible en una corriente de aire libre es el flujo de energía cinética por unidad de tiempo a través del área de la sección transversal de la pala del rotor del aerogenerador (Patel, 2006):

$$P = \frac{EC}{t} = \frac{1}{2}\frac{m}{t}\, v^2 = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2}\rho\, A\, v^3 \tag{2}$$

Donde P es la potencia mecánica instantánea del viento en movimiento (w), M es el caudal másico (Kg/s), ρ es la densidad del aire ($Kg/m\text{^}3$), $A = \pi r^2$ es el área de barrido por las palas del rotor (m^2), t es el tiempo (s) y v es la velocidad del aire ($\frac{m}{s}$).

Potencia Instantánea en el Viento Aprovechada por un Aerogenerador. La potencia instantánea extraída por las palas del rotor de un aerogenerador se obtiene de la diferencia entre el viento entrante v y el viento saliente vo (Wais, 2017):

$$P = \frac{1}{2} M(v^2 - vo^2) \tag{3}$$

Macroscópicamente, la velocidad del viento es discontinua desde v a vo en el plano de los álabes del rotor, con un promedio aproximado de $\frac{v+vo}{2}$, por lo tanto:

$$M = \rho\, A \left(\frac{v+vo}{2}\right) \tag{4}$$

La potencia mecánica instantánea extraída por el rotor que acciona el generador eléctrico se calcula a partir de las ecuaciones (5) y (6):

$$P = \frac{1}{2}\rho A \frac{\left[\frac{1}{2}(v+vo)\right]}{[(v^2 - vo^2)^{-1}]} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \left[\frac{\left(1+\frac{vo}{v}\right)\left[1-\left(\frac{vo}{v}\right)^2\right]}{2}\right] \tag{5}$$

$$P = \frac{1}{2}\rho\, A\, V^3 Cp \tag{6}$$

Donde Cp es el coeficiente de potencia y representa la fracción de la potencia del viento entrante que es extraída por las palas del rotor (Wais, 2017). En este artículo se asumió un valor para Cp de 0.47, que es típico para turbinas eólicas comerciales (THE WIND POWER, 2023).

Raíz de la Velocidad Cúbica Media. La velocidad del viento mensual varía alrededor de $\pm$ 30% a $\pm$35% por encima de la velocidad media del viento en un lugar típico durante el año (Patel, 2006). Por lo tanto, la velocidad del viento utilizada para determinar la densidad de potencia en (6) debería ser (Pishgar-Komleh et al., 2014):

$$V_{rmc} = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} vi^3\right)^{\frac{1}{3}} \tag{7}$$

Finalmente, se obtendrá la densidad de energía media extraída del viento (DEMV) en un periodo que dependerá de la cantidad y frecuencia con la que se hayan registrado las velocidades del viento (Patel, 2006):

$$\text{DEMV} = \frac{1}{2}\rho\, {V_{rmc}}^3 Cp \tag{8}$$

Densidad de Energía Media Extraída del Viento Obtenida mediante la Integración de la Curva de Potencia Instantánea (DEM_IPI)

1. Se calcula la densidad de potencia instantánea en el viento ($DPIi$) a partir de cada una de las 52560 velocidades de viento registradas por la estación meteorológica automática (EMA) cada 10 minutos durante al menos un año en la región de interés, como se expresa en la ecuación (9), donde v_i es la i-ésima velocidad del viento registrada en la región.

$$DPI_i = \frac{1}{2}\rho\, {v_i}^3 Cp \tag{9}$$

2. Se genera la curva de densidad de potencia instantánea anual de la región de interés.

3. Se integra numéricamente respecto al tiempo la curva de potencia instantánea para obtener la densidad de energía del viento total del año (DEVT):

$$DEVT = 10\left(\frac{1}{2}DPI_1 + \sum_{i=2}^{n-1} DPI_i + \frac{1}{2}DPI_n\right)T \tag{10}$$

4. Finalmente, dividiendo la DEVT entre el factor correspondiente, se obtiene la DEMV en un período determinado. En la ecuación 11 se determina la DEVT por hora a partir de una muestra de datos registrada cada minuto durante un año.

$$\text{DEMV}=DEVT\left[\frac{W*min}{m^2}\right]\left[\frac{1\ hora}{60\ min}\right]=\frac{DEVT}{60}\left[\frac{w*h}{m^2}\right] \tag{11}$$

METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO A DISTINTAS ALTURAS

Método de Monin–Obukhov (MMO)

La ecuación 12 es válida para lecturas de la velocidad del viento registradas en periodos cortos de tiempo y no para promedios mensuales o anuales (Bañuelos et al., 2010).

$$V(h) = \frac{Vf}{K}\left[\ln\left(\frac{h}{Zo}\right) - \xi\left(\frac{h}{L}\right)\right] \tag{12}$$

Donde $V(h)$ es la velocidad extrapolada a la altura h, Vf es la velocidad de fricción, K es la constante de Von-Karman, con un valor típico de 0.4 (Bañuelos-Ruedas et al., 2010) y Zo es la longitud de rugosidad de la superficie. La función de corrección de estabilidad $\xi(h/L)$ es determinada por la radiación solar de la región, donde L es el factor de escala conocido como la longitud de Monin–Obukhov. La velocidad de fricción se determina a partir de la ecuación (13):

$$Vf = \frac{Vo}{K*\ln\left(\frac{h}{Zo}\right)} \tag{13}$$

Para condiciones ligeramente inestables, una forma común de aproximar $\xi(h/L)$ es:

$$\xi\left(\frac{h}{L}\right) = 2\ln\left(\frac{1+X}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+X^2}{2}\right) - 2\tan^{-1}(X) + \frac{\pi}{2} \tag{14}$$

Donde:

$$X = \left(1 - 16 * \frac{h}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{15}$$

Debido a la complejidad de esta función, usualmente se simplifica para valores cercanos a 0 de la siguiente forma (Stull, 1988):

$$\xi\left(\frac{h}{L}\right) = -2 * \frac{h}{L} \tag{16}$$

Ley exponencial de Hellmann (LEH)

Método ampliamente usado dentro de la literatura para determinar el perfil eólico de diversas regiones a nivel mundial, debido a su simplicidad (Allouhi et al., 2017).

$$V(h) = Vh0\left(\frac{h}{h0}\right)^{\alpha} \tag{17}$$

Donde $V(h)$ es la velocidad extrapolada a la altura h, $Vh0$ es la velocidad medida a la altura $h0$ y α es el coeficiente de fricción. El valor del coeficiente de fricción depende de diversos factores como la naturaleza del terreno (rugosidad de la superficie), velocidades del viento y la temperatura. Para condiciones neutrales, el valor de α puede ser supuesto como 1/7, con lo que se extrapolara la velocidad del viento con una precisión aceptable (Allouhi et al., 2017; Kamau et al., 2010). De manera alternativa, en la literatura se sugieren valores aproximados de α para distintos tipos de terreno, en la Tabla 1 se muestran los más comunes (Patel, 2006; Masters, 2013). Entre más grande sea el valor del coeficiente α, mayor será el aumento de la velocidad del viento conforme aumente la altura de extrapolación (Masters, 2013).

Tabla 1. Coeficiente de Fricción de Diversos Terrenos (Patel, 2006; Masters, 2013)

Tipo de terreno	Coeficiente de fricción α
Lagos, océanos y terreno liso y/o duro.	0.10
Hierba a la altura del pie en suelo plano.	0.15
Cultivos altos, setos y arbustos.	0.20
Paisaje arbolado con muchos árboles.	0.25
Pequeña ciudad con árboles y arbustos.	0.30
Zona urbana con edificios altos.	0.40

Ley del perfil eólico logarítmico (LPEL)

Fórmula alternativa para extrapolar la velocidad del viento a distintas alturas, que, aunque implica la obtención de un segundo parámetro, cuenta con un fundamento aerodinámico (Okorie, 2017).

$$V(h) = Vh0\frac{\ln\left(\frac{h}{Zo}\right)}{\ln\left(\frac{ho}{Zo}\right)} \tag{18}$$

Donde Zo es el coeficiente de longitud de rugosidad, medido en m y dependiente del tipo de terreno, espaciamiento y altura del factor de rugosidad (Bañuelos et al., 2010; Masters, 2013; Okorie, 2017). En la Tabla 2 se exponen los valores de Zo para regiones con características comunes (Wieringa, 2001).

Tabla 2. Clases y longitudes de rugosidad (Masters, 2013; Wieringa, 2001)

Clase	Descripción	Zo (m)
0	Superficie del agua.	0.0002
0.5	Terreno completamente abierto con una superficie lisa (pistas de concreto de los aeropuertos y hierba cortada)	0.0024
1	Área agrícola abierta sin cercas y setos, y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas.	0.03
1.5	Terrenos agrícolas con algunas casas y setos de 8 m de altura a una distancia aproximada de 1250 m.	0.055
2	Terrenos agrícolas con algunas casas y setos de 8 m de altura a una distancia aproximada de 500 m.	0.1
2.5	Terrenos agrícolas con muchas casas, arbustos y plantas, o setos frondosos de 8 m de altura a una distancia aproximada de 250 m.	0.2
3	Pueblos, ciudades pequeñas o tierras agrícolas con muchos o altos setos frondosos, bosques y terrenos muy accidentados.	0.4
3.5	Grandes ciudades con edificios altos.	0.8
4	Centros urbanos muy grandes con edificios altos y rascacielos.	1.6

Método Exacto

Los valores propuestos para α y Zo en las Tablas 1 y 2, solo son válidos para estudios de recurso eólico teóricos y no deben de ser utilizados para determinar la DEMV para aplicaciones comerciales. Si se requiere realizar un estudio de perfil eólico preciso, los coeficientes α y Zo deben ser determinados a partir de dos mediciones de la velocidad del viento registradas a distintas alturas. A continuación, se describe la metodología a seguir:

1. A partir de las velocidades del viento $Vh0$ y Vh registradas a la altura $h0$ y h, respectivamente, se determinada el coeficiente de fricción $\propto$ (Okorie, 2017):

$$\propto = \frac{\ln\left(\frac{Vh}{Vho}\right)}{\ln\left(\frac{h}{ho}\right)} \tag{19}$$

2. A partir de $\propto$ y las alturas $h0$ y h, se determina el coeficiente de longitud de rugosidad Zo (Bañuelos, 2010):

$$Zo = \exp\left(\frac{ho^{\propto} ln(h) - h^{\propto} ln(ho)}{ho^{\propto} - h^{\propto}}\right) \tag{20}$$

Las mediciones de la velocidad del viento para un estudio de recurso eólico se suelen registrar cada diez minutos durante al menos un año. Por lo tanto, el procedimiento anteriormente mencionado puede ser implementado de dos maneras:

- Los coeficientes α y Zo pueden ser determinados a partir de las velocidades promedio de los datos recolectados a las dos alturas disponibles.
- Coeficientes α_i y Zo_i pueden ser determinados para cada i-esimo par de velocidades de los dos conjuntos de datos registrados a las dos alturas $h0$ y h. Por último, α y Zo son determinados a partir del promedio de todos los α_i y Zo_i calculados, respectivamente.

De las dos maneras de implementar las fórmulas 19 y 20, la segunda es mejor, debido a que el cálculo de α y Zo toma en cuenta el valor que presentaron estos coeficientes en las condiciones particulares en que se registró cada dato. Lo que es importante, ya que el valor de α y Zo cambia con el tiempo de acuerdo con las estaciones del año, la hora del día, la dirección y las condiciones climatológicas particulares del momento. Sin embargo, este método requiere que: los dos conjuntos de velocidades tengan el mismo número de datos, sean registradas al mismo tiempo y de forma ininterrumpida. Debido a que, si la diferencia de dos velocidades correspondientes a un mismo tiempo tiende a 0, α_i y Zo_i tenderán a cero e infinito, respectivamente, lo que provocará notables errores en el valor de α y Zo. Por lo anterior, este método se debe implementar cuando: los datos sean registrados a alturas con una diferencia notable ($\geq 20\ m$) o el valor de la velocidad media aumente considerablemente de una altura a otra ($\geq\ 0.5\ m/s$).

RESULTADOS

Región Analizada

El estudio se realizó a partir de los datos registrados cada 10 minutos durante el año 2022 por la Estación Meteorológica Automática (EMA) del ejido La Flor a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ubicada a las afueras de la Reserva de la Biósfera de Mapimí (Latitud: 26.55, Longitud: -103.99).

Comportamiento del Viento a 10 Metros de Altura

En el estudio realizado en la misma región durante el año 2023, se analizó el comportamiento del viento y su dirección, donde las velocidades de 2 m/s y 3 m/s presentaron la mayor frecuencia con un 27.5% y 27% del total registrado en 2022, lo cual es coherente con el hecho de que la velocidad promedio anual es de 3.1 m/s a 10 m de altura (Meraz, 2023). En la Figura 1 se muestra el porcentaje de ocurrencia de cada velocidad del viento registrada. En cuanto a la dirección del viento se encontró que las velocidades de 2 a 5 m/s (que son las de mayor frecuencia de ocurrencia) fluyen desde el noroeste, el sur oeste y el sur este, al igual que las velocidades de viento de 0.5 a 2 m/s y de 5 a 8 m/s (Figura 2).

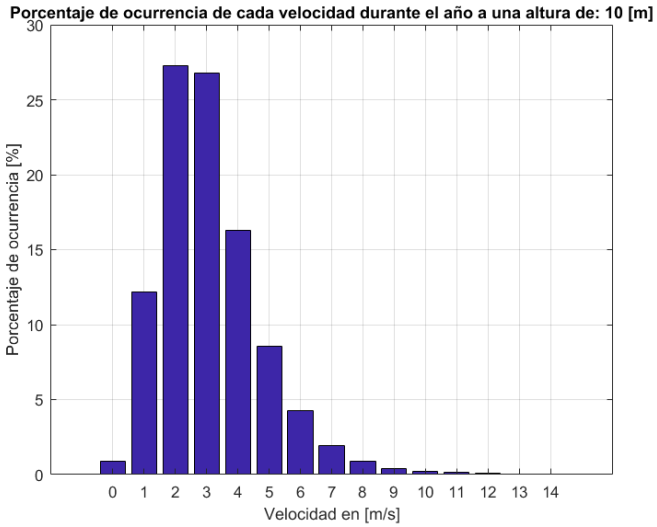


Figura 1. Porcentaje de ocurrencia anual de cada velocidad del viento (Meraz, 2023).

Debido a la dirección del viento se descarta la posibilidad de implementar aerogeneradores de media y alta potencia cuyas velocidades del viento de arranque y nominal típicas suelen ser de 3 m/s y 12 m/s, respectivamente, así mismo, aunque es técnicamente factible la instalación de un aerogenerador de baja potencia su generación sería deficiente ya que la velocidad promedio del viento anual es de 3.1 m/s y presenta importantes cambios de dirección.

DEMV a 10 Metros de Altura. De acuerdo con la Tabla 3, la DEM en la región de estudio a 10 m de altura obtenida a través de los métodos DEM_IPI y DEM_VRMC fue de 148.2 y 141.6 kWh, respectivamente, esta diferencia de 4.48% comprueba que ambos métodos fueron implementados correctamente. La diferencia entre un método y otro se debe a que la velocidad del viento promedio mensual entre algunos meses presenta una variación fuera del rango de $\pm$ 30% y $\pm$35% por encima de la velocidad media del viento asumida al calcular la V_{rmc}. Así mismo, es importante mencionar que existieron breves periodos de tiempo en que la EMA no registró la velocidad del viento y se asumió como 0 m/s.

Tabla 3. Valor de DEM obtenida por dos métodos exactos a 10 m de altura.

MÉTODO	RESULTADO [kWh/m^2]	ERROR [%]
DEM_IPI	148.2671	-
DEM_VRMC	141.6317	4.48

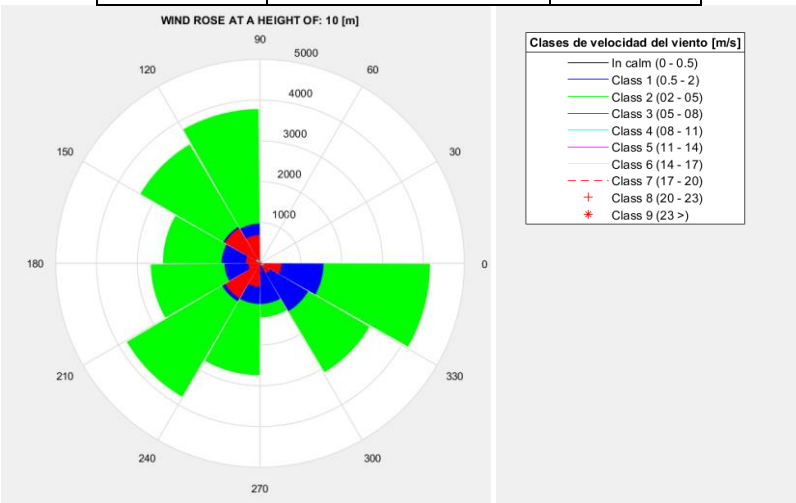


Figura 2. Rosa de los vientos del ejido La Flor a las afueras de la Biósfera de Mapimí (Meraz, 2023).

Estimación del Comportamiento del Viento y la DEMV a Distintas Alturas Mediante la Ley Exponencial de Hellmann

Para realizar la estimación de la velocidad del viento a distintas alturas a partir de la ley exponencial de Hellmann, fue necesario realizar un análisis de la flora de La Reserva de La Biósfera de Mapimí para determinar la altura de los posibles obstáculos para la circulación del viento.

En términos generales, la vegetación de la región varía en altura dependiendo de la especie. Las plantas como el nopal y la gobernadora suelen estar en el rango de 1.5 a 3 m, mientras que otras especies, como los agaves y ciertas cactáceas, son más bajas y no superan el m de altura. El ocotillo es una de las excepciones, alcanzando alturas mayores, hasta unos 6 m en algunos casos (Valiente et. al, 1991).

Basado en lo descrito anteriormente y conforme a los datos presentados en la Tabla 1, se seleccionó un coeficiente de fricción ($\propto$) de 0.2. La Figura 3 ilustra la variación de la velocidad promedio del viento en función del incremento en altura, desde los 10 m hasta los 200 m. De manera similar, la Figura 4 presenta la variación de la velocidad cúbica media del viento, utilizada para calcular la DEMV_VRMC, conforme aumenta la altura en el mismo rango. La Figura 5 muestra el incremento de la DEMV calculada mediante el método exacto, basado en la integración de la curva de potencia instantánea, con respecto al aumento en altura.

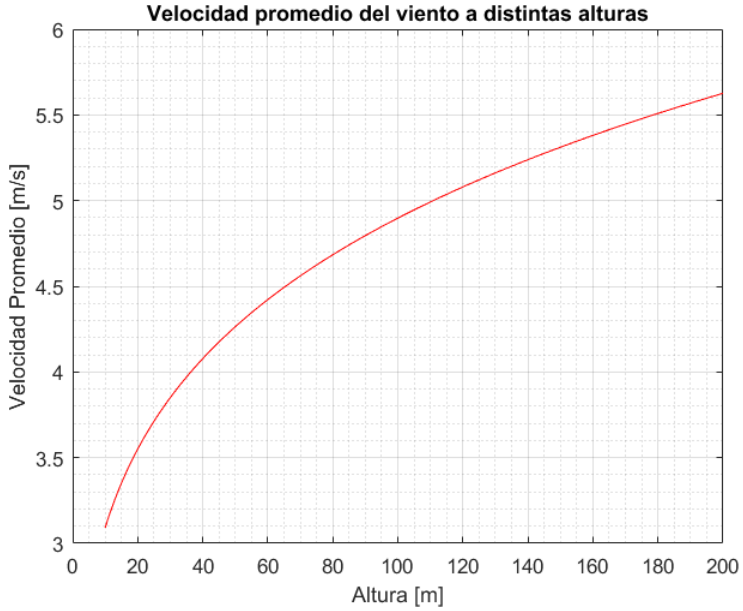


Figura 3. Velocidad promedio del viento a distintas alturas estimada mediante la ley exponencial de Hellmann.

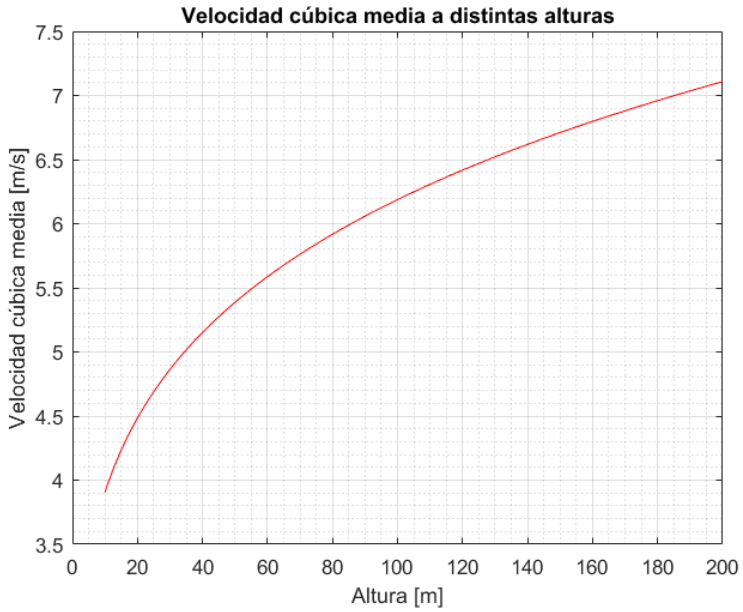


Figura 4. Velocidad cúbica media a distintas alturas estimada mediante la ley exponencial de Hellmann.

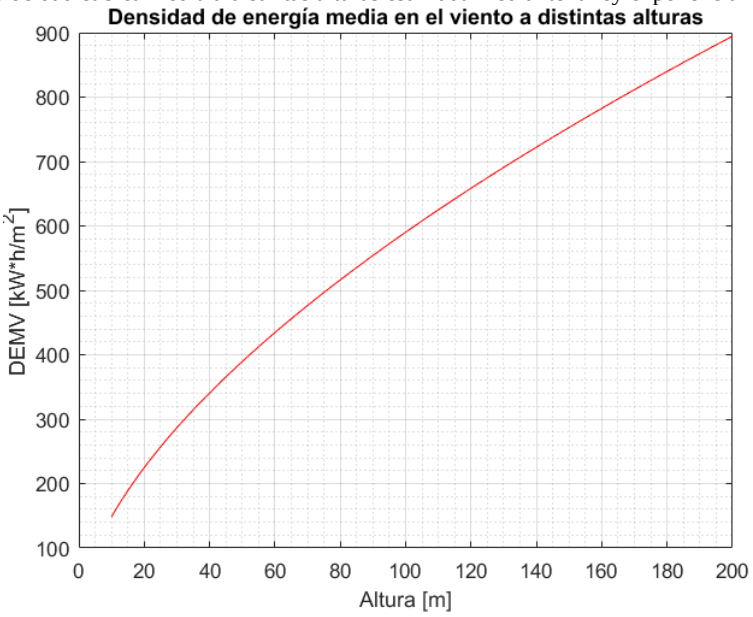


Figura 5. DEMV a distintas alturas estimada mediante la ley exponencial de Hellmann.

La Tabla 4 sintetiza el comportamiento del viento a diferentes alturas, estimado mediante la implementación de la ley exponencial de Hellmann. A 20 m, la velocidad promedio del viento alcanza 3.6 m/s; a 30 m, 3.9 m/s; a 40 m, 4.1 m/s; y a 50 m, 4.3 m/s. Esto sugiere que, a partir de los 30 m de altura, es técnicamente viable la instalación de un aerogenerador de baja potencia, con una DEMV_IPI estimada de 287 kWh/m^2 a esta altura.

Tabla 4. Valores de la velocidad promedio del viento, Vrmc y DEM estimados a alturas adecuadas para la instalación de aerogeneradores de baja potencia, según la Ley exponencial de Hellmann.

ALTURA [m]	Velocidad Promedio [m/s]	VRMC [m/s]	DEM_IPI [kWh / m^2]	DEM_VRMC [kWh / m^2]
20	3.55	4.48	224.7308	214.6736
30	3.85	4.86	286.6272	273.7999
40	4.08	5.15	340.6283	325.3843
50	4.26	5.39	389.4276	371.9997
60	4.42	5.59	434.4456	415.0031

Estimación del Comportamiento del Viento y la DEMV a Distintas Alturas Mediante la Ley del Perfil Eólico Logarítmico

De acuerdo con las características de la flora mencionadas en la sección anterior, se seleccionó un coeficiente de longitud de rugosidad (Zo) de 0.1, correspondiente a la clase 2, que abarca terrenos agrícolas con algunas casas y setos de 8 m de altura, a una distancia aproximada de 500 m. Es importante mencionar que este método presentó resultados similares a los del método basado en la LEH, lo que corrobora la veracidad de ambos métodos, al menos en aplicaciones de baja potencia. Las Figuras 6, 7 y 8 muestran la variación de la velocidad promedio del viento, la velocidad cúbica media del viento y la DEMV_IPI en función del incremento de altura desde los 10 m hasta los 200 m, calculados mediante la LPEL, respectivamente.

La Tabla 5 sintetiza los valores de la velocidad promedio del viento, Vrmc y DEM estimados a alturas adecuadas para la instalación de aerogeneradores de baja potencia, mediante la ley del perfil eólico logarítmico. A 20 m, la velocidad promedio del viento alcanza 3.6 m/s; a 30 m, 3.8 m/s; a 40 m, 4 m/s; y a 50 m, 4.2 m/s. Esto sugiere que, a partir de los 30 m de altura, es técnicamente viable la instalación de un aerogenerador de baja potencia, con una DEMV_IPI estimada de 282 kWh/m^2 a esta altura.

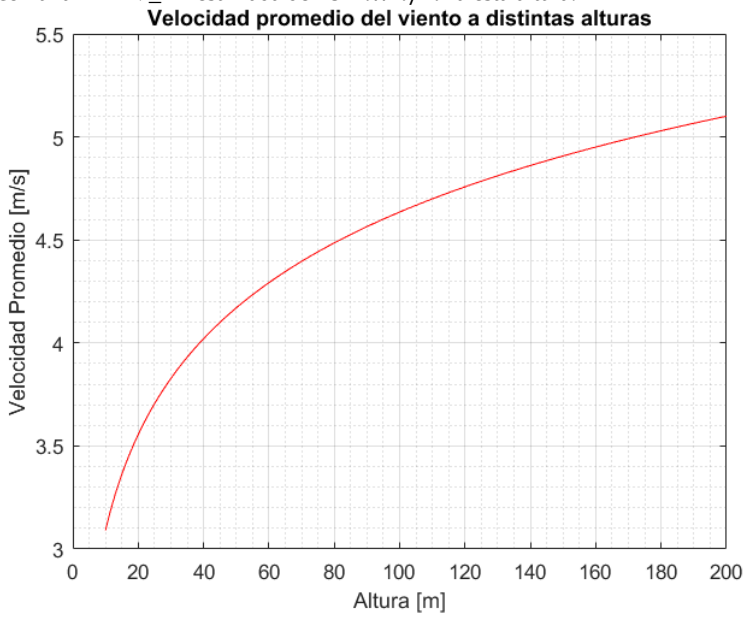


Figura 6. Velocidad promedio del viento a distintas alturas estimada mediante la ley del perfil eólico logarítmico.

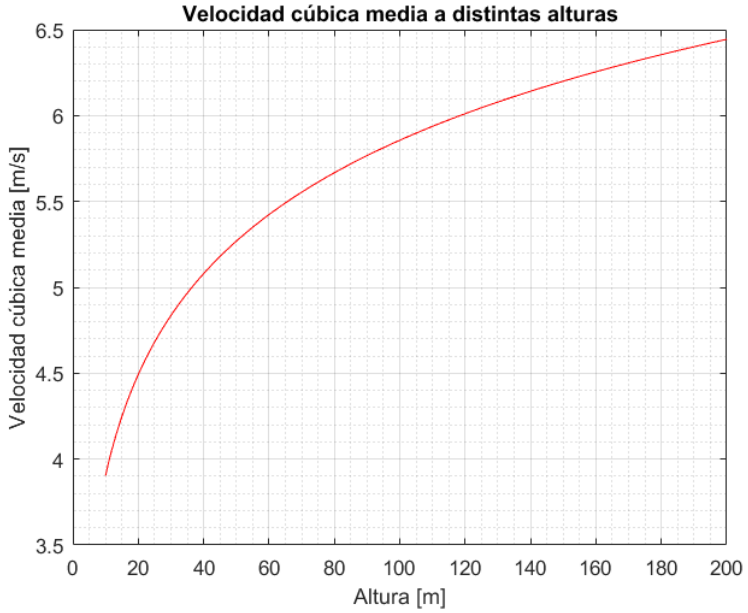


Figura 7. Velocidad cúbica media a distintas alturas estimada mediante la ley del perfil eólico logarítmico.

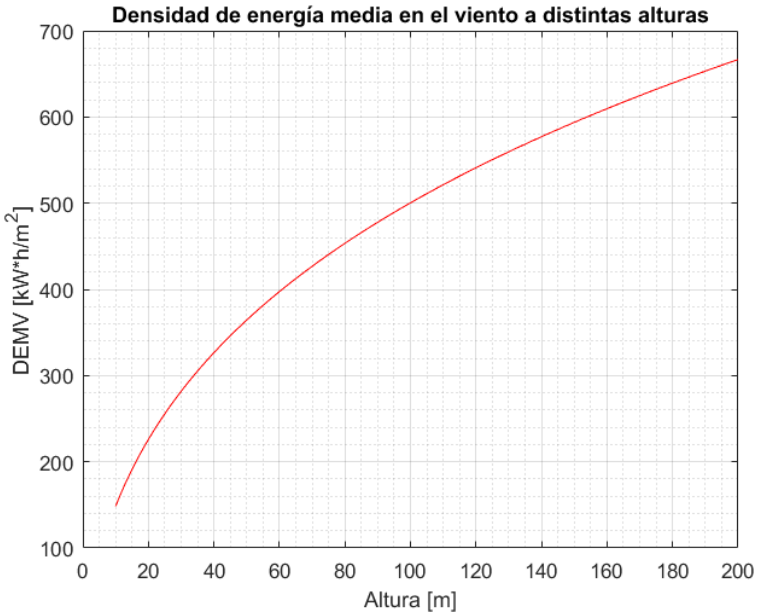


Figura 8. DEMV a distintas alturas estimada mediante la ley del perfil eólico logarítmico.

Tabla 5. Valores de la velocidad promedio del viento, Vrmc y DEM estimados a alturas adecuadas para la instalación de aerogeneradores de baja potencia, según la ley del perfil eólico logarítmico.

ALTURA [m]	Velocidad Promedio [m/s]	VRMC [m/s]	DEM_IPI [kWh / m^2]	DEM_VRMC [kWh / m^2]
20	3.56	4.49	225.7987	215.6937
30	3.83	4.84	281.7063	269.0992
40	4.02	5.08	326.5176	311.9051
50	4.17	5.27	364.3752	348.0685
60	4.29	5.42	397.395	379.6105

Estimación del Comportamiento del Viento y la DEMV a Distintas Alturas Mediante el Método de Monin–Obukhov

Para la implementación de este método se eligió de nuevo un valor para la longitud de rugosidad (Zo) de 0.1. Sin embargo, la determinación del coefienciente de longitud de Monin–Obukhov fue más complicado debido a que depende del régimen de estabilidad térmica de la atmósfera (Stull, 1988). En la siguiente sección se discute la elección de este parámetro para la Reserva de la Biósfera de Mapimi.

- $L > 0$: condiciones de estabilidad (inversión térmica, vientos débiles).
- $L < 0$: condiciones de inestabilidad (superficie más caliente que el aire, convección).
- L cercano a cero indica condiciones neutrales.

Consideraciones para Estimar el Valor de la Longitud de Monin–Obukhov en la Reserva de La Biósfera de Mapimí.

- **Condiciones Diurnas:** La Reserva de la Biósfera de Mapimí se ubica en una región desértica caracterizada por temperaturas elevadas durante el día y marcadas diferencias térmicas entre el día y la noche. Estas condiciones propician la inestabilidad atmosférica durante el día, lo que sugiere un valor negativo para la longitud de Monin–Obukhov (L).
- **Enfriamiento Nocturno:** Durante la noche, el suelo en zonas desérticas como la Biósfera de Mapimí se enfría rápidamente debido a la radiación térmica, lo que puede generar una inversión térmica. En esta situación, el aire más frío se encuentra cerca del suelo, mientras que el aire más cálido se sitúa en niveles superiores, creando condiciones de estabilidad atmosférica. Esta estabilidad justifica un valor positivo de L, donde el viento tiende a ser más calmado y menos turbulento, con velocidades más uniformes a distintas alturas.
- **Horas Matutinas:** En las primeras horas de la mañana, después de una noche fría, la inversión térmica puede persistir hasta que el sol caliente lo suficiente la superficie para romper la capa de aire estable. Durante este periodo, la atmósfera permanece estable, lo que hace razonable asumir un valor positivo de L al modelar el comportamiento del viento.
- **Estacionalidad Invernal:** En los meses de invierno, la radiación solar es menos intensa y la diferencia de temperatura entre el día y la noche puede ser menor, lo que puede dar lugar a situaciones de estabilidad atmosférica durante gran parte del día. Bajo estas condiciones, la atmósfera puede mantenerse relativamente estable, lo que justifica un valor positivo de L.
- **Topografía y Vegetación:** En áreas donde el viento está protegido por la topografía o donde la vegetación reduce la transferencia de calor entre la superficie y la atmósfera, es más probable que se generen condiciones de estabilidad. En estos casos, un valor positivo de L podría representar mejor las condiciones locales.

- **Condiciones de Alta Presión:** Durante periodos de alta presión, es común que se reduzca el movimiento convectivo, lo que conduce a la estabilización de las capas bajas de la atmósfera. En estos escenarios, especialmente si coinciden con baja actividad solar, un valor positivo de L podría ser adecuado para modelar las velocidades del viento.

Dado que la Reserva de la Biósfera de Mapimí es una región desértica con variaciones significativas en la temperatura del suelo entre el día y la noche, y ante la ausencia de mediciones locales específicas para obtener una estimación precisa, se optará por utilizar un valor de -20 para L sugerido en la literatura como una aproximación, que refleje un comportamiento atmosférico ligeramente inestable pero que tienda a la neutralidad (Guevara, 2013).

La Tabla 6 resume los resultados de la implementación del método de Monin–Obukhov, los cuales revelan un bajo nivel de precisión, e incluso sugieren que la velocidad del viento disminuye con la altura, lo cual es poco probable. Debido a esta falta de precisión, los resultados obtenidos no se considerarán en el análisis de la factibilidad técnica para la instalación de aerogeneradores de baja potencia en la región estudiada. No obstante, se incluyen para demostrar que el uso de valores aproximados para la longitud de Monin–Obukhov no es adecuado. Como trabajo futuro, se investigará la precisión de este método cuando el coeficiente L es estimado de manera precisa a partir de datos recopilados en el sitio. Además, se evaluará la idoneidad del método para estimar la velocidad del viento a distintas alturas utilizando datos registrados cada 10 minutos durante un año, donde se calculará un valor de L para cada instante de tiempo con el fin de modelar con mayor exactitud el comportamiento atmosférico inestable de la Reserva de la Biósfera de Mapimí.

Tabla 6. Valores de la velocidad promedio del viento, Vrmc y DEM estimados a alturas adecuadas para la instalación de aerogeneradores de baja potencia, según Método de Monin–Obukhov.

ALTURA [m]	Velocidad Promedio [m/s]	VRMC [m/s]	DEM_IPI [kWh / m^2]	DEM_VRMC [kWh / m^2]
20	12.02	15.19	8732.69	8341.88
30	9.16	11.57	3855.77	3683.21
40	6.42	8.11	1329.24	1269.75
50	3.77	4.77	270.24	258.15
60	1.20	1.51	8.65	8.26

CONCLUSIÓN

Este estudio ha evaluado la viabilidad técnica y económica de instalar aerogeneradores de baja potencia en la Reserva de la Biósfera de Mapimí, utilizando tres métodos para la estimación de la velocidad del viento a distintas alturas. Los resultados obtenidos indican que, a partir de los 30 m de altura, la instalación de aerogeneradores es técnicamente viable, con velocidades promedio del viento de 3.9 m/s según la ley exponencial de Hellmann y 3.8 m/s de acuerdo con la ley del perfil eólico logarítmico. Estas velocidades son suficientes para justificar la inversión en sistemas de generación eólica, considerando también la factibilidad económica que ofrece la orografía irregular de la región, que permite la instalación de aerogeneradores en sitios elevados sin necesidad de grandes torres. Además, esta opción reduce el impacto ambiental en comparación con alternativas como los sistemas solares fotovoltaicos, lo que es de suma importancia en un área protegida como la Reserva de la Biósfera de Mapimí.

Sin embargo, los resultados obtenidos mediante el método de Monin–Obukhov revelaron un bajo nivel de precisión, sugiriendo incluso una disminución de la velocidad del viento con la altura, lo cual es improbable y evidencia la inadecuación de este método al utilizar valores aproximados para la longitud de Monin–Obukhov (L). Por tanto, se propone investigar más a fondo este método con datos específicos del sitio para mejorar la precisión en futuras evaluaciones.

En resumen, la energía eólica emerge como una solución viable y sostenible para satisfacer las necesidades energéticas de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) en la Reserva de la Biósfera de Mapimí. La implementación de aerogeneradores a partir de los 30 m de altura no solo es factible desde una perspectiva técnica y económica, sino que también contribuye a la conservación ambiental al reducir la dependencia de combustibles fósiles y minimizar el impacto ecológico en esta área protegida.

REFERENCIAS

Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2023). Potencial de energía eólica en regiones áridas. Recuperado de https://www.irena.org.

Akdag S. A. & Guler O, (2015). A novel energy pattern factor method for wind speed distribution parameter estimation. Energy Conversion and Management

Allouhi, A., Zamzoum, O., Islam, M. R., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., & Derouich, A. (2017). Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, 311-324.

Azad A. K., Rasul Mohammad Golam and Yusaf Talai, (2014). Statistical Diagnosis of the Best Weibull Methods for Wind Power Assessment for Agricultural Applications. Energies.

Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C., & Rios-Marcuello, S. (2010). Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(8), 2383-2391.

Christofferson R. & Gilette D., (1987). A simple estimator of the shape factor of the two parameter Weibull distribution. Correspondence.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Datos climáticos y de recursos hídricos de la Reserva de la Biósfera de Mapimí. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua.

Gobierno del Estado de Chihuahua. (2023). Información sobre la Reserva de la Biósfera de Mapimí. Recuperado de https://www.chihuahua.gob.mx.

Gobierno del estado de Chihuahua. 2023. Reserva de la Biósfera de Mapimí. Recuperado el 25 de Julio de: https://chihuahua.gob.mx/info/reserva-de-la-biosfera-de-mapimi https://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_en.php.

Instituto de Ecología (INECOL).2023. El desierto chihuahuense de la Reserva de la Biósfera de Mapimí: ¿se está convirtiendo en desierto lluvioso? Recuperado el 25 de Julio de: http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/component/content/article/17-ciencia-hoy/448-el-desierto-chihuahuense-de-la-reserva-de-la-biosfera-de-mapimi-se-esta-convirtiendo-en-desierto-lluvioso

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2023). Informe sobre el potencial de energías renovables en regiones áridas de México. Recuperado de https://www.gob.mx/inecc.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECOL). (2023). Especies en peligro de extinción en la Reserva de la Biósfera de Mapimí. Recuperado de https://www.inecol.mx.

Justus C. G., Hardraves W. R., Mikhail A. and Graber D., (1977). Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. Journal of applied meteorology.

Kamau, J. N., Kinyua, R., & Gathua, J. K. (2010). 6 years of wind data for Marsabit, Kenya average over 14 m/s at 100 m hub height; An analysis of the wind energy potential. Renewable Energy, 35(6), 1298-1302.

Lysen. E. H., (1983). Analysis wind regimes. Introduction to wind energy. Consultancy services wind energy developing countries.

Masters, G. M. (2013). Renewable and efficient electric power systems. John Wiley & Sons.

Murthy, K. S. R. & Rahi, O. P. (2017). A comprehensive review of wind resource assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Okorie, M. E., Inambao, F., & Chiguvare, Z. (2017). Evaluation of wind shear coefficients, surface roughness and energy yields over inland Locations in Namibia. Procedia Manufacturing, 7, 630-638.

Ozat C. & Celiktas M. S., 2016. Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region. Energy Conversion and Management.

Patel M. R. (2006). Wind Speed and Energy. En Taylor & Francis Group, Wind and Solar Power Systems; Designs, Analysis, and Operation. CRC Press.

Pishgar-Komleh S. H., Keyhani A. and Kefeedpari P., (2014). Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study Firouzkooh county of Iran). Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Stull, R. B. (1988). An introduction to boundary layer meteorology. Springer Science & Business Media.

THE WIND POWER (2023). Online access: Manufacturers and turbines. Recuperado el 21 de Junio de 2023 de:

Usta I., (2016). An innovative estimation method regarding Weibull parameters for wind energy applications. Energy.

Valiente-Banuet, A., & Ezcurra, E. (1991). Estructura y funcionamiento de la vegetación en el desierto Chihuahuense: una revisión. Boletín de la Sociedad Botánica de México, (51), 85-98.

Wais P., (2017). A review of Weibull functions in wind sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Wieringa, J. (2001). New revision of Davenport roughness classification. Proc., 3EACWE, Eindhoven, The Netherlands, 285-292.

Wu Bin, Lang Yongqiang, Navid, Zargari Samir, (2011). Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. WILEY.

Guevara Díaz, J. M. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. Terra, 29(46), 81-101.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

INCLUSIÓN DE CRITERIOS SOCIOTÉCNICOS EN LA MEDICIÓN DE RESILIENCIA ENERGÉTICA

Tiare Robles Bonilla y Karla G. Cedano Villavicencio
Instituto de Energías Renovables, UNAM, Privada Xochimilco, Temixco, Morelos, C.P. 62580, México. **trb@ier.unam.mx, kcedano@ier.unam.mx**

RESUMEN

La resiliencia energética se refiere a la capacidad de los sistemas sociotécnicos energéticos para mitigar, minimizar, recuperar y anticipar los impactos de perturbaciones en términos económicos, sociales, ambientales e institucionales. Tradicionalmente, las métricas para evaluar la resiliencia energética se han centrado en problemas técnicos. Sin embargo, han comenzado a emerger métricas a nivel micro que consideran problemas sociotécnicos.

En este trabajo, se realizó un análisis de frameworks y métricas sobre la resiliencia energética y se extrajeron los indicadores utilizados en ellos. Posteriormente, estos indicadores se clasificaron en diferentes dimensiones basadas en los cuatro ejes de la sustentabilidad, institucional, ambiental, social y económico. Se diseñaron dos métricas para evaluar la resiliencia energética, en la primera se recurre a la experiencia de personas expertas en el área energética, cada una con más de 10 años de trayectoria en el campo. Para abordar la falta de datos duros, se emplea la lógica difusa, una metodología heurística que permite utilizar la opinión experta de estas personas, reconociendo la naturaleza inherente de datos imprecisos en sus conocimientos. Esta perspectiva inclusiva nos permite entender mejor cómo fortalecer nuestros sistemas energéticos de manera integral, integrando tanto los aspectos técnicos como las valiosas contribuciones de los expertos. La segunda es una clasificación de indicadores con respecto a su disponibilidad histórica en nuestro país, utilizando datos cuantitativos. Ambas métricas proporcionan una perspectiva integral, combinando las valiosas contribuciones de expertos y datos cuantitativos. Estas métricas son escalables a nivel micro y pueden ser desarrolladas en futuros estudios.

ABSTRACT

Energy resilience refers to the ability of socio-technical energy systems to mitigate, minimize, recover from and anticipate the impacts of disturbances in economic, social, environmental and institutional terms. Traditionally, metrics for assessing energy resilience have focused on technical issues. However, micro-level metrics that consider socio-technical issues have begun to emerge.

In this paper, an analysis of frameworks and metrics on energy resilience was conducted and the indicators used in them were extracted. Subsequently, these indicators were classified into different dimensions based on the four axes of sustainability, institutional, environmental, social and economic. Two metrics were designed to assess energy resilience, the first drawing on the experience of experts in the energy field, each with more than 10 years of experience in the field. To address the lack of hard data, we employ fuzzy logic, a heuristic methodology that allows us to use the expert opinion of these individuals, recognizing the inherent nature of imprecise data in their knowledge. This inclusive perspective allows us to better understand how to strengthen our energy systems in a holistic manner, integrating both the technical aspects and the valuable contributions of experts. The second is a ranking of indicators with respect to their historical availability in our country, using quantitative data. Both metrics provide a comprehensive perspective, combining valuable expert contributions and quantitative data. These metrics are scalable at the micro level and can be developed in future studies.

Palabras claves: resiliencia energética, fuzzy logic, sistemas energéticos, métricas.

Introducción

En la literatura existen diferentes definiciones sobre lo que es la resiliencia energética, Ahmadi et al. (2021) la consideran como una estrategia de gestión de riesgos que tiene como objetivo minimizar la vulnerabilidad, mejorar la flexibilidad, adaptarse al entorno y aumentar la tolerancia del sistema frente a las amenazas y perturbaciones [1]; mientras que Hamborg et al. (2020) mencionan que los sistemas energéticos resilientes no sólo se refieren a los sistemas técnicos energéticos que pueden “recuperarse” tras un apagón, sino que también se relacionan con lo social y económico para el bienestar humano [2]. En este artículo, se define a la resiliencia energética como la capacidad de los sistemas sociotécnicos energéticos para mitigar, minimizar, recuperar y anticipar lo causado por una perturbación en términos económicos, sociales, ambientales e institucionales. En la última década los estudios sobre resiliencia energética han ido en aumento, siendo Estados Unidos uno de los países con más publicaciones sobre el tema. Esto puede ser resultado de las diferentes crisis energéticas que ha enfrentado y han dejado un gran impacto en la sociedad. Por ejemplo, la crisis que se vivió en Ohio en 2003 cuando un corte de electricidad de aproximadamente 8 minutos dejo 50 millones de afectados y con un impacto financiero entre $4 y $10 millones de dólares [3]. La mayoría de los estudios sobre métricas de resiliencia energética tienen un enfoque fisicomatemático, lo que es importante, pero no se expanden a considerar más aspectos de la resiliencia, como lo social o económico y que permita tener una evaluación más precisa y al mismo tiempo que considere tanto los sistemas como las personas y el entorno en el que se encuentran.

La lógica difusa tiene una alta gama de aplicaciones, desde controladores en procesos electromecánicos, toma de decisiones [4], incluso ha sido utilizada en temas económicos relacionados a la energía, tal como Seuret et al. (2020) la utilizaron para medir el acceso de la energía en el país [5].

El diseño de esta evaluación consiste en hacer uso de indicadores que ayuden a evaluar a nivel nacional la resiliencia de los sistemas,

considerando los ámbitos económicos, sociales, ambientales, institucionales y técnicos que componen el sistema energético nacional. Se propone un modelo de fuzzificación en dos pasos donde la opinión de personas expertas es el punto principal, se compone de quince variables lingüísticas en total con tres valores lingüísticos; y una metodología de datos cuantitativos dividida en cinco dimensiones, cada una tiene diferentes indicadores.

Metodología

Caso 1. Fuzzificación de dos pasos

La lógica difusa se compone de variables y valores lingüísticos, funciones de pertenencia y reglas. Las variables lingüísticas son indicadores que sirven para evaluar o caracterizar el sistema difuso, y cada una tiene un conjunto de valores los cuales se dividen en rangos, que normalmente están relacionados al lenguaje cotidiano, tal como bajo, medio, alto, etc.
Las reglas del sistema se forman con las variables y valores lingüísticos, es decir:

$$A=B^c \quad (1)$$

Donde B es el número de valores lingüísticos y C el número de variables. Las funciones de pertenencia nos muestran el grado en que un elemento está relacionado a un valor lingüístico.

Delina et al. (2020) y Hamborg et al. (2020) mencionan que la resiliencia energética no se trata solo de que los sistemas energéticos puedan recuperarse de un apagón, también es importante considerar los sistemas sociales y económicos [6]. Es por esto por lo que se hizo una búsqueda de métricas que consideren ambos aspectos, y en la búsqueda se llegó a Erker et al. (2017) quien propone la Evaluación de la resiliencia energética regional (RERA). Erker et al. (2017) sugiere que la resiliencia del sistema energético debe analizarse y contrastarse considerando las percepciones y actitudes de la sociedad. Por lo que se consideran una serie de principios y principios sustanciales en esta métrica, el cuál considera necesarios tres principios: habilidad de aprendizaje, fuerza física y fuerza social. Dependiendo de cómo se cumplan estos tres principios se implementan los principios sustanciales, los cuales representan la capacidad de contribuir o restar valor a las estructuras, elementos y funciones resilientes y por lo tanto se clasifican en exposición, eficiencia, diversidad y redundancia [7].

Al querer considerar el conocimiento y opinión de personas expertas, se encontró que Canavese et al. (2014) realizó un estudio usando la lógica difusa, así como la percepción de personas expertas. Esto se hizo para evaluar la sustentabilidad local de Algarve, Portugal. Canavese et al. (2014) mostraron como la lógica difusa contribuye a la concepción de un sistema basado en la opinión de expertos, lo cual muestra conceptualmente que es posible integrar la expertez humana en las evaluaciones [8].

El diseño del fuzzificador está construido para evaluar la resiliencia energética a nivel nacional. Se hizo una revisión de la literatura sobre este tema y se extrajeron las variables e indicadores que los autores usan para realizar métricas y evaluaciones. Se extrajeron un total de 121 variables, las cuáles se analizaron a detalle y se clasificaron en cinco grupos: técnico, ambiental, económico, institucional y social. Quedando un total de 73 variables. Una de las limitaciones de la lógica difusa es el número de variables y valores lingüísticos a usar, ya que estos determinan el número de reglas para evaluar, como lo muestra la ecuación 1. Por lo que utilizar 73 variables obtenidas no es conveniente, así que se hizo una clasificación muy específica, siguiendo los siguientes pasos:

1. Revisar si la variable es difusa.
2. Contemplar si la variable se relaciona a algún principio y subprincipio de RERA.
3. Relacionar la variable con alguna categoría de la sustentabilidad (Ambiental, económica, social e institucional).
4. Si la variable está relacionada con dos o más categorías de la sustentabilidad y al menos un principio o subprincipio de RERA, se considera fundamental.

Se seleccionaron aquellas variables que cumplieran los 4 puntos de la sección anterior, dando un total de 15 variables, sin embargo, usar estas quince variables con los tres valores lingüísticos nos daría un total de 14,348,907 reglas, lo que vuelve complejo el sistema difuso. Sin embargo, se eligieron cinco por cada subprincipio de RERA. Esto no altera el número de reglas, ya que el fuzzificador se usará de forma individual por cada subprincipio, dejando un total de 243 reglas de tipo “if-then” como se muestra a continuación:

If (var1 is alto) and (var2 is alto) and (var3 is alto) and (var4 is alto) and (var5 is alto) then (ER is alto)

En este caso se seleccionó una variable de cada grupo ((1) técnico, (2) ambiental, (3) económico, (4) institucional y (5) social), y que estuvieran los tres principios ((1) habilidad de aprendizaje, (2) fuerza física y (3) fuerza social) y subprincipios ((1) exposición, (2) eficiencia y (3) diversidad y redundancia), además que el contexto de la variable pueda ser aplicado en una evaluación a nivel nacional.

Una vez definidas las variables, valores lingüísticos y las reglas, se diseñó un cuestionario utilizándolas, para que personas expertas en el tema evaluaran de forma sencilla la resiliencia energética. Este cuestionario se dividió en tres secciones, una por subprincipio de RERA. Se pide evaluar la pregunta y además evaluar el conocimiento que se tiene sobre el tema de la pregunta. Se usó el software Matlab para realizar el computo del modelo [9]. La codificación de los valores lingüísticos es bajo (1), medio (2) y alto (3).

Para este caso se implementó un segundo fuzzificador con tres variables lingüísticas, las cuales son los tres subprincipios y tres valores

lingüísticos (alto, medio, bajo). En este segundo fuzzificador se tiene un total de 27 reglas. Es decir, primero se pasa cada sección por el primer fuzzificador de 243 reglas, y da un valor, al final se obtienen tres valores, uno por cada sección y estos se pasan al último fuzzificador de 27 reglas, dando finalmente el valor de la resiliencia energética.

Caso 2. Datos cuantitativos

En este caso se fueron descartando variables de las 73 obtenidas, de acuerdo con la información disponible en México. Para esta métrica no se utilizó la clasificación de RERA, mientras la variable estuviera en más de una categoría de la sustentabilidad fue suficiente. Se utilizaron un total de 17 variables, y se hizo un análisis del año 2019 al 2022. Las variables se normalizaron entre 0 y 1, para tener datos uniformes.

Resultados

Caso 1. Fuzzificación de dos pasos

Tal como los trabajos de Canavese et al. (2014) y Papas et al. (2022) realizaron [10], este modelo hace uso de la opinión de expertos en el tema. Se seleccionaron expertos con más de 10 años de experiencia trabajada en distintas áreas de la energía, debido a que estamos considerando las dimensiones económicas, sociales, institucionales y ambientales además de la técnica. Cada persona evaluó su nivel de conocimiento del 1 al 10, siendo 10 nivel experto y además le asignó un valor (alto, medio, bajo) a cada pregunta relacionada a las variables.

Se pidió evaluar el nivel de expertez en el tema, porque se entiende que no todas las personas son expertas en todas las áreas, y además esto evita tener sesgos a respuestas donde el nivel de expertez es bajo y la evaluación a la pregunta tiene un valor "alto". De esta forma se evita este tipo de incoherencias. Se contó con la participación de 30 personas expertas. El nivel de expertez va de 1 a 10, se definió un corte $c=8$ en el nivel de expertez para considerar válidas las respuestas y registrar el valor de la encuesta en el fuzzificador. Es decir, si el nivel autopercibido de expertez normalizado es menor a 8, entonces no se registra la respuesta de esa persona, para evitar que altere la medición del grupo de personas que sí son expertas en ese tema. La tabla 1 muestra un ejemplo de las respuestas recolectadas del formulario, así como el corte que se hizo para considerar la respuesta válida. Se recuerda que el valor lingüístico bajo es 1, medio es 2 y alto es 3. A las últimas cinco columnas se les asigna el valor lingüístico de acuerdo con el corte c de las preguntas.

Tabla 1. Promedio por cada pregunta de cada sección.

Subprincipio	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4	Pregunta
Eficiencia	2.07	2.14	2.5	2.06	1.76
Exposición	2.13	1.9	1.38	1.38	1.69
Diversidad y redundancia	1.8	2.13	1.73	2.72	1.6

Una vez teniendo los valores lingüísticos por sección, se pasan por el fuzzificador uno (fuzzificador destinado a los subprincipios de RERA), y se obtiene la evaluación de resiliencia energética.

Tabla 2. Valor de resiliencia energética por subprincipio

Subprincipio	Valor
Eficiencia	2
Exposición	1.59
Diversidad y redundancia	1.98

Una vez teniendo los valores de cada subprincipio, se obtiene el valor de la resiliencia energética nacional, tal como lo muestra la ilustración 1, que nos da un valor de dos. En este caso la resiliencia energética de México es considerada media.

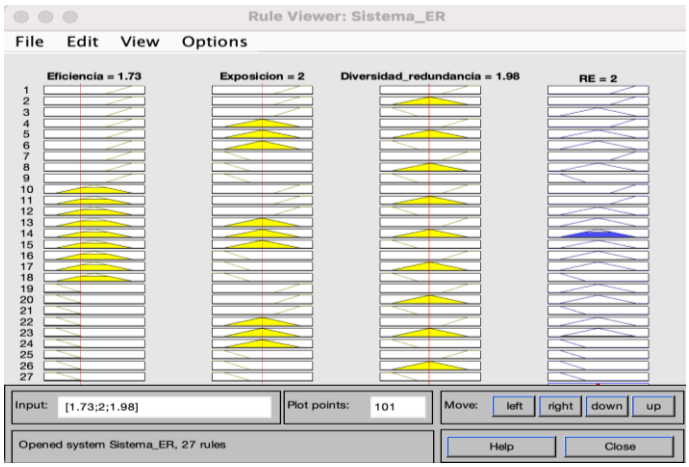


Ilustración 1. Captura de pantalla de MATLAB, valor de la resiliencia energética.

Caso 2. Datos cuantitativos

Se presentan las siguientes gráficas por dimensión para una mejor interpretación. La ilustración 2 muestra la dimensión técnica en el periodo 2019-2022, se observa como la variable de pérdidas totales de energía varía, igual que la duración promedio total de interrupciones en el suministro.

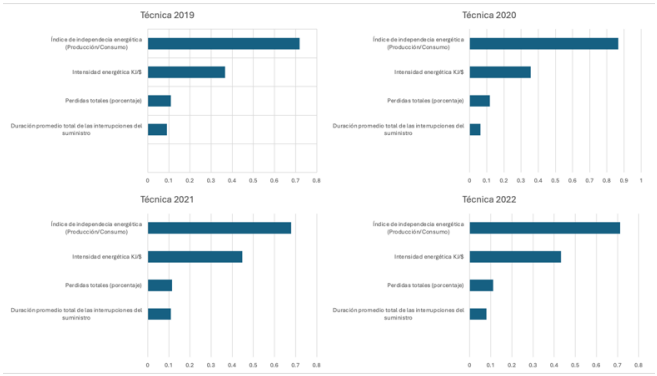


Ilustración 2. Técnica

La Ilustración 3 muestra la dimensión ambiental, una de las variables que más variaciones tiene es el impacto socioeconómico de desastres naturales, seguido por las emisiones de CO2.

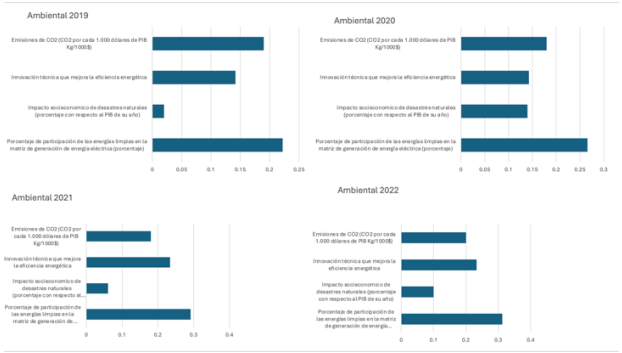


Ilustración 3. Ambiental

La Ilustración 4 muestra la dimensión económica, se aprecian dos variables con variaciones, los subsidios eléctricos y el fondo para la infraestructura ante desastres naturales.

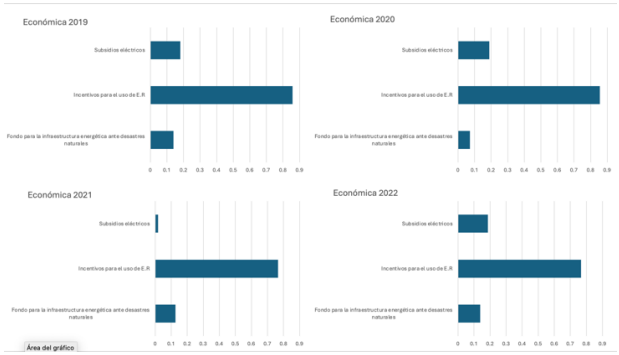


Ilustración 4. Económica

La Ilustración 5 muestra la dimensión institucional, se observa como la variable de infraestructura urbana y el marco legal de las energías renovables sufren cambios en estos años, en comparación con la importación del gas y las instituciones de protección civil que tienen cambios mínimos.

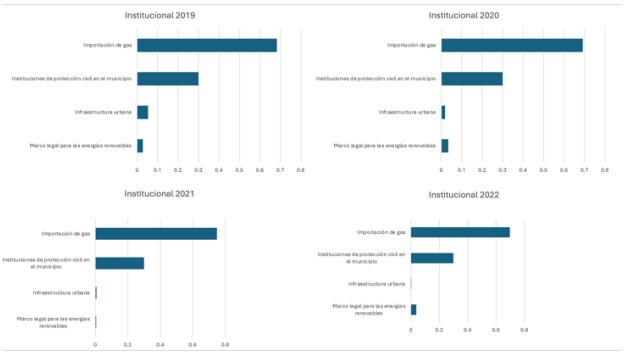


Ilustración 5. Institucional

La Ilustración 6 corresponde a la dimensión social, uno de los objetivos de esta dimensión es lograr acceder a mayor cobertura de datos que tengan que ver con la energía, ya que no está disponible o al alcance de lo que se necesita. Sin embargo, el acceso a la electricidad, aunque está en 99%, siguen siendo miles de personas que no cuentan con este servicio.

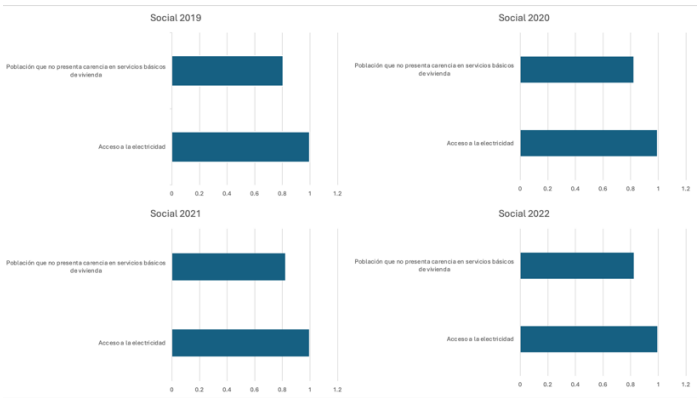


Ilustración 6. Social

Discusión y conclusión

En el primer caso se obtiene un valor de 2. Recordando que uno es bajo, dos es media y tres es alta, lo que da entender que las personas expertas evalúan la resiliencia energética del país como “media”.

Debido a la restricción del número de variables y valores, hacerlo por dimensiones de acuerdo con los tres subprincipios nos permitió no

solo tener cinco variables, sino quince en total, es decir, una variable por pregunta y cada dimensión consta de cinco preguntas. De esta forma no se alteró el número de reglas, simplemente se usó el fuzzificador individualmente para cada subprincipio, además se utilizó un segundo fuzzificador en el que sólo se tienen 3 variables que son los 3 subprincipios, eficiencia, exposición y diversidad y redundancia y los valores son alto, medio y bajo. Al agregar más preguntas el contexto a evaluar se vuelve más amplio, y se nota como en ciertas preguntas hay una respuesta unánime mientras que en otras son extremos diferentes; además, ayuda a poner en un contexto más específico la percepción del experto, en este caso las preguntas fueron adaptadas al contexto de México, sin embargo, puede adaptarse a otros países.

Una de las limitantes del fuzzificador es la parte donde se pregunta a cada persona evaluar su conocimiento sobre la pregunta, ya que al final es la perspectiva de la persona sobre sí misma y esto muchas veces oculta la verdad. De ahí la importancia de utilizar la herramienta con personas que posean un alto grado de expertez y además para evitar sesgos se normaliza para una mejor coherencia de los datos. Tal como Canavese et al. (2014) menciona, es necesario considerar metodologías mixtas (cuali-cuantitativas) y el conocimiento de los expertos para evitar una incertidumbre mayor al obtener datos [8]. Confirmamos que este tipo de método que utiliza la opinión de expertos es muy adecuado cuando la información de las variables por si solas no son suficientes, sino que existe un grado de incoherencia con la calidad de vida de la región a evaluar. Otro punto importante en esta investigación que se debe aclarar es el uso de cuestionarios, la lógica difusa no calcula probabilidades por lo que la representatividad de la muestra no es un punto para considerar, como en la estadística, sino que se busca pertenencia.

Por otro lado, la metodología que usa datos cuantitativos nos ayuda a complementar el fuzzificador, ya que uno tiene que ver directamente con la percepción de las personas y el otro con lo que dicen los datos reportados. Aunque aún falta definir el tipo de cálculo o método que se usará para obtener un índice, se puede apreciar cómo se comporta la resiliencia por dimensión. Al final, es importante que temas como este se consideren para pulir políticas públicas con respecto a los sistemas energéticos y sobre para mejorar la calidad de vida de los usuarios.

REFERENCIAS

[1] Ahmadi, S., Saboohi, Y., Vakili, A., Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144 (2021), 110988. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110988
[2] Hamborg, S., J.N. Meya, K. Eisenack, T. Raabe, Rethinking resilience: A cross- epistemic resilience framework for interdisciplinary energy research, Energy Res. Soc. Sci. 59 (2020) 101285, , https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101285
[3] Roege, P. E., Collier, Z. A., Mancillas, J., McDonagh, J. A., & Linkov, I. (2014). Metrics for energy resilience. Energy Policy, 72, 249–256. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.012
[4] Zadeh, LA. (1994). Fuzzy-logic, neural networks, and soft computing, Communications of the ACM, 37 (3), 77-84, 10.1145/175247.175255
[5] Seuret-Jimenez, D.; Robles-Bonilla, T.; Cedano, K.G. (2020). Measurement of Energy Access Using Fuzzy Logic. Energies, 13, 3266. https://doi.org/10.3390/en13123266
[6] Laurence L. Delina, Joey Ocon, Eugene Esparcia. (2020). What makes energy systems in climate-vulnerable islands resilient? Insights from the Philippines and Thailand, Energy Research & Social Science, 69, 101703, ISSN 2214-6296, https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101703.
[7] Erker, S., Stangl, R., Stoeglehner, G. (2017). Resilience in the light of energy crises – Part I: A framework to conceptualize regional energy resilience, Journal of Cleaner Production, 164, 420-433.
[8] Canavese, D., Siqueira O, N., Queirós, M. (2014). The assessment of local sustainability using fuzzy logic: An expert opinion system to evaluate environmental sanitation in the Algarve region, Portugal. Ecological Indicators, 36, 711-718.
[9] Mathworks. Fuzzy Logic ToolboxTM. Available online: https://la.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html (accessed on 28 November 2023).
[10] Papas, P, J., Ramsey, D, S., Holmes, J., Frood, D., Lyon, S. (2022). Integrating data, expert opinion and fuzzy logic in the development of an index of wetland condition. Marine and Freshwater Research, 73, 1184-1195. https://doi.org/10.1071/MF21197

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS DE LA DEMANDA DEL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL Y LAS PROPUESTAS GUBERNAMENTALES DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA SOBERANA

Alan J. de la Rosa Albino, Juan Carlos Castro Domínguez, Alberto Avila Nuñez, Karla G. Cedano Villavicencio, Manuel Martinez Fernandez
Laboratorio de Innovación y Futuros, Instituto de Energías Renovables
Universidad Nacional Autónoma México
Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Mor, C.P. 62588, México, Tel. 777 362 0096, ajra@ier.unan.mx.

RESUMEN

En respuesta a los desafíos que plantea el cambio climático, México ha establecido compromisos para reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), lo que motivó la publicación de la Ley de Transición Energética (LTE), de la cual emanan planes como la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios. Dicho instrumento rige la política nacional en materia energética, con metas como las establecidas en la Transición Energética Soberana (TES) publicadas en el año 2020, y actualizada en 2024 (TES 2.0), que describen un escenario de demanda energética deseable al año 2050.

Al tratarse de una estrategia nacional, evaluar las acciones que permitan alcanzar las metas establecidas requiere de un ejercicio prospectivo, por lo que el objetivo de este artículo es mostrar un modelo hecho en la plataforma LEAP que contempla la demanda del Sistema Energético Nacional (SEN), comparando tres escenarios: Línea Base (BAU), que refleja las tendencias actuales del sector energético en México y planteamos drivers de crecimiento económicos y demográficos; Línea base de la Transición Energética soberana (TES), que refleja la línea base de la demanda planteada por el gobierno; y Demanda Deseable (TES 2.0), el cual describe el consumo energético ideal para alcanzar las metas planteadas en la actualización de la Transición Soberana.

Este modelo pretende ser la base para estudios futuros en los cuales sea posible plantear acciones estratégicas al 2050, mediante las cuales se alcancen las metas y compromisos adquiridos. Las cuales pueden provenir de diversos aspectos como: innovaciones tecnológicas, promoción de las energías renovables, eficiencia energética, transporte sostenible, economía circular; sólo por mencionar algunas. Inclusive, debido a la escala del modelo es posible explorar diferentes combinaciones de dichas medidas y políticas para identificar las más efectivas en la reducción de emisiones y la promoción de un sistema energético más sustentable y resiliente.

ABSTRACT

In response to the challenges posed by climate change, Mexico has established commitments to reduce its greenhouse gas emissions, leading to the publication of the Energy Transition Law. This law has given rise to plans such as the Strategy to Promote the Use of Cleaner Technologies and Fuels, which governs the nation's energy policy. This strategy sets goals aligned with those outlined in the Sovereign Energy Transition (TES) published in 2020 and updated in 2024, describing a desirable energy demand scenario for 2050.

Given the national scope of this strategy, it isn't easy to evaluate the actions required to achieve the established goals without a similarly scaled prospective exercise. Therefore, the objective of this article presents a LEAP model that considers the demand of the National Energy System (SEN), comparing three scenarios: Business as Usual (BAU), which reflects current trends in Mexico's energy sector using economic and demographic growth drivers proposed by the research group; Sovereign Energy Transition Baseline (TES Baseline), which reflects the baseline demand outlined by the government; and Desirable Demand (TES 2.0), which describes the ideal energy consumption to achieve the proposed goals, as outlined in the updated Sovereign Transition.

By using the LEAP platform to model the SEN and the three presented scenarios, strategic actions can be proposed up to 2050 to achieve the established goals and commitments, moving further away from the baseline and closer to the desirable scenario, with the national scale required by a study of this nature. These proposals can arise from various aspects such as technological innovations, the promotion of renewable energies, energy efficiency, sustainable transportation, and circular economy, to name a few. Moreover, due to the scale of the model, it is possible to explore different combinations of these measures and policies to identify the most effective ways to reduce emissions and promote a more sustainable and resilient energy system.

Palabras claves: Prospectiva energética, transición energética, política energética, fuentes renovables, emisiones, demanda, balance de energía, 2050.

INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental actual se caracteriza por una compleja interacción de diversos factores que afectan la salud de nuestro planeta y de sus habitantes. Dentro de los desafíos más grandes a los que nos enfrentamos se encuentran el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del aire y del agua, y la sobreexplotación de los recursos naturales [4]. Estos problemas no solo impactan negativamente en los ecosistemas, sino que también tienen profundas implicaciones para el bienestar humano y para el propio desarrollo económico.

Como medida de respuesta ante estos desafíos, surge la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015, en donde se proponen una serie de objetivos, prestando especial atención al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 que busca garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todas las personas. Este objetivo no solo aborda la necesidad de una transición hacia fuentes de energía renovable y el aumento de la eficiencia energética, sino que también reconoce la necesidad de una mayor cooperación internacional, que facilite el acceso a tecnología y recursos financieros en el sector energético [5].

En el contexto de la creciente demanda de energía y los ya limitados recursos fósiles, la transición hacia sistemas energéticos sustentables se ha vuelto cada vez más urgente, por lo que la implementación de políticas y estrategias alineadas con el ODS 7 es fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mitigar los efectos del cambio climático, mientras se promueve el desarrollo económico y social. Atendiendo a esto, el 24 de diciembre de 2015 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la "Ley de Transición Energética" (LTE), que tiene como objetivo el "regular el aprovechamiento sustentable de la energía así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos" [1].

Dentro de la LTE, se establece que corresponde a la SENER aprobar y publicar la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios y actualizar el ejercicio prospectivo de la misma, siendo publicada por primera vez el 2 de diciembre de 2016; para luego tener una actualización publicada en el DOF el 7 de febrero de 2020, con el nombre "Hacia una transición energética soberana de México", en el que se presenta el ejercicio prospectivo bajo las estrategias y metas del gobierno en turno [2].

A principios del 2024, la estrategia recibió una actualización, así como el modelo de Transición Energética Soberana (TES 2.0), en el que se toman en cuenta las reformas y la evolución del marco normativo mexicano [3]. Se incluyen dos escenarios: Línea base (TES), este escenario refleja la línea base de la demanda planteada por el gobierno; y Demanda deseable (TES 2.0), este escenario describe el consumo energético ideal para alcanzar las metas planteadas, propuesto en la actualización de la Transición Soberana.

Contexto nacional

Para la realización de un ejercicio prospectivo, es fundamental evaluar el contexto actual mediante la identificación de "elementos portadores de futuro". Estos elementos comprenden el historial del contexto económico y demográfico, los cuales alimentarán el modelo prospectivo. Además, es necesario conocer el historial de la demanda, la transformación de los recursos naturales disponibles y su gestión eficiente.

Económico

El elemento portador económico incluye la consideración del Producto Interno Bruto (PIB), definido como la suma del valor monetario de todos los bienes y servicios de uso final generados por un país o entidad federativa durante un período específico, comúnmente un año o trimestre [6]. La evolución del PIB a lo largo del tiempo es un indicador clave del crecimiento y la transformación económica del país. Además, la estructura del PIB, es decir, la contribución de los diferentes sectores económicos (como la agricultura, la industria y los servicios), proporciona información valiosa sobre la diversificación y la fortaleza económica.

El manejo del PIB en moneda constante es fundamental para eliminar el efecto de la inflación en los cálculos y en los análisis económicos, ya que permite una comparación más precisa de los valores económicos a lo largo del tiempo, proporcionando una visión más clara de la evolución real del crecimiento económico.

Tabla 1. Evolución del Producto Interno Bruto. Fuente: [7]

AÑO	2014	2015	2016	2017	2018	2019
PIB nacional (miles de millones MXN 2019)	22,134	22,862	23,524	24,004	24,538	24,483

Demográfico

La demanda de bienes y servicios está estrechamente ligada al crecimiento poblacional y al aumento en la cantidad de viviendas. Por ello, entender la evolución demográfica es crucial para una planificación económica y social efectiva a futuro. El conocimiento de estos patrones demográficos proporciona información esencial para anticipar las necesidades de infraestructura, servicios públicos y políticas de desarrollo sostenible.

El continuo crecimiento demográfico proyecta que para el año 2030 habrá un incremento del 56% en el número de viviendas en comparación con las cifras del año 2005 [8]. Este aumento refleja no solo la expansión de la población, sino también cambios en los patrones de vida, como la disminución en el tamaño promedio de los hogares (a 3.2 en 2030) y la urbanización creciente. Estos factores subrayan la necesidad de desarrollar estrategias de planificación urbana y rural que aborden la demanda futura de viviendas, infraestructura, y servicios básicos.

Tabla 2. Habitantes en México. Fuente: [8][9]

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Habitantes	119,216,240	120,653,293	122,038,924	123,388,002	124,692,044	125,960,168
Habitantes/vivienda	3.79	3.75	3.71	3.67	3.62	3.58

Demanda energética

Podemos clasificar la demanda en seis sectores, tal como se encuentra en el Balance Nacional de Energía [10], a diferencia de la disgregación presentada en el TES, en donde el sector comercial y de servicios se encuentran unidos. El histórico del consumo de energía entre 2014 y 2018 muestra un aumento total del 8%. Sin embargo, en 2019 se registró una caída del 10% con respecto al año anterior. Durante este periodo, el

sector de transporte ha sido el principal consumidor de energía, representando aproximadamente el 46% del consumo total cada año. Le sigue el sector industrial, que tiene un impacto cercano al 32%. Los restantes sectores, que incluyen residencial, comercial, de servicios públicos y agrícola, se reparten el 22% del consumo energético restante. Esta distribución del consumo energético refleja las prioridades y desafíos en la planificación y gestión del sector energético, subrayando la necesidad de enfocarse en estrategias de eficiencia energética, que tendrían un impacto más significativo en los sectores de transporte e industria, que son los más demandantes.

Tabla 3. Consumo de energía en México en PJ. Fuente: [10]

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Consumo total	4891.87	5092.84	5304.15	5357.39	5285.96	4761.09

Cada uno de estos sectores tienen asociado un impacto en la economía y en el desarrollo, por lo que es importante determinar el aporte que estos presentan al PIB y con ello lograr relacionarlos con algunos indicadores energético-económicos, como lo sería la intensidad energética [12], exceptuando los sectores residencial y de servicios públicos, ya que estos se encuentran ligados al número de habitantes y al número de hogares, respectivamente.

Tabla 4. Aporte al PIB por sector en porcentaje (%). Fuente: [11]

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Agropecuario	3.132	3.192	3.346	3.381	3.384	3.391
Comercial	54.043	54.863	54.713	54.088	53.724	53.761
Industrial	31.490	29.986	29.640	30.946	31.149	30.779
Transporte	6.163	6.181	6.050	6.060	6.203	6.219

Transformación

La transformación de energía en México puede clasificarse según su propósito, considerando la generación de electricidad, la refinación, la producción de gas natural, y la extracción y procesamiento de carbón. A lo largo del periodo analizado, la energía generada cambió de 10,010 millones de GJ a 7,701 millones de GJ en 2019. Hasta 2018, la generación de electricidad, incluyendo diversas tecnologías, fue la principal fuente de transformación. Sin embargo, en 2019, el procesamiento de gas natural se convirtió en la principal fuente de transformación energética.

Tabla 5. Capacidad de Transformación en GJ. Fuentes: [16] [13] [14] [15]

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Generación de electricidad	1,085	1,114	1,150	1,185	1,129	1,156
Refinación	2,661	2,379	2,085	1,714	1,367	1,323
Gas natural	2,079	2,037	1,780	1,518	1,279	1,466
Minería de carbón	428	352	401	374	198	165
Total	10,011	9,805	9,525	8,770	7,950	7,701

Metodología

Para alcanzar el objetivo de esta investigación se debe replicar los escenarios prospectivos presentados por la Transición Energética Soberana, tanto en su propuesta inicial (TES) como en su escenario de demanda deseable (TES 2.0), para compararlos con la línea base (BAU) Elaborada POR nosotros. Para ello, se emplea la plataforma Low Emissions Analysis Platform (LEAP), un sistema de software desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, ampliamente utilizado para la planificación integrada de energía, la evaluación de políticas energéticas y la formulación de estrategias de mitigación del cambio climático y reducción de la contaminación del aire [17].

Para la construcción de los escenarios, se considera un periodo retrospectivo de seis años (2014-2019), seguido de una proyección futura. En esta proyección, la evolución de la demanda y la generación de energía están sujetas al crecimiento económico, demográfico y, en este análisis específico, a la delimitación establecida mediante la intensidad energética obtenida de la Estrategia de Transición [3]. Esta delimitación se basa en la lectura de gráficos y datos proporcionados, los cuales, debido a la calidad de la información, requirieron un proceso de extracción mediante un software especializado en la lectura de gráficos e imágenes (WebPlotDigitizer 4.7), para obtener los datos de demanda más cercanos a los

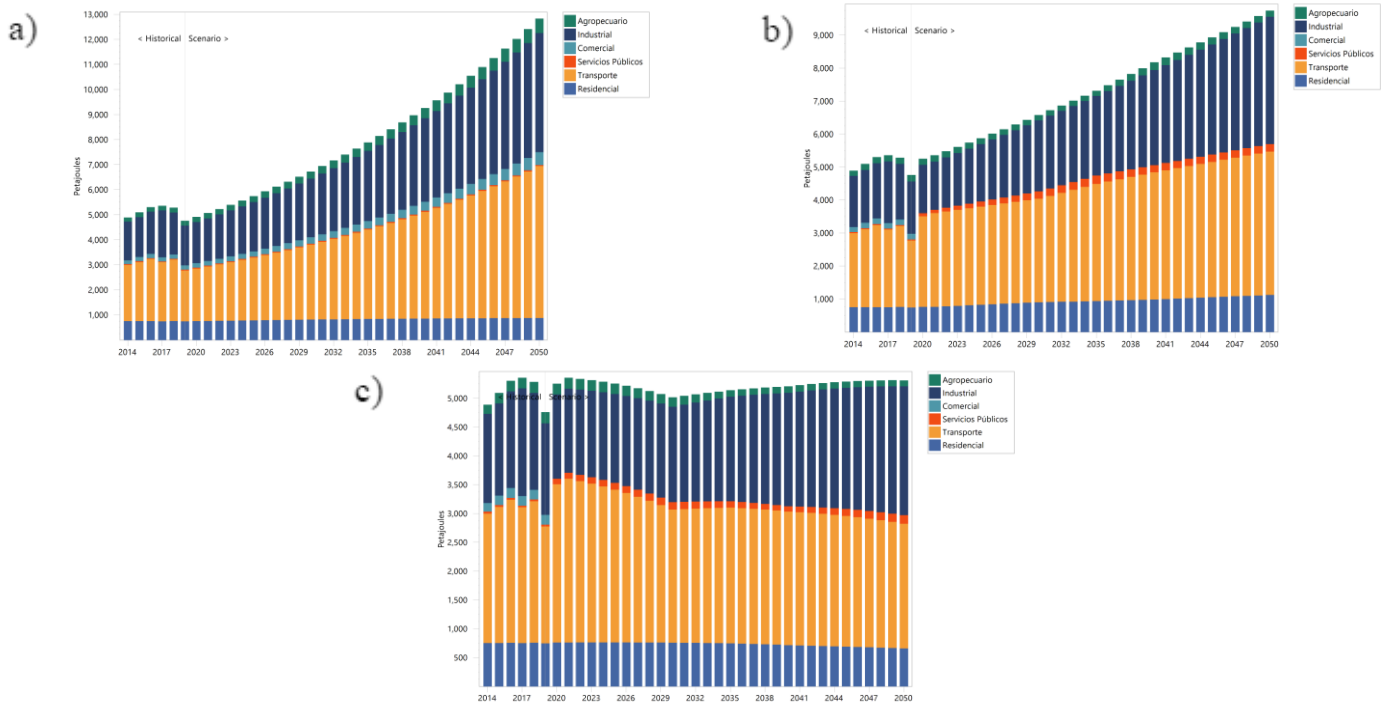
representados.

Una vez determinada la demanda hasta 2050, se calcula la intensidad energética, un indicador que mide la cantidad de energía consumida por unidad de producto interno bruto (PIB)[18]. Para ello, es necesario conocer el PIB durante todo el periodo prospectivo, lo que implicó una revisión exhaustiva de literatura y datos estadísticos [19][20][21][22]. Tras un análisis comparativo se concluyó que un crecimiento del 2.5% es una tasa aceptable y realista para el rendimiento económico que se espera en México, pues coincide con las proyecciones de la OCDE, la CEPAL y el BBVA

Para determinar la intensidad en los sectores de servicios y residencial, se utilizó el índice de crecimiento poblacional y el número de personas por vivienda, datos reportados por la CONAPO [8][9]. Se estima que, en 2050, la población de México alcanzará los 148.1 millones de personas, con un promedio de 3.2 habitantes por vivienda.

Resultados y discusión

Los resultados del ejercicio prospectivo muestran la evolución de la demanda en los tres escenarios. En el escenario BAU, la demanda alcanza los 12,823 PJ, mientras que en el escenario TES aumenta hasta los 9,744 PJ. Por otro lado, se observa una significativa reducción en la demanda en el escenario TES 2.0, que solo consume 5,312 PJ (Gráfica 1.). En todos los escenarios, se mantiene la tendencia histórica recopilada, donde el sector transporte es el mayor demandante de energía, seguido del sector industrial.

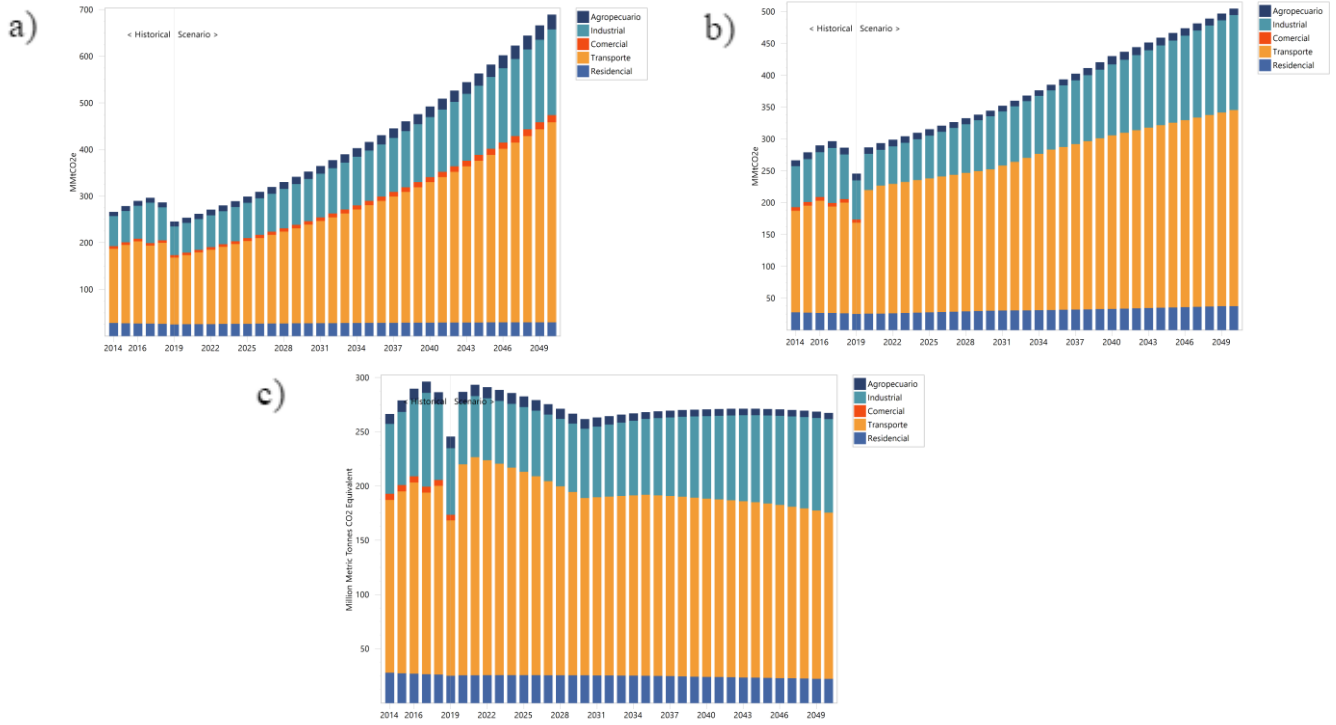


Gráfica 1. Demanda final de energía por sector. a) BAU, b) TES, c) TES 2.0

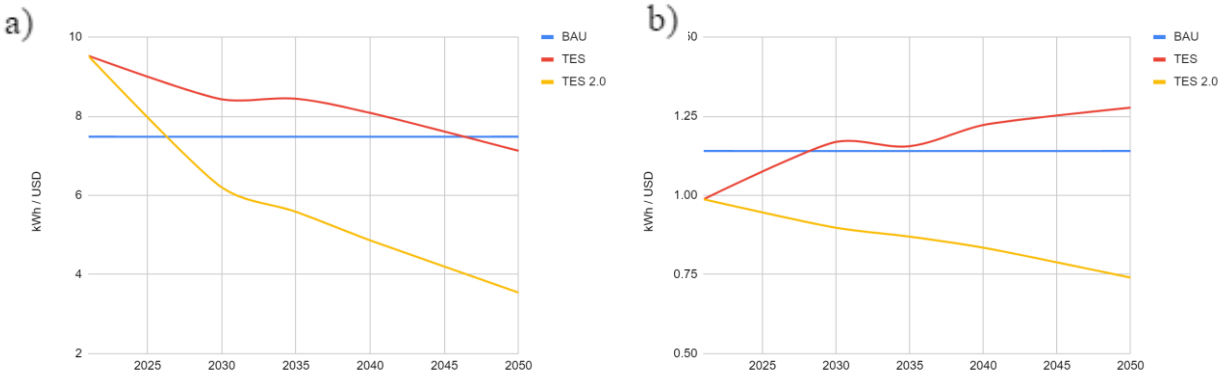
En cuanto a las emisiones, se refleja un comportamiento similar al del consumo de energía, ya que estos dos sectores representan un porcentaje significativo de las emisiones generadas (Gráfica 2). Al analizar los tres escenarios, se observa una disminución en las emisiones, con una reducción del 27.4% en 2050 en el escenario TES en comparación con el BAU, y una reducción del 61.6% en el TES 2.0.

Al analizar la evolución de los tres escenarios, se observa una notable reducción en el consumo de energía y, en consecuencia, en las emisiones, especialmente en el escenario TES 2.0. Esto plantea la pregunta de ¿Cómo lograr tal reducción? La construcción de los escenarios permite realizar análisis comparativos que facilitan la identificación de las estrategias implementadas. Tal como se muestra en la Gráfica 3, se evidencia una significativa diferencia en las intensidades energéticas entre los escenarios, siendo la más baja la del TES 2.0.

El escenario TES 2.0, muestra una reducción del 52.6% en la intensidad energética del sector transporte y del 11.6% en el sector industrial en comparación con el escenario TES. Este análisis sugiere que en el escenario TES 2.0 podría lograrse con un fuerte desacoplamiento entre el crecimiento económico y el consumo de energía, impulsado por un aumento en la eficiencia energética. Sin embargo, es importante considerar que alcanzar estos niveles de eficiencia requeriría no solo mejoras tecnológicas sustanciales, sino también políticas de apoyo, inversión en infraestructura y cambios en los patrones de consumo y producción de energía.



Gráfica 2. Emisiones generadas por la demanda de energía en México. a) BAU, b) TES c) TES 2.0



Gráfica 3. Intensidades energéticas por escenario. a) sector transporte, b) sector industria

Conclusiones

Los resultados obtenidos proyectan la demanda energética, la transformación de energía y las emisiones de GEI asociadas a dichas actividades al 2050. Al comparar estos resultados con los escenarios de la Transición Energética Soberana, se evidenció que la demanda energética de México podría alcanzar valores que superan significativamente las metas de reducción de emisiones planteadas, alcanzando 5,312 PJ en el escenario más ambicioso de TES 2.0. Esto sugiere un crecimiento moderado en la demanda energética total, pero una significativa reducción en las emisiones al aplicar medidas de eficiencia energética y la adopción de tecnologías más limpias

Agradecimientos

Las personas autoras desean expresar su agradecimiento a la UNAM, proyecto PAPIIT IN111623 “Validación de metodología para integración y actualización de escenarios energéticos para México al 2050”, por los recursos otorgados para el desarrollo de este trabajo.

Al Stockholm Environment Institute por las licencias académicas brindadas para acceder al software Low Emissions Analysis Platform

(LEAP).

REFERENCIA:

[1] Diario Oficial de la Federación. (2015, diciembre 24). Decreto por el que se expide la Ley de Transición Energética. Retrieved 2024, from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421295&fecha=24/12/2015#gsc.tab=0
[2] Diario Oficial de la Federación. (2020, febrero 7). Acuerdo por el que se aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios. Retrieved 2024, from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020#gsc.tab=0
[3] Diario Oficial de la Federación. (2024, enero 23). Acuerdo por el que se aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios. Retrieved 2024, from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5714865&fecha=23/01/2024#gsc.tab=0
[4] United Nations. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. United Nations. Retrieved 2024, from, https://sdgs.un.org/2030agenda#:~:text=We%20resolve%2C%20between%20now%20and,protection%20of%20the%20planet%20and
[5] INEGI. (2021). Producto Interno Bruto (PIB). Cuéntame de México: Economía. Retrieved 2023. Retrieved 2023. https://cuentame.inegi.org.mx/economia/pib.aspx?tema=e
[6] INEGI. (2018). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Fuentes y metodologías. Año base 2013. INEGI. Retrieved 2023,. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/pibact/2013/metodologias/METODOLOGIA_CBYSB2013.pdf
[7] Partida Bush, V. (2008). Proyecciones de los hogares y las viviendas de México y de las entidades federativas, 2005-2050. CONAPO. Retrieved 2024, from http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/hogares_viviendas/hogares.pdf
[8] CONAPO. (2022). Población a inicio de año. Para la República Mexicana el periodo es de 1950-2050. Gobierno de México. Retrieved 2023, from https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050/resource/5b2622ac-9c38-4458-bd33-cdad8fad7c4c
[9] SENER. (2021). Balance Nacional de Energía 2020. Gobierno de México. Retrieved 2023, from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf
[10] Jiang, P., Fan, Y. V., & Klemeš, J. J. (2021). Impacts of COVID-19 on energy demand and consumption: Challenges, lessons and emerging opportunities. Applied energy, 285, 116441. From https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116441
[11] INEGI. (2023, 26 de mayo). Producto Interno Bruto (PIB) - Trimestral. Base 2013. Retrieved 2023, from https://www.inegi.org.mx/programas/pib/2013/
[12] PEMEX. (2020). Sistema de Información Energética. Sistema de Información Energética. Retrieved 2023, from https://sie.energia.gob.mx/
[13] SENER. (2021). Balance Nacional de Energía 2020. Gobierno de México. Retrieved 2023, from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf
[14] Servicio Geológico Mexicano. (2018). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2017. Gobierno de México. Retrieved 2023, from http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2017_Edicion_2018.pdf
[15] Secretaría de Energía. (2022). Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021-2035. Gobierno de México. Retrieved 2023, from https://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-276178
[16] Heaps, C.G. (2022). LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.101] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. from https://leap.sei.org
[17] Ang, B. W., & Zhang, F. Q. (2000). A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. Energy, 25(12), 1149-1176. doi:10.1016/S0360-5442(00)00039-6. Retrieved 2023, form https://sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544200000396
[18] BBVA Research. (2024). Situación México marzo 2024. Retrieved 2024, from https://www.bbvaresearch.com/publicaciones/situacion-mexico-marzo-2024/
[19] Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP). (2024). Documento de análisis económico 015/2024. Retrieved 2024, from https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2024/cefp0152024.pdf
[20] Fondo Monetario Internacional (FMI). (2024). World Economic Outlook, April 2024. Retrieved 2024, from https://www.imf.org/es/Publications/WEO/Issues/2024/04/16/world-economic-outlook-april-2024
[21] Factores determinantes del crecimiento económico en México: un enfoque a través de modelos de cambio de régimen. (2019). Contaduría y Administración. Retrieved 2024, from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252019000100009

Destilación y Desinfección solar/Tecnología y Sistemas Fotovoltaicos

ID	TÍTULO	PONENTE
16200	Análisis por termografía de un reactor solar hidrotérmico.	Heidi Isabel Villafan
16130	Estudio comparativo de la disponibilidad de energía solar e índice UV en Tepic, Nayarit; con mediciones de una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 y de la Red Solarimétrica Mexicana.	Fabian Andrés González
16184	Uso de nanopartículas de oro en el crecimiento de nitruro de indio galio para mejorar la fotoactividad y el rendimiento eléctrico de las uniones p-n	Gerardo Valenzuela Hernández
16106	Análisis del efecto de enfriamiento en el condensador de un destilador solar de doble vertiente.	Sandra Chávez Sánchez

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS POR TERMOGRAFÍA DE UN REACTOR SOLAR HIDROTÉRMICO

Argelia Balbuena Ortega, Camilo A. Arancibia Bulnes y Heidi Isabel Villafán Vidales
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México, **abalbuena@ier.unam.mx, hivv@ier.unam.mx.**

Carlos E. Arreola Ramos
CONAHCYT, Centro de Investigación en Óptica, Prolongación Constitución 607, Aguascalientes, 20200, Aguascalientes, México, **cearr@ier.unam.mx**.

Dante Andree López Canales
Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad, Cuernavaca, 62209, Morelos, México.

RESUMEN

Los procesos hidrotérmicos son métodos atractivos para la conversión de biomasa en productos de valor agregado. Dada su importancia, hoy en día diversos esfuerzos de investigación se están enfocando en buscar estrategias que promuevan la sustentabilidad del proceso y una de las opciones, es el uso de la energía solar concentrada como fuente de calor del proceso. En el desarrollo de reactores solares hidrotérmicos es crucial conocer la distribución de temperaturas, ya que los gradientes térmicos disminuyen la vida útil del material de los reactores e impactan las reacciones químicas del proceso. Este estudio presenta una investigación experimental de la distribución de temperaturas en un prototipo de reactor solar hidrotérmico. Para realizar este estudio se utiliza la termografía infrarroja. Los principales resultados muestran que la zona en donde incide la energía solar concentrada alcanza mayores temperaturas (de hasta 280 °C) que la parte trasera del reactor (temperaturas de hasta 200 °C). Estas diferencias de temperaturas tienen un impacto importante en las reacciones hidrotérmicas y en el rendimiento de los productos. Esta investigación proporciona avances en la comprensión fundamental de la dinámica de la temperatura en reactores solares hidrotérmicos y proporciona información simple de adquirir, pero valiosa que permite optimizar su funcionamiento.

ABSTRACT

Hydrothermal processes are attractive methods for the biomass transformation into valuable products. Nowadays, research efforts are looking for different strategies to promote the sustainability of the process, and one of these options comprises the use of concentrated solar energy as heat of the process. In the development of solar hydrothermal reactors is crucial to determine the temperature distribution since the thermal gradients reduce the lifetime of reactor's materials and impact the chemical reaction of the process. This work presents an experimental analysis of the temperature distribution in a solar hydrothermal reactor prototype. To perform this analysis, authors use infrared thermography. The main results show that the zone where concentrated solar energy impinges reaches higher temperatures (up to 280 °C) than the rear part of the reactor (up to 200 °C). These temperature differences have an important influence on the hydrothermal reactions and the yield of main products . This research provides advances in the understanding of the dynamic temperature in solar hydrothermal reactors and gives simple but valuable information that can be used in the optimization of the solar reactor performance.

Palabras claves: Procesos termoquímicos solares, concentración solar, procesos hidrotérmicos solares, horno solar, termografía

INTRODUCCIÓN

Las diferentes rutas termoquímicas para transformar la biomasa en combustibles son opciones atractivas para reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles, aportando beneficios económicos y ambientales. Dentro de las diferentes rutas se encuentra la licuefacción hidrotérmica. Este proceso se utiliza para biomasas con un alto porcentaje de humedad y se realiza en un intervalo de operación de 200-350 ºC y 50-200 bar. Estudios previos (Gasafi et al. 2008) indican que uno de los grandes inconvenientes de la licuefacción hidrotérmica son los altos costos de operación en la etapa de calentamiento, los cuales representan alrededor del 22% de los costos totales de operación de una planta. Para mitigar lo anterior, varios grupos de investigación han propuesto reactores capaces de operar con energía solar concentrada en condiciones subcríticas (Ayala-Cortés et al. 2022, Poravou et al. 2022, Ischia et al. 2020). Este tipo de reactores normalmente consisten en receptores cilíndricos de paredes gruesas ya que deben soportar altas presiones y temperaturas. Sin embargo, al colocarlos en el foco de un sistema de concentración puntual sólo una zona del reactor es irradiada directamente con energía solar concentrada. Esta forma de calentamiento, junto con el espesor de pared, promueven un calentamiento no homogéneo con altos gradientes térmicos en el reactor que reducen la estabilidad de los materiales y su vida útil (Venkataraman et al. 2019). Los gradientes térmicos también impactan en los rendimientos de los diferentes productos, ya que la cinética de la reacción depende de la temperatura y la composición de la biomasa (Obeid et al. 2022). Por lo tanto, es importante conocer la distribución de temperaturas en este tipo de reactores solares con el fin de proponer sistemas o estrategias que permitan obtener temperaturas más homogéneas.

Este trabajo realiza un análisis de la distribución de temperaturas de un prototipo de reactor solar hidrotérmico utilizando termografía infrarroja. Los experimentos se llevaron a cabo con un prototipo de reactor solar hidrotérmico de 104 ml de capacidad, el cual fue diseñado para operar a temperaturas menores a 500 ºC y presiones de hasta 220 bar. Los principales resultados indican que la pared frontal tiene una mayor temperatura, y es particularmente diferente en la zona donde incide la energía solar concentrada, mientras que la pared trasera tiene temperaturas menores con diferencias de temperaturas menores a 30 ºC. Esta investigación proporciona avances en la comprensión fundamental de la dinámica de la temperatura en reactores solares hidrotérmicos y proporciona información simple de adquirir, pero valiosa, que permite optimizar su funcionamiento.

METODOLOGÍA

Los experimentos se llevaron a cabo en el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del Instituto de Energías Renovables, UNAM (Temixco, Morelos, México). La caracterización reciente de este horno solar indican que el sistema tiene una potencia de 16 kWt, 10,860 kW/m^2 de flujo solar pico y un spot solar de 9 cm de diámetro (22-42 %) (Hernández Figueroa, 2024). El prototipo de reactor solar hidrotérmico utilizado en las pruebas tiene una capacidad de 104 ml, un diámetro interno de 3 cm y exterior de 6 cm.

Este reactor fue diseñado para operar a temperaturas menores a 500 ºC y presiones de hasta 220 bar. La pared exterior del reactor fue recubierta con pintura selectiva Solkote Hi/Sorb, que tiene una emisividad de 0.95.

La medición de temperaturas de la pared del reactor solar se realizó in-situ en el horno solar utilizando una cámara termográfica FLIR T300 con un intervalo de medición de 0.7 y 1.3 m, de -20 a 120 ºC o de 0 a 350 ºC y con una resolución de 0.2 ºC. Para tener una mejor medición de temperaturas, el reactor se dividió en 3 secciones (Zona A, Zona B y Zona C), tanto la parte frontal como la parte trasera (Fig. 1). Se realizaron 6 mediciones cada 10 minutos en cada una de las zonas asegurándose que la temperatura inicial fuera la misma. Una vez obtenidas las imágenes se analizaron con el software ResearchIR 4.

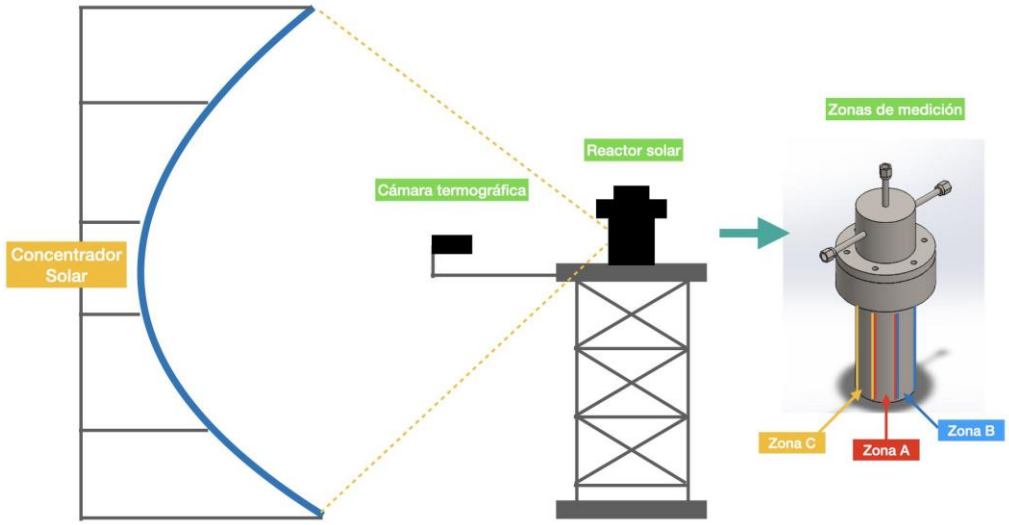


Figura 1. Esquema de la medición de temperaturas por termografía en el horno solar del IER.

En el procesamiento de las imágenes se colocaron 2 indicadores o ROI (Región de Interés) que dan el valor de la temperatura de la pared del reactor en esa zona específica. Esta información es útil para un análisis posterior. Los indicadores se denominaron como L1 y L2 y se ubican de la siguiente manera: L1 a 2 cm de la base del reactor y L2 a 4 cm de la base del reactor como se muestra en la Figura 2 del lado derecho.

Las figuras del lado izquierdo de la Fig. 2 muestran la distribución de temperaturas del reactor obtenidas al inicio del experimento (0 min), y 60 minutos después de iniciado el experimento.

Es importante mencionar que las temperaturas que alcanza el reactor solar hidrotérmico dependen directamente de la irradiancia solar directa (DNI, por sus siglas en inglés), por lo tanto es importante tomar en cuenta este parámetro al momento de procesar los resultados obtenidos por termografía. Para ello, durante las pruebas experimentales se midió continuamente la irradiancia solar directa con un pirheliómetro Eppley. Los valores de temperatura equivalentes o finales (Tf) se obtuvieron utilizando un factor de normalización que permite comparar las mediciones de diferentes días. Los factores de normalización utilizados fueron los siguientes:

f=Rb/Rm (1)
Tf=fTm (2)

Donde f es el factor de normalización, Rb es la DNI base, sobre la cual se van a comparar las mediciones de DNI de otros días, Rm es la DNI de otra medición (en un día diferente o diferente hora). Si los días y factores climatológicos son similares, la radiación será similar entonces el factor de normalización f es casi 1. Tf es la temperatura final, y Tm es la temperatura medida con la cámara termográfica.

RESULTADOS

Las Figuras 2 y 3 muestran las distribuciones de temperaturas en la cara frontal del reactor en las dos líneas de medición, L1 y L2, respectivamente. En ambas gráficas se aprecia el aumento gradual de la temperatura de la cara frontal del reactor a lo largo del tiempo (10, 20, 30, 40, 50 y 60 min). A los 10 minutos de calentamiento, la pared frontal del reactor alcanza una temperatura máxima de 170 ºC justo en la zona de mayor concentración solar (spot solar), mientras que las zonas más alejadas alcanzan una temperatura de 140 ºC.

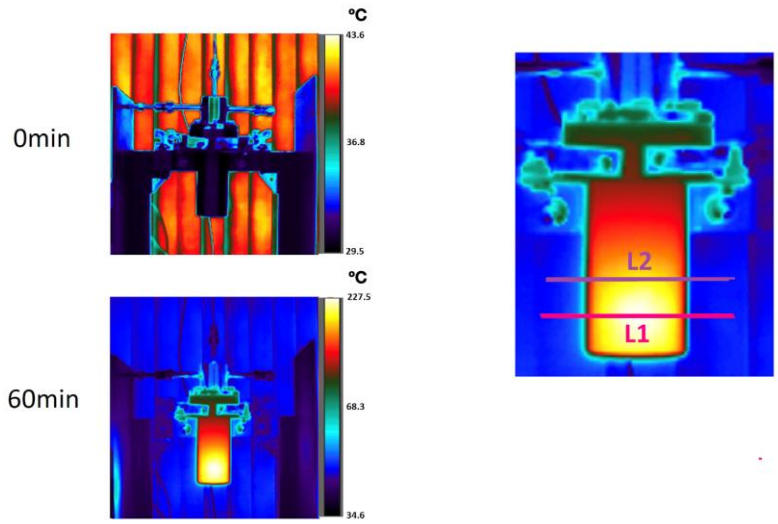


Figura 2. Izquierda: Distribución de temperaturas en la pared frontal del reactor solar al inicio del experimento (0 min) y al final del experimento (60 min). Derecha: Ubicación de indicadores L1 y L2

Conforme pasa el tiempo, el reactor se va calentando y la zona cercana al spot solar alcanza una mayor temperatura, mientras que las zonas más alejadas (los extremos del reactor) se van calentando más lentamente. Lo anterior incrementa la diferencia de temperaturas, por ejemplo a los 40 minutos (línea M4 de la Figura 3), la zona central del reactor solar que ya alcanzó los 250 ºC, mientras que los extremos tienen temperaturas de 200 ºC aproximadamente. A los 60 minutos se puede observar que la diferencia de temperaturas entre la zona central del reactor y las orillas del reactor es de 60 ºC.

En el caso de la medición en el indicador L2 (Figura 3), las diferencias de temperaturas entre la zona central y las orillas del reactor no son tan altas. En este caso se tienen diferencias de temperaturas promedio de alrededor de los 30 ºC. A los 10 minutos de calentamiento se aprecia una mayor diferencia de temperaturas entre estas dos zonas, sin embargo conforme pasa el tiempo, los perfiles de temperatura tienden a aplanarse con el tiempo, fenómeno atribuible a la difusión térmica.

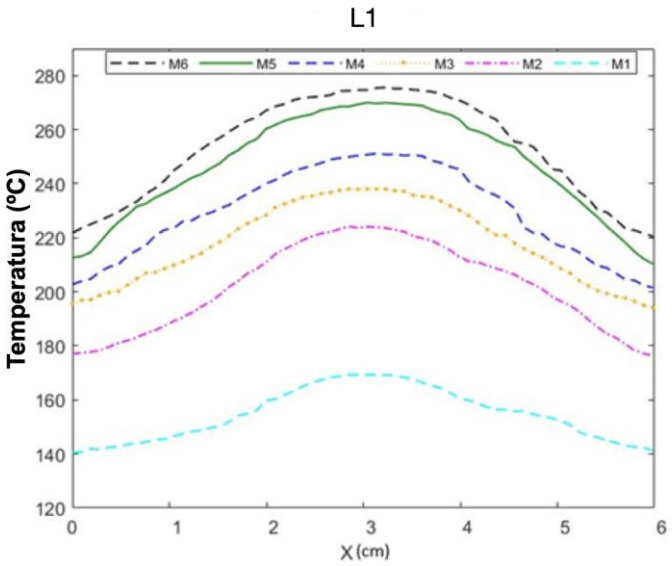
En el caso de la parte posterior del reactor, es decir, la zona no irradiada directamente con energía solar concentrada, se puede observar, de manera general, que las temperaturas máximas alcanzadas son menores a las frontales. La figura 4 presenta los resultados correspondientes a esta zona en los dos indicadores L1 y L2. En el indicador L1, al terminar el experimento (a los 60 min) la temperatura máxima es cercana a los 220 °C, mientras que las menores son cercanas a los 200 °C. En el caso del indicador L2, la temperatura máxima es de 215 ºC, aproximadamente, y la mínima 180 ºC.

En esta zona del reactor se puede apreciar que, a diferencia de la cara frontal, las disparidades de temperatura entre los extremos y el centro son menos pronunciadas, con diferencias de temperatura de aproximadamente 20 ºC. Estos resultados nos indican que en la parte trasera del reactor hay una distribución térmica más homogénea, lo cual se debe a que esta zona del reactor se calienta, principalmente, por

conducción, mientras que en la cara frontal se calienta por radiación.

Adicionalmente se obtuvo el perfil de temperaturas en todo el diámetro del reactor y a los 30 minutos de calentamiento. Como se puede apreciar en la Figura 5, la zona frontal donde incide la energía solar concentrada es la que alcanza la mayor temperatura, mientras que la cara trasera es la que tiene una menor temperatura. La diferencia que hay entre ambas caras (frontal y trasera) es de 60 y 70 ºC, aproximadamente.

Los resultados obtenidos anteriormente nos indican que la cara frontal del reactor siempre tendrá una mayor temperatura y que las diferencias de temperatura máximas entre una zona y otra son de 70 ºC. Es importante mencionar que en el proceso hidrotérmico de biomasa estas diferencias de temperaturas impactan fuertemente en los rendimientos de los productos y posiblemente en las características físicas y químicas de los productos. Estudios cinéticos realizados por Obeid et al. 2022 indican que el proceso hidrotérmico de biomasa lignocelulósica se realiza en temperaturas que van desde los 250 ºC hasta los 350 ºC y que el mecanismo de reacción tiene al menos 17 rutas diferentes que dependen de la temperatura, tiempo de reacción y composición de la biomasa, i.e. Carbohidratos, lípidos, proteína y lignina. Estudios teóricos realizados para madera de pino, siguiendo el mecanismo propuesto por Obeid y colaboradores, (Naravez-Saucedo et al.2022) muestran que a 250 ºC y 15 minutos de tiempo de reacción se obtiene un rendimiento de biocrudo de aproximadamente el 10 %. Si la temperatura del reactor alcanza los 300 ºC, es decir, solo incrementa 50 ºC, y tenemos el mismo tiempo de reacción, entonces el rendimiento del biocrudo incrementa un 30%. Como se puede observar, el rendimiento se ve altamente afectado por diferencias de temperaturas de 50 ºC. En el caso del reactor solar las diferencias de temperaturas van desde los 20 ºC hasta los 80 ºC, por lo tanto es necesario proponer estrategias que permitan disminuir esos gradientes de temperaturas. Una de las opciones a analizar es el uso de un espejo concentrador secundario que permita que la parte trasera del reactor reciba radiación solar concentrada y se obtengan mayores temperaturas.



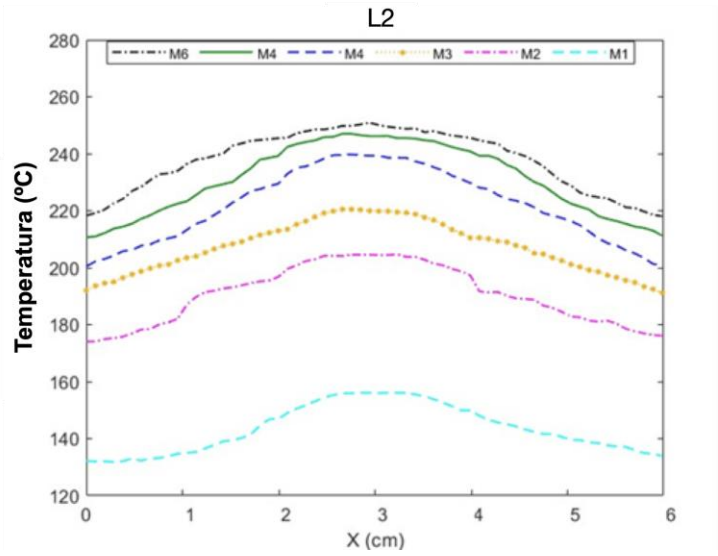
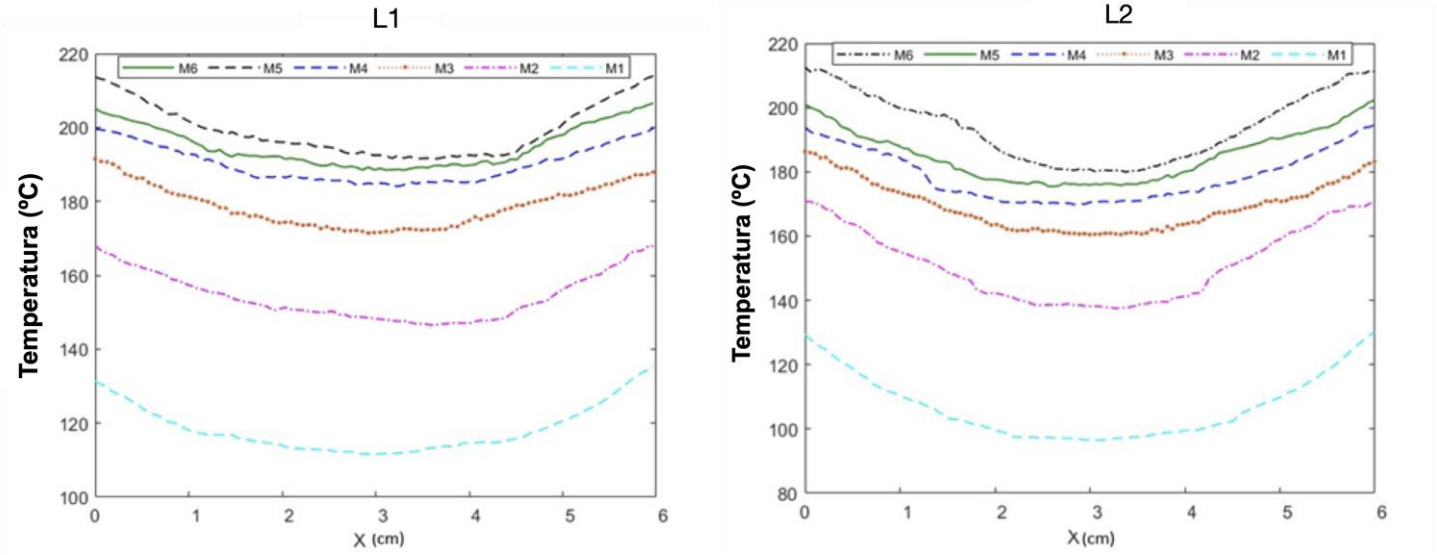


Figura 3. Distribución de temperaturas para la zona frontal del reactor en el indicador L1 para los diferentes tiempos de medición: M1= 10 min, M2=20 min, M3=30 min, M4= 40 min, M5=50 min y M6=60 min.

Figura 4. Distribución de temperaturas para la zona trasera del reactor en los indicadores L1 y L2 para los diferentes tiempos de



medición: M1= 10 min, M2=20 min, M3=30 min, M4= 40 min, M5=50 min y M6=60 min.

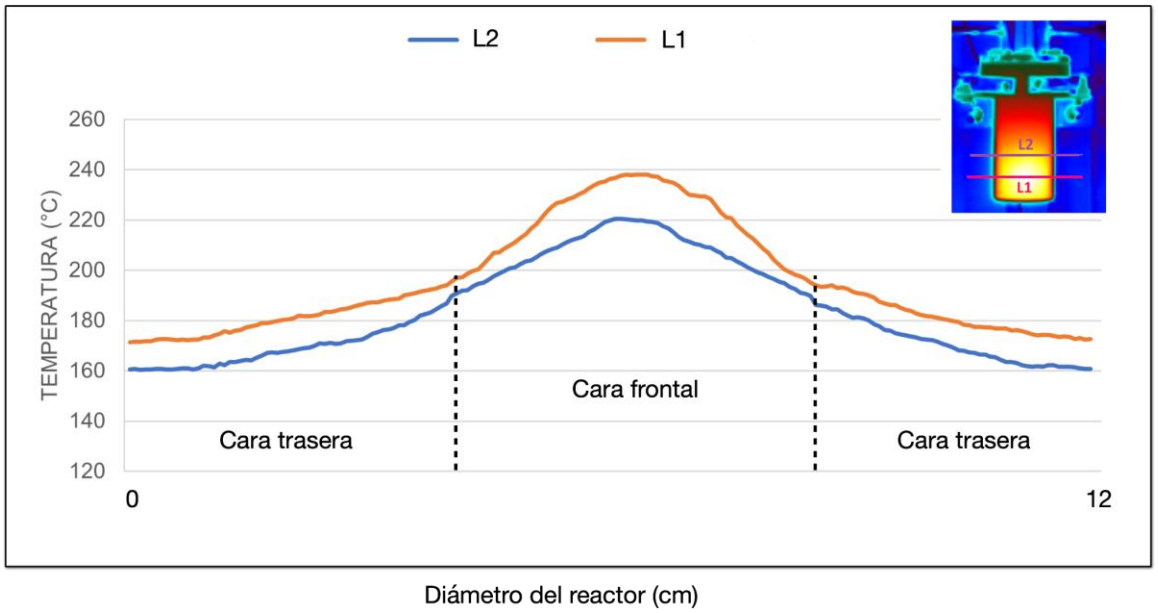


Figura 5. Perfil de temperaturas en todo el diámetro del reactor en las posiciones señaladas por los indicadores L1 y L2, a los 30 minutos de calentamiento.

CONCLUSIONES

Los resultados de la distribución de temperaturas en ambas zonas del reactor solar hidrotérmico (cara frontal y trasera) revelan patrones significativos y que impactan en las reacciones químicas del proceso. La zona que es irradiada directamente con energía solar concentrada tiene un aumento gradual de la temperatura máxima a lo largo del tiempo, sin embargo existe una disparidad notable entre la zona central del reactor y la más pegada a los extremos. Esta disparidad tiende a aplanarse ligeramente con el transcurso del tiempo debido a la difusión térmica, sin embargo la zona donde incide la energía solar concentrada es la que alcanza mayores temperaturas. Por otro lado, en la parte posterior del reactor, las diferencias de temperatura entre los extremos y el centro son menos marcadas. Lo anterior nos indica que en esa región hay una distribución térmica más homogénea. La distribución de temperaturas en todo el diámetro del reactor muestra que las diferencias de temperaturas entre la cara frontal y trasera alcanzan los 70 ºC a los 30 minutos de calentamiento. Estas diferencias de temperaturas son significativas para el proceso hidrotérmico debido a que los rendimientos a productos dependen fuertemente de las temperaturas y generan puntos de estrés térmico que se acentúan con las altas presiones disminuyendo la vida útil del reactor solar. En este sentido es importante proponer estrategias de homogeneización de temperaturas que permitan optimizar su rendimiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM, IN107923 “Licuefacción hidrotérmica solar de biomasa residual”. A. Balbuena agradece el apoyo otorgado por CONAHCYT dentro del programa “Investigadores por México” y López-Canales D.A. la beca otorgada por el proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM, IN107923.

REFERENCIAS

Hernández Figueroa E. (2024). Sistema de evaluación rápida de flujo solar concentrado por enfriamiento de aire. Tesis de licenciatura. Instituto de Energías Renovables, UNAM.

Gasafi E., Reinecke M.Y., Kruse A., Schebek L. (2008) Economic analysis of sewage sludge gasification in supercritical water for hydrogen production. Biomass Bioenergy 32 (2008) 1085e1096. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.02.021

Ayala-Cortés, A., Arcelus-Arrillaga, P., Millan, M., Okoye, P.U., Arancibia-Bulnes, C.A., Pacheco-Catalán, D., Villafán-Vidales, H.I (2022) Solar hydrothermal processing of agave bagasse: Insights on the effect of operational parameters. Renewable Energy, 192, 14-23. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.059.

Poravou, C.A., Tsongidis, N.I., Lekkos, C. et al. (2022) Valorization of Plastic Waste: A Lab-Scale Approach with the Aid of Solar Hydrothermal Liquefaction Technology. Waste Biomass Valorization 13, 3835–3844.https://doi.org/10.1007/s12649-022-01837-3.

Ischia, G., Orlandi, M., Fendrich, M.A., Bettonte, M., Merzari, F., Miotello, A., Fiori, L. (2020) Realization of a solar hydrothermal carbonization reactor: A zero-energy technology for waste biomass valorization. Journal of Environmental Management, 259, 110067. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110067.

Venkataraman M.B, Asselineau C.A., Rahbari A., and Pye J. (2019). Modelling of a 50 MWth on-sun reactor for SCWG of algae: Understanding the design constraints. AIP Conf. Proc. 2126(1), 180017. https://doi.org/10.1063/1.5117697.

Obeid, R., Smith, N., Lewis, D.M., Hall, T., van Eyk, P. (2022) A kinetic model for the hydrothermal liquefaction of microalgae, sewage sludge and pine wood with product characterisation of renewable crude. Chemical Engineering Journal, 428, 131228. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.13128.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA SOLAR E ÍNDICE UV EN TEPIC, NAYARIT; CON MEDICIONES DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS VANTAGE PRO 2 Y DE LA RED SOLARIMÉTRICA MEXICANA.

Fabián González, Sarah Messina, Hada Tadeo, Anthony Hernández
Unidad Especializada de Energías Renovables, Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología, Calle Tres Ciudad Industrial, Tepic, Nayarit, 63173, México, 311471631, fagr5863@gmail.com

Adriana González
Instituto de Geofísica, UNAM. Circuito de la investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio comparativo de datos de disponibilidad de recurso solar e índice UV para la ciudad de Tepic, Nayarit, México. Los datos se obtienen a partir de las mediciones de una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 que utiliza el sensor de fotodiodo 6450 para medir la irradiancia global y el 6490 para estimar el índice UV, la estación está instalada en el Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología; dichos datos son comparados con las mediciones de una estación que forma parte de la Red Solarimétrica Mexicana instalada en el Campus de la Universidad Autónoma de Nayarit, que utiliza como sensores de irradiancia global el piranómetro CMP-11 y el biómetro-radiómetro 501 para la estimación del índice UV. El objetivo es construir la correlación entre las mediciones de ambas estaciones, mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Se utilizan datos medidos correspondientes a días con cielo despejado de un año calendario, comprendido del periodo de marzo de 2023 a febrero de 2024. Los resultados de este trabajo son de utilidad para precisar la estimación de disponibilidad y variabilidad de energía solar mediante el uso de estaciones meteorológicas de superficie que son utilizadas para evaluar el desempeño energético de prototipos de secado solar en el marco del proyecto "Modelo transdisciplinar para el bienestar de las comunidades agrícolas y rurales de Nayarit a través de la incorporación de tecnologías solares, hacia la sostenibilidad", de los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (Pronaiis) en materia de Transición Energética.

ABSTRACT

This paper presents the comparative study of solar resource availability data and UV index for the city of Tepic, Nayarit, Mexico. The data are obtained from the measurements of a weather station DAVIS Vantage Pro 2 which uses the 6450 photodiode sensor to measure the global irradiance and the 6490 to estimate the UV index, the station is installed in the Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología; these data are compared with the measures of a station that is part of the Red Solarimétrica Mexicana installed at the Campus of the Universidad Autónoma de Nayarit, which uses as global radiation sensors the CMP-11 piranometer and the biometer-radiometer 501 for the estimation of the UV Index. The objective is to construct the correlation between the measurements of both stations, by calculating the Pearson Correlation Coefficient. Measured data for clear sky days of a calendar year for the period from March 2023 to February 2024 are used. The results of this work are useful to accurately estimate the availability and variability of solar energy using surface weather stations that are used to evaluate the energy performance of solar drying prototypes within the framework of the project "Modelo transdisciplinar para el bienestar de las comunidades agrícolas y rurales de Nayarit a través de la incorporación de tecnologías solares, hacia la sostenibilidad", of the National Energy Transition Research and Incidence (Pronaiis) Projects.

Palabras claves: recurso solar, índice UV, Nayarit, Red Solarimétrica Mexicana, coeficiente de correlación de Pearson

INTRODUCCIÓN

Nayarit se ubica en una zona geográfica privilegiada para el aprovechamiento de la energía solar, pues se encuentra entre las líneas de latitud 23°05' norte y 20°36' sur, se estima que la irradiación media diaria es de 5.88 kWh/m^2/día [1], superior al promedio nacional que es de 5.5 kWh/m^2/día [2], [3], lo que lo posiciona dentro de los valores más altos a nivel global. Las tecnologías para aprovechar la energía solar dependen de la radiación solar disponible en la superficie terrestre, conocer con precisión la disponibilidad del recurso solar, es crucial para planificar, diseñar y proyectar sistemas solares eficientes. Para ello, se necesitan datos confiables de irradiancia solar medidos desde la superficie. Estos parámetros son esenciales para tomar decisiones informadas sobre la selección y dimensionamiento de tecnologías solares, asegurando un uso eficiente y sostenible de la energía. Por otro lado, generar conocimiento sobre la radiación ultravioleta incidente en la superficie, puede incidir en el estudio de los diversos campos de conocimiento, como lo es la salud pública, biología, climatología, ciencias de los materiales, etc. Este trabajo presenta el estudio comparativo de datos de disponibilidad de recurso solar e índice UV para la ciudad de Tepic, Nayarit, México. Los datos se obtienen a partir de las mediciones de una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 que utiliza el sensor de fotodiodo 6450 para medir la irradiancia global y el 6490 para estimar el índice UV, la estación está instalada en el Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología; dichos datos son comparados con las mediciones de una estación que forma parte de la Red Solarimétrica Mexicana instalada en el Campus de la Universidad Autónoma de Nayarit, que utiliza como sensores de irradiancia global el piranómetro CMP-11 y el biómetro-radiómetro 501 para la estimación del índice UV. Los resultados de este trabajo son de utilidad para precisar la estimación de disponibilidad y variabilidad de energía solar mediante el uso de estaciones meteorológicas de superficie que son utilizadas para evaluar el desempeño energético de prototipos de secado solar en el marco del proyecto "Modelo transdisciplinar para el bienestar de las comunidades agrícolas y rurales de Nayarit a través de la incorporación de tecnologías solares, hacia la sostenibilidad", de los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (Pronaiis) en materia de Transición Energética.

OBJETIVO

El objetivo es construir la correlación de datos de disponibilidad de recurso solar e índice UV para la ciudad de Tepic, Nayarit, mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, a partir de las mediciones de una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2, instalada en el Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología; comparados con las mediciones de una estación que forma parte de la Red Solarimétrica Mexicana instalada en el Campus de la Universidad Autónoma de Nayarit.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio. Este trabajo se lleva a cabo en Tepic, es la capital del estado de Nayarit. Se localiza geográficamente en las coordenadas 21◦30′26” N, 104◦53′37” W, a una altitud de 926 msnm. Cuenta con un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura promedio es de 21.7◦C y tiene una precipitación anual promedio de 1,095 mm ,(INEGI, 2017).Para este trabajo, los datos se obtienen a partir de las mediciones de una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 para medir la irradiancia global y el índice UV, la estación está instalada en el Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología (CENITT), con ubicación en las coordenadas: 21°28'54.8"N 104°50'53.1"W; dichos datos son comparados con las mediciones de una estación que forma parte de la Red Solarimétrica Mexicana instalada en el Campus de la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN), con ubicación en las coordenada: 21°29'29.8"N 104°53'41.0"W. En la figura 1 se muestra la ubicación geográfica de cada uno de los sitios donde están instaladas las estaciones solarimétricas, las cuales se encuentran dentro de la región urbana del municipio de Tepic, Nayarit, con una distancia menor a 5 km entre ambas.

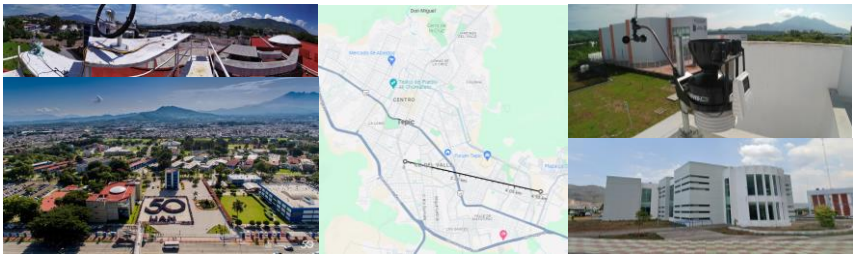


Figura 1. Izquierda: ubicación de la estación de la Red Solarimétrica Mexicana en el Campus de la UAN. Al centro: distancia entre sitios donde se encuentra instaladas las estaciones. Derecha: Ubicación de la estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 en CENITT.

Estación de la Red Solarimétrica Mexicana. El Servicio Solarimétrico Mexicano del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, conformado a partir del Observatorio de Radiación Solar y de una red especializada de estaciones solarimétricas distribuidas en todo el país (Red Solarimétrica
Mexicana), las cuales miden los parámetro de la radiación solar, incluyendo la radiación solar global en superficies planas e inclinadas, así como radiación difusa, directa, ultravioleta, infrarroja, además de variables auxiliares como temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación pluvial (UNAM, 2019).

Estación meteorológica a DAVIS Vantage Pro 2. Se trata de una estación meteorológica de calidad industrial diseñada para soportar entornos hostiles y proporcionar datos con precisión científica, su conjunto de sensores permite medir velocidad y dirección de viento, captación de lluvia, temperatura y humedad, radiación solar y ultravioleta, ofrece mediciones con una frecuencia de actualización de menos de 1 minuto, y transmisión inalámbrica de datos con una distancia de conexión de hasta 300 metros. Para datos solarimétricos, mide la porción del espectro UV que produce quemaduras solares, muestra el índice UV y la tasa de dosis (MED); su sensor de radiación solar detecta longitudes de onda de 300 a 1100 nm, muestra la energía incidente y acumulada [6].

Variables de estudio y unidades de medida. La información primaria se adquirió de las estaciones mencionadas anteriormente. Se utilizan datos medidos correspondientes a días con cielo despejado de un año calendario, comprendido del periodo de marzo de 2023 a febrero de 2024, mediante un proceso de verificación visual de series históricas y selección de datos válidos para las componentes de radiación global y UV. En la estación de la Red Solarimétrica Mexicana , para la medición de radiación global se utiliza el piranómetro CMP 11 de Kipp & Zonen, un instrumento de patrón secundario en la clasificación ISO 9060:1990, cuenta con un rango espectral de 285 a 2800 nm[7], la última calibración se realizó en 2018. Para medir la radiación UV, se utiliza el biometro-radiometro 501A, que cuenta con una respuesta espectral de 250 a 380 nm [8]. Ambos instrumentos están conectados a un sistema de adquisición de datos CR3000 de Campbell Scientific Inc, con una frecuencia de medición de 3 segundos y el almacenamiento del promedio de mediciones cada minuto [9]. En la figura 2 se ilustra el piranómetro CMP 11, el biometro 501A y el sistema de adquisición de datos CR3000; montados en la plataforma de la estación solarimétrica.



Figura 2. a) piranómetro CMP 11; b) biometro 501A; c) sistema de adquisición de datos CR3000. Instrumentos instalados en la estación de la Red Solarimétrica Mexicana en la Universidad Autónoma de Nayarit.

de las mediciones de una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 que utiliza el sensor de fotodiodo 6450 para medir la irradiancia global y el 6490 para estimar el índice UV. El sensor 6450 mide la radiación solar global, con una respuesta espectral del 400 a 1100 nm, con un rango de 0 a 1800 W/m^2 y una precisión de ±5% [10]. El sensor 6490 mide la radiación UV con una respuesta espectral del 280 a 360 nm, con un rango de índice UV de 0 a 16 y una precisión de ±5% [11]. En la figura 3 se muestran los sensores de radiación global y UV montados en la estación DAVIS Vantage Pro 2 en el CENITT en la ciudad de Tepic, Nayarit.



Figura 3. sensores de radiación global y UV montados en la estación DAVIS Vantage Pro 2 en el CENITT en la ciudad de Tepic, Nayarit.

Irradiancia Solar. Se representa mediante la irradiancia global medida en el plano horizontal, que es la potencia recibid a de Sol por unidad de área, representada con la letra **G** y con unidades en W/m^2; y la energía recibida durante un periodo definido de tiempo por cada unidad de área, se conoce como la irradiación y se representa con la letra **I** y con unidades en MJ/m^2 o en su equivalencia en kWh/ m^2, expresado mediante la ecuación 1 [12].

$$\mathbf{I} = \int \mathbf{G}\mathbf{dt} \tag{1}$$

Índice Ultra Violeta (índice UV). En este trabajo se presenta la radiación ultravioleta mediante el índice UV, con el objetivo de facilitar su comunicación y adopción, en la ecuación 2 se muestra la equivalencia entre unidades de medida utilizadas, la cual se clasifica por colores según su intensidad en: bajo (0-3)🟢 , moderado (3-6)🟡, alto (6-8)🟠, muy alto (8-11)🔴, y extremo (11-19)🟣 [13].

$$\mathbf{1\ IUV} = \mathbf{25}\frac{\mathbf{mW}}{\mathbf{m^2}} = \mathbf{0.43}\frac{\mathbf{MED}}{\mathbf{hora}} \tag{2}$$

Procesamiento de datos solarimétricos

El objetivo de este trabajo es construir la correlación entre las mediciones de ambas estaciones, mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, que es una medida ampliamente utilizada en diversas áreas del conocimiento, que, a través de la estadística, se evalúa la correlación lineal entre dos variables, las mediciones de una estación de la Red Solarimétrica Mexicana en comparación con una estación DAVIS Vantage Pro 2. El cálculo coeficiente de correlación muestral de Pearson se representa mediante la ecuación 3, donde X,Y representan el valor individual dentro de una matriz de datos, $\bar{X}$,$\bar{Y}$ representan la media aritmética del conjunto de valores dentro de la matriz de datos, mientras que S_{XY}, S_{XX}, S_{YY} corresponde a la suma de cuadrados corregidas para X,Y [14].

$$\mathbf{r_{XY}} = \frac{\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{X}-\bar{\boldsymbol{X}})(\boldsymbol{Y}-\bar{\boldsymbol{Y}})}{[\boldsymbol{\Sigma}((\boldsymbol{X}-\bar{\boldsymbol{X}})^2\boldsymbol{\Sigma}((\boldsymbol{Y}-\bar{\boldsymbol{Y}})^2]^{1/2}} = \frac{\boldsymbol{S_{XY}}}{\sqrt{\boldsymbol{S_{XX}}\boldsymbol{S_{YY}}}} \tag{3}$$

Se utilizan datos medidos correspondientes a días con cielo despejado de un año calendario, comprendido del periodo de marzo de 2023 a febrero de 2024, mediante un proceso de inspección visual, se seleccionaron 94 días completos que contaban con las condiciones propuestas para ambas estaciones: cielo despejado, continuidad en los datos; con el objetivo de tener una muestra representativa uniforme. Las series históricas de datos tiene una frecuencia de muestreo de 15 minutos, que es el parámetro que utiliza la estación DAVIS Vantage Pro 2, por lo tanto, para igualar la longitud de las matrices de datos, se calculó la media aritmética cada 15 minutos para las mediciones de la estación de la Red Solarimétrica Mexicana. Del total de la muestra se obtuvieron 8924 valores medidos por variable, de los 9024 que representan el 100% de datos sin pérdidas, por lo que se estima que la calidad de los datos de 98.9%, lo que significa una pérdida de datos de 1.1%. Para procesar la información se utilizó el sistema de gestión de bases de datos basado en MySQL de XAMPP[15], y la función PEARSON del paquete ofimático Microsoft Excel, que se basa en la ecuación 3 [16], en conjunto con la librería de Python scipy.stats utilizando la función pearsonr [17] y para la representación gráfica se utilizaron las librerías de Matplotlib de Python [18].

RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados del análisis estadístico y de correlación de Pearson que se aplicaron a las mediciones de radiación global y UV de las estaciones DAVIS Vantage Pro 2 en CENITT, que se denominará “estación CENITT” y la estación RESOLMEX en la UAN, que se denominará “estación RESOLMEX”; ambas en la Ciudad de Tepic, Nayarit, México. Los resultados se presentan en tres momentos: a) se ilustra y describe la serie histórica de datos medios, se describe su comportamiento estadístico, el cual solo ilustra la contrastación de los datos medidos de cada estación, para este trabajo son los 94 días seleccionados, los cuales no representan el comportamiento promedio durante todo el año, por último, se presentan los resultados de la correlación de Pearson.

Estadística descriptiva de datos de irradiancia global

En la figura 4 se muestra las series históricas de los datos de irradiancia global medida en el plano horizontal, los datos corresponden a los 94 días que cumplen con el criterio de selección de días despejados e íntegros, correspondiente al periodo de marzo de 2023 a febrero de 2024. Se observa con línea color negro, los datos correspondientes a la estación CENITT, y la línea color rojo corresponde a datos de la estación RESOLMEX, mediante inspección visual se percibe similitud en el eje de tiempo y con una diferencia en la amplitud representado por eje de irradiación, condición que se visualiza con mayor detalle en la figura 5, que corresponde a los datos medidos el 20 de marzo de 2023.

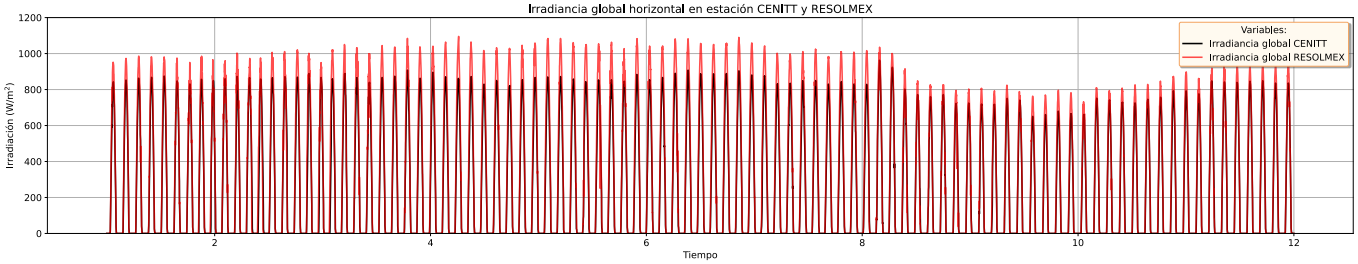


Figura 4. Series históricas de datos medidos de irradiancia global de la estación CENITT y la estación RESOLMEX en Tepic, Nayarit, México.

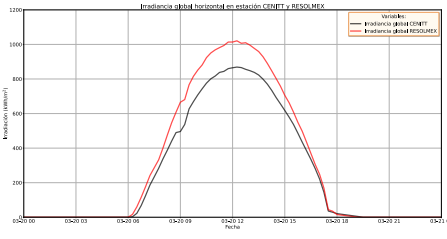


Figura 5. Comparación de valores de irradiancia global para el 20 de marzo de 2023 en Tepic, Nayarit

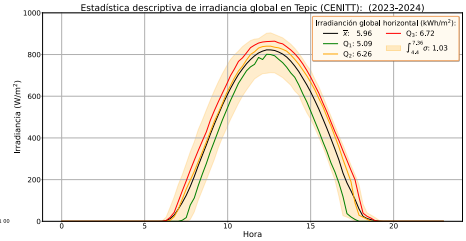


Figura 6. Descripción estadística de irradiancia e irradiación global en estación CENITT

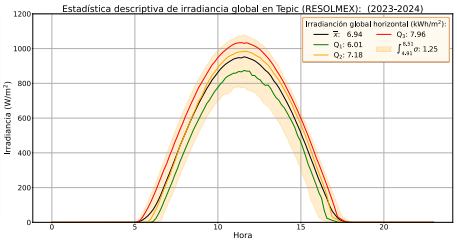


Figura 7. Descripción estadística de irradiancia e irradiación global en estación RESOLMEX

La descripción estadística de los datos medidos de irradiancia e irradiación global en la estación CENITT y RESOLMEX, permite conocer los valores estadísticos de los datos analizados, como lo son: la media, el primer cuartil (Q1), el segundo cuartil o mediana (Q2), el tercer cuartil (Q3), el percentil 95 (P95) y 5 (P5). Lo anterior permite estimar la disponibilidad y comportamiento de la energía solar medida, solo para los días seleccionados. La figura 6 muestra los resultados de la descripción estadística de los datos medidos en la estación CENITT expresados con el valor de la irradiación con unidades de kWh/m^2, la curva de la media ($\bar{X}$) es de 5.96, Q1 = 5.09, Q2 = 6.26, Q3 = 6.72, P5 = 4.4 y P95 = 7.36. En contraste, la figura 7 muestra los resultados de la descripción estadística de los datos medidos en la estación RESOLMEX expresados con el valor de la irradiación con unidades de kWh/m^2, la curva de la media ($\bar{X}$) es de 6.94, Q1 = 6.01, Q2 = 7.18, Q3 = 7.96, P5 = 4.91 y P95 = 8.51. La comparación de la descripción estadística permite construir conocimiento sobre la diferencia que existe en la magnitud registrada en el proceso de medición de la irradiancia solar por ambas estaciones, en promedio se calcula un porcentaje de error de -14.12%, es decir, que la magnitud de irradiancia global medida por la estación CENITT es en promedio 14.12% menor a la magnitud medida por la estación RESOLMEX.

Correlación de Pearson de irradiancia global

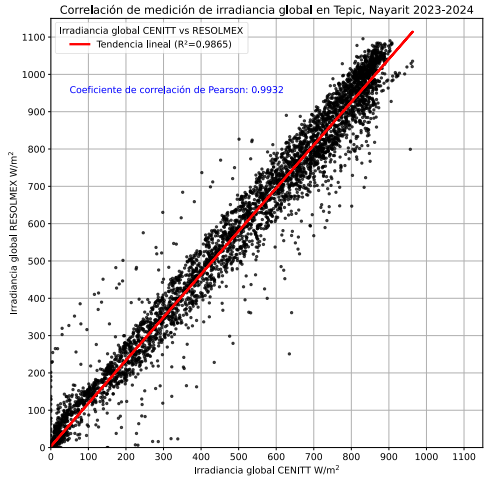


Figura 8. Gráfico de correlación de Pearson de la irradiancia global medida en las estaciones CENITT y RESOLMEX.

La figura 8 muestra el resultado del cálculo de la correlación de Pearson, mediante un gráfico de dispersión se ilustra la relación línea entre los datos medidos de irradiancia global de la estación RESOLMEX y la estación CENITT, haciendo uso de la herramienta "pearsonr" de la librería scipy.stats de Python y la función PEARSON de Microsoft Excel, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.9932, que indica una correlación positiva muy fuerte, muy cercano a 1, lo anterior significa que cuando existe un cambio (incremento o decremento) en la medición de la irradiancia solar en ambas estaciones, este cambio se refleja de manera consistente en la estación CENITT y RESOLMEX. Por lo tanto, esta correlación sugiere que las mediciones de irradiancia solar global en la Ciudad de Tepic, en diferentes sitios y con diferentes instrumentos utilizados en la estación CENITT y RESOLMEX, es muy consistente entre sí; pero lo anterior no implica que sea preciso, ya que existe un error en el cálculo de la irradiación global de 14.12%, lo cual se visualiza de manera gráfica en la dispersión que se muestra en la figura 8, donde los puntos de medición se alejan de la línea de tendencia lineal.

Estadística descriptiva de datos de índice UV

En la figura 9 se muestra las series históricas de los datos del índice UV medido en Tepic, Nayarit, México. Los datos corresponden a los 94 días que cumplen con el criterio de selección de días despejados e íntegros, correspondiente al periodo de marzo de 2023 a febrero de 2024. Se observa con línea color negro, los datos correspondientes a la estación CENITT, y la línea color violeta corresponde a datos de la estación RESOLMEX, mediante inspección visual se percibe similitud en el eje de tiempo y con una diferencia en la amplitud representado por eje del índice UV, condición que se visualiza con mayor detalle en la figura 10, que corresponde a los datos medidos el 20 de marzo de 2023.

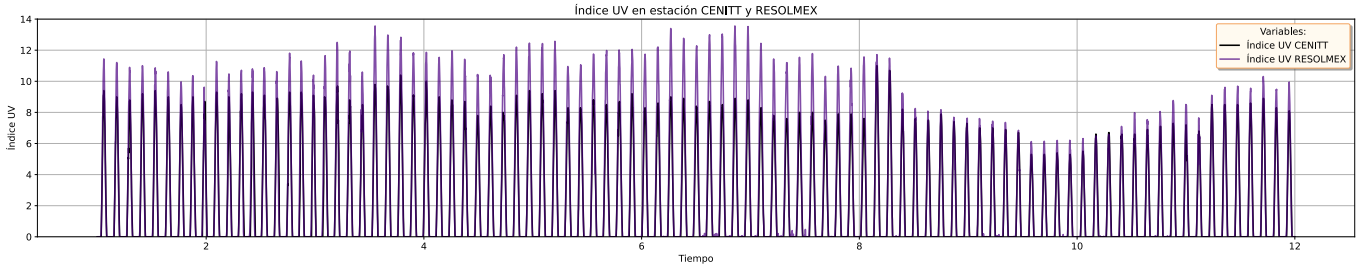


Figura 9. Series históricas de datos medidos de índice UV de la estación CENITT y la estación RESOLMEX en Tepic, Nayarit, México.

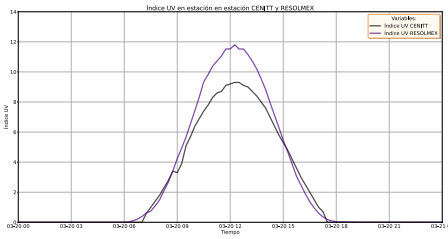


Figura 10. Comparación de valores del índice UV para el 20 de marzo de 2023 en Tepic, Nayarit.

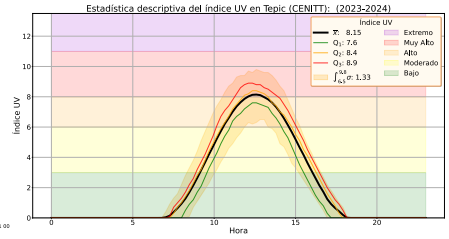


Figura 11. Descripción estadística del índice UV en estación CENITT.

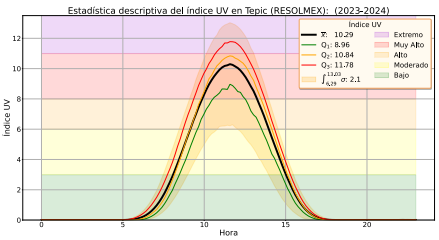


Figura 12. Descripción estadística del índice UV en estación RESOLMEX.

La figura 11 muestra los resultados de la descripción estadística de los valores máximos medidos del índice UV en la estación CENITT, la curva de la media ($\bar{X}$) es de 8.15, Q1 = 7.6, Q2 = 8.4, Q3 = 8.9, P5 = 6.5 y P95 = 9.8; la figura 12 muestra los resultados de la estación RESOLMEX, la curva de la media ($\bar{X}$) es de 10.29, Q1 = 8.96, Q2 = 10.84, Q3 = 11.78, P5 = 6.29 y P95 = 13.03. La comparación de la descripción estadística permite construir conocimiento sobre la diferencia que existe en la magnitud registrada en el proceso de medición de la del índice UV en ambas estaciones, en promedio se calcula un porcentaje de error de -20.08%, es decir, que la magnitud máxima del índice UV medida por la estación CENITT es en promedio 20.08% menor a la magnitud medida por la estación RESOLMEX.

Correlación de Pearson de índice UV

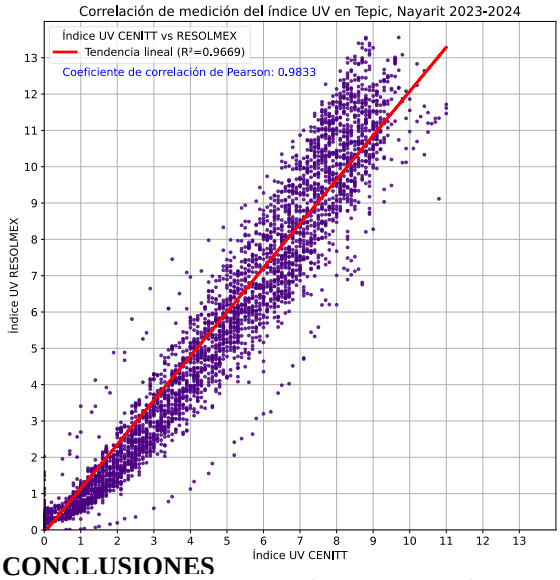


Figura 13. Gráfico de correlación de Pearson del índice UV en las estaciones CENITT y RESOLMEX.

La figura 13 muestra el resultado del cálculo de la correlación de Pearson, mediante un gráfico de dispersión se ilustra la relación línea entre los datos medidos del índice UV de la estación RESOLMEX y la estación CENITT, haciendo uso de la herramienta "pearsonr" de la librería scipy.stats de Python y la función PEARSON de Microsoft Excel, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.9833, que indica una correlación positiva muy fuerte, muy cercano a 1, lo anterior significa que cuando existe un cambio (incremento o decremento) en la medición del índice UV en ambas estaciones, este cambio se refleja de manera consistente en la estación CENITT y RESOLMEX. Por lo tanto, esta correlación sugiere que las mediciones de índice UV en la Ciudad de Tepic, en diferentes sitios y con diferentes instrumentos utilizados en la estación CENITT y RESOLMEX, es muy consistente entre sí; existe un error en el registro de la magnitud máxima del índice UV de 20.08%, lo cual se visualiza de manera gráfica en la dispersión que se muestra en la figura 13, donde los puntos de medición se alejan de la línea de tendencia lineal, e incluso llegan a formar una ligera curva, lo que sugiere que el modelo lineal no se ajusta en su totalidad a los datos, por lo que resalta más la diferencia entre magnitudes registradas por ambas estaciones.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio comparativo de datos de disponibilidad de recurso solar e índice UV para la ciudad de Tepic, Nayarit, mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, a partir de las mediciones de una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2, instalada en el Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología; comparados con las mediciones de una estación que forma parte de la Red Solarimétrica Mexicana instalada en el Campus de la Universidad Autónoma de Nayarit. A continuación se presentan las principales conclusiones.

- Las mediciones de irradiancia solar e índice UV de las estaciones CENITT y RESOLMEX en Tepic, Nayarit, muestran una alta similitud en el tiempo, aunque con diferencias en la magnitud de irradiancia e índice UV.
- La estadística descriptiva de los datos de irradiancia e índice UV revela diferencias en los valores medios y percentiles entre las dos estaciones, con la estación RESOLMEX registrando valores más altos en promedio, sobre todo en el índice UV.
- Existe un error promedio del 14.12% en las mediciones de irradiancia global entre las dos estaciones, y un error promedio de 20.08% para el índice UV, con la estación CENITT registrando valores menores.
- El coeficiente de correlación de Pearson de 0.9932 para irradiancia global y 0.9833 para el índice UV; indica una correlación positiva muy fuerte entre las mediciones de ambas estaciones, sugiriendo consistencia en las mediciones.
- Aunque las mediciones son consistentes entre las estaciones, la diferencia en magnitud sugiere que no son completamente precisas, lo cual es visualizado en la dispersión de los datos.
- Al ser el primer estudio comparativo, se recomienda continuar los trabajos de generación de conocimiento, haciendo uso de otros métodos estadísticos y variar las condiciones de selección de datos, con el fin de enriquecer y agregar certeza a los resultados expuestos en el presente trabajo.
- Es deseable realizar servicios de calibración para ambas estaciones, y utilizar la información obtenida en este trabajo y futuros análisis, para calcular una constante de calibración que permita que las mediciones sean más precisas y cercanas a un instrumento de patrón superior.

AGRADECIMIENTOS

Por todo el apoyo brindado y el permiso de hacer uso de su infraestructura: Al CONAHCYT a través del proyecto 319456 de la convocatoria 2021-2024 (FOP04-2021-03) “Proyectos nacionales de investigación e incidencia para transitar a un sistema energético social y ambientalmente sustentable”, al Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología, a la Universidad Autónoma de Nayarit y al Instituto de Geofísica de la UNAM.

REFERENCIAS

[1] F. González, “Evaluación del recurso solar en Tepic, Nayarit; mediante el análisis de las mediciones de la Red Solarimétrica Mexicana: prospectiva hacia el desarrollo sustentable,” Universidad Autónoma de Nayarit, Tepic, 2022.
[2] D. Riveros-Rosas, C. A. Arancibia-Bulnes, R. Bonifaz, M. A. Medina, R. Peón, and M. Valdes, “Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR model,” *Renew Energy*, vol. 75, pp. 21–29, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.09.013.
[3] Secretaría de Energía, “Prospectiva de Energías Renovables 2017,” 2017.
[4] INEGI, “Anuario estadístico y geográfico de Nayarit 2017,” Gobierno del estado de Nayarit. [Online]. Available: http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITXef_Docs/NAY_ANUARIO_PDF.pdf
[5] G. UNAM, “Red Solarimétrica Mexicana, parámetros de medición,” 2019. [Online]. Available: http://areas.geofisica.unam.mx/solarimetrico/parametros.html
[6] Davis Instruments, “Vantage Pro2,” https://www.davisinstruments.com/pages/vantage-pro2.
[7] KIPP&ZONEN, “CMP11 Piranómetro,” 2019. [Online]. Available: https://www.kippzonen.es/Product/210/CMP11-Piranometro#.XUz6K3ueVPZ
[8] Solar Light Company Inc, “Biómetro-radiómetro 501A,” Manual de usuario. Accessed: Jun. 05, 2020. [Online]. Available: https://solarlight.com/wp-content/uploads/501-UserManual-Spanish.pdf
[9] Campbell Scientific Inc., “CR3000 Micrologger,” Dataloggers y Sistema de Adquisición de Datos. [Online]. Available: https://www.campbellsci.es/cr3000
[10] DAVIS Instruments, “Vantage Pro2 TM Accessories Solar Radiation Sensor,” 2024. Accessed: Aug. 18, 2024. [Online]. Available: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0515/5992/3873/files/6450_SS.pdf
[11] DAVIS Instruments, “Vantage Pro2 TM Accessories UV Radiation Sensor,” 2024. Accessed: Aug. 18, 2024. [Online]. Available: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0515/5992/3873/files/6490_SS.pdf
[12] M. Ibañez Plana, J. R. Rosell Polo, and J. I. Rossel Urrutia, *Tecnología solar*. Mundi-Prensa, Madrid, España, p. 26-32, 2005.
[13] L. V. Delgado, “INDICE ULTRAVIOLETA,” 2003.
[14] H. Lalinde *et al.*, “Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones,” 2018, Accessed: Aug. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/journal/559/55963207025/55963207025.pdf
[15] Apache Friends, “XAMPP Installers and Downloads for Apache Friends,” https://www.apachefriends.org/es/index.html.
[16] Microsoft, “Función PEARSON,” https://support.microsoft.com/es-es/office/funci%C3%B3n-pearson-0c3e30fc-e5af-49c4-808a-3ef66e034c18.
[17] The SciPy community, “pearsonr — SciPy v1.14.1 Manual,” https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.pearsonr.html.
[18] The Matplotlib development team, “Matplotlib: Visualization with Python,” https://matplotlib.org/.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

USO DE NANOPARTÍCULAS DE ORO EN EL CRECIMIENTO DE NITRURO DE INDIO GALIO PARA MEJORAR LA FOTOACTIVIDAD Y EL RENDIMIENTO ELÉCTRICO DE LAS UNIONES P-N

Gerardo Valenzuela-Hernandez, Dainet Berman-Mendoza, Antonio Ramos-Carrazco y Rafael García
Departamento de Investigación en Física, Rosales y Encinas S/N, Hermosillo, Sonora, 83000, México,6441396726, **gerardo.valenzuela@unison.mx.**

Ricardo Rangel
División de Estudios de posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Gral. Francisco J. Múgica S/N, Morelia, 58030, México.
rrangel@umich.mx.

Ana V. Torres-Figueroa
Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Rosales y Encinas S/N, Hermosillo, Sonora, 83000, México, **anavaleria.torres@unison.mx**

Oscar Contreras
Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ensenada, 22860, México. **ocontreras@ens.cnyn.unam.mx.**

Luis Medina-Zazueta
Departamento de Física, Rosales y Encinas S/N, Hermosillo, Sonora, 83000, México, 83000, México**. a219230174@unison.mx**

RESUMEN

En este trabajo se analizan los resultados del crecimiento de nitruro de indio y galio (InGaN) por deposito químico en fase vapor (CVD) sobre substratos de zafiro recubiertos de nanopartículas de oro (AuNPs). Las AuNPs se formaron por dewetting en estado sólido a partir de una fina película de oro. Las muestras sobre AuNPs se compararon con una serie de películas de InGaN crecidas con el método de dos pasos. La difracción de rayos X (DRX) muestra una mayor incorporación de indio en InGaN sobre AuNPs que en las películas crecidas por el método de dos pasos. Se evidenció una reducción energética del borde de la banda de absorción mediante reflectancia difusa (DFR) y absorbancia por espectroscopia UV-vis. Se obtuvo un aumento en la densidad de corriente de 127-182 $\mu A/cm^2$ en la unión p-n basada en InGaN nucleada en oro por el efecto inducido de resonancia de plasmón superficial localizada (LSRP) y la mejora de la estabilidad de la fase de InGaN. La aplicación de sustratos recubiertos de AuNPs en el crecimiento de nitruros del grupo III puede ser una alternativa para mejorar la miscibilidad de la fase InGaN y dotarla de propiedades adecuadas para aplicaciones fotovoltaicas con el objetivo de conseguir celdas solares basadas en InGaN de alta eficiencia.

ABSTRACT

In this report, the results of the growth of indium gallium nitride (InGaN) by chemical vapor deposition (CVD) on a sapphire substrate coated with gold nanoparticles (AuNPs) are discussed. AuNPs were formed by solid-state dewetting from a thin gold film. Samples on AuNPs were compared with a series of InGaN films grown by the two-step method. X-ray diffraction (XRD) show higher indium incorporation in InGaN on AuNPs than in the films grown by the two-step method. An energetic reduction of the absorption band edge was evidenced by diffuse reflectance (DFR) and absorbance by UV-vis spectroscopy. An increase in current density of 127-182 $\mu A/cm^2$ was obtained in the gold nucleated InGaN-based p-n junction by the induced localized surface plasmon resonance (LSRP) effect and the enhancement of the phase stability of InGaN. The application of AuNPs coated substrates in the growth of group III nitrides can be an alternative to improve the miscibility of the InGaN phase and endow it with properties suitable for photovoltaic applications with the aim of achieving high efficiency InGaN-based solar cells.

Palabras claves: Dispositivos plasmónicos, nanotecnología, nitruros del grupo III.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los nitruros del grupo III han cobrado importancia en varias líneas de investigación relacionadas con la industria de dispositivos electrónicos debido a sus extraordinarias propiedades, como su alto voltaje de ruptura y su elevada movilidad de portadores, así como a la posibilidad de modificar su energía de banda prohibida directa (Eg).[1] En particular, la capacidad de sintonizar la energía de absorción y emisión mediante la aleación de nitruro de aluminio (AlN), nitruro de galio (GaN) y nitruro de indio (InN) permite ajustar la Eg de 6,4 a 0,7

eV.[2] Esto permite la posibilidad de obtener materiales adecuados para su implementación en dispositivos electrónicos desde la región ultravioleta (UV) hasta la región cercana al IR dentro del espectro electromagnético.[3] Concretamente, el nitruro de indio-galio ternario (InxGa1-xN) ha resultado bastante atractivo en la construcción de dispositivos optoelectrónicos debido a la capacidad de modificar la energía de banda prohibida (Eg) dentro de la región visible en el espectro electromagnético en función de la concentración de indio en el material (x = 0 para el GaN, x = 1 para el InN), lo que resulta favorable principalmente en el avance de tecnologías fotovoltaicas y de emisión de alta eficiencia.[4]

Recientemente se ha reportado que el InGaN es una capa activa en diodos emisores de luz (LEDs), lo que ha dado como resultado la implementación de sistemas de iluminación de alto rendimiento con una vida útil más larga y un menor consumo de energía.[5] Sin embargo, la modificación del Eg también es beneficiosa para el progreso de los dispositivos fotovoltaicos, permitiendo ajustar el espectro de absorción de la capa activa de InGaN con respecto a la radiación electromagnética del Sol. Esta característica puede aplicarse para desarrollar celdas solares que aprovechen las longitudes de onda emitidas por el Sol, lo que conduce a un aumento de la eficiencia del dispositivo fotovoltaico, un objetivo que hasta ahora sigue presente.[6] Sin embargo, en el caso concreto de los sistemas fotovoltaicos, existen dos retos principales que están directamente relacionados con la limitación del parámetro de eficiencia de las celdas solares basadas en la aleación InGaN; la miscibilidad de fase y la elevada tasa de recombinación.

Este trabajo presenta la modificación de las propiedades del semiconductor InGaN y el aumento en el rendimiento eléctrico de las uniones p-n a través del uso de AuNPs y efectos LSPR. Las muestras de InGaN depositadas sobre AuNPs se compararon con otras crecidas con el método de dos pasos implementando una película de GaN de baja temperatura (LT-GaN) como capa tampón. Se observó una mejora en la incorporación de indio para las películas de InGaN utilizando AuNPs en comparación con las películas sobre LT-GaN de acuerdo con los resultados de DRX. La adaptación de las propiedades ópticas de InGaN/AuNPs se estudió mediante espectroscopia UV-vis reflectancia difusa. El aumento de la densidad de corriente en corto circuito (J_{SC}) se consiguió implementando AuNPs como centros de nucleación en la unión p-n basada en InGaN. Adicionalmente, la reducción en la resistencia en serie y el factor de idealidad se atribuyeron al aumento de miscibilidad y a efectos LSPR producidos por las AuNPs. Mediante la metodología propuesta, se presenta una alternativa para la obtención de películas de InGaN de alta calidad para la búsqueda de dispositivos plasmónicos de alta eficiencia.

METODOLOGÍA

El método propuesto para llevar a cabo la formación de nanopartículas de oro en el presente trabajo implementa la diferencia en la energía superficial de la interfaz substrato-película metálica. Se planteó el uso c-zafiro como substrato, con el propósito de obtener la formación de las AuNPs. Los substratos utilizados para las AuNPs fueron sometidos a un proceso de limpieza previamente. Esto consiste en la sonicación del substrato en solución de acetona durante 30 minutos, para su posterior rociado con alcohol isopropílico. Los substratos se trataron térmicamente a 50 °C durante 10 minutos en una placa térmica, con el objetivo de evaporar los solventes remanentes. La Figura 1 presenta el proceso de limpieza general implementado en los substratos utilizados en este trabajo. Concluida la etapa de limpieza, el substrato fue colocado en la cámara de un sistema de deposición catódica (sputtering por su nombre en inglés), utilizado para realizar el recubrimiento con oro.

Se estableció el diseño de cuadro aleatorio para sintetizar InGaN con el estudio de los parámetros previamente analizados. La temperatura fue ajustada en base al diagrama de fases del InGaN con el propósito de reducir la probabilidad de separación de fase. La masa de la aleación Ga-In y su temperatura de formación se ajustaron a 100 mg y 600 °C, respectivamente. Para producir un flujo laminar de especies reactivas de Ga e In, se utilizaron 100 mg de NH_4Cl y una temperatura de evaporación de 250 °C. Similar a los experimentos anteriores, el substrato y los flujos de gases se mantuvieron constantes, cuyo resumen se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de experimentos de diseño cuadro aleatorio (DBCA) implementado para la síntesis de InGaN.

Etiqueta	Composición de indio	Temperatura (°C)
X02	$In_{0.050}Ga_{0.950}N$	800
X04	$In_{0.100}Ga_{0.900}N$	800
X06	$In_{0.150}Ga_{0.850}N$	650
X07	$In_{0.175}Ga_{0.825}N$	650
X08	$In_{0.200}Ga_{0.800}N$	650

Finalmente, los depósitos de InGaN crecidos sobre substratos recubiertos con nanopartículas de oro fueron comparados con películas de InGaN depositadas por el método de dos pasos, el cual implementa una capa de apoyo de GaN crecido a bajas temperaturas previo al depósito del InGaN.

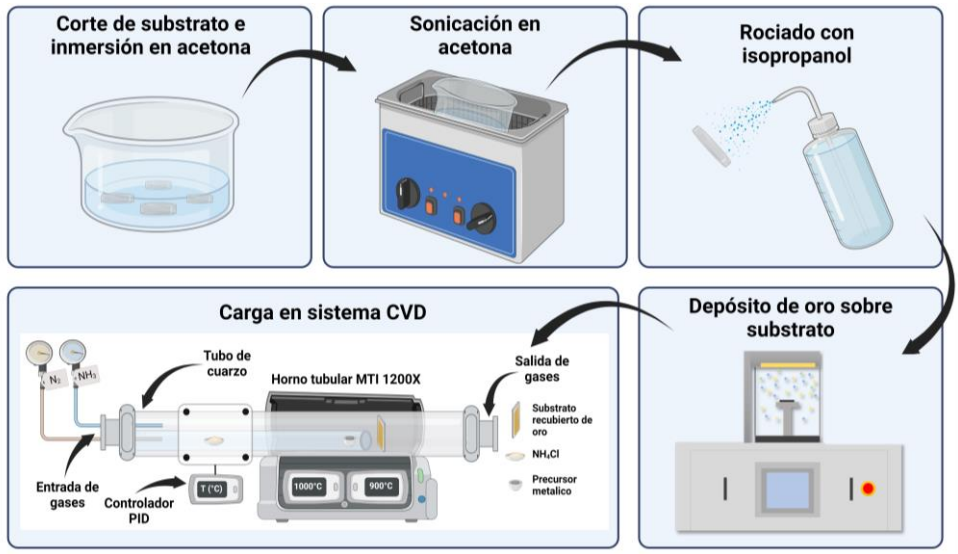


Figura 1. Esquemático de proceso de limpieza superficial de substrato para uso en el crecimiento de nitruros del grupo III.

Para poder realizar la formación de las uniones p-n basadas en los nitruros propuestos en este trabajo, se diseñó y ensambló una cámara de contaminación controlada para dosificar el precursor bis(ciclopentadienil)magnesio Cp2Mg como precursor promotor de aceptores. La cámara cuenta con una resistencia térmica acoplada a un porta muestra de acero inoxidable para situar adecuadamente la muestra durante el proceso de dopaje. Adicionalmente, el sistema cuenta con el control de una válvula ALD para dosificar el precursor Cp2Mg en fase vapor en dirección a la muestra.

Inicialmente, las películas de InGaN son colocadas sobre el porta muestra y posteriormente el sistema es cerrado para iniciar la etapa de vacío. Concluido el tiempo de tratamiento, inicia el proceso de impurificación mediante la programación de disparos de Cp2Mg en fase vapor. Para ello, mediante un sistema de control, se ajusta el tiempo de apertura y cierre de una válvula ALD con el propósito de dosificar el precursor de impurificación. Posterior al proceso de dosificación, inicia la etapa de tratamiento térmico para promover la difusión de los portadores aceptores en la película del semiconductor III-V. El tiempo y la temperatura se determinan mediante cálculos de la ley de Fick y los perfiles de difusión del Mg en nitruros del grupo III-V. Las uniones fueron caracterizadas con un analizador de parámetros eléctricos Keithley 4200 SCS, acoplado a un simulador solar Oriel LCS-100 el cual provee de radiación AM 1.5 de 1000W/m^2, estándar en la caracterización de celdas solares. Con el objetivo de comparar resultados, las uniones fueron caracterizadas bajo condiciones de oscuridad y con iluminación solar, tal como se presenta en la Figura 2.

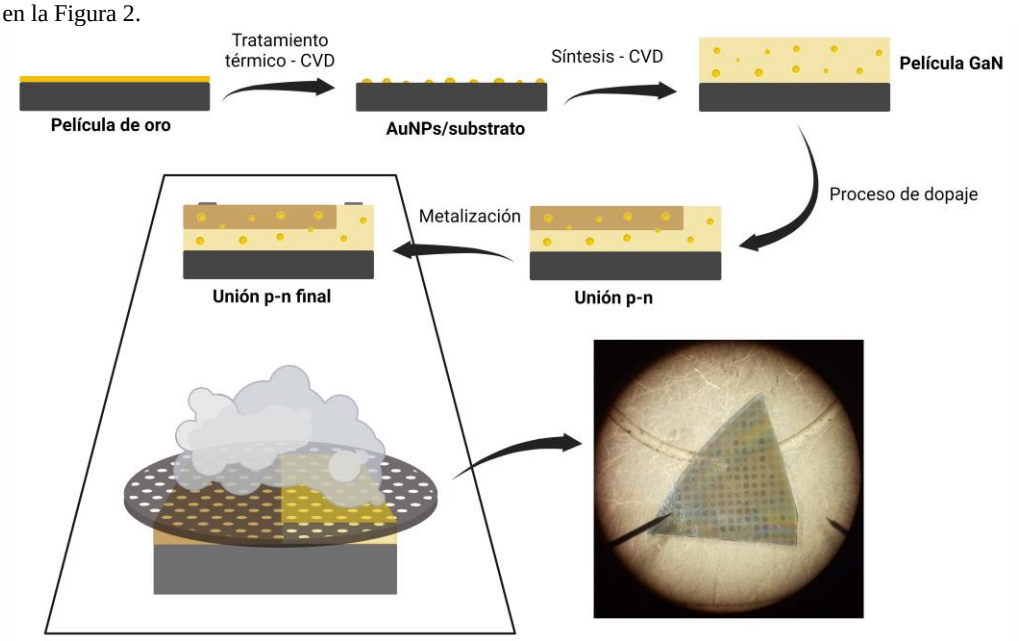


Figura 2. Esquemático de proceso de formación de uniones p-n basadas en InGaN para su caracterización como celdas solares bajo simulador solar.

RESULTADOS

Los resultados de difracción de rayos X de ambas series de depósitos se presentan en la Figura 3. Los picos de difracción de la fase wurtzita GaN muestran un desplazamiento hacia la fase wurtzita InN, de acuerdo con las cartas cristalográficas PDF Nos. 00-050-0792 y 00-050-1239, respectivamente.[7,8] El descenso de la posición 2θ del pico está relacionado con la incorporación de indio en la red de GaN, que conduce a la formación de InGaN tipo wurtzita con estructura hexagonal. La razón de lo anterior se debe a la diferencia del radio atómico entre el Ga y el In, siendo este último mayor que el primero. Debido a esto, la distancia entre planos aumenta lo que conlleva a un decremento 2θ en la difracción. Este comportamiento se observó para ambas series de películas de InGaN, como se presenta en la Figura 3 (a) y (b) para InGaN/AuNPs e InGaN/LT-GaN, respectivamente. De acuerdo con las cartas cristalográficas presentadas, ambas series de InGaN exhibieron las fases tipo wurtzita con sistema cristalino hexagonal. A pesar de la separación de fases en las muestras de InGaN crecidas sobre AuNPs y LT-GaN, la máxima incorporación de indio se observó en las películas depositadas sobre las nanopartículas.

El aumento de la incorporación de indio puede estar asociado al papel de las AuNPs en el proceso de síntesis, actuando como centros de nucleación para potenciar la reacción en fase vapor-líquido debido a la mayor absorción de especies reactivas de indio durante el crecimiento de los cristales. El mecanismo de crecimiento se basa en la contribución de las AuNPs como centro de nucleación para la cristalización del InGaN debido a la posterior coalescencia de pequeños cristales en una película compacta. A partir de esta observación, el uso de AuNPs en el método de crecimiento aquí presentado, mejora la incorporación de indio en el material depositado en comparación con el uso de la capa tampón LT-GaN.

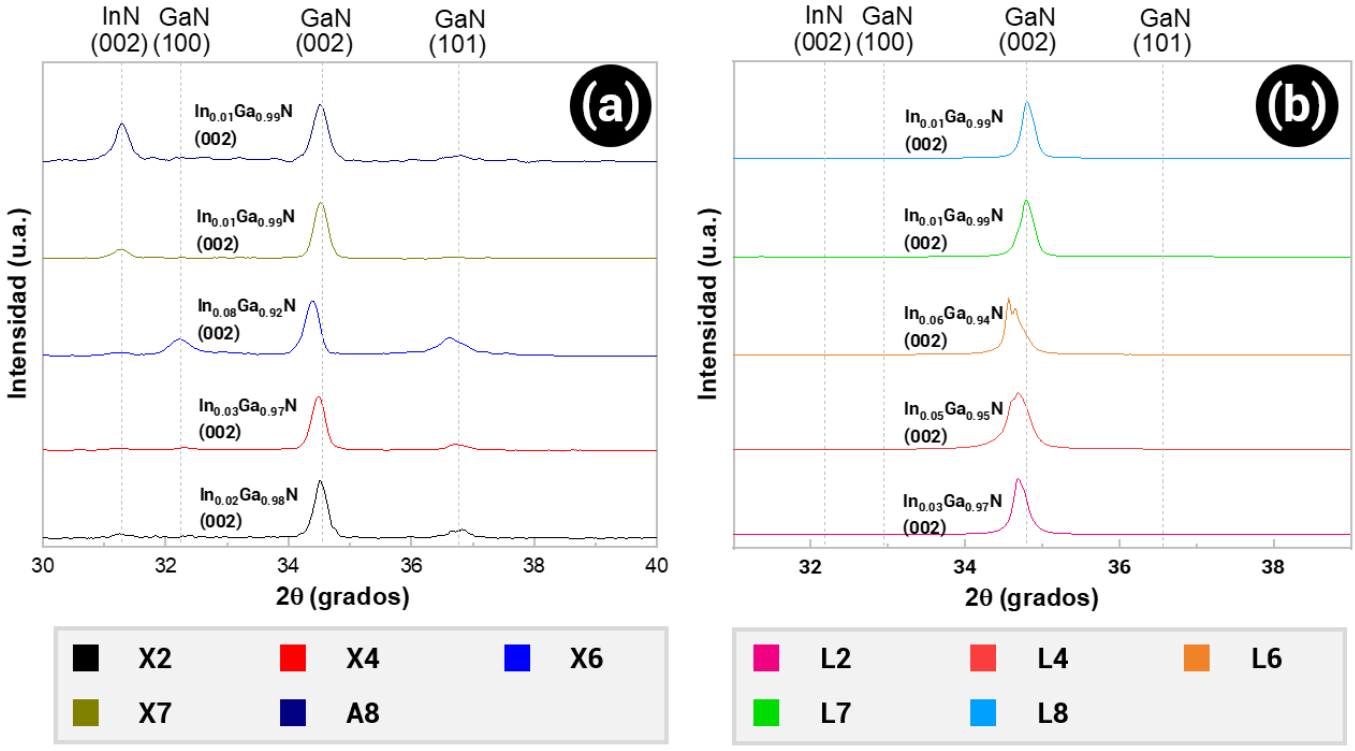


Figura 3. Resultados de DRX pertenecientes a series de depósitos InGaN crecidos sobre (a) AuNPs/zafiro y (b) LT-GaN/zafiro.

La Figura 4 (a) muestra la DFR de las películas de InGaN depositadas sobre AuNPs y convertidas a la función Kubelka-Munk. Por otro lado, los resultados de absorbancia UV-vis de InGaN/LT-GaN se presentan en la Figura 4 (b). Como se observa en los espectros, la concentración de indio en el material influye en el borde de la banda de absorción, independientemente del procedimiento de crecimiento.[9] En ambos casos, los espectros muestran una disminución de la energía del borde de la banda de absorción. Este comportamiento puede correlacionarse con los resultados de las caracterizaciones estructurales, y atribuirse directamente a la formación de la fase InGaN a diferentes concentraciones de indio. Sin embargo, el borde de la banda de absorción de las muestras con altas concentraciones de indio (X4, X5, L4 y L5) muestra un desplazamiento hacia mayor energía debido a la separación de fases, tal y como muestran ambos resultados; reflectancia difusa y absorbancia.

Adicionalmente, los espectros de las InGaN/AuNPs exhiben una banda de absorción centrada en aproximadamente 2,3 eV, y es notable para la mayoría de las muestras, lo que se atribuye al plasmón de resonancia de las nanopartículas presentes en el semiconductor.[10] Lo anterior puede asumir la posibilidad de atribuciones plasmónicas en el semiconductor, debido a la interacción de la nube electrónica oscilante de las

nanopartículas que se encuentran incrustadas en el bulto del material activo del dispositivo. A partir de esto, se propuso el estudio sobre las propiedades eléctricas de uniones p-n basadas en InGaN sobre AuNPs y capas de apoyo para comprender el comportamiento de los efectos del plasmón de resonancia localizado de superficie.

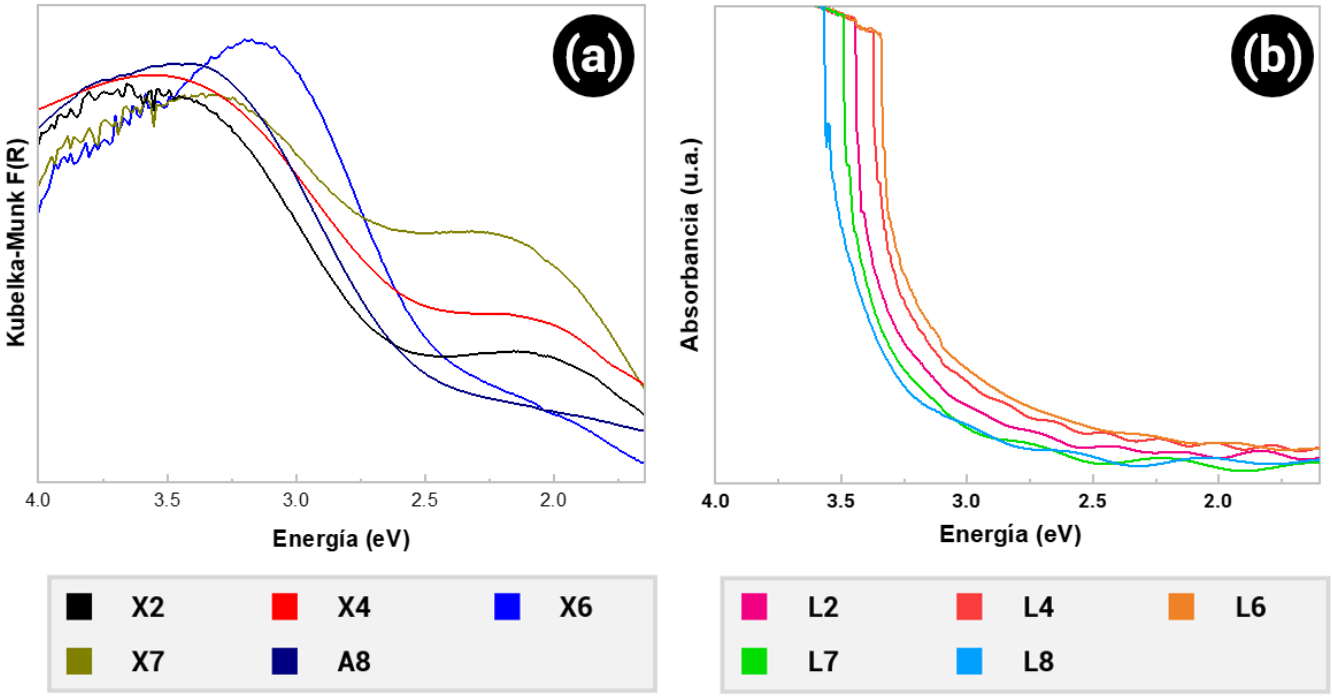


Figura 4. (a) Reflectancia difusa convertida en Kubelka-Munk de InGaN/AuNPs y (b) corresponde a la absorbancia de películas de InGaN/LT-GaN.

La Figura 5 muestra las curvas de densidad de corriente contra voltaje de las uniones p-n basadas en InGaN bajo condiciones de iluminación del simulador solar. Cabe mencionar que las curvas de los dispositivos no iluminados muestran el comportamiento rectificador característico de una unión p-n. Bajo condiciones de iluminación solar, es posible observar diferencias en los parámetros J_{SC} y el V_{OC} en función de la composición de indio en el dispositivo.[11] Este comportamiento se observó para ambas series de uniones p-n de InGaN, como se presenta en la Figura 5 (a) y (b).

Como resultado principal, la unión p-n $In_{0.150}Ga_{0.850}N$ desarrollada sobre AuNPs exhibe la mayor magnitud de J_{SC}, lo que implica que el efecto de las nanopartículas favorece el rendimiento eléctrico del dispositivo. Se obtuvieron celdas solares utilizando las muestras InGaN/LT-GaN con eficiencias de hasta 7.69%, una eficiencia competitiva con dispositivos desarrollados con estos materiales en laboratorios de investigación académicos.[12]

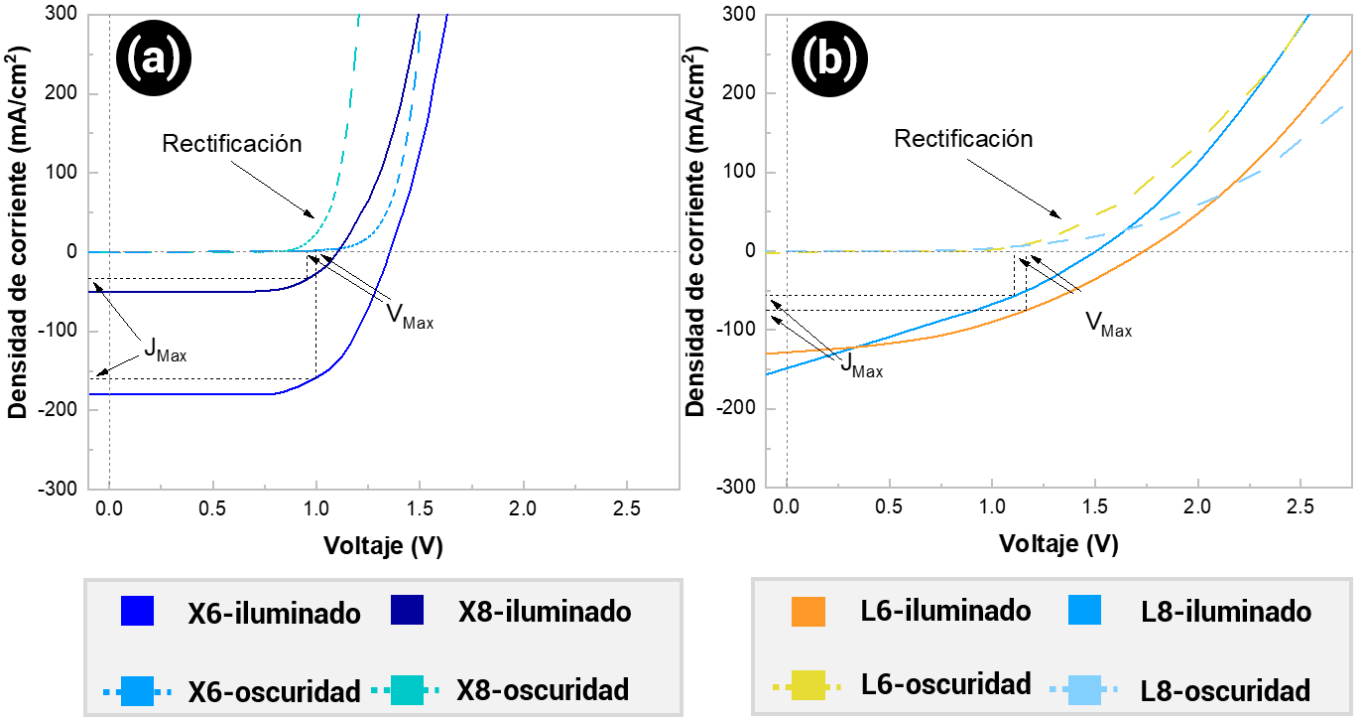


Figura 5. Curvas J-V características de uniones p-n basadas en InGaN desarrolladas sobre (a) AuNPs/zafiro y (b) LT-GaN/zafiro.

Shim et al. Reportaron efectos similares a los presentados anteriormente, atribuyendo el incremento del J_{SC} en celdas solares basadas en InGaN a los efectos de dispersión de luz y a la mejora del campo localizado promovida por las nanopartículas de plata embebidas en las capas del dispositivo.[12]

A partir de estas observaciones, es posible promover el aumento del J_{SC} adaptando las propiedades ópticas y eléctricas de las películas de InGaN crecidas sobre AuNPs como centro de nucleación, con el propósito de la mejorar el rendimiento eléctrico de los dispositivos fotovoltaicos basados en nitruros del grupo III.

CONCLUSIONES

Se ha presentado el efecto del uso de AuNPs en el crecimiento de películas de InGaN, resultando en un aumento de la miscibilidad de fase y un ajuste de las propiedades ópticas/eléctricas, en comparación con el conocido proceso de crecimiento en dos pasos. Se reporta una mayor incorporación de indio en InGaN/AuNPs en comparación con la película sobre LT-GaN, mejorando la miscibilidad de la fase InGaN a través de AuNPs como centros de nucleación. Además, se observó una menor energía del borde de la banda de absorción para InGaN sobre AuNPs en comparación con la observada para InGaN/LT-GaN. Se consiguió una mejora del rendimiento eléctrico de las uniones p-n basadas en InGaN utilizando AuNPs y los efectos LSPR inducidos presentados en el dispositivo. Las estimaciones revelan un aumento de la corriente de densidad en el cortocircuito de 127 a 182 $\mu A/cm^2$ para la unión p-n de InGaN sobre AuNPs en comparación con la basada en InGaN/LT-GaN, así como de la densidad de potencia de 69 a 162 $\mu W/cm^2$.

El procedimiento para el crecimiento de películas de InGaN mediante el método aquí descrito conduce a la oportunidad para la mejora de la miscibilidad de la fase InGaN, con la posibilidad de explorar la modificación de la energía de absorción dentro de todo el espectro solar. Además, la adaptación de las propiedades del InGaN favorece la obtención de semiconductores adecuado

REFERENCIAS

(1) Jain, S. C.; Willander, M.; Narayan, J.; Van Overstraeten, R. III-Nitrides: Growth, Characterization, and Properties. J. Appl. Phys. 2000, 87 (3), 965–1006. DOI: 10.1063/1.371971.

(2) Morkoç, H. General Properties of Nitrides. In Nitride Semiconductors and Devices; Morkoç, H., Ed.; Springer: Berlin, 1999; pp 8−44. DOI: 10.1007/978-3-642-58562-3_2.

(3) Wu, J. When Group-III Nitrides Go Infrared: New Properties and Perspectives. J. Appl. Phys. 2009, 106 (1), 011101. DOI: 10.1063/1.3155798.

(4) Mukai, T.; Yamada, M.; Nakamura, S. Characteristics of InGaN-Based UV/Blue/Green/Amber/Red Light-Emitting Diodes. Jpn. J. Appl. Phys. 1999, 38 (7R), 3976-3981. DOI: 10.1143/JJAP.38.3976.

(5) Nakamura, S.; Senoh, M.; Iwasa, N.; Nagahama, S. High-Brightness InGaN Blue, Green and Yellow Light-Emitting Diodes with

Quantum Well Structures. Jpn. J. Appl. Phys. 1995, 34 (7A), L797-L799. DOI: 10.1143/JJAP.34.L797.

(6) Routray, S. R.; Lenka, T. R. InGaN-Based Solar Cells: A Wide Solar Spectrum Harvesting Technology for Twenty-First Century. CSI Transactions on ICT 2018, 6 (1), 83–96. DOI: 10.1007/s40012-017-0181-9.

(7) El-Masry, N. A.; Piner, E. L.; Liu, S. X.; Bedair, S. M. Phase Separation in InGaN Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition. Appl. Phys. Lett. 1998, 72 (1), 40–42. DOI: 10.1063/1.120639.

(8) Chang, C. A.; Shih, C. F.; Chen, N. C.; Lin, T. Y.; Liu, K. S. In-Rich In1-xGaxN Films by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy. Appl. Phys. Lett. 2004, 85 (25), 6131–6133. DOI: 10.1063/1.1842375.

(9) Singh, R.; Doppalapudi, D.; Moustakas, T. D.; Romano, L. T. Phase Separation in InGaN Thick Films and Formation of InGaN/GaN Double Heterostructures in the Entire Alloy Composition. Appl. Phys. Lett. 1997, 70 (9), 1089–1091. DOI: 10.1063/1.118493.

(10) Amendola, V.; Pilot, R.; Frasconi, M.; Maragò, O. M.; Iatì, M. A. Surface Plasmon Resonance in Gold Nanoparticles: A Review. J. Condens. Matter Phys. 2017, 29 (20), 203002. DOI: 10.1088/1361-648X/aa60f3.

(12) Shim, J.; Choi, S.; Kong, D.; Seo, D.; Kim, H.; Lee, D.; Hamzaoui, H.; Bouazzi, A. S.; Dahal, R.; Pantha, B.; Li, J.; Lin, J. Y.; Jiang, H. X. Ag Nanoparticles-Embedded Surface Plasmonic InGaN-Based Solar Cells via Scattering and Localized Field Enhancement. Optics Express. 2005, 87 (14), A1176-A1187. DOI: 10.1363/OE.24.0A1176.

(13) Bhuiyan, A. G.; Sugita, K.; Hashimoto, A.; Yamamoto, A. InGaN Solar Cells: Present State of the Art and Important Challenges. IEEE J. Photovolt. 2012, 2 (3), 276–293. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2012.2193384.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS DEL EFECTO DE ENFRIAMIENTO EN EL CONDENSADOR DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE VERTIENTE

Sandra Ch S, Hilario T P, René R R
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo Xalpa 180, San Martin Xochinahuac, Azcapotzalco, 02128 Ciudad de México, CDMX, Tel. 5318 9000, **scs@correo.azc.uam.mx**
Ignacio C M
Instituto Politécnico Nacional, ESIME-UPALM, Av. IPN s/n, 07738 Ciudad de México, Tel. 57296000 ext. 54884, icarvajal@ipn.mx
Jorge E L R
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. CIMAV, Chihuahua, 31136.
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, 31110.

RESUMEN

En este trabajo se estudia el efecto del enfriamiento en la superficie externa del condensador de un destilador solar de doble vertiente con la finalidad de incrementar la producción de destilado. En el interior del destilador se tiene un recipiente absorbedor de aluminio pintado de negro mate con un área de 0.15 m^2 y un volumen de 4 L. La doble vertiente tiene un ángulo de inclinación de 35°, el cual funciona como condensador, el destilado se recolecta mediante 4 canaletas de vidrio unidas al recipiente absorbedor que tiene una inclinación de 6°. En el dispositivo se realizaron pruebas experimentales para tres condiciones: sin ningún efecto de enfriamiento, con efecto de enfriamiento por aire y con efecto de enfriamiento por agua. En cada prueba experimental, se registraron datos de temperatura, radiación solar incidente y volumen del destilado durante un periodo de 8 horas. Como resultado, se alcanza una temperatura máxima en la superficie interna de la cubierta de 49.1°C, 52.9°C y 45°C con una producción de 460 ml, 493 ml y 643 ml, para el destilador solar sin ningún efecto de enfriamiento, con efecto de enfriamiento por aire y con efecto de enfriamiento por agua, respectivamente. La máxima productividad fue del 64%, incrementándose en un 39% respecto del caso sin enfriamiento, este resultado se obtuvo en el destilador solar con efecto de refrigeración por agua, favoreciendo una mejor condensación, lo que se traduce en un mayor volumen de destilado.

ABSTRACT

In this work, the effect of cooling on the external surface of the condenser of a double-slope solar still is studied in order to increase the distillate productivity. Inside the distiller there is an aluminum absorber plate painted matte black with an area of 0.15 m^2 and a volume of 4 L, the double slope has an inclination angle of 35°, which functions as a condenser, by means of 4 glass channels connected to the absorber plate with an inclination of 6°, the fluid is collected. Experimental tests were performed on the device for three conditions; without any cooling effect, with air cooling effect and with water cooling effect, in each experimental test, data of temperature, incident solar radiation and distilled volume were recorded for a period of 8 hours. As results, a maximum temperature is reached on the internal surface of the cover of 49.1°C, 52.9°C and 45°C with a production of 460 ml, 493 ml and 643 ml, for the solar still without any cooling effect, with air cooling effect and with water cooling effect, respectively. The maximum productivity was 64%, increasing by 39% compared to the case without cooling. This result was obtained in the solar still with water cooling effect, favoring better condensation, which translates into a higher distilled volume.

Palabras claves: Destilación solar, Enfriamiento, Temperatura, Transferencia de Calor, Simulación numérica, Aire.

INTRODUCCIÓN

Después del aire, el agua es la segunda necesidad básica de todos los organismos vivos del planeta Tierra, siendo un recurso finito gravemente afectado por la contaminación. La desalinización basada en energías renovables, como la energía solar, presenta una alternativa sostenible y no contaminante a la desalinización basada en combustibles fósiles, que agrava los problemas de contaminación ambiental, permite la diversificación energética, está disponible durante períodos de tiempo predecibles y ayuda a evitar la dependencia de suministros energéticos externos. Así los destiladores solares son considerados una de las tecnologías simples de desalinización térmica, que puede ser aplicada en zonas rurales y remotas, donde el suministro de electricidad es deficiente o nulo. Sin embargo, se ha encontrado que es menos eficiente debido al menor rendimiento en la producción de agua dulce.

La capacidad de un sistema de destilación solar depende de las condiciones meteorológicas como radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente, de los parámetros de diseño tales como tamaño del destilador solar, espesor del vidrio, ángulo de inclinación del vidrio, material del destilador solar, número de recipientes, y de los parámetro operativos como la profundidad del agua, temperatura del agua, temperatura del vidrio, nivel de contaminación del agua, área de exposición del recipiente absorbedor y capacidad calorífica de la cuenca, Velmurugan y Srithar (2011).

Numerosos trabajos de investigación se han realizado con el fin de superar los problemas asociados con el método convencional agregando nuevas técnicas en el diseño para incrementar su rendimiento. Estas modificaciones incluyen la integración de la energía solar fotovoltaica, colectores solares, reflectores, intercambiador de calor integrado al vacío, nanofluidos entre otros, Pansal et al (2020).

Elango y Murugavel (2025), investigaron experimentalmente el efecto que tiene la profundidad de agua (0.01 y 0.05 m) sobre la productividad del destilador solar de doble efecto, encontraron que hay menos rendimiento durante el tiempo de calentamiento y más

rendimiento durante el tiempo de enfriamiento en comparación con un destilador de un solo efecto, para una profundidad de agua de 0.01 m, considerando al destilador con y sin aislamiento produjeron 17.4% y 8.1%, mayor que un destilador solar pasivo de doble pendiente. El rendimiento diario fue de 5.33 kg/m^2 utilizando al destilador aislado y 4.40 kg/m^2 sin aislamiento. Por su parte, Trad y Kaabi (2013) fabricaron un destilador solar de dos pisos, con una cubierta de cristal transparente, la primera cubierta de cristal (primer efecto) sirve de base para el segundo efecto, además la temperatura de la cubierta de vidrio disminuye debido a que el agua fluye continuamente sobre la superficie exterior de la primera cubierta de vidrio, lo que mejora la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y el interior de la superficie de la cubierta de vidrio en el primer efecto. El destilador solar asimétrico con doble efecto proporciona mayor productividad comparado con un destilador solar simétrico de doble pendiente convencional. Muftah et al. (2018), modificaron un destilador solar de una vertiente con recipientes absorbedores en escalera y espejos, agregando una cubierta exterior adicional protegida con un escudo resistente a la radiación y protegida por un espejo reflector. Reportaron las eficiencias antes y después de las modificaciones siendo estas de 52.3% y 60.2% respectivamente. El segundo sistema tiene un mayor rendimiento de 8.9 kg/m^2/día, respecto al modelo de referencia que alcanza 6.9 kg/m^2/día. Arunkumar et al (2013), experimentaron con un destilador solar tubular integrado con concentración, con un área en el recipiente absorbedor de 2x0.03 m^2 para desalinización de agua de mar aplicando un flujo de agua o aire para enfriamiento de la cubierta. La producción diaria de destilado del sistema aumenta reduciendo la temperatura del agua que fluye sobre él (disposición de enfriamiento de la cubierta superior). Analizaron tres condiciones, producción de destilado sin ningún efecto de refrigeración, con efecto de refrigeración por aire y con efecto de refrigeración por agua, siendo la producción de 2.05 L/día, 3.05 L/día y 5 L/día, respectivamente, siendo la máxima productividad para el SST (Destilador Solar Tubular) con efecto de refrigeración por agua, favoreciendo una mejor condensación, lo que se traduce directamente en una mejor calidad del agua.

La presente investigación tiene el propósito de implementar técnicas que ayuden a mejorar el proceso de condensación y sean aplicadas en nuevos diseños de destiladores solares para producir un equipo simple en su construcción y de bajo costo. Para esto, se tomó como referencia el trabajo realizado por Arunkumar et al (2013), pero a diferencia de dicha investigación, en el presente trabajo se utilizó un destilador solar de doble pendiente y con una doble cubierta de vidrio con una separación de 1.5 cm. Además, el concentrador solar propuesto tiene una menor área en el recipiente absorbedor, menor volumen inicial de agua, y difiere notablemente en la implementación de las técnicas de enfriamiento por aire y agua.

DESARROLLO

En este trabajo, se estudia un destilador solar de doble pendiente, que consiste en un recipiente cerrado con una cubierta transparente de vidrio de 3 mm de espesor y un ángulo de inclinación de 35º, el cual permite el paso de la radiación solar. En el interior de la zona del destilador se encuentra un recipiente absorbedor (charola) de aluminio pintado de negro mate con un área de 0.15 m^2 donde se deposita el fluido. El recipiente absorbedor es colocado en una base de vidrio de 6 mm, entre las paredes del recipiente absorbedor y del soporte de vidrio se tienen 4 canaletas de vidrio de 3 mm con un ángulo de inclinación de 6° aproximadamente, de tal manera que el condensado que se adhiere a cada una de las paredes de la cubierta de vidrio sea recolectado en las canaletas. En la base del soporte de vidrio de 6 mm, se tienen dos barrenos en contra esquina con un diámetro de 9 mm, donde se coloca una manguera de plástico para la recolección de agua destilada, Figura. 1.

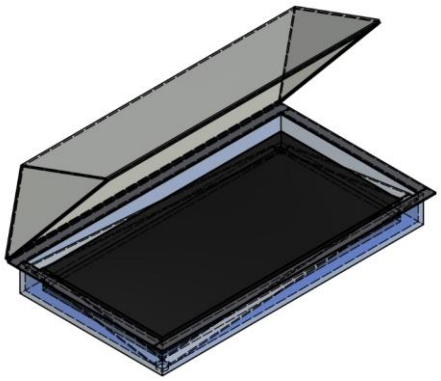


Figura 1. Destilador solar de doble pendiente.

La solución por destilar se coloca en el recipiente absorbedor de color negro mate que absorbe casi completamente la radiación solar que incide sobre el cuerpo negro, precisamente, el acabado mate es usado para lograr una mejor absorción, al reducir las pérdidas por reflexión. Una vez absorbida por el recipiente, la energía térmica se transfiere de inmediato al fluido y a medida que el sol sube sobre el horizonte en la mañana, el recipiente absorbedor y el fluido va aumentando su temperatura hasta llegar a un máximo, generalmente después del mediodía, para posteriormente enfriarse al ir declinando el sol. Para evitar pérdidas de calor, el destilador se sella por completo con silicón transparente o de lo contrario, parte de la energía captada se perderá como calor y vapor hacia el ambiente. El fluido continúa su proceso de calentamiento hasta el punto de evaporarse, sin llegar a un punto de ebullición, esto es debido a que la presión del vapor de agua es mayor que la de las sales minerales o partículas presentes en el fluido, lo que hace que las sustancias más volátiles se evaporen primero mientras que los residuos, sales o partículas se quedan precipitadas en el fondo del recipiente absorbedor, por lo que se logra una separación eficiente.

En la propuesta de este trabajo se utilizó un destilador solar al que se le realizó una modificación en la superficie que funciona como condensador, agregándole una segunda cubierta de vidrio de 3mm de espesor y con una separación de 1.5 cm entre ellas, con el propósito de tener un canal para implementar el enfriamiento por aire y por agua. En la Figura 2 se muestra el dispositivo con las tres modificaciones estudiadas.



a) b) c)

Figura 2. Destilador solar: a) convencional, b) con doble cubierta y enfriamiento por aire, c) con doble cubierta y enfriamiento por agua.

Se realizó una prueba experimental para cada configuración empleando 1L de agua de la red de suministro de agua potable de la Ciudad de México. En cada una de las pruebas se obtuvieron datos de temperatura mediante termopares tipo K en las principales superficies como: recipiente absorbedor, fluido y cubierta de vidrio. Se midieron también, la radiación solar y el volumen de destilado mediante un piranómetro y una probeta graduada, respectivamente.

La instrumentación empleada para la obtención de las temperaturas fue mediante módulos ADAM's y un piranómetro Eppley modelo 8-48, que, sumado a una interface en LabVIEW, se logran registrar dichas temperaturas y la radiación solar cada 10 minutos durante un intervalo de tiempo de 10:00 am a 18:00 pm, debido a que en este periodo de tiempo se tiene mayor insolación.

Para el caso donde se buscó promover el enfriamiento por aire, se obtuvo por convección natural un flujo de aire a través del canal frontal, formado por las dos cubiertas, cuya salida fue por la superficie frontal posterior del destilador solar, tal y como se muestra en la Figura 3.

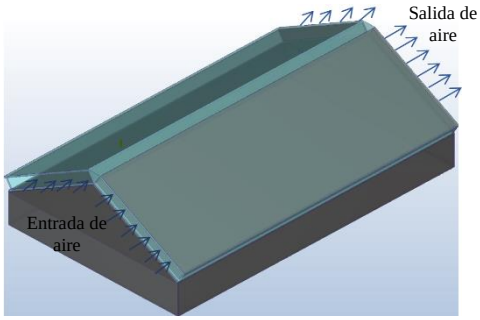


Figura 3. Flujo de aire a través del canal formado por la doble cubierta de vidrio.

Por otra parte, para el caso del destilador experimentado con enfriamiento por agua, se dispuso de un tanque de almacenamiento con un volumen de 10 L de agua de grifo que se encontraba a una temperatura de entre 15 y 20°C. El tanque se colocó a una altura adecuada para que el agua fuera suministrada por gravedad hacia el canal formado por la doble cubierta. El volumen de agua suministrada en la doble cubierta de vidrio fue de 3.6 L, ingresándose al destilador solar por la superficie lateral superior. Una vez que se llenaba el volumen formado

por la doble cubierta, el agua permanecía de 40 a 60 min alcanzando un incremento en su temperatura de hasta 35°C. Posteriormente el agua se drenaba mediante mangueras que se colocaron en una de las superficies frontales. Una vez que se vaciaba el agua, se volvía a llenar el volumen entre las cubiertas reproduciendo este procedimiento hasta completar las 8 horas de experimentación.

Es importante mencionar que las pruebas se realizaron en el mes de marzo en la Ciudad de México para diferentes días, debido a los ajustes necesarios que requería el destilador solar para implementar las técnicas de enfriamiento por aire y por agua.

RESULTADOS

Mediante la experimentación llevada a cabo para los tres casos en el destilador solar de dos vertientes, empleando 1 L de agua, se lograron obtener las temperaturas y la radiación solar. En las Figuras 3, 4 y 5, se muestra la distribución de temperatura tanto para el recipiente absorbedor (T_{CH}), agua a destilar (T_F), cubierta de vidrio ($T_{V,Int}$ y $T_{V,sup}$), del medio ambiente (T_∞) y la radiación solar.

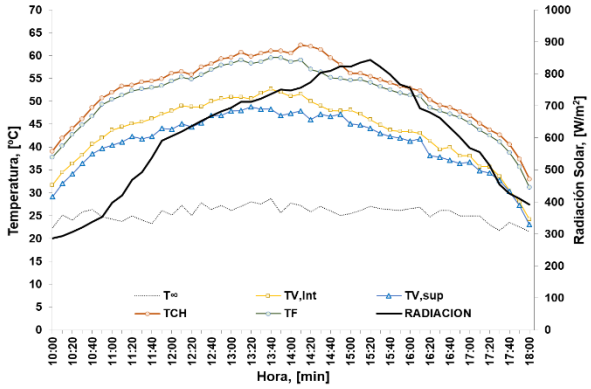


Figura 3. Distribución de temperaturas y radiación solar para el destilador solar convencional.

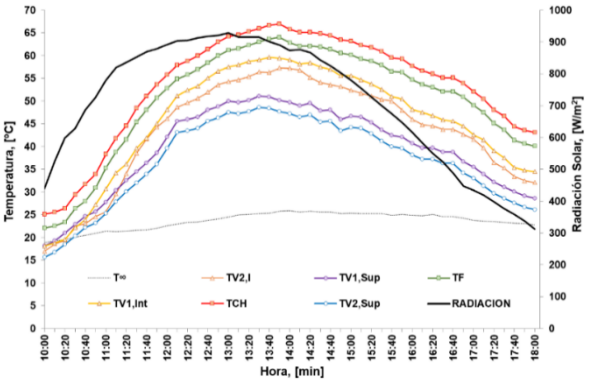


Figura 4. Distribución de temperaturas y radiación solar para el destilador solar con enfriamiento por aire.

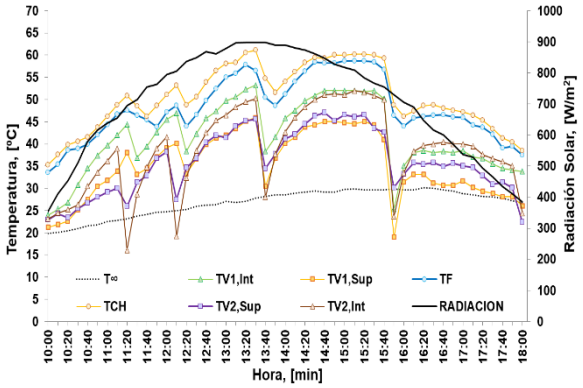


Figura 5. Distribución de temperaturas y radiación solar para el destilador solar con enfriamiento por agua.

En las Figuras 3, 4 y 5, se muestra la distribución de temperaturas para las tres condiciones; sin ningún efecto de enfriamiento, con efecto de enfriamiento por aire y con efecto de enfriamiento por agua. Se observa que conforme va transcurriendo el tiempo las temperaturas van incrementándose hasta alcanzar valores máximos siendo estos para el recipiente absorbedor de 62.2°C, 64°C y 58°C, para el destilador solar convencional, con enfriamiento por aire y agua, respectivamente. Así mismo, para el destilador solar sin efecto de enfriamiento se registraron temperaturas máximas de 59.6°C y 52.7°C para el fluido y la superficie interna de la cubierta de vidrio. Para el caso de la prueba experimental con enfriamiento por aire el fluido alcanzó una temperatura de 53°C y la de la superficie interna de la primera cubierta fue de 59.6°, incrementándose 7°C más que la prueba experimental sin ningún efecto de enfriamiento, en consecuencia la configuración empleada para la entrada y salida de aire en el canal formado por la doble cubierta en el condensador resulta deficiente, viéndose afectado el rendimiento del dispositivo, de tal forma que el enfriamiento por aire para este estudio no tuvo un efecto positivo significativo sobre la primer cubierta de vidrio.

Por otro lado, para la prueba con enfriamiento por agua, como se esperaba del procedimiento implementado, se observan descensos cada 60 minutos en todas las temperaturas. Se registró la mínima temperatura, de aproximadamente 15°C, en la superficie interna de la segunda cubierta de vidrio, el fluido para este caso únicamente alcanzó una temperatura de 56°C mientras que la temperatura de la primera cubierta de vidrio interna fue de 50°C. También se observa en los 3 casos que las temperaturas menores se registran en la superficie externa de la segunda cubierta de vidrio, la cual fue de 47°C en promedio para las pruebas experimentales, esto ocurre porque dicha superficie se enfría debido a que se encuentra en contacto con corrientes de aire, ya sea viento, corrientes convectivas o ambas. Así mismo, las variaciones en la radiación solar influyen en las temperaturas del dispositivo y del ambiente, las cuales se ven alteradas alcanzando su punto máximo en un rango de 800 a 900 W/m^2 de 12:00 a 15:00 hrs.

Finalmente, en la Figura 6 se muestran los resultados de la evaluación del rendimiento de destilado para cada prueba experimental, donde la productividad diaria obtenida sin efecto de enfriamiento fue de 460 ml, con el enfriamiento por aire la productividad aumentó a 493 ml y finalmente, la productividad aumentó a 643 ml para el destilador con enfriamiento por agua. Para este último caso el fluido alcanzó la menor temperatura, 46°C, lo cual se debió a que parte de la energía térmica solar que incide en el dispositivo se quedó almacenada en el volumen de agua que se encontraba en el canal formado por la doble cubierta y solo una porción fue absorbida en el recipiente. A pesar de esto, la máxima productividad, 64%, la obtuvo el destilador solar con efecto de enfriamiento por agua, esto se debe a que se intensifica el proceso de condensación debido a que se enfría la superficie interna de la primer cubierta de vidrio. Por lo tanto, tomando en cuenta lo que implica en su implementación, el enfriamiento por agua se recomienda para tener una mayor productividad en los destiladores de doble vertiente.

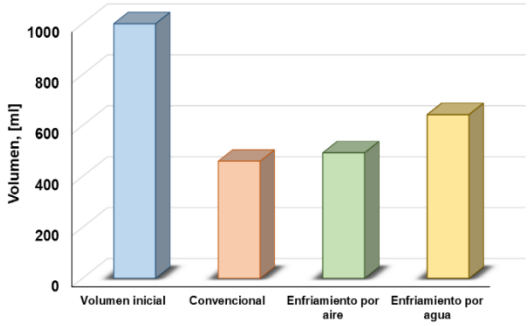


Figura 6. Volumen de destilado para cada prueba experimental.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudió el proceso de destilación solar de forma convencional y agregando un efecto de enfriamiento por aire y por agua al adicionar una doble cubierta de vidrio, de tal manera que estos fluidos absorben calor de la cubierta en cuya cara interior se tiene el proceso de condensación. Se encontró que la productividad aumentó logrando un rendimiento de 643 ml con enfriamiento por agua, 493 ml con enfriamiento por aire y 460 ml sin flujo de aire o agua.

Por lo tanto, el enfriamiento por agua resultó el más favorable para el proceso de destilación, debido a que la temperatura de la superficie interna de la cubierta en la que ocurre el proceso de condensación se redujo 8°C favoreciendo el aumento del volumen de destilado. Esto se logró a pesar de que la temperatura en el fluido disminuyó 12°C comparado con la prueba sin ningún efecto de enfriamiento. Además, se concluye que para mejorar la productividad y aumentar la temperatura del fluido se debe de reducir el espacio entre las dos cubiertas, de esta manera, una mayor proporción de la radiación solar será absorbida por el recipiente absorbedor y no por el agua contenida en el volumen formado por la doble cubierta. Así mismo, se debe explorar la técnica de circulación constante de un flujo de agua para mantener fría la superficie interna del vidrio en donde ocurre la condensación.

Por otra parte, se encontró que, para la configuración implementada en este estudio, el proceso de destilación solar con efecto de enfriamiento por aire no resulto adecuado obteniendo un aumento insignificante en la productividad de sólo 7%. Se recomienda modificar las condiciones de entrada y salida del flujo de aire para enfriamiento, y estudiar la influencia de la separación de las cubiertas.

Finalmente, el destilador solar propuesto con enfriamiento por agua muestra un gran potencial en términos de mayor rendimiento de destilación por unidad de área en comparación con otros diseños disponibles.

REFERENCIAS

Arunkumar T, Jayaprakash R, Ahsan A, Denkenberger D, Okundamiya M.S. (2013). Effect of water and air flow on concentric and tubular flow water desalting system. Applied Energy, Vol.103, p. 109–115.

Elango T, Murugavel K.K. (2015). The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. Desalination, Vol. 359, p. 82–91.

Muftah A.F, Sopian K, Alghoul M.A. (2018). Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts. Desalination, Vol. 435, p. 198-209.

Pansal K, Ramani B, Sadasivuni K, Panchal H, Manokar M, Sathyamurthy R, Kabeel A.E, Suresh M, Israr M. (2020). Use of solar photovoltaic with active solar still to improve distillate output: A review. Groundwater for Sustainable Development, Vol. 10, p. 100341

Trad A, Kaabi A. (2013). Effect of orientation on the performance of a symmetric solar still with a double effect solar still (comparison study). Desalination, Vol. 329, p. 68–77.

Velmurugan V, Srithar K. (2011). Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, p. 1294–1304.

Energía y Sociedad/ Edificios Bioclimáticos

ID	TÍTULO	PONENTE
16137	Análisis de patrones de comportamiento de acuerdo a la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)	Norma Rodríguez Muñoz
16064	Evaluación del confort higrotérmico utilizando un modelo bidireccional de transferencia de calor y masa a través de la ropa	Iván Oropeza Pérez
16082	Aprovechamiento de la energía solar térmica en la formulación de subproductos cosméticos: Un enfoque hacia la creación de emprendimientos sociales comunitarios	Diana Lara Llanderal
16093	Efecto de la composición material del absorbedor de un CPC sobre el flujo radiactivo, comparativa entre vidrio, vidrio pyrex y cuarzo	Brandon Luke Carranco Arias

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS DE PATRONES DE COMPORTAMIENTO DE ACUERDO A LA ENCUESTA NACIONAL SOBRE CONSUMO DE ENERGÉTICOS EN VIVIENDAS PARTICULARES (ENCEVI)

Carlos A. Espino-Reyes
Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Calle CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, Durango 34147, México, **carlos.espino@cimav.edu.mx**

Norma A. Rodríguez-Muñoz
CONAHCYT, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Calle CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, Durango 34147, México, **norma.rodriguez@cimav.edu.mx**

RESUMEN

En México han existido esfuerzos para caracterizar el consumo energético de las viviendas, sin embargo, estos han sido limitados. A través de décadas se han implementado numerosos programas en pro de la mejora en la habitabilidad de la vivienda y eficiencia energética, pero aún se pueden observar condiciones de confort térmico inadecuadas junto con altos consumos energéticos en muchas regiones. En contraste con otros países, en México aún se requiere la implementación de algún tipo de verificación energética obligatoria en viviendas que ayude a identificar y categorizar su comportamiento de forma exhaustiva. Contar con información certera sobre el uso de energía en este sector es de gran importancia para afrontar los diversos retos actuales, tales como la pobreza energética, presente en el 36% de los hogares del país o los cortes de energía debido a la sobre demanda del sistema eléctrico nacional. Una de las fuentes de información más importantes en este sentido es la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares llevada a cabo durante 2018. Esta encuesta tuvo como objetivo obtener información estadística sobre patrones y hábitos de consumo en las viviendas del país. En el presente documento, se analizan los datos de consumo en las viviendas encuestadas, principalmente aquellas variables relacionadas con los gastos por energía eléctrica (tarifa, tamaño de la vivienda y número de ocupantes) con el objetivo de identificar patrones relevantes del sector vivienda. Uno de los resultados relevantes fue el costo de facturación eléctrica en relación al tamaño de vivienda, el cual se ubicó entre $216 para viviendas menores a 30 m^2 y $336 para viviendas de 151-200 m^2. También fue posible observar el desconocimiento de los usuarios sobre su tarifa, ya que en promedio el 39% de los hogares encuestados indicaron no conocer su tarifa, con entidades que alcanzaron un 72% de desconocimiento.

ABSTRACT

In Mexico, efforts have been made to characterize the energy consumption in dwellings; however, these have had limited results. Over the decades, numerous programs have been implemented to improve housing habitability and energy efficiency, but in many regions inadequate thermal comfort conditions as well as high energy consumption rates are still present. In contrast to other countries, in Mexico, implementing some mandatory energy verification in homes is still required to help identify and categorize their behavior exhaustively. Accurate information on the use of energy in this sector is of great importance in facing the various current challenges, such as energy poverty, present in 36% of Mexican homes, and power outages due to overdemand from the national electrical system. In this sense, one of the most important sources of information is the National Survey on Energy Consumption in Private Homes carried out in 2018. This survey aimed to obtain statistical information on consumption patterns in homes in Mexico. In this document, the consumption data in the surveyed homes are analyzed, mainly those variables related to electrical energy expenses (tariff, size of the home, and number of occupants), to identify relevant patterns in this sector. One of the relevant results was the cost of electricity about the size of the home, which varies from $216 MXN for homes smaller than 30 m^2 and $336 MXN for homes measuring between 151 and 200 m^2. It was also possible to observe users' lack of knowledge about their tariff since, on average, 39% of the households surveyed indicated that they did not know their type of tariff, with some states reaching 72% unawareness.

Palabras claves: Edificios, Información estadística, Caracterización energética, Tendencias nacionales, Políticas energéticas

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el sector de los edificios residenciales representa un 21 % del consumo mundial de energía (United Nations Environment Programme, 2024). En México en el año 2022 este sector representó el 14.66 % del consumo final de energía con 833 PJ de los 5682 PJ totales a nivel nacional (SENER, 2023). Uno de los grandes retos en este sector es el de la pobreza energética, fenómeno que se estima está presente en un tercio de las viviendas del país (García-Ochoa & Graizbord, 2016). La pobreza energética se comprende como aquella condición en la que un hogar no cuenta con los ingresos suficientes para satisfacer sus necesidades energéticas (García-Ochoa & Graizbord, 2016).

En este sentido, son una serie de factores los que contribuyen al nivel de pobreza energética de un país, por ejemplo, el costo de la energía, el número de hogares que cuentan con dispositivos eléctricos específicos, el nivel de ingreso de los hogares, entre otros. Es debido a esto que es de gran importancia, como parte de las políticas nacionales, obtener información estadística para caracterizar el uso de energía en los hogares.

Uno de los esfuerzos más importantes en este sentido fue el diseño y la aplicación de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) del año 2018. Esta encuesta tuvo como objetivo obtener información estadística relacionada a los hábitos de consumo de los hogares del país. La encuesta fue aplicada a una muestra total de 32,047 viviendas durante el primer semestre del año 2018. La encuesta estuvo conformada por 165 preguntas distribuidas en 13 secciones: 1) características de la vivienda, 2) suministro de electricidad, 3) cocción de alimentos, 4) conservación de alimentos, 5) higiene y limpieza, 6) tecnología y entretenimiento, 7) climatización, 8) calentamiento de agua, 9) bombeo de agua, 10) uso de aparatos de eficiencia energética, 11) disposición al cambio de energético, 12) programas y prácticas de ahorro energético y 13) percepción de los energéticos.

En este documento, se utiliza Python® para analizar con mayor detalle el impacto de algunas variables en el consumo de energía de las viviendas. Una limpieza de los datos fue llevada a cabo para mejorar la confiabilidad de los resultados.

METODOLOGÍA

Las respuestas de la ENCEVI fueron obtenidas de la página de internet del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (INEGI et al., 2018). Uno de los objetivos principales de este estudio fue obtener valores promedio del consumo de energía eléctrica de los hogares, sin embargo, esta información no es directamente recolectada por la encuesta; como alternativa se decidió analizar las respuestas a la pregunta 2.5 *¿Cuál fue el total a pagar en su último consumo de luz?*, para posteriormente relacionar el costo promedio con un consumo de electricidad estimado.

Preparación de los datos

Como un primer paso se llevó a cabo una preparación de los datos, esto debido a que al tratarse de un proceso de recolección de información que involucra una gran cantidad de personas, una extensa cantidad de preguntas y un proceso de captura que incluye el factor humano, una gran cantidad de datos pueden contener errores en su valor o formato. Identificar y eliminar estos datos erróneos puede ayudar a obtener mejores resultados.

El primer paso para la preparación de datos fue identificar aquellos registros donde la respuesta a la pregunta 2.2 *"¿En la vivienda hay algún local comercial?*" era positiva y la respuesta a la pregunta 2.3 *"¿Tienen recibo de luz exclusivo para el local?*" era negativa. Estos registros fueron eliminados ya que no se consideraron representativos de una vivienda común, al combinar con sus gastos domésticos los gastos correspondientes a una actividad comercial.

En segundo y tercer lugar se eliminaron de la base de datos aquellos registros donde la pregunta 2.5 fue respondida con un "*no sabe*" (identificado con un valor 99 999), así como también aquellos registros donde no fue registrado ningún valor en dicha pregunta. Considerando así únicamente aquellas personas que buscaron dar una respuesta certera a esta pregunta.

Posteriormente, haciendo uso de la herramienta de programación Python®, se llevó a cabo un tercer proceso de preparación en el cual se buscó eliminar los valores atípicos de la base de datos. Para esto se calculó la puntuación Z de cada dato de la muestra, buscando eliminar aquellos valores en los extremos de la distribución. Para los valores máximos permisibles se consideraron solo los valores que estaban dentro del 99.7 % del rango de la distribución (3\σ), en este caso por la distribución de los datos se descartaron solamente los datos que superaban el límite superior. La cantidad de datos restantes una vez realizado el proceso de preparación se muestran en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Registros nacionales antes y después del proceso de preparación

Etapa	Número de registros
Base de datos original	28,953
Paso 1	27,868
Paso 2 y 3	24,166
Paso 4	21,886

Tabla 2. Registros por entidad después del proceso de preparación

Entidad	Registros	Entidad	Registros	Entidad	Registros	Entidad	Registros
Ags.	822	CDMX	621	Mor.	739	Sin.	676
B.C.	660	Dgo.	724	Nay.	750	Son.	577
B.C.S.	642	Gto.	791	N.L.	657	Tab.	476
Camp.	553	Gro.	591	Oax.	713	Tamps.	668
Coah.	606	Hgo.	674	Pue.	714	Tlax.	745
Col.	784	Jal.	734	Qro.	739	Ver.	627
Chis.	585	Edomex	559	Q. Roo.	692	Yuc.	723
Chih.	653	Mich.	825	S.L.P	767	Zac.	799

Finalmente, utilizando los datos ya preparados y mediante la herramienta Python ®, se llevó a cabo la agrupación de datos considerando diferentes variables. Esto con el objetivo de encontrar relaciones entre el costo de energía y dichas variables.

Estimación energética

Como se mencionó anteriormente, la ENCEVI no cuestiona a los usuarios su consumo anterior si no cuanto pagaron por la energía eléctrica en la facturación anterior. A partir de los datos obtenidos para gasto se llevó a cabo una estimación del consumo de energía promedio, esto con el fin de obtener un dato característico expresado en kWh que no sea afectado por el cambio en el valor del dinero a través del tiempo y que sea más adecuado para ser utilizado en estudios energéticos en edificaciones.

La estimación se llevó a cabo considerando el costo de la energía eléctrica durante el primer semestre del año 2018. Una característica importante de la ENCEVI es que la captura de datos se llevó a cabo durante el primer semestre del año 2018; al analizar la respuesta de la pregunta 2.6 "*¿A qué periodo corresponde?*" (refiriéndose a la facturación del servicio eléctrico) se puede observar que la mayoría de las personas (44 %) indicaron que la última facturación que pagaron inició entre los meses de noviembre y enero.

Por lo tanto, se puede considerar que el pago reportado correspondía, en la mayoría de los casos, a un periodo de facturación de invierno; durante estos meses las tarifas para climas cálidos presentan menores cantidades de subsidio, siendo la única diferencia la cantidad considerada en el segundo escalón de consumo. Por ejemplo, en la tarifa 1 los primeros 75 kWh mensuales se consideran consumo básico y los 65 kWh siguientes se consideran consumo intermedio, mientras tanto, en la tarifa 1-A los primeros 75 kWh mensuales se consideran consumo básico mientras que los siguientes 75 kWh mensuales se consideran consumo intermedio. Los costos en todas las tarifas durante enero de 2018 fueron de $0.793 MXN/kWh para el consumo básico, $0.956 MXN/ kWh para el consumo intermedio y $2.802 MXN/kWh para el consumo excedente.

La tarifa eléctrica con mayor representación en los registros de la ENCEVI es la tarifa 1 con el 54.1 % de las respuestas (sin considerar los hogares en los que desconocían su tarifa), seguida de la tarifa 1 B (12.4 %), la 1 C (11.3 %), la 1 A (9.3 %), la 1 D (5 %), la 1 E (4 %), la 1 F (3.8 %), y finalmente la DAC (0.1 %) . Estos registros son similares a los datos reportados por la Secretaría de Energía (SENER) en el año 2017 para usuarios de energía eléctrica por tarifa (Tarifa 1: 54.4%, Tarifa 1 A: 7.4 %, Tarifa 1 B: 11.1%, Tarifa 1 C: 14 %, Tarifa 1 D: 5%, Tarifa 1 E: 3.3% y tarifa DAC: 3.6 %) (SENER, 2017).

Tomando en cuenta los escalones de consumo durante el invierno de la tarifa 1 es posible estimar un consumo de energía promedio bimestral a partir del pago reportado para energía eléctrica. En este caso tomando el pago promedio nacional por vivienda de $290.7 MXN, considerando una facturación bimestral y un pago por derecho a alumbrado público del 5.6%[1], se obtiene un valor estimado de 275 kWh/bimestre o 137.5 kWh/mes. Esta misma metodología se utilizó para estimar los consumos de energía presentados en este documento.

RESULTADOS

Pago promedio por entidad

Respecto a cuanto pagan las viviendas por entidad y por el tipo de tarifa, se obtuvieron los pagos promedio con base a estos dos criterios. Respecto a los datos por tarifa, es importante mencionar que, al ser la encuesta realizada en el año 2018, la mayoría de las personas indicaron que su ultimo pago correspondía a un periodo con inicio entre noviembre y enero. Debido a esto se puede pensar que en la mayoría de los costos reportados no estaba involucrado el subsidio característico de los periodos de verano. También es importante mencionar que varias ciudades han presentado cambios de tarifa entre el año del levantamiento de la encuesta y el presente. De acuerdo al análisis de datos, el hogar promedio pagó en su última facturación $290.7 MXN.

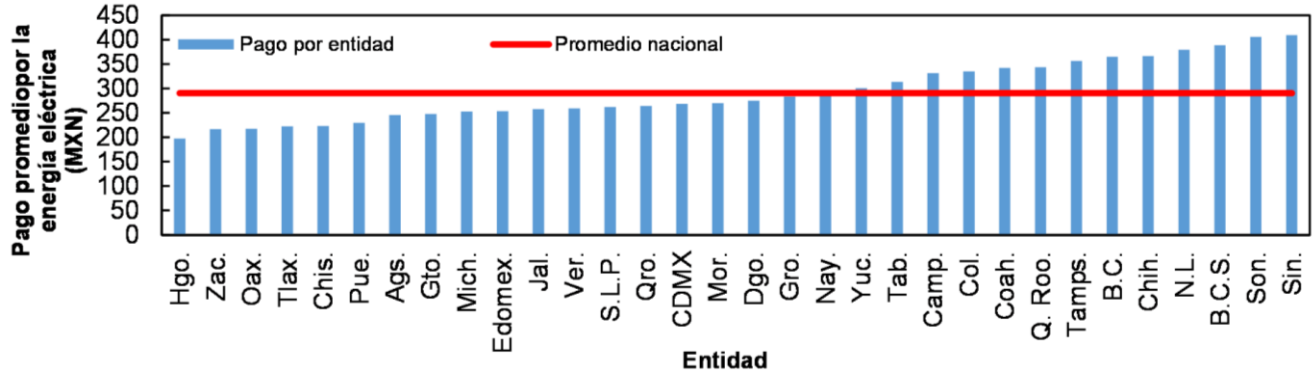


Figura 1. Pago promedio por entidad

Pago promedio de acuerdo al tamaño de la vivienda

Una de las relaciones de mayor interés fue costo de la energía eléctrica al considerar el tamaño de la vivienda, el promedio nacional se puede observar en la figura 2. Estos datos muestran que las viviendas de 76 a 100 m^2, las cuales son las más comunes de acuerdo a los hogares entrevistados (figura 3), pagaron en promedio $296.6 en su última facturación.

[1] Valor informativo, el valor mostrado corresponde a la ciudad de Durango, Dgo. Considerar que este valor es diferente para cada municipio.

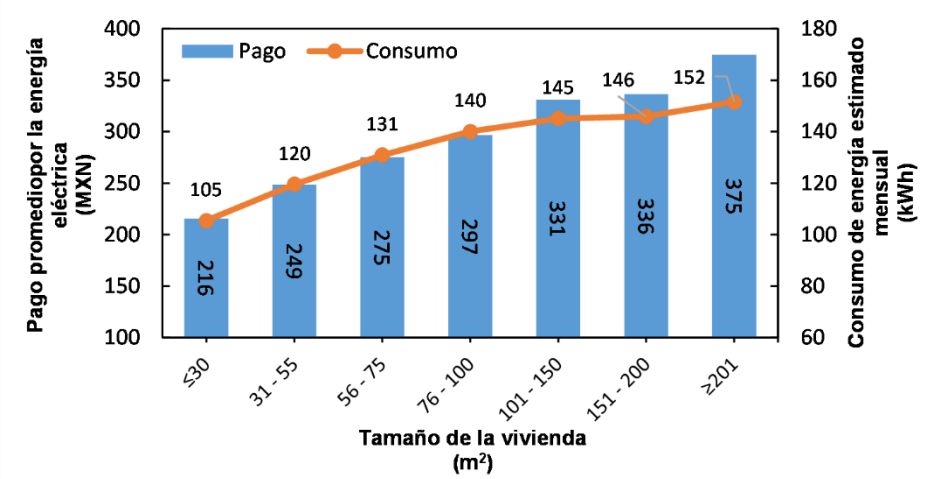


Figura 2. Pago de energía eléctrica conforme a tamaño de vivienda



Figura 3. Registros por tamaño de vivienda

Pago promedio con base en el número de habitantes

Otra variable importante a considerar en el consumo de energía de los hogares es el número de ocupantes de la vivienda. Para observar el impacto de esta variable se agruparon los datos promedio de pago con base al número de ocupantes de la vivienda. En México el promedio de ocupantes por vivienda es 3.6 (INEGI, 2020), de acuerdo a los datos de ENCEVI, las viviendas con tres ocupantes pagaron en promedio $292 MXN mientras que las de cuatro ocupantes pagaron en promedio $306 MXN.

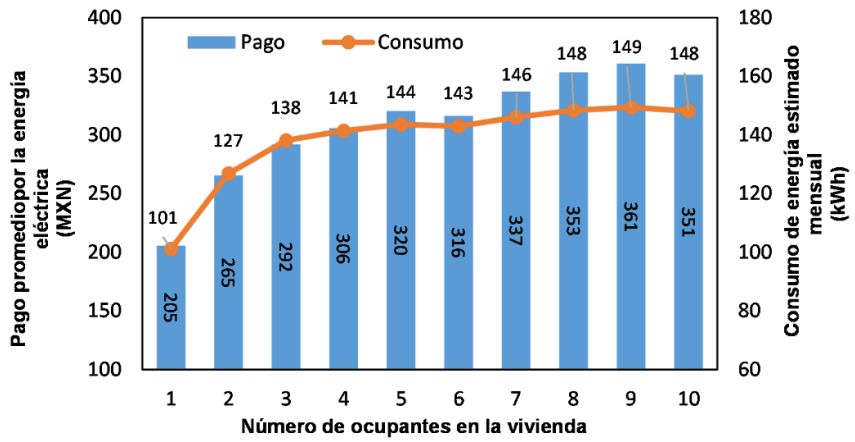


Figura 4. Pago promedio por energía eléctrica con base en el número de habitantes en la vivienda

Conocimiento de los usuarios sobre su tarifa

Finalmente, respecto al conocimiento de los usuarios respecto a su tarifa eléctrica, es importante mencionar que un 39% de los encuestados declararon no saber en qué tipo de tarifa se encontraba su hogar. Al considerar este factor en cada entidad se puede observar que las entidades con un menor porcentaje de desconocimiento sobre su tarifa son: Aguascalientes (2 %), Estado de México (10 %) y Zacatecas (14 %). Mientras que las entidades con el mayor porcentaje de desconocimiento de su tarifa eléctrica por hogar son: Tabasco (65 %), Campeche (66 %) y Baja California Sur (72 %).

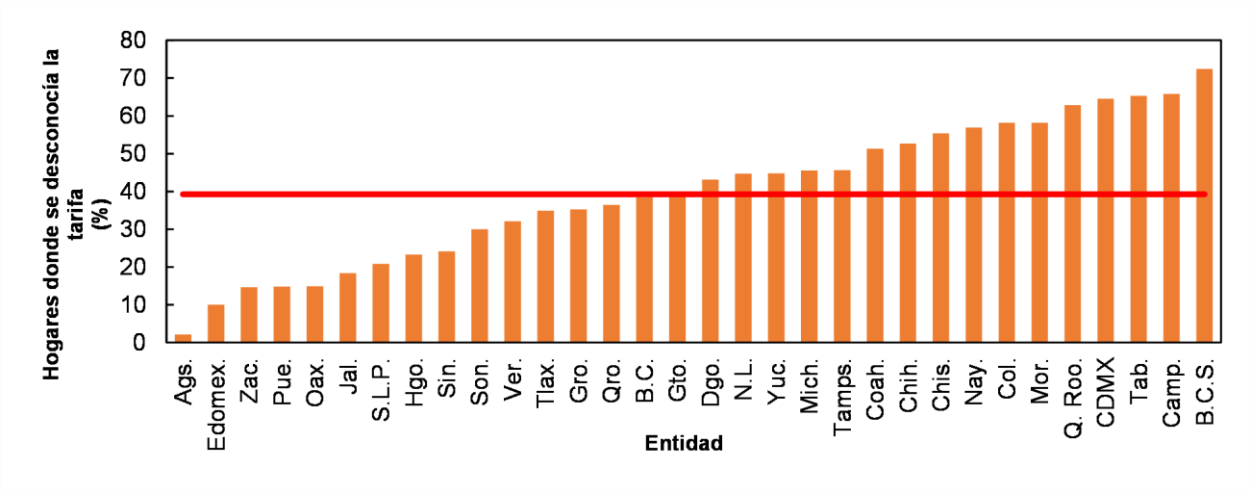


Figura 5. Porcentaje de desconocimiento de su tarifa eléctrica por entidad

CONCLUSIONES

Caracterizar el consumo energético de los edificios, especialmente en el sector residencial, es de gran importancia para establecer metas de eficiencia energética y desarrollo sostenible. Existen relaciones diversas entre el consumo de energía de los hogares y también múltiples factores del tipo: social, económico y ambiental. Entender como estos factores impactan el consumo de energía de los hogares puede ayudar a establecer metas nacionales en materia de eficiencia energética.

En México, la ENCEVI es una herramienta de gran utilidad como un primer acercamiento a la caracterización estadística de los hogares del país. Esta herramienta ofrece una perspectiva sobre el uso de energía en los hogares modernos, facilitando la comprensión sobre los hábitos de consumo en este sector.

La ENCEVI permite obtener una visión general del tamaño de construcción de las viviendas del inventario nacional, siendo las viviendas más comunes en la encuesta aquellas con una superficie construida entre 76 m^2 y 100 m^2; en estas viviendas se estimó un consumo de energía mensual promedio de 140 kWh/mes. Por su parte en viviendas menores a los 30 m^2 el consumo estimado fue de 105 kWh/mes y en viviendas de 151 a 200 m^2 el consumo estimado fue de 146 kWh/mes. El consumo promedio estimado de 137.5 kWh/mes puede ser un punto de partida importante al establecer metas de eficiencia energética que busquen mover el mercado en la dirección de proyectos ambiciosos como el desarrollo de edificios de consumo de energía casi nula (nZEB) o de energía neta cero (NZEB).

El análisis de la relación entre los habitantes de una vivienda y su consumo de energía también puede brindar información importante sobre aspectos sociales que influyen en este ámbito. Por ejemplo, una casa de cuatro habitantes no necesariamente requiere el doble de energía que una habitada por dos personas. Esto es principalmente debido a que el uso de energía en espacios comunes, como la sala de estar o el comedor, varia en menor medida con respecto al número de personas que hagan uso de ellos. Esto es importante sobre todo al recordar que a mayores consumos se paga más por la electricidad, debido a la mayor cantidad de consumo que se contabiliza dentro de los escalones intermedios y excedentes de la facturación. Por lo tanto, en la figura 3 el aumento de consumo con relación a los ocupantes es menor que el aumento de los costos. Tal es el caso, que al estimar el aumento de costo de facturación por cada habitante (desde uno hasta 10 ocupantes) se obtiene un aumento promedio en la facturación de $16 por ocupante y solamente de 5 kWh por ocupante en el consumo mensual de energía.

Finalmente, de acuerdo con la encuesta un porcentaje significativo de los encuestados indicaron no conocer el tipo de tarifa en el que se encontraban. Respecto a este punto, se puede mencionar la importancia de fomentar una cultura de la información en la cual las personas conozcan no solamente el tipo de tarifa a la que pertenecen, sino también la forma en la que se lleva a cabo el cobro en dicha tarifa.

Así mismo, es posible plantear preguntas respecto a la forma en la que se capturan las respuestas. Si bien encuestas de este tipo son muy extensas y requieren de una cantidad considerable de tiempo para responderse, una alternativa para obtener una mayor cantidad de datos confiables puede ser hacer uso directo de la facturación eléctrica de los encuestados para capturar datos como: consumo en kWh, costo en $MXN, periodo de facturación y tipo de tarifa. Así mismo, una identificación más clara de la ubicación geográfica (desde el nivel municipal) de los encuestados en los datos presentados al público también puede ser de gran ayuda para un mejor uso y comprensión de los datos.

Se reconoce la valía de la ENCEVI como herramienta, especialmente para estudios de eficiencia energética en el sector residencial, sin embargo, es importante revisar y actualizar su contenido, de forma tal que permita obtener otro tipo de información relevante. Por ejemplo,

aspectos referentes al confort térmico, definición especifica de los materiales constructivos de la vivienda y criterios para la adquisición de equipos domésticos, entre otros, pueden proveer información valiosa para comprender mejor el uso de energía en el sector vivienda.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al M.I. Rodrigo Domínguez García por la enseñanza del programa Python ® y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el otorgamiento de la beca de posgrado con número 814218.

REFERENCIAS

García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. In Economía, Sociedad y Territorio: Vol. xvi.

INEGI. (2020). Sistemas de consulta - Banco de indicadores. https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=1003000015&vind=metadato#D1003000015#D1003000019#D1003000011#D6200108938#D1003000015

INEGI, CONUEE, & SENER. (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018. Subsistema de Información Demográfica y Social. https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/#documentacion

SENER. (2017, October 20). Usuarios de energía eléctrica por tarifa. Datos Abiertos. https://datos.gob.mx/busca/dataset/usuarios-de-energia-electrica-por-tarifa

SENER. (2023). Balance Nacional de Energía 2022.

United Nations Environment Programme. (2024). 2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. United Nations Environment Programme. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DEL CONFORT HIGROTÉRMICO UTILIZANDO UN MODELO BIDIRECCIONAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA A TRAVÉS DE LA ROPA

Iván Oropeza Pérez
Coordinación de Arquitectura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Centro Universitario, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México, 2227154069, **ioropeza@correo.uam.mx**

RESUMEN

En este documento se evalúa el rango de confort higrotérmico de una persona considerando el flujo bidireccional de calor y masa entre el cuerpo humano y sus alrededores y tomando en cuenta una capa de ropa. Un modelo de análisis toma en cuenta el flujo bidireccional de calor, que se da por sus tres vías de transferencia: conducción, radiación y convección, mientras que el flujo de masa se da a través de la evaporación y la difusión. La evaluación muestra que, considerando varias características de la ropa, entre ellas la reflectividad solar, la permeabilidad de aire, la densidad, y la conductividad; es el enfriamiento por convección, que aumenta con la presencia de ventilación y evaporación, y está presente en ropa con alta permeabilidad de aire, la que tiene la mayor influencia para alcanzar el confort higrotérmico, incluso más que la alta reflectividad solar de la ropa cuando un alto grado de radiación solar global está presente en el ambiente.

Palabras claves: Confort higrotérmico; capa de ropa; transferencia de calor y masa; flujo bidireccional.

ABSTRACT

In this document the range of hygrothermal comfort of a person is assessed considering the bidirectional heat and mass flux between the human body and its surroundings and by taking into account a clothing layer. An analysis mode considers the bidirectional flux of heat, which is undertaken by three manners of transfer: conduction, radiation and convection, whereas the mass flux is given by evaporation and diffusion. The assessment shows that, considering various characteristics of the cloth, such as solar reflectivity, air permeability, density, and conductivity; it is the cooling by evaporation, which is enhanced by the presence of ventilation and evaporation, and which is present on clothing with high air permeability, the one with most influence to achieve hygrothermal comfort, even more than high reflectivity clothing when high levels of solar radiation are present on the environment.

Keywords: Hygrothermal comfort; clothing layer; mass and heat transfer; bidirectional flux.

INTRODUCCIÓN

El confort higrotérmico es entendido como las condiciones físicas adecuadas, llamadas temperatura y humedad relativa, que el cuerpo humano puede soportar sin experimentar fases de sobrecalentamiento o enfriamiento. Sin embargo, estudios han demostrado que estos dos parámetros no son suficientes para determinar un cierto grado de confort higrotérmico. Varios factores físicos tales como la radiación solar, radiación mecánica, o una combinación; la misma radiación del cuerpo humano; el nivel de sudoración; la resistencia térmica y permeabilidad de aire de la ropa; entre otros, así como factores humanos tales como el estado psicológico y fisiológico de la persona, hacen que el confort higrotérmico se vuelva un valor difícil de calcular si solamente se cuenta con los valores de temperatura del aire y humedad relativa del lugar.

De esta manera, los estudios recientes sobre el tema se han enfocado en encontrar los parámetros ambientales y humanos para lograr confort higrotérmico. Así pues, los estudios se pueden clasificar en los medios de transferencia de calor y masa del cuerpo humano a sus alrededores, y viceversa, para lograr tal confort. En términos de transferencia de calor, la transferencia por conducción es la más estudiada, sobre todo para conseguir confort térmico en condiciones de bajas temperaturas. Por otro lado, para fines de enfriamiento en condiciones cálidas, los estudios se han enfocado en la combinación de las tres maneras de transferir calor (conducción, convención y radiación), dando un énfasis en la convección, a través de telas porosas, y en la radiación, presentando ropa con alta reflectividad solar. En términos de transferencia de masa, diferentes documentos presentan el fenómeno de la difusión, que es entendida como la transferencia de la humedad de medios húmedos a medios más secos, presentándose en el confort higrotérmico como la transferencia de humedad del ambiente al cuerpo humano, pasando por capas porosas de la ropa. Así también se presenta el fenómeno de evaporación, que es la transferencia de humedad, principalmente sudoración, por parte de la piel humana hacia sus alrededores. Sin embargo, en el estudio del arte no se encontró ningún caso que mostrara un análisis integral considerando los tres medios de transferencia de calor y los dos medios de transferencia de masa, considerando tanto las condiciones de metabolismo del cuerpo humano como las condiciones climatológicas externas, y a su vez, las características de la ropa entre ambos medios.

Así pues, este documento tiene como propósito mostrar una evaluación integral del confort higrotérmico considerando los principales medios bidireccionales de transferencia de calor y masa, así como la presencia de una capa de ropa, en términos de enfriamiento en condiciones cálido-húmedas, principalmente. El estudio contempla el desarrollo de un modelo matemático que determina los valores de temperatura y humedad relativa, los cuales son comparados con los rangos de confort higrotérmico, y de esta manera se puedan establecer las condiciones de metabolismo y de ropa, principalmente, que sean las adecuadas para lograr los niveles adecuados de confort en temperatura y humedad, considerando que los niveles de temperatura y humedad son difíciles de modificar, especialmente en espacios sin métodos activos de climatización, conocidos como edificios de funcionamiento libre.

METODOLOGÍA

Las tres maneras de transferencia de calor entre el cuerpo humano y sus alrededores, así como los dos medios de transferencia de masa, pueden ser observados en la Figura 1.

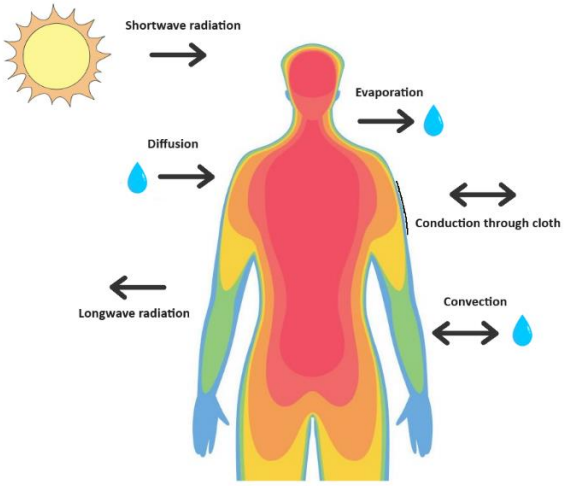


Figura 1. Medios de transferencia de calor y masa del cuerpo humano hacia sus alrededores, y viceversa (Fuente: elaboración propia).

La Figura 1 muestra que existe una transferencia de calor por conducción, desde y hacia el cuerpo humano, transmitida por la ropa. También se muestra la transferencia de calor por convección, dada principalmente por el intercambio de calor entre el aire alrededor del cuerpo y la piel, acelerada por fluidos como el agua y el sudor. En el caso de la radiación, esta se puede dividir en dos: la radiación ultravioleta, o de onda corta, que es recibida principalmente del sol, y la infrarroja, o de onda larga, la cuál es emitida desde el cuerpo humano. En el caso de la transferencia de masa, como se había expresado en la introducción, está la difusión, o transferencia de humedad de los alrededores al cuerpo, y la evaporación, o sudoración generada desde la piel hacia sus alrededores.

De esta manera, se puede apreciar los distintos factores que influyen en un rango de confort higrotérmico. Así, el presente documento muestra un modelo matemático desarrollado para comprender los flujos bidireccionales de calor y masa que rigen en los rangos de confort higrotérmico y de esta manera se pretende encontrar los factores del usuario, principalmente, como las características de la ropa y la tasa metabólica, para determinar las estrategias para alcanzar el confort.

El modelo matemático inicia con la transferencia de calor por conducción, expresada en un modelo de tres dimensiones, de la siguiente manera:

$$q_{cond}(x,y,z) = \frac{k}{\partial x+\partial y+\partial z}\left(\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T(y)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2}\right) \quad (1)$$

Donde q_{cond} es el flujo local de calor por conducción en las direcciones x,y,z (W/m^2) y k es el valor de conductividad del material (W/m-K). Como el flujo de calor es solamente considerado a través de la ropa, es decir, en la dirección z, la ecuación se puede simplificar:

$$q_{cond} = \frac{k}{dz}\left(\frac{d^2 T(z)}{dz^2}\right) \quad (2)$$

Si la dirección es considerada como la longitud seccional, esta es igual al grosor de las capas de ropa (m). Así, la Ecuación 2 puede ser simplificada:

$$q_{cond} = \frac{k}{dL}\left(\frac{d^2 T(L)}{dL^2}\right) \quad (3)$$

De esta manera, el flujo de calor por conducción a través de una capa de ropa, y dado por la diferencia de temperaturas de las dos capas externas está dado por la siguiente ecuación:

$$q_{cond} = A \cdot U \cdot (T_{cloext} - T_{cloint}) \quad (4)$$

Donde A es la superficie donde el flujo es llevado a cabo (m^2), U es el coeficiente global de transferencia de calor de la capa de ropa (W/m^{2}K) y que depende de la conductividad y grosor de la tela, principalmente, T_{cloext} es la temperatura de la capa exterior de la ropa (K) y T_{cloint} es la temperatura de la capa interior (K). En el caso de la transferencia de calor por convección, esta está dada por:

$$q_{conv}(x,y,z) = h\left(\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(y)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

Donde q_{conv} es el flujo de calor por convección del cuerpo humano hacia sus alrededores, y viceversa (W/m^2), h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m^2K) y es estimado, entre otros factores, por los números de Nusseslt, Rayleigh, Prandtl, y Grashof, todos ellos sin unidades, dependientes del calor específico del aire, el valor de gravedad, el coeficiente del valor de expansión del fluido, y la densidad y viscosidad del aire, entre otros. Así, la Ecuación 5 puede ser simplificada de la siguiente manera;

$$q_{conv} = A \cdot h \cdot (T_{cloint} - T_{zone}) - A \cdot h \cdot (T_{zone} - T_{skin}) \quad (6)$$

Donde T_{zone} es la temperatura de bulbo seco del aire y T_{skin} es la temperatura de la piel. Se puede notar que el flujo de calor es bidireccional, es decir, depende tanto del calor que fluye de los alrededores, dado por T_{zone}, como del calor fluyendo del cuerpo hacia afuera, dependiente de T_{skin}. Con respecto al flujo de calor por radiación, este está dado por la siguiente ecuación de gobierno:

$$q_{rad}(x,y,z) = \varepsilon_{SB} \cdot \sigma \cdot [(T_{cloext})^4 - (T_{outair})^4]\left(\frac{\partial^2 x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial z^2}\right) + met \quad (7)$$

Donde q_{rad} es el flujo de calor por radiación (W/m^2), ε_{SB} es la constante de Stefan-Boltzman ($W/m^2\text{-}K^4$), T_{outair} es la temperatura de bulbo seco del aire exterior (K) y met es la tasa metabólica del cuerpo humano (W/m^2) que indica el calor irradiado desde la piel humana y que depende principalmente del ejercicio físico realizado por la persona. Al igual que los dos tipos de flujos caloríficos anteriores, al ser solamente considerado una dimensión de flujo, la z, la Ecuación 7 puede ser simplificada como sigue:

$$q_{rad} = \varepsilon_{SB} \cdot \sigma \cdot A \cdot [(T_{cloext})^4 - (T_{outair})^4] + met \quad (8)$$

Así pues, para calcular la temperatura de confort, $T_{comfort}$, se integran los tres flujos de calor bidireccionales y se desarrolla la Ecuación 9:

$$T_{comfort} = \left\{\left[\frac{U\cdot(T_{cloext}-T_{cloint})+h_{cloint}\cdot(T_{cloint}-T_{1zone})-A\cdot h_{skin}\cdot(T_{1zone}-T_{skin})+\varepsilon_{SB}\cdot\sigma\cdot[(T_{cloext})^4-(T_{outair})^4]+met}{\rho\cdot L\cdot C_P}\right]\cdot\Delta t\right\} + T_{1zone} \quad (9)$$

Para el caso de la transferencia de masa, difusión y evaporación, su flujo bidireccional está dado por la ecuación de gobernanza:

$$\frac{d\rho_A}{dt} = \left[\frac{\partial N_{A,x}}{\partial_x} + \frac{\partial N_{A,y}}{\partial_y} + \frac{\partial N_{A,z}}{\partial_z}\right] - R_A \quad (10)$$

Donde ρ_A es densidad del vapor de agua (kg/m^3) en el medio con una superficie A, N_A es el coeficiente de difusión en cada dimensión (m^2/s), y R_A es la tasa de flujo de vapor de agua (kg/m^3s) por evaporación, o sudoración. Si se calcula una densidad del vapor de confort en un medio poroso, como el que existe con la capa de tela de la ropa, esta se puede expresar de la siguiente manera:

$$\rho_{confort} = \left(\frac{-k\cdot L}{\mu}\cdot\Delta P - R_A\right)\cdot\Delta t + \rho_{A1} \quad (11)$$

Donde k es la permeabilidad de aire (porosidad) de la tela ($m^3/s/m^2$), μ es la viscosidad del aire (Pa.s), ΔP es la diferencia de presión del aire a través del medio poroso (Pa), Δt es la diferencia de tiempo en que sucede el flujo de masa (s) y ρ_{A1} es la densidad inicial al tiempo t=0. De esta manera, se puede calcular la humedad relativa a través de la Ecuación 12:

$$\varphi = \frac{\rho_{comfort}}{\rho As}\cdot 100 \quad (12)$$

Donde ρ_{AS} es la densidad de saturación del vapor (kg/m^3) y se puede calcular con la Ecuación (13):

$$\rho As = 6.11 \cdot exp\left[\frac{17.27\cdot T_d}{T_d + 237.3}\right] \quad (13)$$

Donde T_d es la temperatura de rocío del lugar, y es tomada de tablas de las condiciones climatológicas propias del lugar donde se haría el estudio de confort higrotérmico considerando los modelos bidireccionales de transferencia de calor y masa.

Modelo de evaluación

Con las Ecuaciones 1 a 13 se puede establecer un modelo de evaluación considerando condiciones de entrada, que se pueden dividir en condiciones ambientales, del cuerpo humano y de la ropa usada. De esta manera se calculan las condiciones de temperatura y humedad relativa las cuales son evaluadas si se encuentran dentro de los rangos de confort. Si esto no es así, se cambiarían las condiciones de entrada hasta lograr el confort higrotérmico. Un esquema del modelo de evaluación puede ser visto en la Figura 2.

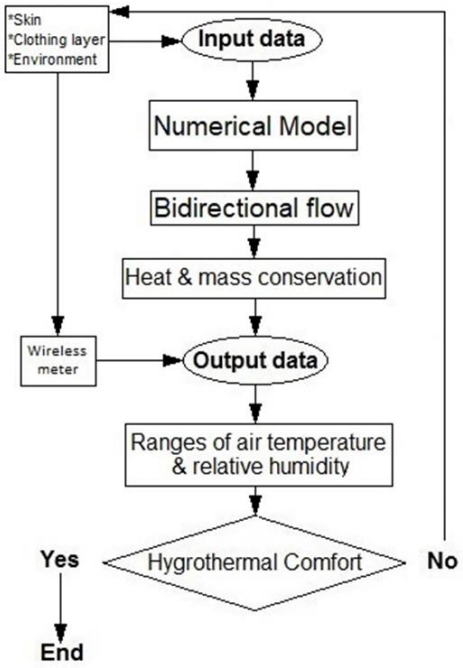


Figura 2. Diagrama de flujo que muestra el modelo de evaluación propuesto en este documento considerando las ecuaciones desarrolladas en el mismo (Fuente: elaboración propia).

Arreglo experimental

Para realizar el modelo de evaluación, un arreglo experimental es necesario. Es consiste en una persona saludable de mediana edad, la cual lleva un medidor de temperatura y humedad relativa Ymiko, modelo YS-11®, en la parte media del dorso, y que realizar ejercicio a diferentes niveles de tasa metabólica. La persona usa diferentes tipos de ropa con telas de diferentes características físicas y se evalúa la validez del modelo matemático aquí desarrollado con los resultados del experimento. Un esquema del experimento puede ser visto en la Figura 3.

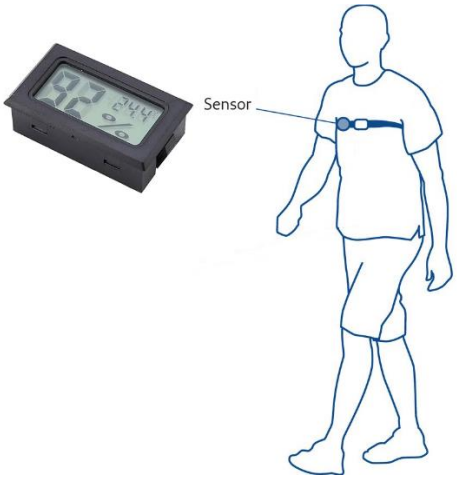


Figura 3. Esquema del experimento para validar el modelo de análisis desarrollado en este documento (Fuente: elaboración propia).

Los diferentes tipos de telas usadas en el experimento están descritos en la Tabla 1.

Tabla 3. Valores físicos de las telas usadas en el experimento y el modelo de evaluación

Tipo de tela	Conductividad (W/m-K)	Permeabilidad de aire ($cm^3/s/cm^2$)	Reflectividad solar (sin unidad)	Densidad (g/cm^3)
Algodón blanco	0.035	13.14	0.94	1.50
Polyester y nylon	0.025	11.95	0.83	1.08
Algodón elástico	0.030	12.95	0.73	1.56
Polyester reciclado	0.050	12.77	0.94	1.38
Algodón negro	0.035	13.14	0.05	1.50

Resultados

Los experimentos fueron divididos en dos partes: condiciones interiores y exteriores, esto es, sin y con radiación solar global y ventilación. En el caso de las condiciones interiores los experimentos se realizaron en la Ciudad de México, los días 27 de noviembre al 1 de diciembre de 2023, con condiciones de temperatura de bulbo seco interior de 23.4 a 25.3 °C, humedad relativa de 58 a 71%. Con respecto a las condiciones de tasa metabólica, esta fue puesta en un rango de 1 a 5.2 mets (58 a 301.6 W/m^2). Los resultados pueden ser observados en la Figura 4.

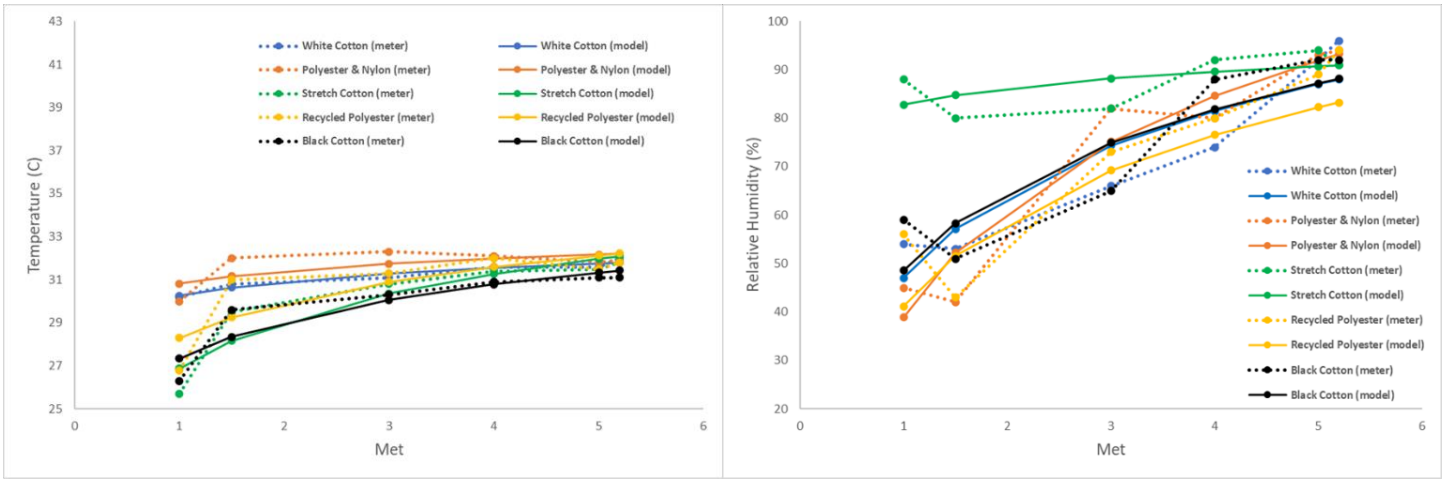


Figura 4. Temperatura y humedad relativa, medida y calculada, para condiciones interiores.

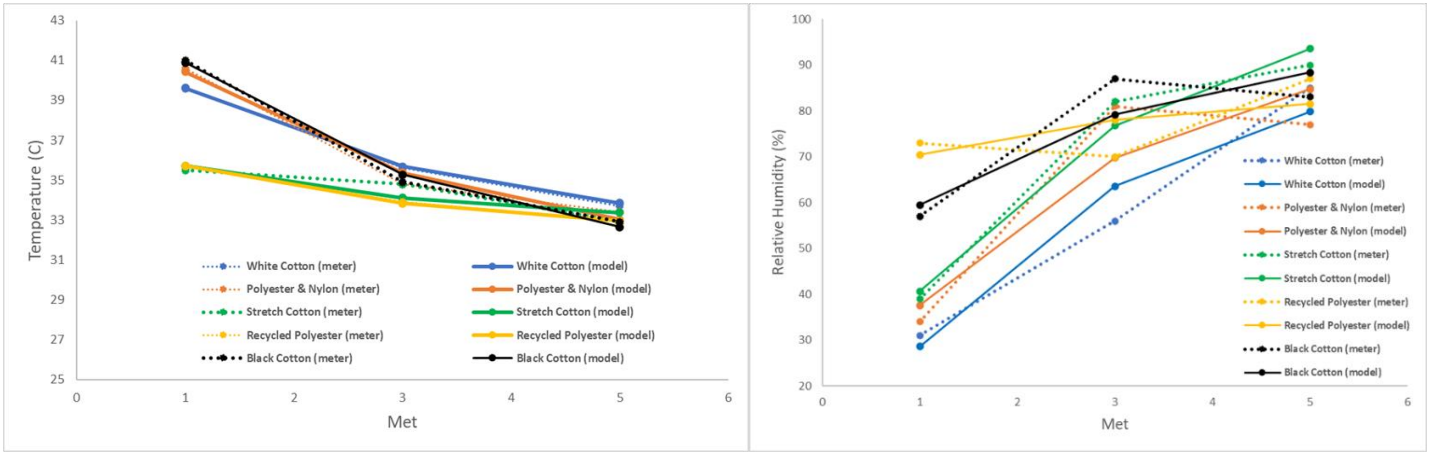


Figura 5. Temperatura y humedad relativa, medida y calculada, para condiciones exteriores.

Para el caso de condiciones exteriores, es decir, con presencia de radiación solar y ventilación natural, las mediciones experimentales fueron realizadas un solo día, el 2 de diciembre de 2023, presentando una radiación global solar de 590-602 W, 53% de humedad relativa, 24.6°C de temperatura de bulbo seco exterior, y 6 km/h (1.67 m/s) de velocidad media del viento.

Las Figuras 4 y 5 muestran que los resultados obtenidos con el modelo de evaluación desarrollado en este documento tienen concordancia con los medidos en los experimentos, presentando un error máximo de 1.8°C en el caso de la temperatura y tres medidas arriba del 15% en el caso de la humedad relativa, de 45 datos comparados (medidos y calculados). De esta manera se puede establecer la validez del modelo presentado.

Por otra parte, los resultados obtenidos son comparados de acuerdo con el tipo de tela. De esta manera se puede apreciar que, en condiciones de ausencia de radiación y ventilación, la temperatura y la humedad alrededor del cuerpo humano aumentan conforme aumenta la tasa metabólica de la persona, provocando que se alcancen temperaturas de más de 31°C y de humedades relativas superiores de más de 80%. Con respecto al tipo de tela que presenta mejores resultados, estas son el algodón negro y blanco, mientras que en términos de humedad el menor valor lo obtuvo el poliéster reciclado, con un valor relativamente alto de permeabilidad de aire (12.77 $cm^3/s/cm^2$).

Con respecto a la presencia de radiación y ventilación, aunque la radiación solar global es relativamente alta (alrededor de 600 W/m^2) la presencia de aire en movimiento incentiva que la temperatura alrededor del cuerpo disminuya, debido a la pérdida de calor por convección. Se puede apreciar que ante la ausencia de sudor (1 met), la temperatura está entre los 35 y los 41°C. Sin embargo, cuando el cuerpo se ejercita, existe la presencia de sudor (humedad) la cual, junto con la presencia de viento, disminuye la temperatura, aunque aumentando de manera lógica la humedad relativa. De esta manera, la temperatura converge a valores cercanos a 33°C, siendo las telas con mayores valores de permeabilidad de aire las que obtienen mejores resultados.

Es por esto que se considera que la permeabilidad de aire de la tela, o porosidad, se vuelve el factor físico más importante a considerar, sobre todo en condiciones exteriores, como los presentados en la Figura 5. Esto se considera en condiciones de ventilación natural, ya que sin la presencia de esta condición la reflectividad, o albedo de la tela, se convierte en el factor con mayor influencia. Por otra parte, la porosidad de diferentes telas puede ser apreciada en la Figura 6.

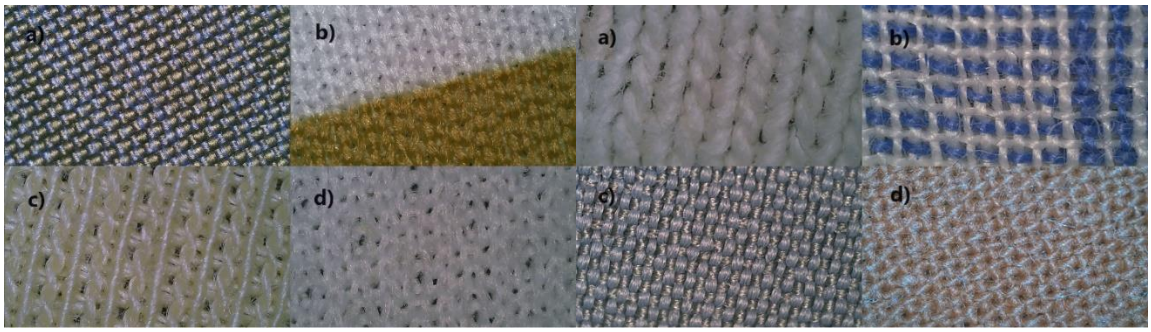


Figura 6. Fotografías microscópicas de diferentes telas, algunas usadas en este documento (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 6 se aprecian las imágenes microscópicas de cuatro tipos de tela usadas en este documento: algodón blanco a-derecha, polyester y nylon b-izquierda, algodón elástico c-izquierda, y polyester reciclado d-izquierda. Algunas telas tales como nylon, a-izquierda, y algodón crudo, d-derecha, muestran claramente una falta de porosidad lo cuál conllevaría una eventual elevación de temperatura y humedad relativa.

CONCLUSIONES

En el documento se desarrolló un modelo matemático integral de transferencia de calor y masa que toma en cuenta los flujos bidireccionales del cuerpo humano hacia sus alrededores y viceversa. Este modelo fue validado con resultados experimentales y es usado para encontrar, bajo ciertas condiciones climatológicas (temperatura, humedad relativa, radiación solar y ventilación natural), del cuerpo humano (tasa metabólica), y de la ropa (conductividad, porosidad, reflectividad y densidad) las mejores características de la ropa para alcanzar un grado de confort higrotérmico. Según los resultados obtenidos en dos experimentos bajo condiciones de ausencia y presencia de radiación y ventilación, se encontró que el algodón negro mantiene los menores de temperatura y humedad relativa en condiciones interiores (indoor), mientras que en condiciones exteriores el poliéster reciclado presentó los mejores resultados. Así pues, se encontró que la porosidad de la tela, o permeabilidad de aire, es el valor con más influencia mientras hay condiciones de ventilación natural y sudoración del cuerpo. Si estas condiciones no están presentes, la reflectividad solar de la tela es el factor más importante por considerar.

REFERENCIAS

Khan A., Nazir A., Rehman A., Naveed M., Ashraf M., Iqbal K., Basit A., Maqsood H.S. (2020). A review of UV radiation protection on humans by textiles and clothing, International Journal of Clothing Science and Technology, Vol 32, No. 6, p. 869-890.

Zhihao M., Dongliang Z., Faming W., Ronggui Y. (2022). A novel thermal comfort and energy saving evaluation model for radiative cooling and heating textiles, Energy and Buildings, Vol 258, p. 111842.

Jia N., Jia X., An H., Li J., Wang R (2019). A 3D heat and moisture transfer model with radiation in clothing, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol 517, p. 440-451.

Sun C., Fan J. (2017). Comparison of clothing thermal comfort properties measured on female and male sweating manikins, Textile Research Journal, Vol 87, No. 18, p. 2214-2223.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN LA FORMULACIÓN DE SUBPRODUCTOS COSMÉTICOS: UN ENFOQUE HACIA LA CREACIÓN DE EMPRENDIMIENTOS SOCIALES COMUNITARIOS

Diana E. Lara Llanderal y Karla G. Cedano Villavicencio
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, C.P. 62580, México
Teléfono: 777 136 33 41, e-mail: **delal@ier.unam.mx**

RESUMEN

Comúnmente, la energía solar térmica se ha utilizado en la deshidratación de frutas y verduras, que posteriormente son transformados en productos alimenticios como suplementos, snacks y condimentos. La energía solar térmica también ha contribuido al desarrollo de emprendimientos que reducen la vulnerabilidad de comunidades desfavorecidas. Sin embargo, existen pocas investigaciones sobre el aprovechamiento de productos secundarios que utilicen materia vegetal deshidratada. Bajo este enfoque, se han formulado los siguientes objetivos de investigación: a) Desarrollar un producto que incorpore materia vegetal deshidratada para la elaboración de subproductos de alta demanda. b) Utilizar este producto como piloto para llevar a cabo una metodología que propicie a la formación de una cooperativa solar productora. Se realizó un extracto vegetal utilizando plantas medicinales deshidratadas con exposición solar de 0 a 10 días y se comparó el rendimiento de secado entre un deshidratador semi industrial de gabinete y una red de secado casera. El extracto se utilizó para la elaboración de un producto cosmético que puede ser replicado en hogares y utilizado como producto en la formación de un emprendimiento social comunitario. El principio metodológico del producto fue difundido en redes sociales como "Cosmética solar" y se evaluaron indicadores de alcance e interés. Los resultados sugirieron que la deshidratación solar de especies como manzanilla (Matricaria nobilis), rosa criolla y menta (Mentha spicata) son adecuadas para formar extractos oleosos e hidroglicerinados para formular productos cosméticos por sus propiedades medicinales. El extracto fue desarrollado y caracterizado utilizando materia vegetal en distintas fases de deshidratación. La metodología desarrollada y la evaluación de interés en el tema indican que la industria cosmética representa un área de oportunidad para el aprovechamiento de la energía solar térmica, por lo que el desarrollo de un subproducto de alta demanda favoreció la etapa de planeación de un emprendimiento social en Temixco, Morelos.

ABSTRACT

Commonly, solar thermal energy has been used in the dehydration of fruits and vegetables, which are subsequently transformed into food products such as supplements, snacks and condiments. Solar thermal energy has also contributed to the development of businesses that reduce the vulnerability of disadvantaged communities. However, there is little research on the use of secondary products that use dehydrated plant matter. Under this approach, the following research objectives have been formulated: a) Develop a product that incorporates dehydrated plant matter for the production of high-demand by-products. b) Use this product as a pilot to carry out a methodology that promotes the formation of a solar producer cooperative. A plant extract was made using medicinal plants dehydrated with sun exposure from 0 to 10 days and the drying performance was compared between a semi-industrial cabinet dehydrator and a homemade drying net. The extract is used to produce a cosmetic product that can be replicated in homes and used as a product in the formation of a community social enterprise. The methodological principle of the product was disseminated on social networks as "Solar Cosmetics" and indicators of scope and interest were evaluated. The results suggested that solar dehydration of species such as chamomile (Matricaria nobilis), rose criolla and mint (Mentha spicata) are suitable to form oily and hydro glycerinated extracts to formulate cosmetic products for their medicinal properties. The extract was developed and characterized using plant matter in different dehydration phases. The developed methodology and the evaluation of interest in the topic indicate that the cosmetics industry represents an area of opportunity for the use of solar thermal energy, so the development of a high-demand by product favored the planning stage of a social enterprise. in Temixco, Morelos.

Palabras claves: Secado solar, Multidisciplina energética, Intervención comunitaria, Emprendimiento social.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda del bienestar humano ha sido clave para el desarrollo de herramientas y productos que mejoran la calidad de vida. El análisis de la gestión de recursos durante el ciclo de vida de los instrumentos revela que la energía es prioritaria, al igual que la divulgación de información sobre su gestión y regulación. La gestión energética, basada en fuentes renovables, puede mejorar la calidad de vida, ya que la energía es esencial para derechos básicos como salud, educación y trabajo. La cadena del sistema energético (producción, transmisión, distribución, consumo y residuos) debe respetar la dimensión social, respetando las prácticas y estilos de vida del contexto sociocultural en donde se realice cualquier proceso de gestión energético. Sin embargo, no todos los consumidores de energía tienen igual acceso a recursos, información y tecnologías, lo que plantea problemas de justicia energética. Para abordar esto, se recomienda: (1) identificar el problema de distribución, (2) reconocer a quienes afecta y (3) proponer estrategias de remediación. El empoderamiento comunitario puede mitigar la injusticia energética mediante soluciones estratégicas replicables (Jenkins et al. 2016).

El empoderamiento se evalúa a nivel comunitario y puede abordarse mediante acceso a tecnología y servicios. Este artículo se centra en el empoderamiento de comunidades vulnerables a través del uso productivo de la energía, vinculado a indicadores de desarrollo humano como empleo digno y construcción de capacidades.

El emprendimiento social surge como una vía efectiva para reconstruir el tejido comunitario mediante modelos de negocio con energías renovables descentralizadas, como la solar térmica, que generan ingresos y fomentan redes de apoyo (Haugh and Talwar 2014). Sin embargo, los usos productivos de la energía solar han sido poco investigados más allá de su producción. Las cooperativas productoras destacan por aprovechar las capacidades individuales y crear redes de apoyo (Becker et al. 2017), promoviendo una propiedad colectiva que busca transformación ambiental y social (Surie 2017).

Desarrollar un producto o servicio para un emprendimiento social requiere habilidades y conocimientos previos (Kwong et al. 2019). Este trabajo presenta un procedimiento para desarrollar un producto de alta demanda con energía solar térmica, desde la identificación hasta la evaluación, y describe cómo este procedimiento puede restaurar tejidos sociales mediante la formación de capacidades y transmisión de conocimiento.

METODOLOGÍA.

El proyecto integra diversas disciplinas asociadas a áreas sociales, tecnológicas y de negocios. Por lo tanto, con el objetivo de facilitar la comprensión de la metodología seguida, se presenta un esquema metodológico. Cabe mencionar que la última etapa se encuentra en proceso de desarrollo, por lo que algunos datos podrán ser fortalecidos con la información que se recabe en los siguientes periodos.

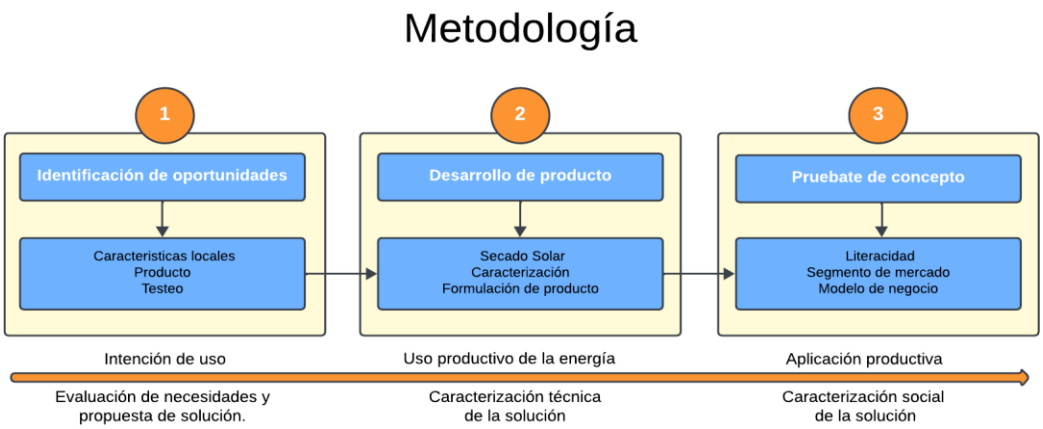


Figura 1. Esquema metodológico para la formación de un emprendimiento social en Temixco, Morelos.

Identificación de oportunidades

Características locales. El empoderamiento busca fortalecer comunidades afectadas por desigualdad socioeconómica. Se identificaron comunidades con alto potencial solar y alta marginación, eligiendo Temixco, Morelos, como zona piloto para recolectar datos y aplicar un modelo de negocio social. En 2020, el 48.4% de la población en Temixco vivía en pobreza moderada y el 13.2% en pobreza extrema. La población vulnerable por carencias sociales alcanzó el 19.8%. En 2024, Temixco reportó alta incidencia de embarazo adolescente y Morelos tenía uno de los salarios promedio más bajos del país. Sin embargo, Temixco tiene gran potencial solar, permitiendo a sus habitantes técnicas de cultivo y siembra, convirtiendo a Morelos en uno de los mayores productores de rosas.

Producto. Se identificaron tres productos potenciales elaborados a partir de insumos deshidratados mediante energía solar térmica: productos alimenticios (tisanas, snacks, proteína), productos para animales (bocados y premios) y productos de cuidado personal (cosméticos). Para evaluar su factibilidad, se consideraron cinco indicadores clave: competencia local, variación de costo de materia prima, tamaño de mercado, tiempo de procesamiento solar y oportunidades de innovación. Se utilizaron técnicas de mapeo comercial.

Testeo. Una vez seleccionado el producto con mayor viabilidad, se procedió a evaluar las preferencias de los consumidores. Se aplicó una encuesta a 100 personas residentes de Temixco, recolectando datos sobre ingredientes, aromas, precios, lugares de compra, artículos, empaques y etiquetas. La muestra incluyó 50 mujeres y 50 hombres.

Desarrollo de producto

Secado solar. El secado solar fue diseñado para ser replicable. Se comparó el rendimiento de secado usando un deshidratador solar semiindustrial y una red de secado con tela multiperforada. Se introdujo materia vegetal en ambas tecnologías y se retiraron muestras diariamente durante 10 días durante el mes mayo, con una radiación solar diaria promedio de 6.8 kWh.

Caracterización. El color y aroma fueron características importantes según la encuesta. Las 40 muestras se evaluaron con un colorímetro digital, que midió la intensidad de luz en longitud de onda específica. Se calibró con una muestra vegetal fresca y se compararon los resultados de muestras secas para determinar cambios de color por exposición al calor.

Formulación de producto. Después de determinar el tiempo de deshidratado necesario, se extrajeron aroma y color mediante maceración en distintos medios acuosos. Se utilizó un 20% de materia vegetal y un 80% de medio acuoso en frascos ámbar, macerando a temperatura ambiente y oscuridad. Se evaluaron pH, índice Brix, índice de refracción y se realizó cromatografía de papel. El extracto con mayor índice Brix se incorporó a una receta de cosmética natural.

Prueba de concepto

Literacidad. La literacidad implica procesos de aprendizaje en contextos socioculturales. Se realizaron talleres para evaluar la reproducibilidad de la fórmula por personas ajenas al proyecto, elaborando dos productos cosméticos con extractos vegetales. Se aplicó una encuesta de satisfacción para medir la facilidad de elaboración e interés en otros productos.

Segmento de mercado y producción. Para integrar un emprendimiento social, se requiere conocer productores y consumidores. Se implementó una campaña en redes sociales para divulgar el proceso de elaboración del producto “cosmética solar”, segmentando el público objetivo según características demográficas y preferencias.

Modelo de negocio social. El modelo de negocio social se diseñó considerando a los residentes de Temixco. Aunque aún no se ha ejecutado, se prevé desarrollar una cooperativa para la manufactura de productos o deshidratación de materia vegetal, permitiendo a los integrantes comercializar por cuenta propia. Los ingresos se reinvertirán en publicidad, insumos y expansión. El modelo está en fase de incubación, revisando elementos para su ejecución en los próximos meses.

OBSERVACIONES Y RESULTADOS

Identificación de oportunidades

Características locales. Se seleccionaron dos localidades en Temixco para la recolección de datos: la colonia Rubén Jaramillo y el conjunto Campo Verde. Rubén Jaramillo se destaca por su entorno educativo, que incluye desde preescolar hasta educación superior, mientras que Campo Verde ha desarrollado una red de microcomercio debido a desafíos socioeconómicos acentuados por la pandemia de COVID-19. En esta área, los residentes establecen una sociedad de ventas y consumo compartido, donde cada miembro se encarga de vender productos o servicios y realizar actividades de transporte. La elección de estas localidades como *focus group* se basó en el impulso al microcomercio en Campo Verde y la capacidad de innovación en Rubén Jaramillo, proporcionando contextos variados para la recolección de datos.

Productos. Se evaluó la factibilidad de los productos utilizando una escala de Likert, donde 1 indicaba poca variación en el costo de la materia prima y escasa competencia y 5 representaba alta variación y múltiples negocios en el sector. La recolección de datos incluyó visitas a puntos de venta y comparación de precios. Se concluyó que los productos de grado alimenticio enfrentan una competencia establecida en un mercado limitado, dificultando la innovación. Para los productos de consumo animal, no se identificó un mercado consolidado por la falta de educación en el cuidado de mascotas. Sin embargo, hay oportunidades en el sector de cuidado personal, donde se pueden desarrollar productos basados en materia vegetal deshidratada, ya que el mercado actual está dominado por productos importados de baja calidad. Se muestra un resumen representativo en la figura 1.

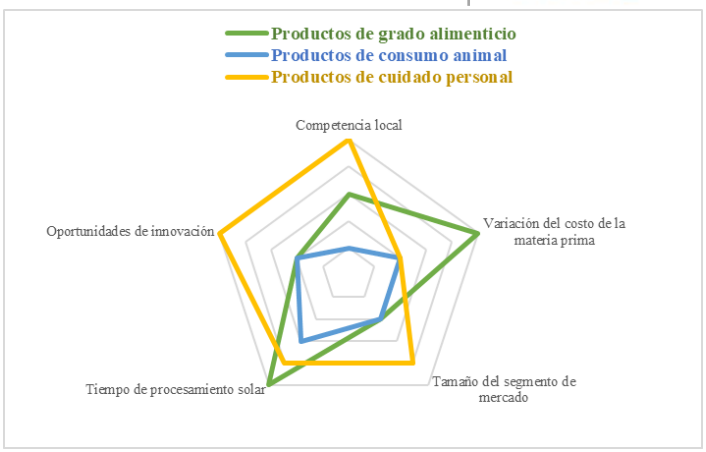


Figura 2. Gráfica representativa de evaluación de segmento para la selección de producto piloto.

Testeo. La encuesta se realizó a 100 habitantes de la comunidad, abordando el consumo de productos cosméticos como maquillaje y jabones. Se indagó sobre características relevantes (olor, forma, logo, duración), lugares de compra y razones para no adquirir productos. Los ingredientes naturales más deseados fueron árnica, manzanilla, rosas, menta y vitamina E. Los resultados revelaron que el 84% de los encuestados usa productos cosméticos; el 72% son mujeres; el 92% no revisa etiquetas; el 71% desea elegir ingredientes y el 81% quiere personalizarlos. Se identificó la necesidad de desarrollar un producto que incorpore valor a la rutina de cuidado personal con materia vegetal deshidratada.

Desarrollo de producto

Secado solar. Se optó por elaborar extractos oleosos mediante maceración de rosa SPP, una planta ornamental de Temixco. Se compararon dos técnicas de deshidratación: una rejilla de secado al aire (con y sin obstrucción de luz) y un deshidratador solar híbrido. Durante 10 días (en muestras de 5 y 10 g), se extrajeron muestras de pétalos de rosa amarillos, logrando una reducción del 85% del peso inicial en ambas tecnologías, aunque el deshidratador híbrido mostró mayor variación en la pérdida de peso.

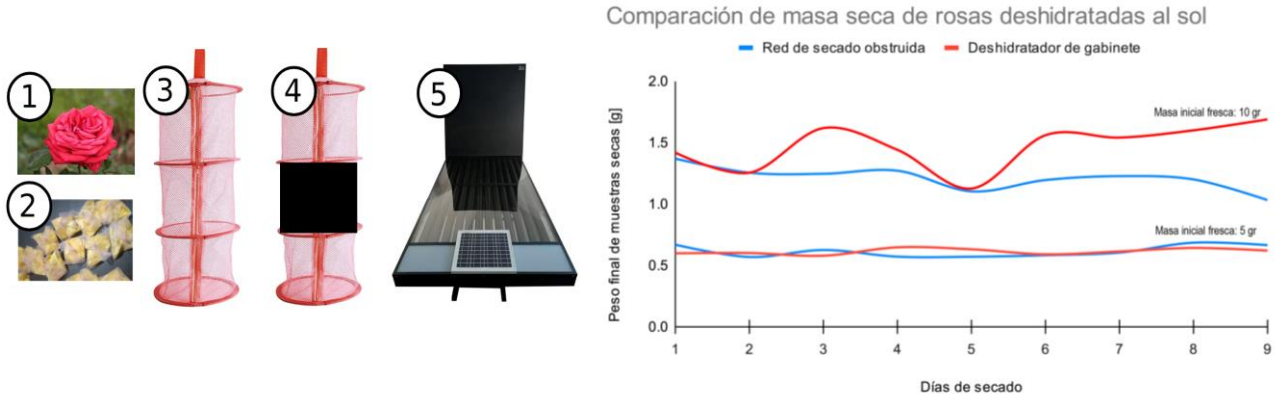


Figura 3. [1] fotografía de una rosa SPP, [2] empaquetado de pétalos de rosa en tela multiperforadora, [3] red de secado sin obstrucción de luz, [4] red de secado con obstrucción de luz y [5] deshidratador solar híbrido (izquierda), curvas comparativas de pérdidas de peso después de la deshidratación en ambas tecnologías (derecha).

Caracterización. El color fue una característica esencial en las preferencias señaladas por las personas encuestadas. Despues del proceso de deshidratado se observó despigmentación en muestras secadas al aire, especialmente en la red sin obstrucción de luz, mientras que las del deshidratador híbrido adquirieron un color más oscuro. La textura de los pétalos se volvió más quebradiza en el deshidratador. La mayor uniformidad de color se logró entre los días 3 y 5 en la rejilla obstruida.



Figura 4. Características cualitativas de pétalos de rosa deshidratados con diferentes tecnologías solares.

Los parámetros de colorimetría mostraron variaciones en luminosidad y tonalidades según el método de secado. El eje L (ΔL) indica luminosidad, y el eje b (Δb) refleja tonalidades: valores positivos son amarillos y negativos son azules. Los pétalos secos en la red obstruida mostraron mayor variación en luminosidad debido a la despigmentación de la xantofila, que se reduce con la exposición solar. En contraste, las muestras del deshidratador híbrido aumentaron su concentración de xantofila, ya que el ambiente estaba aislado de la luz solar. Los datos cuantitativos de las muestras se presentan en la gráfica que muestra la evolución de sus características durante el tratamiento.

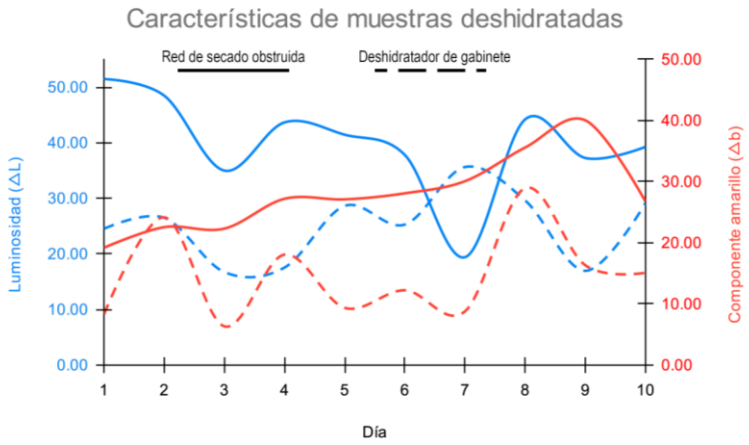


Figura 5. Curvas características de los cambios de color en muestras deshidratadas en diferentes tecnologías.

Formulación de producto. Dado que el objetivo era desarrollar un concentrado vegetal líquido para productos cosméticos, se seleccionaron tres vehículos conductores: aceite de coco fraccionado, alcohol y glicerina. En esta ocasión se seleccionaron pétalos de rosa roja por la alta capacidad de pigmentación que tiene el caroteno.

Los resultados mostraron que las muestras de pétalos deshidratados macerados en aceite de coco durante 2, 4, 6, 8 y 10 días no presentaron cambios significativos en pH, pigmentación ni aroma. Aunque el mismo procedimiento con pétalos frescos dio resultados similares, se observaron cúmulos negros en el líquido, sugiriendo posible contaminación por hongos debido al contenido de agua. En contraste, la maceración en alcohol y glicerina con muestras deshidratadas a 6 días mostró cambios en el pH (dentro del rango adecuado para aplicaciones tópicas) y modificaciones en pigmentación y aroma tras 10 días de maceración.

Día de secado solar	Densidad [gr/cm3]	pH inicial	pH final	Pigmentación	Aroma
Aceite conductor: Aceite de coco fraccionado					
0	1.45	6	6	✗	✓
2			6	✗	✓
4			6	✗	✓
6			6	✗	✓
8			6	✗	✓
10			6	✗	✓
Aceite conductor: alcohol					
6	0.79	6	5	✓	✓
Aceite conductor: Glicerina					
6	1.26	6	5	✓	✓

Cuadro 1. Propiedades cualitativas de macerados en distintos vehículos conductores.

La pigmentación y el aroma se caracterizaron mediante la medición de grados Brix e índice de refracción. Los grados Brix determinan la cantidad de materia seca disuelta en un líquido. Para las muestras tratadas en aceite de coco fraccionado, no hubo cambios significativos en los parámetros medidos. En cambio, las muestras tratadas en alcohol y glicerina mostraron un aumento significativo en el índice Brix, indicando mayor saturación del líquido. Sin embargo, se presentaron cambios mínimos en otros parámetros, sugiriendo que la textura inicial del líquido no fue alterada de manera notable.

Día de secado solar	Índice Brix inicial	Índice Brix	Índice de refracción inicial	Índice de refracción
Aceite conductor: Aceite de coco fraccionado				
0	62.3	62.5	1.44	1.44
2		62.5		1.44
4		62.6		1.44
6		62.5		1.44
8		62.5		1.44
10		62.7		1.44
Aceite conductor: Alcohol				
6	18.6	24.5	1.36	1.36
Aceite conductor: Glicerina				
6	62.5	72.5	1.447	1.47

Cuadro 1. Propiedades cuantitativas de macerados en distintos vehículos conductores.

Prueba de aceptación

Las siguientes subsecciones detallan los procedimientos implementados en las pruebas piloto, con el fin de definir las herramientas que se utilizarán en la conformación de redes de apoyo social orientadas a la creación de una cooperativa productora solar de ingresos pasivos. De este modo, los aprendizajes obtenidos servirán como insumos para optimizar futuras ediciones de los talleres y campañas publicitarias.

Literacidad. Se realizaron dos pruebas de concepto donde se invitó a personas a elaborar productos cosméticos con extractos vegetales y plantas medicinales deshidratadas. Se realizaron dos talleres con las siguientes características:

- Primer taller: se realizó en Temixco Morelos en una zona escolar. El grupo focal fue de 40 personas y el rango de edad de las personas asistentes fue de 17-58 años.
- Segundo taller: se realizó en Puebla en un parque a cielo abierto. El grupo focal fue de 16 personas y el rango de edad de las personas asistentes fu de 6-63 años.

En el primer taller, el 63% de los asistentes fueron mujeres, y en el segundo, el 80%. La satisfacción fue del 93% y 100%, respectivamente, y el 95% y 100% de los participantes indicaron haber adquirido nuevos conocimientos. Además, un 84% expresó interés en aprender sobre pigmentos en el primer taller, mientras que el 91% mostró interés en la elaboración de perfumes y tónicos en el segundo.

Segmento de mercado. Se llevó a cabo una campaña publicitaria para promover productos cosméticos de plantas medicinales deshidratadas, incluyendo extractos vegetales. Los resultados permitieron elaborar un perfil inicial de las características del segmento de producto y del consumidor.

- Persona productora: mujeres (en su mayoría jóvenes encargadas del cuidado de terceros, con rutina de trabajo fija o ocupaciones cotidianas, tienen o han tenido algún emprendimiento y residen cerca de la localidad de mapeo.
- Persona consumidora: Mujeres en etapa adulta con rutina de cuidado establecida, destinan poco tiempo para el cuidado personal, buscan practicidad en su rutina de cuidado y destinan poco recurso económico a los productos cosméticos.

CONCLUSIONES

En conclusión, este trabajo ha presentado una metodología viable para productos de valor agregado a partir de plantas medicinales deshidratadas, utilizando técnicas de secado solar y maceración en vehículos adecuados. La realización de talleres prácticos ha fomentado el aprendizaje y el interés en la elaboración de estos productos dentro de la comunidad, lo que puede contribuir al empoderamiento social y económico de sus integrantes. Además, las pruebas piloto y la campaña publicitaria han permitido identificar un perfil de consumidor y las oportunidades del mercado, sentando las bases para la creación de una cooperativa que genere ingresos pasivos y fortalezca la economía local. Se prevé que un modelo de cooperativa por ingresos pasivos sea una vía que construya un tejido social capaz de formar capacidades y habilidades en todo a la deshidratación con tecnologías solares y los usos productivos de la energía. Como parte del proyecto, los trabajos futuros se centrarán en la evaluación de la toma de decisiones y formación de capacidades, así como también los usos productivos que puedan agregarse como parte de la innovación del proyecto. Algunas líneas de trabajo futuro que podrían fortalecerán este u otros proyectos similares, serán la evaluación de emociones de las personas participantes en interacción con tecnologías solares (Rincón-Rubio and Cedano-Villavicencio, 2023) y el análisis de impacto en el empoderamiento comunitario. Estos aprendizajes servirán como insumos para futuras iniciativas y proyectos en la región.

REFERENCIAS

Becker, S., Kunze C., Vancea M. (2017). Community energy and social entrepreneurship: Addressing purpose, organization and embeddedness of renewable energy projects, Journal of Cleaner Production, 147, pp. 25-36.

Haugh M. H. and Talwar A. (2014). Linking Social Entrepreneurship and Social Change: The Mediating Role of Empowerment, Journal of Business Ethics, 133, pp. 643-658.

Jenkins, K., McCauleya, D., Heffronb, R., Stephanc, H. and Rehner R. (2016). Energy justice: A conceptual review, Energy Research & Social Science, 13, pp. 174–182.

Kwong, C., Cheung, C., Manzoor, H. and Rashid, M. (2019) Entrepreneurship through Bricolage. A Study of Displaced Entrepreneurs at Times of War and Conflict.Entrepreneurship & Regional Development, 31 (5-6), pp. 435-455.

Surie G. (2017). Creating the innovation ecosystem for renewable energy via social entrepreneurship: Insights from India, Technological Forecasting & Social Change, 121, pp. 184-195.

Rincón-Rubio A and Cedano-Villavicencio . (2023). Emotional energy communities: Centering emotions and feelings within energy transitions in southern Mexico, Energy Research & Social Science, 98, pp. 1-9.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

EFECTO DE LA COMPOSICIÓN MATERIAL DEL ABSORBEDOR DE UN CPC SOBRE EL FLUJO RADIATIVO, COMPARATIVA ENTRE VIDRIO, VIDRIO PYREX Y CUARZO

Brandon L. Carranco Arias [a], Richard S. Ruiz Martínez [b], Yuridiana R. Galindo Luna[b]

[a] Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Posgrado en Ingeniería Química, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1 A Sección, Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09310, México, cbi2223803283@xanum.uam.mx

[b] Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1 A Sección, Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09310, México, rmr@xanum.uam.mx, ygalindol@izt.uam.mx

RESUMEN

Efluentes de la industria textil con regularidad tienen carga de colorantes azoicos, ampliamente usados por su durabilidad en los productos, la descomposición natural genera compuestos tóxicos para flora y fauna marina y terrestre. Se han implementado fotocatalizadores solares como TiO_2 en concentradores parabólicos compuestos (CPC) para llevar a cabo procesos de oxidación avanzados (AOPs) y degradar en CO_2 y H_2O a los colorantes. El absorbedor del sistema contiene al fluido y permite el flujo de radiación, por lo tanto, el material condiciona el flujo radiativo sobre el fluido con catalizador suspendido. En este sistema, se valoran tres materiales: (i) vidrio, (ii) vidrio pyrex y (iii) cuarzo. Considerando propiedades físicas como transmisividad, reflectividad e índice de refracción. El flujo será valorado con el software Tonatiuh, en un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), mediante trazado de rayos. La hora y localidad donde se coloca el sistema provocan ángulos cenitales y acimutales. Los días seleccionados para el análisis corresponden a las cuatro estaciones del año: a) 21 de marzo, b) 21 de junio, c) 21 de septiembre y d) 21 de diciembre. El intervalo de operación estará entre las 09:00AM y las 16:00PM, evaluado cado dos horas. El flujo neto valorado en la superficie diametral (se evalúan 20 puntos en ángulos equidistantes del cilindro), del absorbedor manifiesta una mejora de 66.55% en la comparativa cuarzo-vidrio y de 20.67% entre los sistemas cuarzo-pyrex, resultando el cuarzo como mejor material de construcción.

ABSTRACT

Effluents from the textile industry regularly contain azo dyes, which are widely used due to their durability in products. However, their natural decomposition generates toxic compounds harmful to both marine and terrestrial flora and fauna. Solar photocatalysts such as TiO2 have been implemented in compound parabolic concentrators (CPC) to carry out advanced oxidation processes (AOPs) and degrade the dyes into CO2 and H2O. The absorber in the system contains the fluid and allows the flow of radiation; therefore, the material influences the radiative flow over the fluid with suspended catalyst. In this system, three materials are evaluated: (i) glass, (ii) Pyrex glass, and (iii) quartz, considering physical properties such as transmissivity, reflectivity, and refractive index. The flow will be evaluated using Tonatiuh software in a Compound Parabolic Concentrator (CPC) through ray tracing. The time and location where the system is placed cause zenith and azimuthal angles. The selected days for analysis correspond to the four seasons of the year: a) March 21, b) June 21, c) September 21, and d) December 21. The operating interval will be between 09:00 AM and 16:00 PM, evaluated every two hours. The net flux evaluated on the diametral surface (20 equidistant points on the cylinder are assessed) of the absorber shows an improvement of 66.55% in the quartz-glass comparison and 20.67% between the quartz-Pyrex systems, making quartz the best construction material.

Palabras claves: Absorbedor, concentrador parabólico compuesto (CPC), fotocatálisis, transmitancia, radiación solar, flujo radiativo, trazado de rayos

INTRODUCCIÓN

El acceso a agua potable es una de las mayores preocupaciones en la actualidad, para el 2030 aproximadamente 47% de la población global enfrentará el problema de escases de agua limpia (Islam et al., 2021). La investigación sobre el tratamiento de agua es urgente y va asociada a diferentes etapas según las características de los contaminantes: pretratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario y procesos avanzados de oxidación (AOPs), el uso de fotocatalizadores pertenece a esta última categoría donde se generan especies oxidantes para degradar compuestos específicos (Deng et al., 2015). Por ejemplo, los colorantes azoicos los cuales requieren procesos avanzados de oxidación, estos tienen aplicaciones en la industria textil, alimentaria, farmacéutica, etc. Debido a su variedad de tonalidades, y baja decoloración por uso o factores ambientales. El 60% de los efluentes textiles contiene colorantes azoicos y poseen elevada demanda química y biológica de oxígeno, impactando negativamente en los ecosistemas contaminados (Al-Tohamy et al., 2022).

La fotocatálisis, es un poderoso y sostenible proceso capaz de degradar contaminantes recalcitrantes (Reyes, 2023), sin embargo, se requiere aumentar la eficiencia de esta tecnología y con ello escalar a nivel industrial. El esfuerzo de los científicos se ha centrado en el diseño de

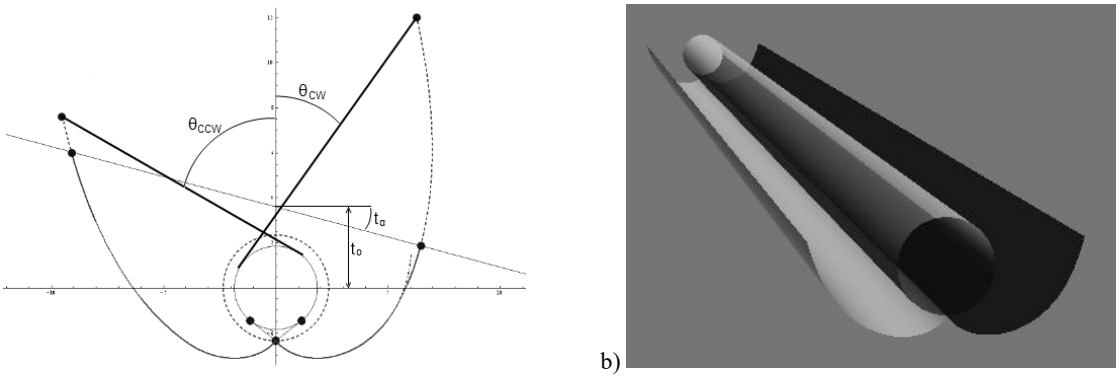
fotoreactores y materiales fotocatalíticos. Los reactores de estos sistemas se pueden clasificar como soportados o suspendidos, dependiendo de la ubicación del fotocatalizador. El catalizador soportado evita la separación posterior del catalizador, lo cual es relevante al realizar escalamiento y evitar pérdida de material. Entre los fotoreactores se encuentran los concentradores parabólicos compuestos (CPC), dispositivos ópticos que recolectan el flujo radiativo de diversas direcciones en una región de este (receptor), valiéndose de un arreglo de superficies parabólicas que comparten el eje focal, para aumentar el área de entrada de radiación al sistema, sin la necesidad de implementar un sistema de seguimiento (Tapia et al., 2009). La selección de receptor se basa en su transmitancia óptica, por ejemplo el vidrio que es usado en el diseño de reactores fotocatalíticos (Salgado, 2011) y evaluación de desempeño óptico (Reyes et al., 2023) con diferentes configuraciones de catalizador soportado (Peña et al., 2018), el vidrio de borosilicato transmite el 65% de la radiación a longitudes de onda de 285nm, en relación a otros materiales como el cuarzo cuenta con un valor alrededor del 80% de transmisividad pero costo elevado para aplicaciones comerciales (Tanveer et al. 2013). En general las investigaciones sobre el diseño del CPC incluyen tubos de vidrio como absorbedores, estos son iluminados por reflectores solares o a través de concentradores solares compuestos, se han realizado análisis con métodos experimentales y a través de metodologías como Monte Carlo, donde los catalizadores son soportados o suspendidos. Estudiando el grosor de la película fotocatalítica, locación de superficie, geometría de concentrador, propiedades ópticas y condiciones de irradiancia (Peña et al., 2018). Sin embargo, no existe una comparativa entre materiales, el más utilizado es el vidrio y los análisis más sobresaliente son:
El desempeño óptico de CPC con catalizador soportado en diferentes configuraciones, evaluado con métodos teóricos y estocásticos muestra una mejora del 27% respecto al diseño clásico (Peña et al., 2018). Cuando el flujo fotónico es evaluado con el método de Monte Carlo, para sistemas con catalizador soportado en forma de monolitos se obtiene una dispersión estándar del 65% (Reyes et al., 2023). El método de trazado de rayos puede usarse para estimar el flujo de calor desde la superficie absorbente hacia el agua, comparado con estudios experimentales concluyendo los absorbedores con aletas tienen un mejor desempeño en comparación con los absorbedores sin aletas (Barron et al., 2021) acreditando el uso de simuladores para el tratamiento de sistemas de concentración óptica.

En este trabajo se propone evaluar el absorbedor del reactor fotocalítico utilizando tres materiales: vidrio, vidrio pyrex y cuarzo, considerando las propiedades ópticas; reflectancia, transmitancia y refracción. Estas propiedades definen casi por completo el comportamiento de interacción de la luz con el absorbedor y la superficie reflejante. Como propiedades materiales, la selección de la composición absorbente es crucial debido a que impacta positivamente en el flujo radiativo.

METODOLOGÍA

Geometría

La geometría del CPC está definida en el software Tonatiuh se observa en la Figura 1, los parámetros usados para este sistema y sus valores se describen a continuación. Radio del tubo absorbedor = 0.013m, radio exterior del tubo de vacío = 0.015m, ángulo de aceptación en el sentido horario, respecto al eje del CPC (θ_{cw}) = 1.14°, ángulo de aceptación en sentido antihorario, respecto al eje del CPC, (θ_{ccw}) =1.14°, inclinación del plano de truncamiento respecto al eje horizontal (t_α) =0°, altura del origen del plano de truncamiento (t_0) =0.008° y longitud = 0.6m.



a) b)

Figura 1. Representación de los parámetros para un sistema CPC asimétrico a) parámetros (Tonatiuh, 2024), b) geometría analizada

Trazado de rayos

Tonatiuh es un software de código abierto, basado en el método Monte Carlo para trazado de rayos, útil para simular el comportamiento del flujo radiativo en sistemas de concentración solar (Blanco et al, 2009). El Método Monte Carlo es una técnica matemática para estimar soluciones de problemas complejos, a través de muestras aleatorias e interpretación de resultados. Útil con fenómenos dependientes de muchas variables. En el área de transferencia radiativa este método valora las propiedades ópticas de los materiales (absorción, emisión, reflectancia y transmisividad), evalúa la trayectoria a través del material, de un número elevado de rayos (fotones) y las interacciones ópticas con el medio, además de las superficies del entorno. La trayectoria del fotón es simulada desde la emisión hasta el punto de absorción, todos los rayos evaluados que atraviesan una misma región contribuyen al flujo radiativo de esta, el método parte de un punto de la región y se dirige a las

fuentes de radiación, para evaluar la cantidad de energía emitida.
Los materiales tienen propiedades ópticas diferenciables en algunos casos es de interés analizar la difusión, reflexión o refracción de la luz. Dependiendo de las características de la geometría de estudio, Tonatiuh dispone de la opción "Specular Estándar Material" para estudiar la reflexión de la luz (capacidad de proyectar el flux en la superficie material), con la finalidad de simular el comportamiento de la superficie involuta y parabólica del CPC. Los nodos materiales "Basic Refractive Material" sirven para evaluar la refracción de la luz a través de los índices de refracción, esta clase de nodo será usado para definir el absorbedor como vidrio, pyrex y cuarzo.

Propiedades del absorbedor e involuta y parábola

Las propiedades para el absorbedor (transmitancia e índice de refracción) son consideradas en el rango de longitud de onda 290-400nm, este intervalo está asociado al espectro UV que activa los fotocatalizadores más usados. Los valores de transmitancia (capacidad de permitir el flux radiativo) de un material para los materiales están presentados en la Tabla 1. Mientras que los valores de índice de refracción (desviación en la trayectoria del flux al atravesar el seno de un material) se muestran en la Tabla 2. El uso de la ecuación de Beer-Lambert (ecuación 1) permite obtener los datos para absorbancia presentados en la Tabla 3. La reflectancia de la parte involuta y parabólica del CPC se construye generalmente con aluminio, este análisis valora este caso, donde su valor es de 98.87% (Hummel, R.E.,1981).

Los valores de transmitancia se determinan con el modelo de media ponderada (ec. 1) (Freund et al., 1994)

$$x_w = \frac{\sum wx}{\sum w} \quad (1)$$

Donde, x_w: media ponderada de la porpiedad x, w: valor relativo y x:propiedad; subíndices, v:vidrio, p:pyrex y c:cuarzo

Ecuación de Beer-Lambert (Modest et al.)

$$A = -\log T \quad (2)$$

Donde, A: Absorbancia y T: Transmitancia

Tabla 1. Valores de transmitancia para los materiales

Longitud de onda (nm)	***Transmitancia (%)***		
	Vidrio (Wonwook et al., 2016)	*Pyrex (Corning, 2023)*	*Cuarzo (Lukes et al., 2008)*
280	0	40	96
300	20	68	97
320	30	82	97.5
340	80	90	98
360	89	93	98
380	89	94	98
400	90	94	98
	Media ponderada transmitancia (%)		
	$T_{w,v} = \frac{\sum wT_v}{\sum w} = 56.86$	$T_{w,p} = \frac{\sum wT_p}{\sum w} = 80.14$	$T_{w,c} = \frac{\sum wT_c}{\sum w} = 97.5$

Tabla 2. Valores de índices de refracción para los materiales

Material	*Índice de refracción (n)*
Vidrio	1.52 (Seward et al., 2005)
Pyrex	1.47 (Corning, 2023)
Cuarzo (sílice fundida)	1.458 (Zajac et al., 2003)

Tabla 3. Valores de absorbancia para los materiales

Material	*Absorbancia*
Vidrio	0.2452
Pyrex	0.0966
Cuarzo	0.011

Condiciones de la simulación

Para entender las variaciones de irradiancia a lo largo del año el fenómeno crucial involucrado es la traslación terrestre, han sido simuladas fechas donde la radiación solar sobre el sistema es máxima o mínima (solsticio) o los días y noches tiene duración equivalente (equinoccio), con la finalidad de obtener una comparativa en distintos escenarios, la Tabla 5 muestra las fechas consideradas. El flujo solar es dependiente de la ubicación del sistema, todos los resultados están asociados a las coordenadas de la UAM Iztapalapa, ubicada en la Ciudad de México (19.362492 Norte, -99.075222 Oeste).

Tabla 4. Fechas consideradas para la simulación

Evento	*Fecha*
Fin invierno, inicio primavera, equinoccio	21 de marzo
Fin primavera, inicio verano, solsticio de verano	21 junio
Fin verano, inicio otoño, equinoccio	21 septiembre
Fin otoño, inicio invierno	21 diciembre

RESULTADOS

Se realizó el análisis de los tres materiales en función de las propiedades ópticas y de cuatro condiciones de radiación, durante el periodo cercano al mediodía solar.

En la figura 2, se muestra el flujo de radiación solar (W/m^2) en el seno del absorbedor de vidrio, en el periodo más activo del sistema (09:00AM-1600PM) debido a la radiación solar, con un formato de 24 h., el flujo máximo se manifiesta a las 12:30PM el día 21 de junio del 2024 fecha muy cercana al solsticio de verano, con un valor de 10636 W/m^2, el valor mínimo está relacionado con las 09:00AM el día 21 de diciembre del 2024, con un valor de 4026 W/m^2, el comportamiento del flujo en los diferentes días es semejante, con valores ascendentes hasta llegar a un máximo cercano al medio día solar 12:30PM (punto más alto del sol en el día) a partir de donde los valores descienden hasta las 16:00PM.

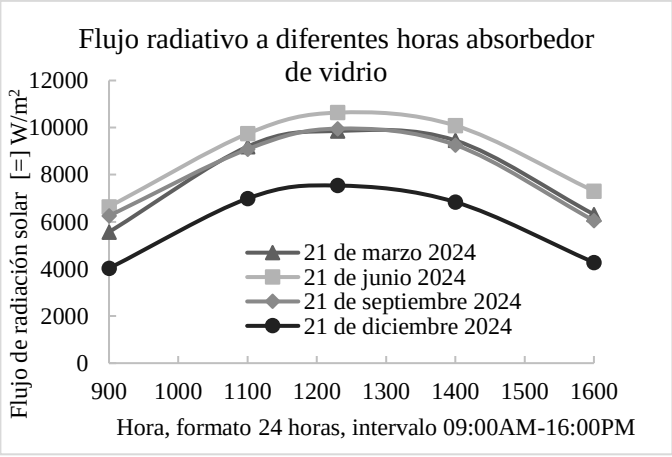


Figura 2. Flujo de radiación (W/m^2) en intervalo de horas con actividad solar (09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de vidrio

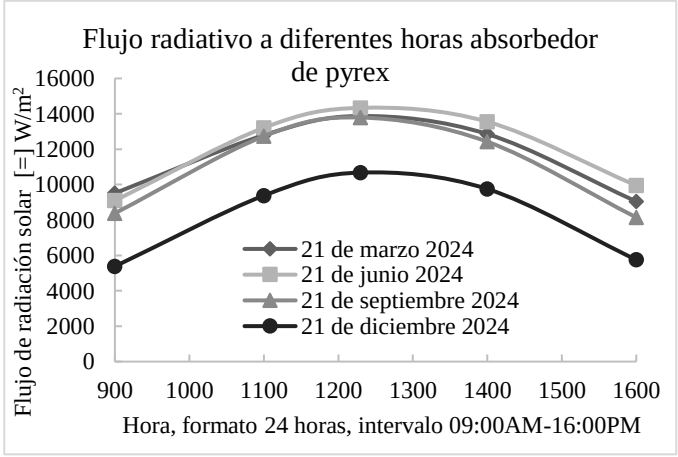


Figura 3. Flujo de radiación (W/m^2) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de pyrex

La figura 3 presenta el comportamiento del flujo de radiación solar con respecto a la hora local en el sistema con absorbedor de pyrex, en esta se observa un comportamiento típico durante un día soleado. Los valores máximos alcanzados fueron de 14336W/m^2 correspondientes a marzo, junio y septiembre.

La figura 4 muestra el flujo en el sistema con absorbedor de cuarzo, el comportamiento de las curvas es consistente con los otros sistemas, siendo las fechas con mayor concentración marzo, junio y septiembre este flujo es el máximo absoluto obtenido entre todas las simulaciones con un valor de 17468W/m^2, el valor mínimo observado en el momento de mayor concentración solar (12:30PM) es de 13046W/m^2.

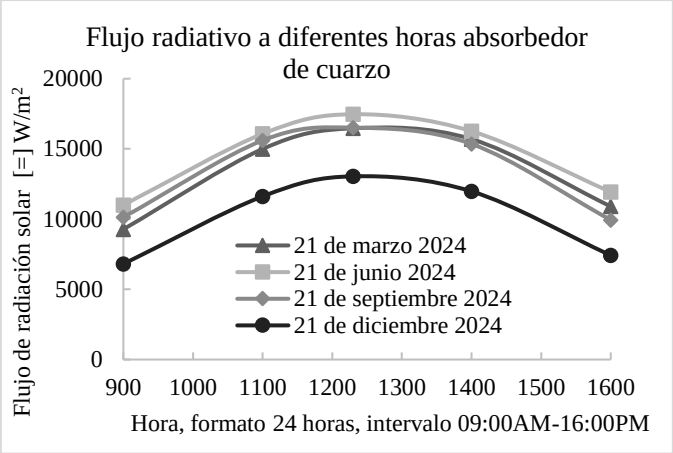


Figura 4. Flujo de radiación (W/m^2) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de cuarzo

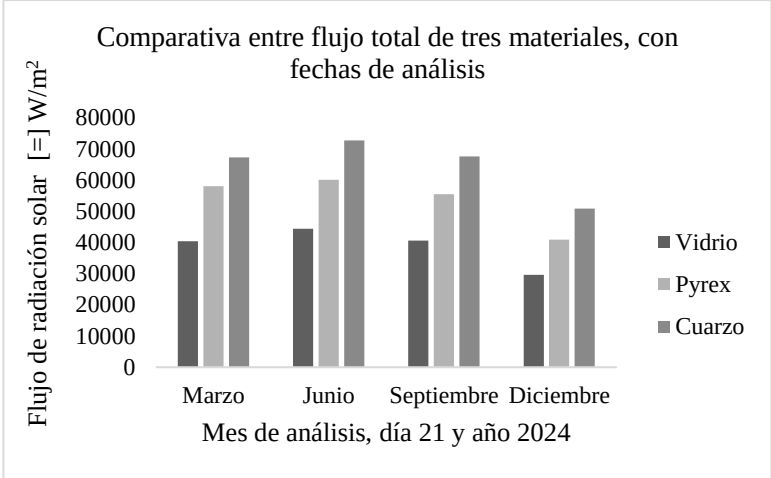


Figura 5. Comparativa entre flujo total simulado en W/m^2 de tres materiales: vidrio, pyrex y cuarzo, los días 21 de los meses: marzo, junio, septiembre y diciembre, el año 2024

En la figura 5 se observa la comparativa de los materiales en función de la radiación solar con respecto al mes del año. En marzo el flujo total incidente en el sistema vidrio es de 40383W/m^2, pyrex manifiesta 58088W/m^2 y cuarzo 67337W/m^2, el sistema pyrex tiene un incremento de 43.8% de flujo radiativo en relación al vidrio, mientras que el cuarzo una mejora del 66.7% frente al vidrio, la comparativa cuarzo/pyrex muestra mejora de 15.9% con el uso de cuarzo. Las comparativas se condensan en la Tabla 6.

Tabla 6. Relaciones de aumento porcentual entre flujos radiativos del vidrio, pyrex, cuarzo, correspondientes a las fechas determinadas.

Materiales relacionados/Mes	*Marzo*	*Junio*	*Septiembre*	*Diciembre*	*Promedio*
Pyrex/Vidrio	43.8%	35.4%	36.6%	38%	38.45%
Cuarzo/Vidrio	66.7%	63.8%	66.3%	71%	66.95%
Cuarzo/Pyrex	15.9%	20.9%	21.7%	24.2%	20.67%

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el análisis de tres materiales (vidrio, pyrex y cuarzo) en función de sus propiedades ópticas, para determinar la cantidad de flujo radiativo correspondiente a cuatro fechas para conocer el comportamiento del sistema durante el año. Los resultados más sobresalientes se presentan a continuación.

- De acuerdo con los resultados del análisis, en diciembre el flujo es menor con respecto al resto de los meses, este comportamiento se presenta en todos los sistemas durante la implementación del absorbedor, se determinó que el cuarzo supera el valor máximo en comparación con el vidrio.

- El mes de junio donde el flujo de energía solar es máximo en el año del análisis, presenta las menores diferencias de flujo, lo anterior es atribuido a las bajas condiciones de irradiancia y la diferencia de flujo debido al material el cual disminuye.

- En función de las simulaciones utilizando el software Tonatiuh se encontró que un absorbedor de cuarzo en un CPC mejora en 66.95% el flujo radiativo en comparación con vidrio, material comúnmente usado en los sistemas de concentración. El aumento aparece en todas las fechas de análisis y en el peor de los escenarios, cuando la irradiancia es muy elevada, el aumento es de 63.8%.

REFERENCIAS

Al-Tohamy, R., Ali, S. S. and Li, F. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. Ecotoxicology and Environmental Safety, 231, 113160. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160

Barrón-Díaz, J. E., Flores-Johnson, E. A. and Chan-Colli (2021). FEM-CFD simulation and experimental study of compound parabolic concentrator (CPC) solar collectors with and without fins for residential applications. Applied Sciences, 11(8), 3704. https://doi.org/10.3390/app11083704

Blanco, M. J., Mutuberria, A. and Garcia, P. (2009). Preliminary validation of Tonatiuh. Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress & Exposition, American Society of Mechanical Engineers (ASME), Orlando, Florida. https://www.researchgate.net/publication/212165994

Freund, J. E., Simon, G. A. (1994). Estadística elemental. Colombia: Pearson Educacion.

Comisión Nacional del Agua. (2019). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (25a ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-607-626-015-9.

Corning Incorporated. (2023). *Pyrex products*. Corning Incorporated.

Hecht, E. (2000). Óptica (3rd ed.). Addison Wesley Iberoamericana.

Hummel, [1980], Reflectivity of silver and aluminum-based alloys for solar reflectors, Solar Energy, Volume 27, Issue 6, 1981, Pages 449-455, https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90040-2

Islam, A., Teo, S.H. and Taufiq-Yap, Y.H. (2021). Step towards the sustainable toxic dyes and heavy metals removal and recycling from aqueous solution-A comprehensive review. Resour. Conserv. Recycl. 175, 105849.

Lukes, P., Clupek, M. and Babicky, V. (2008). Ultraviolet radiation from the pulsed corona discharge in water. Plasma Sources Science and Technology, 17(2), 024012. https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/024012

Nikfar, S., & Jaberidoost, M. (2014). Dyes and Colorants. En Encyclopedia of Toxicology (3rd ed., pp. 252-261). Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-386454-3.00602-3

Oh, W., Kang, B. and Choi, S. (2016). Evaluation of Anti-Soiling and Anti-Reflection Coating for Photovoltaic Modules. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 16(10), 10689–10692. https://doi.org/10.1166/jnn.2016.13219

Peña-Cruz, M. I., Valades-Pelayo, P. J. and Arancibia-Bulnes, C. A. (2018). Annual optical performance of a solar CPC photoreactor with multiple catalyst support configurations by a multiscale model. International Journal of Photoenergy, 2018, Article ID 8718172. https://doi.org/10.1155/2018/8718172

Reyes-García, J.L., Arancibia-Bulnes, C.A. and Méndez Arriga, F. (2023). Optical and hydrodynamic performance of photocatalytic monoliths of diferent shapes in a solar photoreactor with compound parabolic collector. Catalysis Today, Vol. 429, 114498. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114498.

Salgado-Tránsito, I., Jiménez-González, A. E. and Ramón-García, M. L. (2015). Design of a novel CPC collector for the photodegradation of carbaryl pesticides as a function of the solar concentration ratio. Solar Energy, Vol. 115, 537-551. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.034

Salgado Tránsito, I. (2011). Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta solar de degradación fotocatalítica de aguas contaminadas [Tesis doctoral]. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía, Temixco, Morelos, México.

Tanveer, M., & Tezcanli Guyer, G. (2013). Solar assisted photo degradation of wastewater by compound parabolic collectors: Review of design and operational parameters. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 534–543. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.053

Tapia, S., & del Río, J. A. (2009). Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. Revista Mexicana de Física, 55(2), 141-153.

Seward, T.P. and Terese Vascott. (2005). High temperature glass melt property database for process modeling; Eds.:; The American Ceramic Society, Westerville, Ohio ISBN 1-57498-225-7

Wang, L., & Yu, J. (2023). Principles of Photocatalysis. In S-scheme Heterojunction Photocatalysts (pp. 1-52). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0

Energía de la biomasa / Energía y Medio Ambiente

ID	TÍTULO	PONENTE
16149	Impacto del Contenido de Humedad en Cáscaras de Naranja sobre la Producción de Biochar mediante Pirolisis Solar Lenta y su Eficacia en la Bioadsorción de Cu(II) en Soluciones Acuosas	Víctor Manuel Maytorena
16176	Evaluación energética para la electrificación del Sistema de Transporte Universitario como un escenario de descarbonización.	Valeria Rubi Sánchez
16114	Propuesta de modelo de gestión para reutilizar los residuos de la industria del agave en aplicaciones de biomasa y/o biocombustibles, como beneficio a la nación COMCAAC	Armando Gallegos Muñoz
16189	La vulnerabilidad energética y sustentabilidad energética en las políticas públicas del sector eléctrico en México de los últimos cuatro sexenios (2000-2024)	Karen Liliana Chip Domínguez

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

IMPACTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN CÁSCARAS DE NARANJA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR MEDIANTE PIROLISIS SOLAR LENTA Y SU EFICACIA EN LA BIOADSORCIÓN DE Cu(II) EN SOLUCIONES ACUOSAS

Alix Natalia Ruiz Ávila, Valeria Pérez Mata Serna, Guadalupe López Avilés Ramiro Alberto Calleja Valdez, Ricardo Arturo Pérez Enciso, Víctor Manuel Maytorena Soria
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora (UNISON), Blvd. Rosales y Luis Encinas, Hermosillo, CP 83000, Sonora, México
victor.maytorena@unison.mx.

RESUMEN

En un contexto de cambio climático y creciente conciencia ambiental, la investigación en fuentes de energía renovable, como la energía solar térmica y la biomasa, avanza constantemente. La pirolisis solar de biomasa residual utiliza la radiación solar concentrada para transformar biomasa residual en biochar y otros biocombustibles, la pirolisis solar estudiada en este trabajo no requiere de gases de arrastre, siendo la misma biomasa quien genera su atmosfera inerte, lo que mejora su neutralidad de carbono, reduce costos y simplifica la operación. Este proyecto aprovecha la energía solar disponible en el estado de Sonora mediante un horno solar y la biomasa residual generada por la industria de la naranja dulce (*Citrus sinensis*), aprovechando la cascara de la misma. En la primera fase, se produce biochar mediante pirolisis lenta, con rampas de calentamiento menores a 36°C/min y temperaturas de alrededor de 503°C durante la formación del biochar. En la seguna fase se cuantifico el rendimiento de biochar producido obteniendo valores de 33.5 y 8.7% para las cascaras deshidratas e hidratadas respectivamente. Finalmente, del biochar producido se cuantifico el potencial de remediar aguas contaminadas con metales pesados (Cu II), presentando valores de remoción del 82 y 27% para concentraciones de 200 ppm con biochar proveniente de cascaras frescas y deshidratadas, respectivamente. Concluyendo que, si el objetivo es la producción de biochar con fines energéticos, se recomienda utilizar biomasa con bajo contenido de humedad, con el fin de aumentar los rendimientos de biochar, reducir los tiempos de operación y minimizar el consumo energético solar. Mientras que si el objetivo es aplicarlo para la remoción de contaminantes es recomendable producir el biochar a partir de cáscaras frescas.

Palabras claves: Pirolisis solar, Biochar, Bioadsorción, Cascara de naranja, Remediación de metales pesados, Energía renovable.

ABSTRACT

In the context of climate change and growing environmental awareness, research in renewable energy sources, such as solar thermal energy and biomass, is constantly advancing. Solar pyrolysis of residual biomass uses concentrated solar radiation to convert residual biomass into biochar and other biofuels. The solar pyrolysis studied in this work does not require carrier gases, as the biomass itself generates its inert atmosphere, which enhances carbon neutrality, reduces costs, and simplifies operation. This project harnesses the solar energy available in the state of Sonora using a solar furnace and residual biomass from the sweet orange (Citrus sinensis) industry, specifically utilizing its peel. In the first phase, biochar was produced through slow pyrolysis, with heating ramps below 36 °C/min and temperatures around 503 °C during biochar formation. In the second phase, the yield of biochar was quantified, obtaining values of 33.5% and 8.7% for dehydrated and hydrated peels, respectively. Finally, the potential of the produced biochar to remediate water contaminated with heavy metals (Cu II) was quantified, showing removal rates of 82% and 27% for concentrations of 200 ppm with biochar from fresh and dehydrated peels, respectively. In conclusion, if the goal is to produce biochar for energy purposes, it is recommended to use biomass with low moisture content to increase biochar yields, reduce operation times, and minimize solar energy consumption. On the other hand, if the goal is to use it for contaminant removal, it is advisable to produce biochar from fresh peles.

Keywords: Solar pyrolysis, Biochar, Bioadsorption, Orange peel, Heavy metal remediation, Renewable energy.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía y la búsqueda de fuentes sostenibles han impulsado el interés en la biomasa como sustituto prometedor de los combustibles fósiles para la recuperación y valorización de energía en productos de valor añadido [1]. La biomasa es considerada una de las fuentes de energía más prometedoras para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de combustibles basados en carbono. Su adopción sustancial podría aliviar los problemas ambientales, sociales y económicos que enfrenta la sociedad moderna [2]. En particular, los desechos de biomasa incluyen residuos forestales y agrícolas, como madera, hojas, troncos, cáscaras y nueces, así como cadáveres y excrementos de humanos y animales. La biomasa vegetal se compone principalmente de tres componentes lignocelulósicos: celulosa (40-60% en peso), hemicelulosa (15-30% en peso) y lignina (10-25% en peso), cuyas proporciones dependen de la fuente de biomasa [1]. La biomasa lignocelulósica, que incluye residuos agrícolas y forestales, se ha destacado como una fuente prometedora de bioenergía. No obstante, antes de que estos residuos puedan transformarse en una fuente valiosa de energía u otros productos de valor agregado, se requieren procesos adecuados. Existen numerosos procesos que convierten la biomasa cruda en formas utilizables de energía

y productos químicos de interés. Estos incluyen la combustión, pirólisis, gasificación, torrefacción, licuefacción, esterificación y fermentación [3]. Los procesos termoquímicos (combustión, gasificación y pirólisis) de conversión de biomasa en biocombustibles requieren una considerable cantidad de energía térmica [4]. La pirólisis se presenta como la opción más atractiva en comparación con la combustión y la gasificación, debido a su baja emisión de contaminantes y la obtención de diversos productos de valor agregado [1]. La pirólisis es un proceso térmico que descompone una sustancia a alta temperatura en un ambiente inerte o muy bajo en oxígeno. Actualmente, este proceso se utiliza para convertir residuos orgánicos en productos de gran valor [5]. La pirólisis se puede desarrollar bajo cuatro modalidades: lenta, rápida, instantánea y catalítica [6]. Además, se clasifica según la estrategia de reacción en: pirólisis convencional, pirólisis al vacío, pirólisis por microondas y pirólisis solar [1]. La pirólisis es un proceso altamente endotérmico que requiere un gran aporte de calor, generalmente suministrado por fuentes de energía no renovables [7]. La mayoría de los estudios han utilizado reactores de calefacción eléctrica o han quemado combustibles fósiles para calentar la biomasa durante la torrefacción y la pirólisis [8]. Por otro lado, la energía solar, una fuente inagotable y limpia, juega un papel esencial en estos procesos. Alrededor de 885 millones de TWh llegan a la superficie terrestre en un año, lo que representa 4200 veces la energía que la humanidad consumiría en 2035, según el Escenario de Políticas Actuales de la AIE [9]. Por consiguiente, es crucial utilizar energía solar para la producción de biocombustibles alternativos limpios. La pirólisis solar de biomasa lignocelulósica es un método novedoso para la producción de biocombustibles [8]. Se espera que la utilización de energía solar para asistir en la conversión de biomasa mediante procesamiento termoquímico mejore significativamente el rendimiento general del ciclo de vida de los biocombustibles. Para desarrollar la pirólisis solar, es necesario aumentar la densidad del flujo radiativo solar (Flux solar), ya que la radiación solar terrestre puede proporcionar alrededor de 1000 W/m² en un día despejado, un flux solar que no permite alcanzar las temperaturas necesarias para la pirólisis las cuales rondan entre 400 y 1000 °C [26]. Para lograr esto, se han utilizado tecnologías de concentración solar, que redirigen la radiación solar incidente a superficies mucho más pequeñas que la superficie de recolección de los espejos, incrementado la razón de concentración. Las tecnologías adecuadas para esto incluyen: el canal cilindro parabólico, sistemas lineales y puntuales de Fresnel, platos parabólicos, sistemas de torre central y hornos solares [10]. Por otro lado, independientemente del método utilizado para llevar a cabo la pirólisis de biomasa lignocelulósica, esta generará en diferentes proporciones tres productos principales: bioaceite (%bio-oil), biocarbón (%biochar) y gas no condensable (%biosyngas) [11]. El biosyngas es una mezcla de gases no condensables que incluyen principalmente CH_4, CO, CO_2, H_2 y N_2 [12]. Esta mezcla de gases se puede utilizar para preparar productos químicos mediante la síntesis de Fischer-Tropsch o implementarse como combustible directamente [13]. El tar es una mezcla de moléculas condensables que incluyen compuestos aromáticos de uno a cinco anillos, otros hidrocarburos que contienen oxígeno e hidrocarburos aromáticos policíclicos [14], los cuales también se pueden utilizar directamente para generar calor mediante combustión. El biocarbón es un material carbonoso sólido con estructura policíclica aromática, y el rendimiento de biocarbón obtenido mediante pirólisis de biomasa suele rondar entre el 5-50% en peso [15]. Cuando la biomasa se piroliza, el biocarbón posiblemente se forma mediante reacciones de reordenamiento intra e intermolecular, en las cuales los anillos de benceno del componente de lignina se combinan en una estructura policíclica [16].

A continuación, se presenta una breve revisión de estudios sobre la pirólisis solar y el uso de biocarbón en el tratamiento de aguas residuales. Morales et al. realizaron análisis ópticos y térmicos durante la producción de biocombustible por pirólisis solar de cáscaras de naranja en un canal parabólico, concluyendo que la pirólisis solar de biomasa es una oportunidad interesante para el almacenamiento y transporte de energía solar [18]. Sobek y Werle investigaron la pirólisis solar de madera residual, paja residual y lodo de aguas residuales, demostrando la eficacia de la energía solar concentrada en la producción de biocarbón de alta calidad y su potencial como combustible sólido renovable [19]. Por otro lado, Aspiazu-Méndez et al. exploraron el uso de cáscaras de nuez pecana para producir biocarbón mediante pirólisis solar, utilizando un reactor cilíndrico y un simulador solar, alcanzando temperaturas de hasta 674 °C [20]. En cuanto a la pirólisis convencional de cascaras de cítricos y remoción de contaminantes se encontró que, Khormaei et al. estudiaron la eliminación de iones de cobre usando biocarbón de residuos de naranja agria, observando que la absorción máxima se alcanzó a un pH de 5 y mejoró con el tratamiento químico del biosorbente [21]. Trakal et al. evaluaron la eliminación de cobre utilizando biocarbón de bagazo cervecero activado químicamente, encontrando que el biocarbón activado mostró una mayor eficiencia de adsorción comparado con el no activado [22]. Santos et al. investigaron el biocarbón derivado de cáscaras de naranja pirolizadas, destacando su alta capacidad de adsorción para plomo y su viabilidad como biocombustible sólido [23]. Lam et al. propusieron un método de pirólisis asistida por microondas con activación química para convertir cáscaras de naranja en carbón activado, logrando una alta capacidad de adsorción de colorantes en soluciones acuosas [24].

En general la pirolisis solar presenta importantes ventajas sobre la pirolisis convencional, destacándose en términos de eficiencia energética y beneficios medioambientales. Al utilizar la radiación solar como fuente de calor, elimina la necesidad de quemar combustibles fósiles o parte de la biomasa, lo que incrementa la eficiencia del proceso al evitar la pérdida de materia prima y reducir las emisiones de CO_2 en un 32.4%. Además, los productos obtenidos poseen mayor valor calorífico al almacenar la energía solar como energía química. A diferencia de los sistemas convencionales, que generan gases contaminantes y requieren procesos intensivos en energía como la producción de oxígeno puro, la pirolisis solar es más limpia y eficiente, con menores costos operativos gracias al uso de energía solar gratuita. También minimiza las reacciones secundarias no deseadas y las pérdidas de calor, mejorando la conversión de biomasa en productos útiles sin comprometer el medio ambiente [25].

El objetivo de este estudio es investigar la pirólisis solar lenta y pasiva (sin implementar gas de arrastre) en un horno solar desarrollado por la Universidad de Sonora [17], utilizando residuos de cáscara de naranja dulce (*Citrus sinensis*) para la producción de biocarbón, y ver el efecto del contenido de humedad inicial de las cascaras sobre la remoción de cobre (II) de soluciones sintéticas.

METODOLOGÍA

Método experimental

La metodología seguida se resume en el diagrama de la Figura 1. El proceso comienza con la selección de la biomasa y la reducción del tamaño de partícula, pasando por la pirolisis solar y culminando en las pruebas de bioadsorción. Las masas de cáscaras de naranja húmeda y seca utilizadas fueron de aproximadamente 80 g y 48 g, respectivamente, debido a que se optó por llenar el reactor, el cual tiene un volumen aproximado de 200 cc. Posteriormente, el reactor fue sellado y aislado térmicamente, dejando expuesta únicamente el área receptora, que es de aproximadamente 38 cm².

Los experimentos de pirolisis solar se llevaron a cabo el 1 de marzo de 2024 en la plataforma solar de Hermosillo (29.027835°, -111.144695°), entre las 10:00 y las 14:00 horas. Durante la etapa experimental de la pirolisis solar, se propuso como variable de control la temperatura de la reacción termoquímica (Tc), seleccionando 500 °C como objetivo y manteniendo rampas de calentamiento (RC) inferiores a 50 °C/min. Una vez obtenido el biochar de las cáscaras de naranja, este fue trasladado a los laboratorios de Ingeniería Ambiental y biorremediación del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, para su aplicación y caracterización.

Las pruebas de bioadsorción se realizaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL, con un volumen operativo de 125 mL de solución acuosa. Se varió la concentración inicial del metal de interés (30, 50, 100, 200 y 300 ppm) utilizando sulfato de cobre (II) para determinar las condiciones óptimas. Los siguientes parámetros se mantuvieron constantes en todos los experimentos: 0.5 g de biochar, pH de 5, temperatura de 30 °C, agitación a 150 rpm y un tiempo de agitación de 24 horas. Por último, las muestras de las pruebas de bioadsorción se filtraron utilizando filtros de 11 micrómetros, y las diluciones correspondientes se analizaron mediante un equipo de absorción atómica para determinar la cantidad de Cu (II) bioadsorbido.

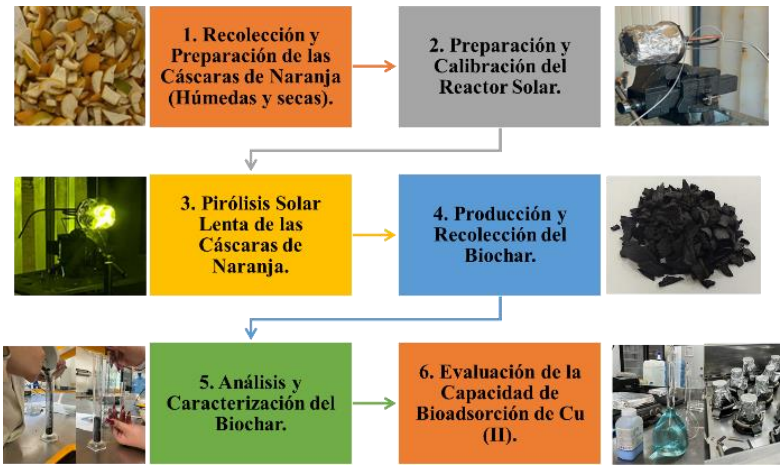


Figura 1. Metodología seguida para la producción y evaluación de biochar solar de cascara de naranja como bioadsorbente.

Por otra parte, en la figura 2 se muestra el sistema experimental correspondiente al horno solar, este sistema consta de 4 elementos principales: (a) Heliostato, encargado de mandar la radiación solar directa, (b) Atenuador encargado de regular el flux solar, (c) Espejo concentrador, espejo parabólico de 2da superficie con punto de 1.5 m, (d) Reactor pirolítico cilíndrico y (e) el sistema de control y monitoreo de variables.



(a) (b) (c) (d) (e)

Figura 2. Componentes del horno solar para pirolisis:

Helióstato (a), Atenuador (b), Plato concentrador (c), Reactor pirolítico (d) y Estación de control (e).

Modelos matemáticos

Para el análisis del presente trabajo se discute de manera elemental 3 aspectos importantes, primero se hace una predicción de la potencia solar suministrada ($\dot{Q_{sol}}$) al reactor para la pirolisis, (Cisneros-Cárdenas et al., [17]) (Ec. 1), después se estima el rendimiento del biochar Y_B (Ec. 2) y finalmente se cuantifica la eficiencia de bioadsorción de Cu (II) R de las soluciones sintéticas (Ec. 3), ambas por balance de materia.

$$\dot{Q_{sol}} = F \bullet I_b \bullet A_c \bullet (1 - S) \quad (1) \qquad Y_B = \frac{m_B}{m_C} \quad (2) \qquad R = \frac{C_i - C_f}{Ci} \quad (3)$$

Donde: F es el factor horno (-), I_b es la radiación solar directa (DNI en W/m^2), A_c es el área del espejo concentrador (m^2) y S es la fracción del área bloqueada por el atenuador (-), siendo 1 totalmente cerrado y 0 totalmente abierto. Con respecto a la Ec. 2, m_B y m_C son las masas del biochar y de la cascara cruda (g), respectivamente. Finalmente, C_i y C_f representan las concentraciones de Cu(II) antes y después de la bioadsorción en ppm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización y Contenido de humedad de la cascara de naranja

En la Tabla 1 se presenta la caracterización fisicoquímica de la cáscara de naranja, tanto hidratada como deshidratada, según el método propuesto por Vásquez Sierra et al. [27]. Además, se incluye la densidad aparente del biochar (D_a) obtenida de cada una de las cáscaras estudiadas, determinada mediante el método de la probeta (Encinas-Vázquez et al., [28]). Como se puede observar, el proceso de deshidratación solar aplicado resultó en una reducción del 58% en el contenido de humedad. Por otro lado, los valores presentados para las fracciones inorgánica (cenizas) y orgánica se expresan en base húmeda, lo que explica la mayor proporción de estas fracciones en la biomasa deshidratada. Sin embargo, ambas fracciones muestran proporciones similares en base seca, ya que provienen del mismo lote de cáscaras de naranja.

Una variable importante, asociada a la porosidad y al área superficial en materiales particulados, es la densidad aparente (D_a). Según la teoría, cuanto menor es la D_a, mayor es la porosidad del material. Como se aprecia, la densidad aparente del biochar proveniente de la cáscara hidratada es ligeramente inferior a la de la cáscara deshidratada, lo que sugiere una ligera ganancia en el área superficial del biochar obtenido de la cáscara hidratada.

Tabla 1. Composición porcentual de diferentes componentes en la cáscara de naranja

Experimento	Características de la biomasa	Humedad (%)	Inorgánica (%)	Orgánica (Volátiles) (%)	D_a (g/cm^3)
E1	Cascara deshidratada	1.34	5.68	92.98	0.30
E2	Cascara hidratada	59.4	2.33	38.19	0.29

Pirolisis solar y Producción de biochar

En la Fig. 2(a) se muestra la evolución del DNI (Irradiancia Normal Directa) durante el día de estudio, destacándose los periodos en los que se realizaron los experimentos. El experimento $E1$, que consistió en la pirolisis de cáscaras de naranja deshidratadas, tuvo una duración de 50 minutos, mientras que el experimento $E2$, correspondiente a cáscaras frescas (hidratadas), duró 75 minutos. Los DNI promedio registrados durante estos periodos fueron de 967 ± 8 W/m² para el experimento $E1$ y 1008 ± 4 W/m² para el experimento $E2$.

La evolución de las temperaturas de las biomasas relacionadas a estos dos experimetos se muestran en la Fig. 3(a) y 3(b), para E1 y E2, respectivamente. Como se puede apreciar el E1 presenta un ligero cambio de pendiente alrededor de los 100°C indicando la presencia de una ligera zona de secado de aproximadamente 30 s, esto se atribuye al bajo contenido de humedad de las cascaras deshidratas (Tabla 1), una vez superada la zona de secado, la temperatura de la biomasa es obligada a incrementar hasta llegar a la temperatura deseada para la pirolisis (Tc=500°C), durante este periodo es expulsada una gran cantidad de material orgánico en forma de gas el cual es quemado a la salida del tubo de escape del reactor como se evidencia en la figura 2(d), esta etapa puede ser llamada gasificación la cual comúnmente se desarrolla entre los 105°C y los 400°C, dependiendo el tipo de biomasa, durante esta etapa la rampa de calentamiento (RC) obtenida fue de 36°C/min, garantizando la pirolisis lenta. Después de esta etapa llegamos a la zona de la formación de biochar, aquí la temperatura se controló aproximadamente por 35 min, donde la temperatura media ($\overline{T_B}$) de esta zona fue de 508±11°C. El control sobre la RC y $\overline{T_B}$, se logra a través de la manipulación de las persianas, permitiendo incrementar o reducir el paso de la radiación solar proveniente del heliostato, en la figura 3(c), se muestra la evolución del porcentaje de apertura ($1-S$), para $E1$, presentando un valor promedio de 27% en la región de formación de biochar.

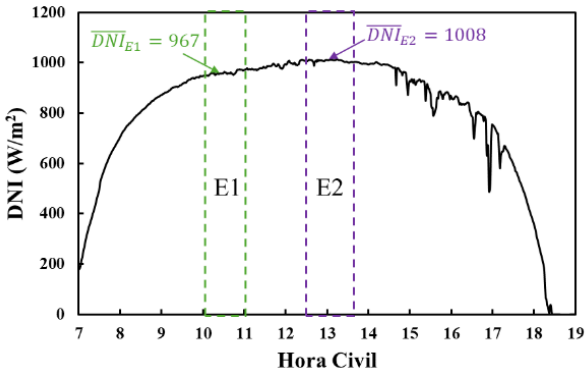


Figura 2. Evolución del DNI para el día 1/03/2024 (29.027835°, -111.144695°).

Por otro lado, en la figura 3(b), se muestra la evolución de las temperaturas registradas de la biomasa correspondientes al sistema $E2$, el fenómeno observado en este experimento es similar al descrito anteriormente, pasando por una zona de calentamiento, secado, gasificación y formación de biochar. Se puede apreciar que la cascara de naranja fresca presento un tiempo de secado más prolongado con una duración aproximada de 9 min, esto al alto contenido de humedad, como se indica en la tabla 1. El sistema $E2$ desarrollo una RC de 25°C/min, con una $\overline{T_B}$=503±5°C, se encontró que el tiempo estimado para la zona de formación de biochar fue de aproximadamente 47 min, ligeramente superior que el sistema $E1$. Como complemento se agregó la evolución del porcentaje de apertura del atenuador correspondiente al sistema $E2$, como se indica en figura 3(d), presentando un valor promedio de 29% para la zona de producción de biochar. Al evaluar los errores relativos de las $\overline{T_B}$ para ambos sistemas con respecto a la Tc, se encontró que el sistema $E1$ y $E2$ presentaron valores de 1.5 y 0.6 %, respectivamente. Indicando que se obtuvo un mejor control sobre el sistema $E2$, principalmente en la zona de formación de biochar.

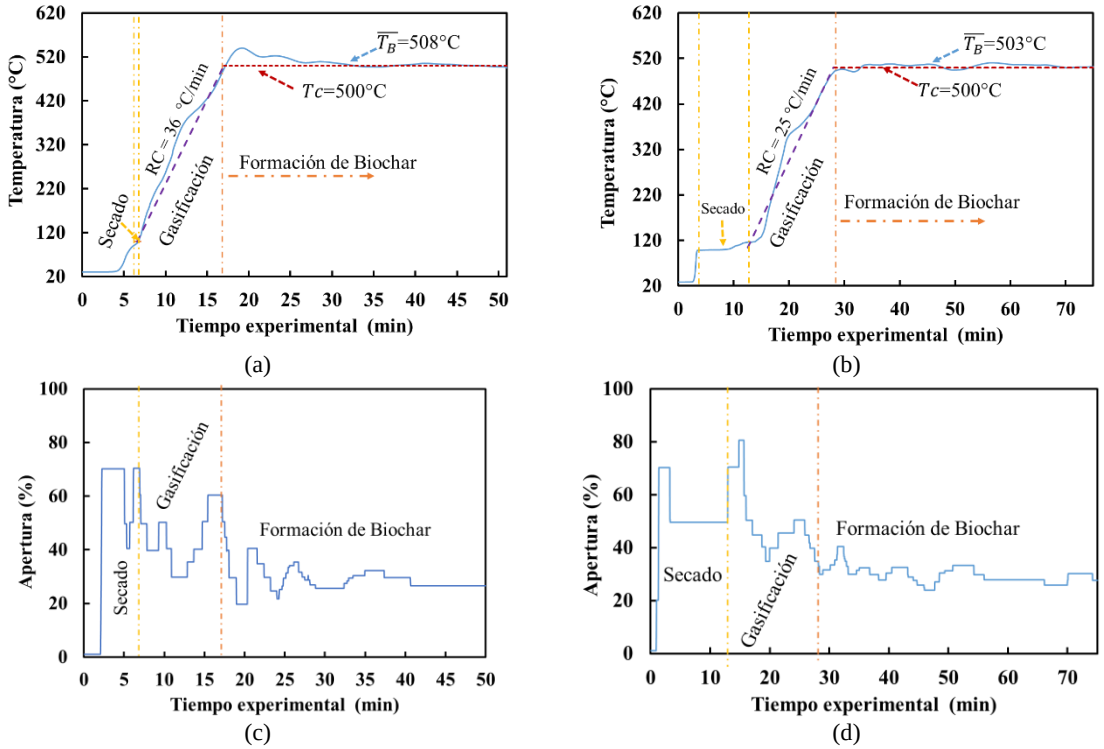


Figura 3. Evolución de las temperaturas de las cascaras de naranja: Deshidratas (a), Hidratadas (b), Evolución del % de apertura para los sistemas E1 (c) y E2 (d).

Finalmente, en la figura 4, se muestra una comparativa de los rendimientos obtenidos asi como de la energía solar suministrada por kg de cascara pirolizada (Ec) y por kg de biochar producido (Eb), para cada sistema experimental. Los valores obtenidos par Ec y Eb, fueron calculados al relacionar la Ec. 1 con el tiempo de experimentación y al dividirlos ente los kg de cascara cruda y de biochar producido respectivamente.

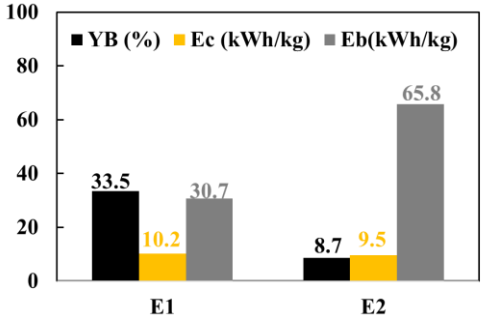


Figura 4. Comparación entre los sistemas E1 y E2 para: YB (barras negras), Energía solar suministrada por kg de cascara de naranja curda (barras amarillas) y Energía solar suministrada por kg de biochar producido (Eb-barras grises).

Los resultados muestran que el rendimiento de biochar en el sistema $E1$ fue del 33.5%, mientras que en el sistema $E2$ fue del 8.7%, lo que indica que el sistema $E1$ produce aproximadamente 2.3 veces más biochar en comparación con el sistema $E2$. Por otro lado, al cuantificar la energía solar suministrada por kilogramo de cáscara cruda durante los experimentos, se observó que ambos sistemas recibieron cantidades similares de energía: 10.2 kWh/kg para el sistema $E1$ y 9.5 kWh/kg para el sistema $E2$. Sin embargo, al analizar la cantidad de energía requerida por kilogramo de biochar producido, se encontró que el sistema $E2$ necesitó aproximadamente 65.8 kWh, mientras que el sistema $E1$ requirió 30.7 kWh. Esto sugiere que el contenido de humedad en las cáscaras de naranja consume una cantidad considerable de energía.

Remoción de contaminantes

Finalmente se hace una comparación del poder de bioadsorción referente al biochar proveniente del experimento E1 y E2, los resultados para las 5 concentraciones estudiadas se muestran en la Figura 5. Como se puede apreciar el biochar obtenido presentan buenos valores de remoción del ion Cu(II), siendo mayor a bajas concentraciones (< 50 ppm) y en menor medida a altas concentraciones (>200 ppm), esto se atribuye a la capacidad de bioadsorción por unidad de masa de biochar y por ende a la cantidad de sitios activos por unidad de superficie de los materiales, se aprecia que al incrementar la cantidad de iones de Cu(II) los sitios activos de la masa de biochar van quedando saturados por lo que se manifiesta una baja capacidad de remoción, quedando una mayor cantidad de iones disueltos. Por otro lado, al comprar los sistemas E1 y E2, se puede apreciar que para el caso de biochar proveniente de la cascara hidratada presenta una significativa mejoría en la remoción de iones de Cu(II) para cada una d las concentraciones, presentando valores similares para Ci<50 ppm, mientras que para 100 a 300 el biochar E2 supero alrededor de 2.3 veces aproximadamente, siendo de 3.1 veces mayor para Ci de 200 ppm. Estos resultados son compatibles con los resultados de la densidad aparente reportados en la tabla 1, indicando que el biochar proveniente del sistema E2 presenta mayor área superficial, para garantizar este supuesto es necesario realizar pruebas más especializadas de caracterización en área superficial asi como de otras técnicas que den más información de las características físicas y químicas de estos dos biochar.

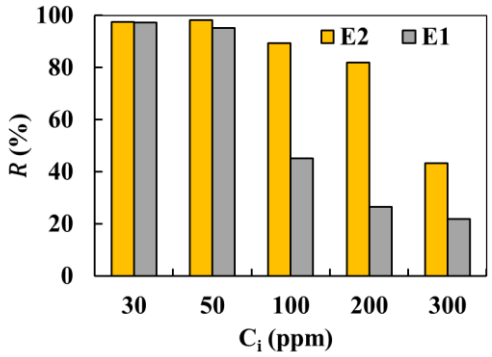


Figura 5. Comparación entre de la eficiencia de remoción para el biochar proveniente del experimento $E1$ y $E2$.

CONCLUSIONES

- En términos generales, se puede concluir que el horno solar de la plataforma solar de Hermosillo es capaz de producir biochar a temperaturas controladas, con rampas de calentamiento inferiores a 50 °C/min, lo que garantiza una pirolisis solar lenta. No obstante, aún queda el desafío de optimizar el control preciso de las rampas de calentamiento.
- Si el objetivo es la producción de biochar, se recomienda utilizar biomasa con bajo contenido de humedad, con el fin de aumentar los rendimientos de biochar, reducir los tiempos de operación y minimizar el consumo energético.
- El biochar obtenido mediante pirolisis solar lenta es un buen candidato para la remoción de Cu(II). En particular, el biochar producido a partir de cáscaras frescas (hidratadas) muestra una mejora significativa, alcanzando una capacidad de remoción de Cu(II) hasta 3.1 veces mayor en comparación con el biochar de cáscaras deshidratadas.
- Se sugiere realizar pruebas más especializadas de caracterización física y química de estos materiales, así como un estudio TGA/DTG tanto para cáscaras de naranja hidratadas como deshidratadas.

REFERENCIAS

1. Shin Ying Foong, Rock Keey Liew, Yafeng Yang, Yoke Wang Cheng, Peter Nai Yuh Yek, Wan Adibah Wan Mahari, Xie Yi Lee, Chai Sean Han, Dai-Viet N. Vo, Quyet Van Le, Mortaza Aghbashlo, Meisam Tabatabaei, Christian Sonne, Wanxi Peng, Su Shiung Lam, Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions, Chemical Engineering Journal, Volume 389, 2020, 124401.
2. A.A. Khan, W. de Jong, P.J. Jansens, H. Spliethoff, Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies, Fuel Processing Technology, Volume 90, Issue 1, 2009, Pages 21-50, ISSN 0378-3820.
3. Haftom Weldekidan, Vladimir Strezov, Graham Town, Review of solar energy for biofuel extraction, Renewable and Sustainable Energy Reviews,Volume 88, 2018, Pages 184-192.

4. N.R. Singh, W.N. Delgass, F.H. Ribeiro, R. Agrawal, Estimation of liquid fuel yields from biomass Environ Sci Technol, 44 (2010), pp. 5298-5305.
5. Su Shiung Lam, Rock Keey Liew, Ahmad Jusoh, Cheng Tung Chong, Farid Nasir Ani, Howard A. Chase, Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 53, 2016, Pages 741-753.
6. H.B. Goyal, Diptendu Seal, R.C. Saxena, Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 2, 2008, Pages 504-517.
7. S. Morales, R. Miranda, D. Bustos, T. Cazares, H. Tran, Solar biomass pyrolysis for the production of bio-fuels and chemical commodities, J Anal Appl Pyrolysis, 109 (2014), pp. 65-78.
8. Dengyu Chen, Kehui Cen, Fan Chen, Yimeng Zhang, Solar pyrolysis of cotton stalks: Combined effects of torrefaction pretreatment and HZSM-5 zeolite on the bio-fuels upgradation, Energy Conversion and Management, Volume 261, 2022, 115640.
9. Philibert C. Solar energy prespective. France International Energy Agency; 2011.
10. Ya-Ling He, Yu Qiu, Kun Wang, Fan Yuan, Wen-Qi Wang, Ming-Jia Li, Jia-Qi Guo, Perspective of concentrating solar power, Energy, Volume 198, 2020, 117373.
11. Y. Huang, B. Li, D. Liu, X. Xie, H. Zhang, H. Sun, et al. Fundamental advances in biomass autothermal/oxidative pyrolysis: a review ACS Sustainable Chem Eng, 8 (32) (2020), pp. 11888-11905.
12. Klass, D.L. Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals; Academic Press: San Diego, CA, USA, 1998.
13. J. Hu, F. Yu, Y.W. Lu, Application of Fischer-Tropsch synthesis in biomass to liquid conversion Catalysts, 2 (2012), pp. 303-326.
14. Lopamudra Devi, Krzysztof J Ptasinski, Frans J.J.G Janssen, A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes, Biomass and Bioenergy, Volume 24, Issue 2, 2003, Pages 125-140.
15. D. Angın, Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake, Bioresour. Technol., 128 (2013), pp. 593-597.
16. M. Van de Velden, J. Baeyens, A. Brems, B. Janssens, R. Dewil, Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction, Renew. Energy, 35 (2010), pp. 232-242.
17. Cisneros-Cárdenas, N.A., Pérez-Enciso, R.A., Pérez-Rábago, C.A., Calleja-Valdez, R.A., Maytorena-Soria, V.M., García-Gutiérrez, R., Cabanillas-Lopez, R.E., (2023). Thermal experimental study of a volumetric receiver-reactor using a Mini-Solar furnace, Applied Thermal Engineering, Volume 234, 121276.
18. Morales, S., Miranda, R., Bustos, D., Cazares, T., & Tran, H. (2014). Solar biomass pyrolysis for the production of bio-fuels and chemical commodities. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 109, 65–78.
19. Sobek, S., & Werle, S. (2021). Solar pyrolysis of waste biomass: A comparative study of products distribution, in situ heating behavior, and application of model-free kinetic predictions. Fuel, 292.
20. Aspiazu-Méndez, A., Cisneros-Cárdenas, N. A., Pérez-Rábago, C., Pat-Espadas, A. M., Manzini-Poli, F., & Estrada, C. A. (2024). Analysis of the Solar Pyrolysis of a Walnut Shell: Insights into the Thermal Behavior of Biomaterials. Energies, 17(6).
21. Khormaei, M., Nasernejad, B., Edrisi, M., & Eslamzadeh, T. (2007). Copper biosorption from aqueous solutions by sour orange residue. Journal of Hazardous Materials, 149(2), 269–274.
22. Trakal, L., Šigut, R., Šillerová, H., Faturíková, D., & Komárek, M. (2014). Copper removal from aqueous solution using biochar: Effect of chemical activation. Arabian Journal of Chemistry, 7(1).
23. Santos, C. M., Dweck, J., Viotto, R. S., Rosa, A. H., & de Morais, L. C. (2015). Application of orange peel waste in the production of solid biofuels and biosorbents. Bioresource Technology, 196, 469–479.
24. Lam, S. S., Liew, R. K., Wong, Y. M., Yek, P. N. Y., Ma, N. L., Lee, C. L., & Chase, H. A. (2017). Microwave-assisted pyrolysis with chemical activation, an innovative method to convert orange peel into activated carbon with improved properties as dye adsorbent. Journal of Cleaner Production, 162, 1376–1387.
25. M.A. Rahman, Abdul Mojid Parvej, Mohammad Abdul Aziz, Concentrating technologies with reactor integration and effect of process variables on solar assisted pyrolysis: A critical review, Thermal Science and Engineering Progress, Volume 25,2021,100957.
26. V.M. Maytorena, D.A. Buentello-Montoya, Worldwide developments and challenges for solar pyrolysis, Heliyon, Volume 10, Issue 15, 2024.
27. Vásquez Sierra, C., Biviana, E., Builes, H., & Fredy, J. (2006). Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, *59*(2), 3557–3564.
28. Encinas-Vázquez, A., Quezada-Renteria, J. A., Cervantes, F. J., Pérez-Rábago, C. A., Molina-Freaner, F. E., Pat-Espadas, A. M., & Estrada, C. A. (2021). Unraveling the mechanisms of lead adsorption and ageing process on high-temperature biochar. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 96(3), 775–784.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE UNIERSITARIO COMO UN ESCENARIO DE DESCARBONIZACIÓN

Valeria Rubi Sánchez Hernández, Ariana Cruz Olayo, Liliana Ivette Ávila Córdoba
Facultad de Ingeniería, UAEMÉX, Cerro de Coatepec, Toluca, Estado de México, 50110, México, **7227602274, valeri8rubigmail.com**

Claudia Ivett Alanís Ramírez
Facultad de Planeación Urbana, UAEMEX, Calle Mariano Matamoros, Toluca, Estado de México, s/n, 50130, México.

RESUMEN.

El segundo sector a nivel mundial con más emisiones de Gases de Efecto Invernadero es el transporte; México contribuye con un 25% de las emisiones de CO_2. En el Acuerdo de París concordaron implementar escenarios de descarbonización, para contrarrestar los impactos ambientales y comprometiendo llegar a la carbono-neutralidad para el 2070.

De lo anterior, las instituciones educativas en sus servicios de transporte, tienen un gran compromiso para llegar a la neutralidad, es por ello que la UAEMEX cuenta con un transporte escolar denominado "Potro Verde Bús", unidades que utilizan Gas Natural Comprimido como combustible alternativo al diésel. El objetivo de esta investigación fue evaluar escenarios de descarbonización con el uso de la electromovilidad para el Sistema de Transporte Universitario de la UAEMEX. La metodología utilizada fue la desarrollada por la ISO 14040 y 14044 para el Análisis de Ciclo de Vida. Se evaluaron las fases de: producción del autobús, uso y mantenimiento para la Ruta Ixtlahuaca, con la unidad funcional de un pasajero-kilómetro. Se analizaron 4 escenarios: Autobús de Gas Natural Comprimido; Autobús eléctrico mix; autobús eléctrico 50 %; autobús eléctrico renovable. Los métodos seleccionados de evaluación fueron: IPCC, ReCiPe 2016 y Demanda Acumulada de Energía con el uso del software SimaPro PhD 9.6.0.1 y la librería Ecoinvent 3.10. Como resultado se encontró que la Huella de Carbono del "Autobús GNC" es menor que la del "Autobús eléctrico mix" y del "Autobús eléctrico 50 %", con una diferencia de $7.61x10^{-4}$ kg de CO_2 eq y $2.74x10^{-4}$ kg de CO_2 eq, respectivamente. Se concluye que la electromovilidad es buena opción de descarbonización siempre y cuando la generación de electricidad sea por fuentes renovables y que por ahora los autobuses de GNC son la mejor opción para la Universidad debido a la dependencia de combustibles fósiles en el mix energético del país.

ABSTRACT

The second sector worldwide with the most Greenhouse Gas emissions is transportation; Mexico contributes with 25% of CO_2 emissions. In the Paris Agreement they agreed to implement decarbonization scenarios, to counteract environmental impacts and committing to reach carbon neutrality by 2070.

From the above, educational institutions in their transportation services have a great commitment to reach neutrality, which is why UAEMEX has its own transportation called "Potro Verde Bús". That are units that use Compressed Natural Gas as an alternative fuel to diesel. The objective of this research was to evaluate decarbonization scenarios with the use of electromobility for the UAEMEX University Transportation System. The methodology used was ISO 14040 and 14044 for Life Cycle Analysis. The life cycle phases: bus production, use and maintenance for the Ixtlahuaca Route were evaluated, with the functional unit of one passenger-kilometer. Four scenarios were analyzed: Compressed Natural Gas Bus; Mix electric bus; electric bus 50%; renewable electric bus. The selected evaluation methods were: IPCC, ReCiPe 2016 and Accumulated Energy Demand with the use of the SimaPro PhD 9.5 software and the Ecoinvent 3.9.1 library. As a result, it was found that the Carbon Footprint of the "CNG Bus" is lower than that of the "Mix Electric Bus" and the "50% Electric Bus", with a difference of $7.61x10^{-4}$ kg of CO_2 eq and $2.74x10^{-4}$ kg of CO_2 eq, respectively. It is concluded that electromobility is a good option for decarbonization as long as the generation of electricity is from renewable sources and that for now CNG buses are the best option for the University due to the dependence on fossil fuels in the country's energy mix.

Palabras claves: ACV, Transporte Universitario, Electromovilidad, Huella de Carbono y Descarbonización.

Introducción

El sector transporte es uno de los sectores con más externalidades negativas, entre las principales se encuentran: el consumo de energía y recursos naturales; en el 2016 representaba el 31.6 % y fue responsable del 24 % de las emisiones globales de CO_2 (Holden, 2019); según con el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, es el segundo sector que más emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) produce, (14 %); la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, reporta que el transporte emite 171 $MtCO_2$ eq (25 %) en México (Iniciativa Climática de México, 2021).

Para disminuir los GEI y combatir el cambio climático, los países han tenido reuniones donde proponen procesos de mitigación, adaptación y resiliencia; uno de ellos es el Acuerdo de Paris en 2015, formando parte 195 países y la Unión Europea, donde se comprometieron a no aumentar por encima de 2 °C la temperatura del planeta (Cano et al., 2022). Para ello se incorporó la meta de descarbonización, la cual establece que para 2050 la fuente principal de la generación de electricidad debe ser por medio de energías renovables, en donde el transporte tendrá que ser eficiente y sostenible en conjunto con la transición a una flota vehicular eléctrica, asimismo una parte de la distribución de los ingresos será destinada para implementar subsidios verdes e incluir impuestos al carbono (Galindo et al., 2022).

Dentro de los países participantes en el acuerdo de París, se comprometieron a plasmar sus estrategias de descarbonización en un informe (Contribuciones Nacionales Determinadas) que se publicaría cada 5 años de índole público. En las estrategias de mitigación para el sector transporte se contempla como fuentes alternativas el hidrógeno y la electricidad (Lubecki et al., 2023), siendo el primer escalón la electrificación del transporte, pues los vehículos de combustión por hidrogeno verde[1] aún tienen problemas con el almacenamiento.

La operación de la electromovilidad una opción ampliamente estudiada como escenario de descarbonización, pero para contemplar la incorporación de la flota eléctrica también es necesario hacer referencia a las fuentes de energía utilizadas por la matriz energética[2] mexicana, debido a que la generación de la electricidad es primordial para que sea realmente una transición hacia la descarbonización del sector (Vicente, 2021). De acuerdo con la Secretaría de Energía, en el 2023 la matriz energética de México estaba regida principalmente por los combustibles fósiles con el 84.8 % y el restante se atribuye a las fuentes renovables. Es relevante destacar que el país cuenta con un gran potencial renovable (solar, eólica) al estar dentro de los países donde pasa el "cinturón solar" [3], aunque según datos de Portillo (2017), México a pesar de tener 5 veces más radiación que Alemania aún no ha explotado su recurso solar ni una cuarta parte. En relación con la energía eólica y con datos del Global Wind Atlas (2024), México cuenta con una zona con altas velocidades de viento en el estado de Oaxaca (9 m/s) y en el resto del país se pueden alcanzar velocidades de 6 m/s, lo cual se encuentra por encima del promedio.

Conforme al potencial renovable, México puede incursionar en la generación de electricidad renovable y así transitar a la electrificación del sistema de transporte más rápido, pues se espera que para 2030 la flota de transporte público sea 20 % eléctrico (Cities Finance Facility y Carbon Trust México, 2018). Si bien desde 1954 la Ciudad de México cuenta con trolebuses y al pasar de los años ha sido posible que cada hora circulen hasta 22 trolebuses, ahorrando así 504 kg de CO_2 por cada km recorrido (Servicios de transportes eléctricos, 2024), el país se comprometió a disminuir un 36% de manera condicionada para 2030. Solo que para poder alcanzarlo tanto el gobierno como la sociedad deben apegarse a los objetivos del desarrollo sostenible (ODS). A pesar de que los ODS no abordan de primera mano el transporte en sus metas si lo contemplan, un ejemplo es en el ODS 11[4] , cuya meta 11.2 describe que para 2030 el transporte deberá ser seguro, asequible, accesible y sostenible (Magalhães y Santos, 2022; Reyes, 2022).

Para evaluar la sostenibilidad del transporte, la Huella de Carbono es una buena herramienta, ya que cuantifica los GEI en términos del compuesto químico, dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq), referente a las emisiones generadas desde la extracción de la materia prima, transformación hasta en el fin de vida del producto o servicio (Hernández et al., 2023; Rodríguez et al., 2020; Valls y Bovea, 2021).

De lo anterior, la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), cuenta con un sistema de transporte urbano que surge oficialmente en 2013 con el propósito de apoyar a los alumnos con sus gatos de traslado, la Universidad cuenta con 47 unidades; de las cuales 38 operan con diésel (Potrobús) y 9 con gas natural (Potro Verde Bús), recorriendo 17 rutas, abarcando los municipios aledaños a Toluca como Metepec, Zinacantepec, Tenango, Ixtlahuaca, Sauces, Temoaya, entre otros. La UAEMEX, refleja su compromiso con la disminución de la Huella de Carbono al implementar nuevas unidades que utilizan gas natural (Potro Verde Bús) (UAEM, 2021), sin embargo, dicho combustible sigue siendo un hidrocarburo con reservas finitas, por lo que el objetivo de este proyecto fue evaluar un escenario de descarbonización con la electrificación del Transporte Universitario Potro Verde Bús mediante la metodología el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la reducción de su Huella de Carbono".

Metodología

La metodología ocupada fue ACV, que está normada bajo las Organización Internacional de Normalización (por sus siglas en inglés, ISO) 14040 y 14044, la cual se desarrolla en cuatro etapas iterativas entre sí (ISO, 2006b).

- *Objetivos y alcance del estudio:* producción, uso y mantenimiento de la Ruta Ixtlahuaca del Potro Verde Bús, en la Figura 1, se describen 3 recuadros de diferentes colores, el de color azul es el ciclo de vida del combustible; el verde el del autobús; y el naranja representa el alcance del presente trabajo, considerando desde la producción del autobús (estructura, carrocería, componentes, acabados); el uso o la operación variando la fuente energética para su funcionamiento entre GNC y fuentes renovables; y el mantenimiento requerido para un año de servicio. Dejando fuera del alcance la extracción de materia prima, del combustible y el fin de vida útil del autobús. La unidad funcional fue: **Un pasajero por kilómetro recorrido del Potro Verde Bús en la Ruta Ixtlahuaca**.
- *Análisis del inventario:* en la cual se recopila información para reconocer todas las entradas que se utilizan para la producción de cada una de las etapas del producto, así como salidas. El inventario para el autobús de GNC como para los escenarios electrificados del STU se hicieron exclusivamente para la Ruta Ixtlahuaca del Potro Verde Bús durante un 1 año de operación.

  Los datos para el inventario del autobús de GNC se obtuvieron principalmente de tres fuentes: por la Dirección de Transporte Universitario de la UAEMEX que proporcionó la afluencia promedio de alumnos, la marca del autobús (DINA 2019) y horarios; por entrevistas a conductores que operan autobuses diésel y de GNC para pasajeros, de las cuales se hicieron principalmente preguntas acerca de mantenimiento; de manera experimental usando el Potro Verde Bús de la Ruta a Ixtlahuaca: temporizando su recorrido,

[1] Hidrogeno verde: obtención del hidrogeno por fuentes renovable como la electrolisis del agua

[2] Matriz Energética: la diversificación de las distintas fuentes de energía para la generación de energía eléctrica y combustibles que existe en un país

[3] Cinturón solar: zona geográfica donde se encuentran las más altas radiaciones solares.

[4] ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, donde las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

registrando el kilometraje de un viaje redondo y contabilizando la afluencia de pasajeros. Ahora bien, para el autobús eléctrico se supuso que el mantenimiento que va a requerir va a ser similar al de GNC, sin embargo, la periodicidad se tomó conforme a manuales de mantenimiento de autobuses eléctricos y algunos otros datos se sacaron de estudios semejantes.

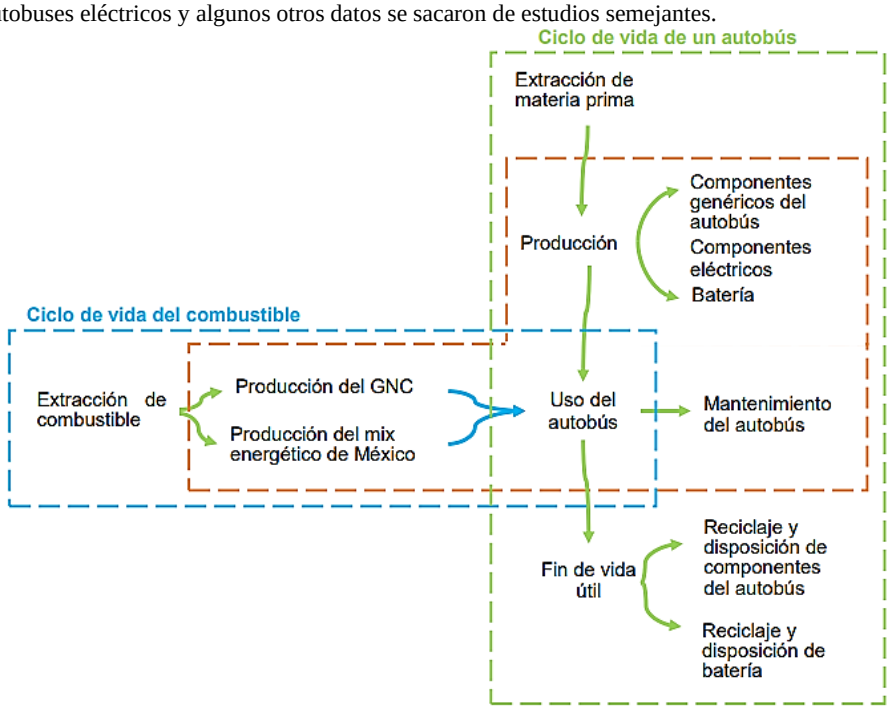


Figura 1: Límites del sistema del ACV para la manufactura, quema de combustible y mantenimiento de un autobús de pasajeros de gas natural. Fuente: Adaptado de Lubecki etal., 2022.

En la Figura 2, se muestra el inventario de ciclo de vida de las entradas y salidas asociadas a la unidad funcional para cada etapa del autobús de GNC. Para el inventario del autobús eléctrico se consideró una variación en cuanto al rendimiento del autobús y el cambio de periodicidad de los cambios contemplados en el mantenimiento. Se utilizó un rendimiento del combustible, según Olvin y Pal (2021), de 1.006 kWh/km. Para el mantenimiento se registraron 6 entradas (aceite, refrigerante, agua, neumáticos, energía eléctrica y batería de iones de litio Ferrofosfato (LPF)).
En la Figura 3 se muestran el ICV con las cantidades correspondientes para cada entrada/salidas asociadas a la unidad funcional del autobús eléctrico.

- *Evaluación del impacto*: Para el modelaje se utilizó el programa de ciclo de vida SimaPro v.9.6.0.1 en su versión PhD, utilizando la librería Ecoinvent 3.10.

Una vez modelado el inventario, se seleccionaron los métodos IPCC, ReCiPe 2016 y Demanda Acumulada de Energía (DAE) para la evaluación de impacto ambiental. En el método IPCC se evaluó el Calentamiento Global (CG); en ReCiPe 2016, se seleccionaron 4 de sus categorías de punto medio: Formación de partículas finas $PM_{2.5}$ (FPF), Escasez de recursos minerales (ERM), Escasez de recursos fósiles (ERF), Consumo de agua (CA).

Los métodos escogidos evaluaron el impacto de 4 escenarios de descarbonización. Los dos escenarios principales “Autobús GNC” que representa al Potro Verde Bús de la UAEMEX y el “Autobús eléctrico mix” en el que se supuso que la electricidad consumida por el autobús proviene tal cual está compuesta la matriz energética de México. El tercer escenario se estableció pensando que la UAEMEX invierta en su propia estación de carga a partir de paneles solares policristalinos instalados en los techos de los espacios académicos de la Universidad para generar el 50% de energía eléctrica del consumo de los autobuses y el restante fuera tomado directamente de la CFE; en el cuarto escenario se consideró que la generación de electricidad sea 100% renovable con el 40 % de energía generado por turbinas eólicas de 1 a 3 MW, 30 % con sistemas fotovoltaicos instalados en campo abierto, 20 % con tecnología hidroeléctrica con descenso natural y un 10 % por producción geotérmica.

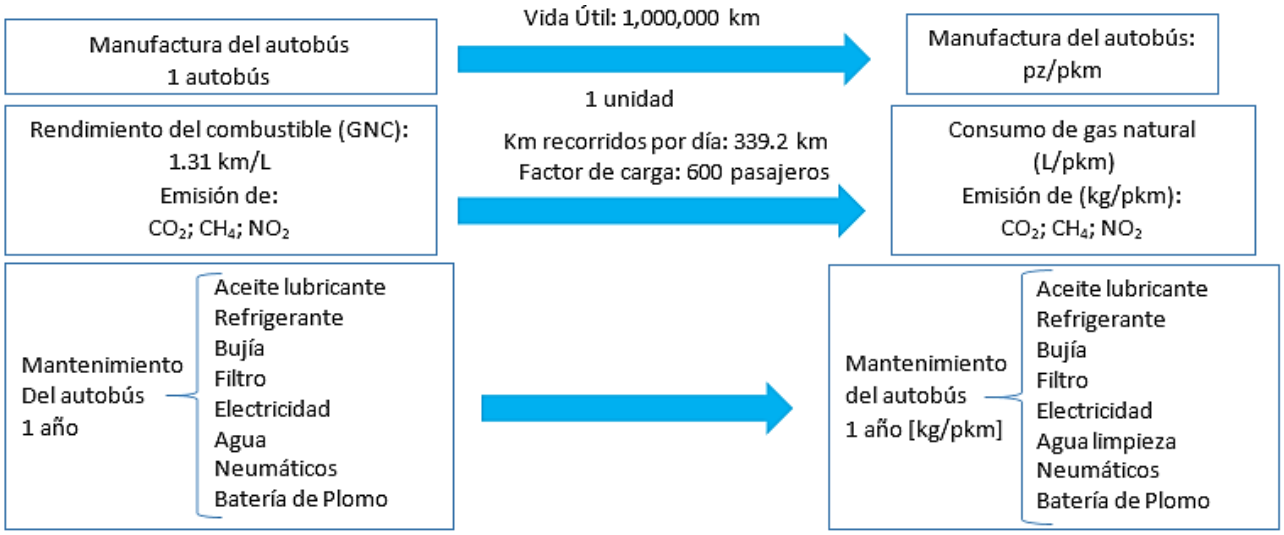


Figura 2: ICV de un autobús de pasajeros de gas natural. Fuente: elaboración propia, 2024.

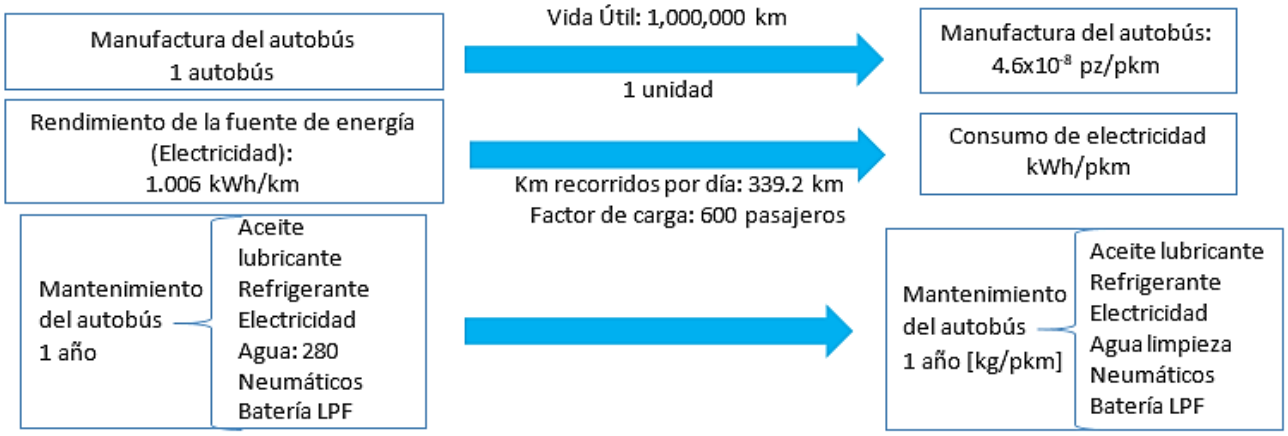


Figura 3: ICV de un autobús eléctrico de pasajero. Fuente: elaboración propia, 2024

Resultados e interpretación de resultados

El primer escenario a analizar es el "Autobús GNC". Los resultados del IPCC mostrados en la Figura 4 demuestran que la etapa de mayor impacto es la fase de la producción del autobús con el 81.7 % de la Huella de Carbono, siendo el refuerzo de acero y la aleación fundida del aluminio las que más contribuyen a la huella ambiental. El mantenimiento del autobús contribuye con 13.3 % por el continuo cambio de aceite, mientras que el uso del autobús es insignificante con tan solo un 5.01 %.

Los resultados con el método ReCipe en las 4 categorías se muestran en la Figura 5, donde se observa que la producción del autobús es la que más afecta al ambiente, debido a: la aleación fundida de aluminio ya que se ocupa en la carrocería, la transmisión, tuberías, algunas partes para el motor, etc.; el reforzamiento de acero; el mercadeo del cátodo y ánodo de cobre; el acero al cromo; la electricidad de voltaje medio. En cuanto al mantenimiento el daño se eleva por el uso del aceite por el mercadeo del petróleo (elemento primordial para su fabricación). La FPF en la producción del autobús genera el 90.1 %, el mantenimiento 9.56 % y el uso apenas 0.34 %. En cuanto a la ERM la producción del autobús aporta el 98.1 %, el mantenimiento solo 1.9 %. En la ERF ya hay más presencia de la etapa de mantenimiento del autobús, aunque el uso sigue siendo insignificante. Así se tiene que el 65.4 % de la ERF corresponde a la producción, 34.4 % la etapa de mantenimiento y el 0.2 % el uso del autobús. Para el CA el 85.4 % es de la producción del autobús, el 14.9 % del mantenimiento.
En cuanto a la DAE las fuentes no renovales son las que se utilizan más para todo el ACV, esto sin duda se debe a la conformación de la matriz energética actual del país, donde más del 80 % corresponde a recursos fósiles y una pequeña parte de fuentes renovables, siendo la hidroenergía la de mayor porcentaje, por lo que no es de extrañar qué hora es el consumo de energía renovable usando agua que las fuentes eólicas, solares y geotérmicas. La producción del transporte es el que más energía requiere con 22.6 kJ/pkm, siguiendo el mantenimiento con 11.22 kJ/pkm y por último el uso con 0.06 kJ/pkm.

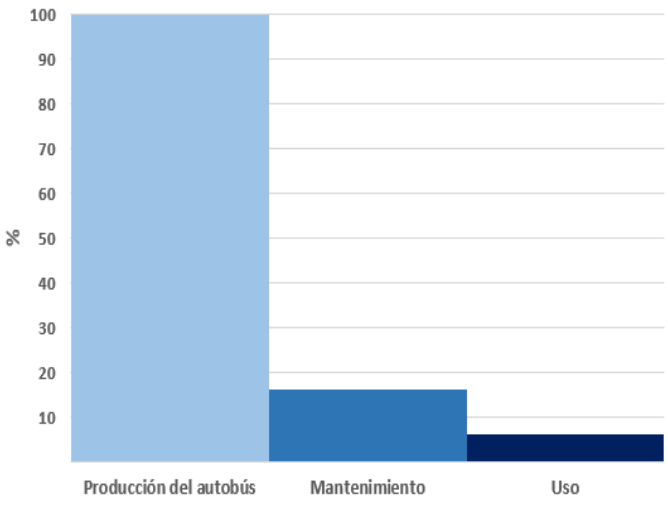


Figura 4: Resultados del Autobús GNC con el método IPCC

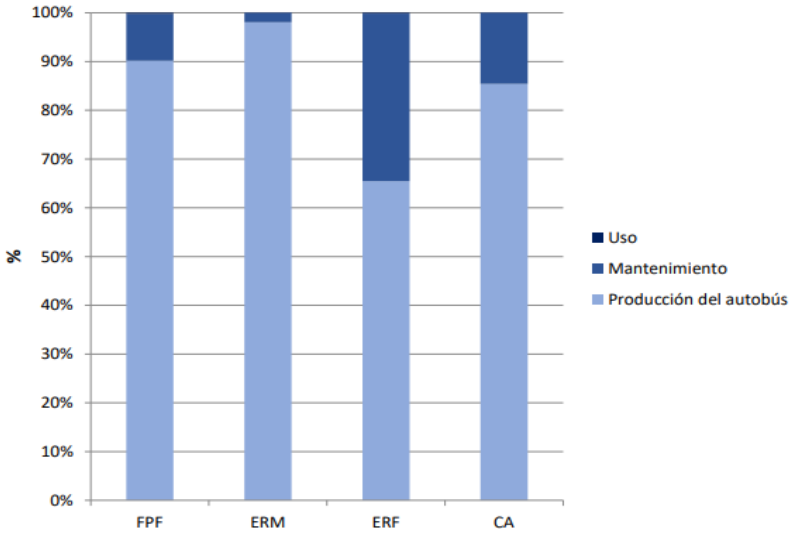


Figura 5: Resultados del Autobús GNC con el método ReCiPe 2016

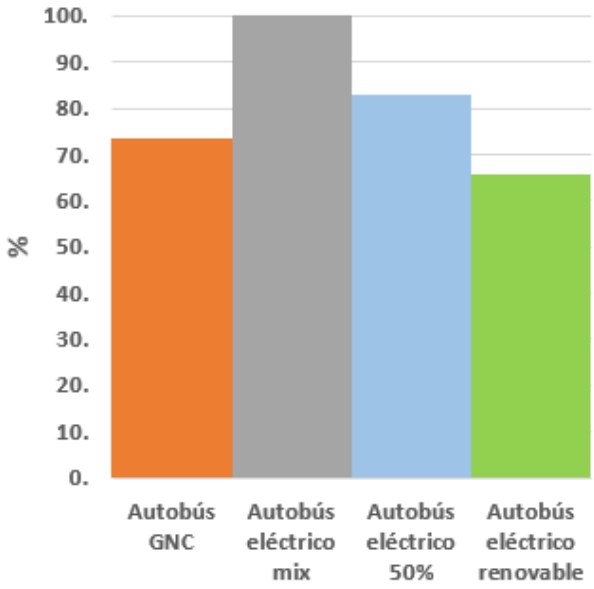


Figura 6: Comparación de escenarios con el método IPCC.

Los resultados del "Autobús GNC" indican que la fabricación de la carrocería, la transmisión, tuberías, algunas partes para el motor, etc. son los componentes que hacen que el impacto ambiental incremente, debido a los procesos que se requieren para la producción de los lingotes y barras del aluminio y del acero. Además de que el continuo cambio de aceite lubricante (cada 3 meses) es el responsable de aumentar aún más el daño.

Analizando solo la Huella de Carbono de los 4 escenario (ver Figura 6), si la UAEMEX actualmente incluyera autobuses eléctricos o bien apostara por producir la mitad de su demanda de electricidad por paneles fotovoltaicos su Huella de Carbono no disminuiría, de hecho, sería aún mayor que sus unidades de GNC. Ahora bien, en el escenario donde el mix energético del país es 100 % renovable el autobús eléctrico emitiría $2.2x10^{-4}$ kg de CO_2 eq/pkm menos que el autobús de GNC. Con el análisis de este proyecto se concluye que la UAEMEX está en el primer escalón de la descarbonización con la integración de sus unidades verdes (Potro Verde Bús), las cuales muestran resultados menos dañinos para el ambiente, al menos para las actuales circunstancias del país, aunque se recomienda seguir haciendo estudios similares y contemplar un análisis desde la cuna a la tumba para obtener resultados más auténticos.

De lo anterior es importante establecer las limitaciones de este trabajo, ya que en primera estancia no se contó con un modelo de autobús eléctrico para tener datos experimentales y un conocimiento más exacto del mantenimiento; se dejó fuera la infraestructura requerida para

implementar transporte eléctrico en la UAEMEX, así como la evaluación económica del estudio. Se recomienda ampliar la información sobre estos aspectos para un análisis más completo y lograr una Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida.

Conclusiones

La evaluación ambiental del Sistema de Transporte Universitario de la UAEMEX, a partir del cálculo de la huella de carbono, y con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, el Autobús GNC reporta que es menor $7x10^{-4}$ kg de CO_2 eq/pkm en comparación con el Autobús eléctrico mix. En la etapa de mantenimiento es mayor $1.6x10^{-4}$ kg de petróleo eq/pkm y la DAE requerida es menor 9.03 kJ/pkm en comparación con el Autobús eléctrico mix. El Autobús eléctrico mix: emite $2.87x10^{-3}$ kg de CO_2 eq/pkm. En la etapa de uso es mayor $3.35x10^{-4}$ kg de petróleo eq/pkm respecto con el Autobús GNC y la DAE utilizada es 42.91 kJ/pkm. Para los escenarios de descarbonización ("Autobús GNC", "Autobús eléctrico mix", "Autobús eléctrico 50 % y "Autobús eléctrico renovable, en 3 etapas de su ciclo de vida (Producción del autobús, uso y mantenimiento) la Huella de Carbono del Autobús eléctrico mix es 26.4 % mayor que el Autobús eléctrico GNC y 16 % superior que el Autobús eléctrico 50 %. La Huella de Carbono del Autobús eléctrico renovable es 7 % menor a comparación con el Autobús GNC, 17.41 % inferior respecto con el Autobús eléctrico 50 % y 34.34 % menos que el Autobús eléctrico mix.

Referencias

Caballero Ruiz, I. (2019). Comparativa medioambiental de diferentes tipos de transporte de viajeros utilizando una perspectiva de Análisis de Ciclo de Vida [Trabajo fin de máster]. ICAI de la Universidad Pontifica Comillas.

Canales, I., y Jorquera, F. (2020). Modificación de plan de mantenimiento para los buses BYD K9FE [Trabajo de titulación]. Universidad Técnica de Federico Santa María.

Cano, N., Berrio, L., Carvajal, E., y Arango, S. (2022). Assessing CF of a Colombian University using ISO 14064 GHG Protocol. Investigación Sobre Ciencias Ambientales y Contaminación.

Cities Finance Facility, y Carbon Trust México. (2018). Estrategia de electromovilidad de la Ciudad de México 2018-2030. Ciudad de México: Finande Fcility.

Diario Oficial de la Federación. (2024). Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero. DOF.

Diario Oficial de la Federación. (2024b). Lista de combustibles que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo. DOF.

Galindo, L., Reyes, P., y Caballero, K. (2022). Escenarios de mitigación para México a 2050: algunos hechos estilizados. Sobre México Temas de Economía, 1(6), 156–208.

Global Wind Atlas. (2024). Global Wind Atlas. Recuperado en marzo de 2024. https://globalwindatlas.info/en

Hernández, M., Cruz, M., Fabela, M. de J., Flores, O., Hernández, J., y Vázquez, D. (2023). Diagnóstico del desarrollo tecnológico en México para la incorporación de la electromovilidad en el autotransporte. Querétaro: COMUNICACIONES

Holden, E., Gilpin, G., y Banister, D. (2019). Sustainable mobility at thirty. Sustainability (Switzerland), 11(7). https://doi.org/10.3390/su11071965

Iniciativa Climática de México. (2021). Rumbo a la COP26. Emisiones del sector transporte. Iniciativa Climática de México, 9.

Lubecki, A., Szczurowski, J., Bałys, M., Brodawka, E., y Zarębska, K. (2022). Life cycle assessment study on the public transport bus fleet electrification in the context of sustainable urban development strategy. Science of the Total Environment, 824.

Magalhães, I., y Santos, E. (2022). Evaluating the potential of mobility plans for achieving sustainable urban development. Research in Transportation Business and Management, 43.

Öivind, A., y Pål, B. (2021). The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: Life cycle assessment and policy implications. Applied Energy, 289. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116621

Organización Internacional de Normalización. (2006b). Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices (ISO 14044). Suiza

Portillo, A. (2017). Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento. CIEP. https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/

Reyes, I. (2022). Circularidad y manejo de desechos para el sector del transporte público en América Latina. Santiago: CEPAL.

Rodriguez, J., Ruiz, M., y Meneses, A. (2020). Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia. *Espacios*, *41*(47), 74–84. https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n47p06

Schmerler Vainstein, D., Velarde Sacio, J. C., Rodríguez González, A., y Solís Sosa, B. (2019). ELECTROMOVILIDAD. Conceptos, políticas y lecciones aprendidas para el Perú. Perú: Gráfica Biblos S.A.

Secretaría de Energía. (2022). Balance Nacional de Energía. México: SENER Secretaría de Energía. (2023). Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía, México.

Servicio de Transportes Eléctricos. (2024). Corredor Cero Emisiones "Eje Central." Gobierno de La Ciudad de México.

UAEM. (2021). Plan Rector de Desarrollo Institucional. 2021-2025.

Valls, K., y Bovea, M. (2021). Carbon footprint in Higher Education Institutions: a literature review and prospects for future research. In Clean Technologies and Environmental Policy (Vol. 23, Issue 9, pp. 2523–2542). Springer Science and Business Media Deutschland

Vicente, J. (2021). Evaluación general de la matriz energética ecuatoriana y el aporte de las energías renovables no convencionales a la descarbonización de la generación eléctrica con énfasis en el potencial geotérmico [Fin Master]. Universidad Andina Simón Bolívar.

Volkswagen. (2019) ¿Cómo funciona un motor eléctrico? https://www.vw.com.mx/es/experiencia/tips/como-funciona-un-motorelectrico.html.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN PARA REUTILIZAR LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL AGAVE EN APLICACIONES DE BIOMASA Y/O BIOCOMBUSTIBLES, COMO BENEFICIO A LA NACIÓN COMCAAC

Armando Gallegos Muñoz[1], Paula C. Isiordia-Lachica[2], Ricardo Alberto Rodríguez Carvajal[3]
Departamento de Ingeniería Mecánica[1], Departamento de Agronomía[2], Departamento de Ingeniería Química[3], Universidad de Guanajuato, Lascuráin de Retana #5, Col. Centro, C.P. 36000,
gallegos@ugto.mx, pc.isiordia@ugto.mx, rodriguez.ricardo@ugto.mx

Dr. Rafael García Gutiérrez
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n C.P 83000, Col. Centro rgarcia@cifus.uson.mx

RESUMEN
Este trabajo presenta una propuesta que busca integrar las actividades técnicas y de ingeniería, con las actividades de gestión logística y organizativa para trabajar con los residuos de la industria del agave y poder generar productos que tengan como impacto un beneficio social a comunidades como la nación COMCAAC, que presenta una pobreza energética al no contar con las condiciones de acceso a combustibles económicos por su ubicación geográfica que hacen que la venta de gas u otros combustibles sean de alto costo.
Este proyecto presenta el estudio de las actividades técnicas para realizar la transformación de los residuos del agave en biomasa y/o biocombustible, con procesos de bajo costo, y propone un modelo de organización y logística para que esta comunidad pueda autoabastecerse de combustibles de manera que contribuyan a mitigar la pobreza energética, así como a la seguridad alimentaria, ofreciendo una alternativa de solución para cocinar sus alimentos y otras necesidades.
Se presentan la caracterización de diferentes variedades de agave, contemplando sus propiedades de crecimiento en tierra como la costa de Sonora y otras propiedades que ayuden a tomar la decisión de la mejor variedad para el uso de las aplicaciones propuestas.
La propuesta utiliza los conceptos de economía circular, con procesos sustentables de elaboración de los productos para que los costos sean viables.

Palabras claves: Economía-Circular, Biomasa, Biocombustible, Agave, Modelo-de-gestión.

INTRODUCCÓN
En México los problemas en comunidades marginadas son multifactoriales, estas comunidades muchas veces parecen invisibles para las políticas públicas, por lo cual las carencias son constantes, los pueblos indígenas son parte importante de estas comunidades marginadas que sufren de pobreza en diferentes ámbitos de la vida, este trabajo se centra en el estudio y propuestas de solución a la falta de seguridad energética, hídrica y alimentaria, atendida de manera sistemática por un grupo de investigadores, conformado de manera multidisciplinaria del área social y de desarrollo tecnológico.
La Nación COMCAAC (pueblo Seri) comparte la problemática nacional de los pueblos indígenas de México, ya que es el sector social que presenta los índices de desarrollo humano más bajos del país, concentra pobreza extrema, vulnerabilidad en materia de impartición de justicia, y presenta profunda discriminación multidimensional. La seguridad energética, hídrica y alimentaria, que están estrechamente relacionadas entre sí, son factores que subyacen en estas comunidades y que inhiben cualquier iniciativa de desarrollo. Los COMCAAC conforman uno de los 7 pueblos originarios del estado de Sonora y son habitantes milenarios de la Costa Central del Desierto de Sonora y el Golfo de California. Habitan sobre todo dos localidades, Desemboque (Municipio de Pitiquito) y Punta Chueca (Municipio de Hermosillo), donde se propone desarrollar con este pueblo un análisis de viabilidad de sembrar y cosechar agave pacífica que se utiliza para la fabricación de bacanora con el modelo propuesto de gestión basado en economía circular.

LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS RESIDUOS DEL AGAVE
La economía circular es un concepto que ha ganado importancia en los últimos años como respuesta a los desafíos medioambientales y económicos del modelo lineal de "producir, usar y desechar". Este enfoque busca cerrar los ciclos de materiales, transformando los residuos en recursos útiles y promoviendo la sostenibilidad a largo plazo. En el contexto de la industria del agave, un sector particularmente significativo en México debido a su papel en la producción de tequila y mezcal, la aplicación de principios de economía circular ofrece una oportunidad valiosa para maximizar el valor de los residuos y reducir su impacto ambiental.

UN DESAFÍO Y UNA OPORTUNIDAD
Se estima que, por cada litro de tequila producido, se generan aproximadamente 5-6 kilogramos de bagazo de agave. Esto se traduce en millones de toneladas de residuos anualmente, considerando que la producción de tequila en México alcanzó los 527 millones de litros en 2022.Uno de los enfoques más prometedores para integrar los residuos del agave en una economía circular es su conversión en biomasa.
Logística en la Economía Circular del Agave
En el contexto del agave, la logística se refiere no solo al manejo eficiente de la cadena de suministro del producto principal (como el tequila o el mezcal), sino también a la gestión efectiva de los residuos generados a lo largo del proceso de producción. Los principios de la economía

circular sugieren que estos residuos, como el bagazo y las hojas, deben ser recolectados, transportados, y procesados de manera que se conviertan en recursos valiosos en lugar de desperdiciarse. La economía circular requiere una visión holística de la cadena de suministro del agave, donde cada etapa del proceso de producción está diseñada para minimizar el desperdicio y maximizar el uso de los recursos.

La logística desempeña un papel clave en esta optimización, asegurando que los residuos sean recolectados de manera eficiente y transportados a las instalaciones donde pueden ser transformados en biomasa, biocompuestos, o productos alimentarios y cosméticos. Por ejemplo, una logística bien diseñada puede permitir la recolección selectiva de bagazo fresco en las destilerías, que luego puede ser transportado rápidamente a plantas de procesamiento para la producción de bioetanol o biocarbón, minimizando la degradación del material y maximizando su valor.

Un concepto central de la economía circular es la logística inversa, que se refiere al proceso de devolver los residuos al ciclo de producción para ser reutilizados o reciclados. En la industria del agave, la logística inversa implica la recolección de residuos en las destilerías y su transporte a instalaciones donde puedan ser reprocesados.

La revalorización de los residuos del agave a través de la logística inversa puede generar múltiples beneficios económicos y ambientales. Por ejemplo, los residuos pueden ser convertidos en biomasa para la producción de energía, o en fibras para la fabricación de biocompuestos. Este proceso no solo reduce la cantidad de residuos que se acumulan en vertederos, sino que también crea nuevas fuentes de ingresos para las empresas productoras de agave.

DESCRIPCIÓN DEL AGAVE

El Agave es un grupo diverso de plantas suculentas nativas principalmente de México y el suroeste de los Estados Unidos. Las especies de agave son conocidas por sus hojas gruesas y carnosas, que suelen tener espinas en los márgenes y una espina terminal afilada. Son plantas de crecimiento lento, y muchas especies florecen solo una vez en su vida, produciendo una inflorescencia grande antes de morir.

En la siguiente tabla se presentan las diferentes especies con algunas características a destacar.

Especie	Distribución	Características	Usos	Imagen
Agave tequilana (Agave Azul)	Principalmente en el estado de Jalisco, México.	Hojas azuladas, delgadas y largas. Es la especie más conocida por ser la materia prima principal para la producción de tequila.	Producción de tequila, mezcal, y también se utiliza en la elaboración de productos artesanales.	
Agave americana (Maguey, Century Plant)	Amplia distribución en México se ha naturalizado en otras regiones como el Mediterráneo.	Hojas grandes y carnosas con espinas a lo largo de los márgenes. Puede alcanzar un tamaño imponente.	Producción de mezcal, pulque y fibras (henequén). Se utiliza también en paisajismo.	
Agave salmiana (Maguey Pulquero)	Originaria del altiplano mexicano.	Hojas anchas y gruesas, de color verde oscuro. Puede alcanzar grandes tamaños.	Principalmente para la producción de pulque, una bebida tradicional mexicana fermentada.	
Agave parryi (Parry's Agave)	Arizona, Nuevo México, y el norte de México.	Hojas cortas y anchas, de color gris azulado, dispuestas en forma de roseta.	Cultivada como planta ornamental, es una de las especies más resistentes al frío	

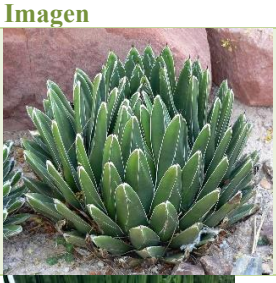
Especie	Distribución	Características	Usos	Imagen
Agave victoriae-reginae (Queen Victoria Agave)	Endémica de las regiones desérticas del noreste de México.	Hojas cortas y rígidas, de color verde oscuro con bordes blancos, formando una roseta compacta.	Muy apreciada como planta ornamental por su forma y resistencia.	
Agave angustifolia (Espadín)	Amplia distribución en México y América Central.	Hojas estrechas y alargadas, de color verde claro.	Es la principal especie utilizada en la producción de mezcal.	
Agave attenuata (Fox Tail Agave)	Zonas áridas de México, especialmente en Jalisco.	Hojas suaves y sin espinas, de color verde o grisáceo. Forma una inflorescencia curva que recuerda a la cola de un zorro.	Popular como planta ornamental debido a su apariencia y a la ausencia de espinas.	
Agave fourcroydes (Henequén)	Originaria de la península de Yucatán, México.	Hojas largas, estrechas y rígidas, de color verde oscuro.	Principalmente utilizada para la producción de fibras (henequén), que se emplean en la fabricación de cuerdas y textiles.	
Agave sisalana (Sisal)	Nativa del sur de México, pero ampliamente cultivada en todo el mundo, especialmente en Brasil y África.	Hojas largas y lanceoladas, de color verde grisáceo.	Fuente importante de fibras naturales (sisal), utilizadas en cuerdas, alfombras y otros productos industriales.	
Agave montana (Mountain Agave)	Regiones montañosas del noreste de México.	Hojas anchas y cortas, de color verde oscuro con bordes dentados.	Es utilizada principalmente en jardinería debido a su resistencia al frío y a su forma atractiva.	

Tabla 1 Elaboración propia, tomado de Valenzuela Zapata & Nabhan, (2003).

Como se puede ver el Agave incluye una gran variedad de especies que han sido esenciales en la cultura, economía y ecología de las regiones donde se encuentran. Además de su importancia industrial y agrícola, muchas especies de agave son apreciadas en jardinería y paisajismo por su resistencia y atractivo visual.
Cada especie de agave tiene adaptaciones específicas que le permiten sobrevivir en entornos áridos y difíciles, lo que las hace especialmente valiosas en el contexto del cambio climático y la conservación de la biodiversidad.

Capacidades térmicas del agave
Las diferentes especies de agave cuentan con diferentes capacidades térmicas este tema no es ampliamente estudiado en términos generales como lo serían para materiales industriales o sustancias químicas. Sin embargo, se puede analizar cómo las especies de agave han desarrollado mecanismos de adaptación térmica y su tolerancia a diferentes rangos de temperatura, lo cual es crucial para su supervivencia en climas áridos y extremos.

Especie de agave	Rango Térmico	Adaptaciones
Agave tequilana (Agave Azul)	Crece bien en temperaturas entre 20°C y 35°C, pero puede tolerar temperaturas extremas breves de hasta 5°C y 40°C.	Esta especie es resistente a la sequía y puede soportar la alta radiación solar en las zonas semiáridas. Su coloración azulada reduce la absorción de calor, ayudando a mantener la temperatura interna de la planta.
Agave americana (Maguey, Century Plant)	Soporta temperaturas desde -5°C hasta 40°C. Es una de las especies más tolerantes al frío.	Sus hojas gruesas almacenan agua y sus espinas disipan el calor, protegiendo la planta de la deshidratación. Además, la planta cierra sus estomas durante el día para reducir la pérdida de agua.
Agave parryi (Parry's Agave)	Puede tolerar temperaturas de hasta -15°C, lo que la convierte en una de las especies de agave más resistentes al frío.	Sus hojas grises y compactas ayudan a reflejar la radiación solar y minimizan la pérdida de agua, además de soportar heladas intensas.
Agave victoriae-reginae (Queen Victoria Agave)	Prefiere temperaturas cálidas, pero puede soportar heladas ligeras hasta -4°C.	La estructura densa y compacta de la roseta reduce la exposición directa al sol, y su color oscuro ayuda a absorber el calor cuando es necesario.
Agave attenuata (Fox Tail Agave)	Esta especie es menos resistente al frío, prefiriendo temperaturas por encima de los 5°C y soportando hasta 35°C	Carece de espinas, lo que podría ser una desventaja en términos de disipación de calor, pero se adapta bien a la sombra parcial, reduciendo la exposición al calor extremo.
Agave salmiana (Maguey Pulquero)	Tolera bien las temperaturas desde -5°C hasta 35°C.	Sus hojas gruesas y carnosas almacenan grandes cantidades de agua, lo que le permite sobrevivir en entornos calurosos y secos. Las espinas a lo largo de los márgenes de las hojas ayudan a disipar el calor.
Agave sisalana (Sisal)	Prefiere temperaturas cálidas y húmedas, generalmente entre 20°C y 30°C, y es sensible a las heladas.	Adaptado para crecer en climas tropicales secos, el Agave sisalana tiene hojas que minimizan la pérdida de agua a través de un recubrimiento ceroso.
Agave montana (Mountain Agave)	Puede soportar temperaturas frías, hasta -10°C, debido a su adaptación a altitudes elevadas.	Sus hojas rígidas y espinosas ayudan a proteger la planta del frío extremo y la radiación solar intensa en las montañas.

Tabla 2 Tolerancia Térmica de las Especies de Agave, tomado de Gentry (1982).

El conocimiento detallado de las capacidades térmicas específicas, como la capacidad calorífica de cada especie, no está estudiada a profundidad debido a la naturaleza de estas plantas. Sin embargo, la investigación y los estudios de adaptación fisiológica proporcionan una comprensión sólida de cómo estas plantas gestionan la temperatura y sobreviven en sus entornos naturales.
Las propiedades caloríficas de las especies de agave están más relacionadas con el uso de estas plantas como biomasa para la producción de bioenergía, así como con sus componentes químicos que podrían influir en su potencial como fuente de energía.

Propiedades Caloríficas de las Especies de Agave
La biomasa de agave, debido a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa, puede ser convertida en energía mediante procesos de combustión, gasificación o producción de biocombustibles como el bioetanol.

Composición Química del Agave
Las propiedades caloríficas del agave (Gentry, 1982) están influenciadas por su composición química. Las especies de agave suelen contener altos niveles de:

- Celulosa: 35-45% en peso seco.
- Hemicelulosa: 25-35% en peso seco.
- Lignina: 10-15% en peso seco.
- Azúcares solubles: Varía dependiendo de la especie y la madurez de la planta.

Poder Calorífico
El poder calorífico es una medida de la energía que puede ser liberada por la combustión completa de un material. Para la biomasa del agave,

el poder calorífico típico se sitúa entre 15 y 20 MJ/kg (megajulios por kilogramo) en peso seco. Este valor varía en función de la especie y de las condiciones de cultivo.

Especie	Poder calorífico	Aplicaciones
Agave tequilana	Aproximadamente 16-18 MJ/kg.	Principalmente investigado para la producción de bioetanol debido a su alto contenido en azúcares fermentables
Agave salmiana	Alrededor de 17-19 MJ/kg.	Potencial para ser utilizado en la producción de biogás y bioetanol. Su biomasa también puede ser usada en combustión directa para generación de energía.
Agave americana	Aproximadamente 15-17 MJ/kg.	Además de su uso tradicional en la producción de mezcal, su biomasa se puede aprovechar en la producción de energía, tanto en forma de bioetanol como en procesos de combustión.
Agave angustifolia (Espadín)	Entre 16 y 18 MJ/kg.	Utilizado en la producción de mezcal, también se investiga para la producción de bioetanol y otras formas de bioenergía.
Agave sisalana (Sisal)	Alrededor de 17 MJ/kg.	Principalmente cultivado por sus fibras, pero la biomasa residual podría ser aprovechada para la generación de energía.

Tabla 3 elaboración propia tomado de Ortíz-Méndez et al. (2017)

PROCESOS DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA

Las especies de agave pueden ser utilizadas en varios procesos para la producción de energía (Álvarez-Chávez et al., 2021; Nava-Cruza et al., 2015)

1. **Combustión Directa**
2. **Producción de Bioetanol:**
3. **Producción de Biogás:**

Comparación con Otros Combustibles

En comparación con otras fuentes de biomasa como la madera (18-20 MJ/kg) o el bagazo de caña de azúcar (15-17 MJ/kg), el agave presenta un poder calorífico competitivo. Su ventaja radica en su capacidad para crecer en suelos marginales y en condiciones de poca agua, lo que lo convierte en una opción viable para la producción sostenible de bioenergía en regiones áridas.

Las especies de agave ofrecen un considerable potencial como fuente de biomasa para la producción de bioenergía debido a su composición química y propiedades caloríficas. Con un poder calorífico promedio entre 15 y 20 MJ/kg, el agave es comparable a otras fuentes de biomasa comúnmente utilizadas en la producción de energía. Además, su capacidad para crecer en ambientes áridos lo convierte en una opción atractiva para la producción de energía renovable en regiones con condiciones climáticas extremas. (Nava-Cruza et al., 2015)

El desarrollo de tecnologías más eficientes para la conversión de la biomasa de agave en energía podría mejorar su viabilidad económica y medioambiental, contribuyendo a la diversificación de las fuentes de energía renovable.

Actividades técnicas para la transformación de los residuos del agave en biomasa y biocombustibles.

El proceso de transformación de los residuos del agave puede variar según el método de trabajo propuesto, aquí se mencionan el siguiente método, que abarca 5 etapas con 11 actividades, que van desde la recolección al posible uso en energías renovables (Álvarez-Chávez et al., 2021; Nava-Cruza et al., 2015; Palomo-Briones et al., n.d.)

1. Conversión en Biomasa: los residuos pueden compactarse en pellets, que se utilizan como biomasa sólida para generar energía en plantas de combustión, Pirólisis y Gasificación
2. Producción de Biocombustibles: comprende fermentación, digestión anaerobia y transesterificación.
3. Optimización y Sostenibilidad, comprende Análisis de Ciclo de Vida (LCA), Optimización de Procesos
4. Aplicaciones y Beneficios pueden ser energía renovable, economía circular, desarrollo rural

PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE AGAVE BASADO EN ECONOMÍA CIRCULAR

El modelo propuesto es conceptual pero abarca los elementos necesarios que se sustentan con la investigación de las diferentes especies de Agave y los diferentes procesos tecnológicos que se necesitan para aprovechar los residuos del Agave, este modelo propone seis etapas que se describen a continuación:

1. Recolección y Clasificación de Residuos

Descripción: Implementar un sistema eficiente de recolección de los residuos generados durante la cosecha y procesamiento del agave. Estos residuos incluyen bagazo (fibra residual), hojas, raíces y cabezas de agave no utilizadas.

- Crear estaciones de recolección en los centros de producción.
- Clasificar los residuos según su tipo y posible uso posterior.

2. Procesamiento de Residuos

Descripción: Transformar los residuos de agave en productos de valor añadido a través de diversos procesos industriales.

- Producción de Bioetanol: Utilizar el bagazo del agave como materia prima para la producción de bioetanol mediante procesos de fermentación. El bioetanol puede ser utilizado como biocombustible.

- Producción de Biogás: Implementar biodigestores anaeróbicos para transformar los residuos orgánicos en biogás, que puede ser utilizado como fuente de energía renovable.
- Producción de Compost: Convertir las hojas y otros residuos vegetales en compost para ser utilizado como fertilizante en los campos de cultivo de agave, cerrando el ciclo de nutrientes.
- Extracción de Fibras Naturales: Aprovechar las fibras del agave para la fabricación de textiles, cuerdas, papel y otros productos biodegradables.

3. Innovación y Desarrollo de Nuevos Productos

Descripción: Investigar y desarrollar nuevos productos a partir de los residuos del agave, promoviendo la innovación y diversificación de productos.

- Materiales Biodegradables: Investigar la viabilidad de crear plásticos biodegradables y otros materiales ecológicos a partir de los compuestos del agave.
- Productos Nutracéuticos: Explorar la extracción de compuestos bioactivos del agave, como los fructanos, que pueden ser utilizados en suplementos alimenticios y productos nutracéuticos.
- Carbón Activado: Desarrollar procesos para convertir los residuos de agave en carbón activado, utilizado en la purificación de agua y aire.

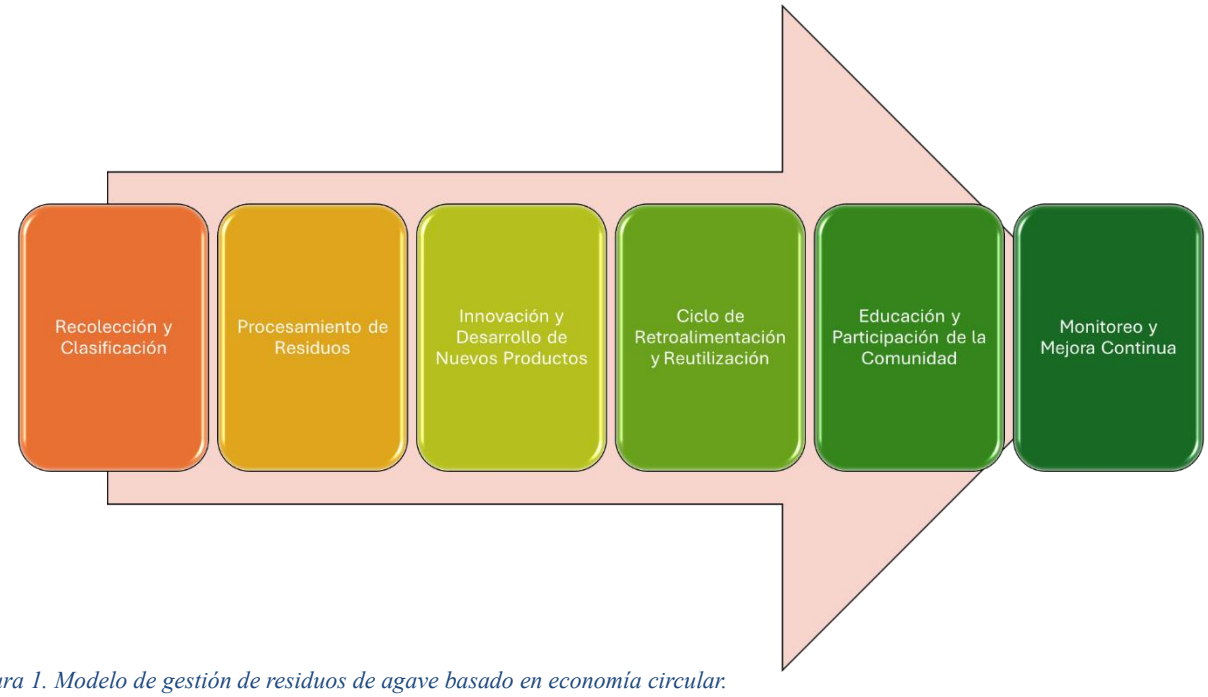


Figura 1. Modelo de gestión de residuos de agave basado en economía circular.

4. Ciclo de Retroalimentación y Reutilización

Descripción: Crear un ciclo cerrado en el que los subproductos y residuos generados en cada etapa sean reutilizados dentro del sistema o devueltos al entorno de manera segura.

- Uso de Subproductos: Integrar los subproductos del proceso de producción de bioetanol, como la vinaza, en la fertilización de cultivos o en la producción de biogás.
- Energía Renovable: Utilizar el biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica para alimentar los procesos de producción, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables.
- Ciclo de Nutrientes: Reutilizar el compost producido en las plantaciones de agave para mejorar la calidad del suelo y aumentar la sostenibilidad de la producción.

5. Educación y Participación de la Comunidad

Descripción: Promover la participación de la comunidad y la educación sobre los beneficios de la economía circular y la gestión sostenible de residuos.

- Capacitación: Implementar programas de capacitación para productores y trabajadores sobre técnicas de recolección, clasificación y procesamiento de residuos.

- Conciencia Ambiental: Desarrollar campañas de sensibilización sobre la importancia de la economía circular y la reducción de residuos en la comunidad local.

6. Monitoreo y Mejora Continua

Descripción: Establecer mecanismos para el monitoreo continuo del sistema de gestión de residuos y la mejora de procesos.

- Indicadores de Rendimiento: Definir indicadores clave de rendimiento (KPI) para evaluar la eficiencia de la recolección, procesamiento y reutilización de residuos.
- Auditorías Ambientales: Realizar auditorías periódicas para asegurar el cumplimiento de las normas ambientales y la mejora de las prácticas de gestión de residuos.

CONCLUSIONES

A pesar de las oportunidades la transición hacia un modelo de economía circular en la industria del agave enfrenta varios desafíos. La inversión en tecnología, la necesidad de infraestructura adecuada y la falta de incentivos económicos son algunos de los obstáculos que deben superarse. Además, es crucial contar con políticas públicas que promuevan la investigación y el desarrollo de tecnologías de conversión, así como con marcos regulatorios que favorezcan la adopción de prácticas sostenibles.

Sin embargo, con el apoyo adecuado, la industria del agave tiene el potencial de convertirse en un modelo ejemplar de economía circular, donde los residuos no son un problema, sino un recurso valioso. La integración de estos residuos en una cadena de valor sostenible no solo beneficiará al medio ambiente, sino que también fortalecerá la economía local y contribuirá al bienestar social.

Existen desafíos significativos que deben abordarse para aprovechar estas oportunidades de manera efectiva. La inversión en tecnología para la conversión de biomasa, la creación de cadenas de suministro eficientes y la necesidad de un marco regulatorio favorable son algunos de los obstáculos que la industria debe superar.

Este modelo de gestión basado en la economía circular para los residuos de agave busca maximizar el uso de los recursos, minimizar los desechos y promover la innovación. Al transformar los residuos en productos de valor agregado y cerrar los ciclos de materiales, se puede lograr un impacto positivo tanto en el medio ambiente como en la economía local. Además, la participación comunitaria y la educación son fundamentales para asegurar la sostenibilidad a largo plazo del sistema.

REFERENCIAS

Álvarez-Chávez, J., Villamiel, M., Santos-Zea, L., & Ramírez-Jiménez, A. K. (2021). Agave By-Products: An Overview of Their Nutraceutical Value, Current Applications, and Processing Methods. In Polysaccharides (Vol. 2, Issue 3, pp. 720–743). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030044

Gentry, H. S. (1982). Agaves of Continental North America. Project MUSE. (University of Arizona Press, Ed.; 1st ed., Vol. 1).

Ortíz-Méndez, M., Morales-Martínez, O. H., Ríos-González, T. K., Rodríguez-De La Garza, L. J., Quintero, J. A., Aroca, J., Whitaker, S., Ríos-González, L. J. (2017). Bioethanol production from agave lechuguilla biomass pretreated by autohydrolysis. Revista Mexicana de Ingeniería. 16(2), 467–476. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62052087013

Nava-Cruza, N. Y., Medina-Morales, M. A., Martinez, J. L., Rodriguez, R., & Aguilar, C. N. (2015). Agave biotechnology: An overview. In Critical Reviews in Biotechnology (Vol. 35, Issue 4, pp. 546–559). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.3109/07388551.2014.923813

Palomo-Briones, R., López-Gutiérrez, I., Islas-Lugo, F., Galindo-Hernández, K. L., Munguía-Aguilar, D., Andrés Rincón-Pérez, J., Ángel Cortés-Carmona, M., Alatriste-Mondragón, F., Razo-Flores, E., & Potosí, L. (n.d.). Agave bagasse biorefinery: Processing and perspectives.

Valenzuela Zapata, A. G., & Nabhan, G. P. (2003). Tequila: a natural and cultural history (The University of Arizona, Ed.; 1st ed., Vol. 1).

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

LA VULNERABILIDAD ENERGÉTICA Y SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA EN LAS POLÍTICAS PÚBLICAS DEL SECTOR ELÉCTRICO EN MÉXICO DE LOS ÚLTIMOS CUATRO SEXENIOS (2000-2024)

Karen Liliana Chip Domínguez & Karla Graciela Cedano Villavicencio
Laboratorio de Innovación y Futuros, Instituto de Energías Renovables de la UNAM, Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México, Tel. 777 362 0090, dir@ier.unam.mx

RESUMEN

El concepto de sustentabilidad energética ha sido un tema central en el debate público internacional desde las últimas dos décadas del siglo pasado. Su relevancia en los acuerdos medioambientales e informes internacionales ha influido en la política energética mexicana, integrándose en diversos programas de desarrollo del sector y en las políticas públicas correspondientes. En el ámbito académico, este concepto se ha abordado desde diferentes enfoques, incorporando no sólo la dimensión ambiental, sino también las dimensiones social y económica. De manera similar, se ha introducido el concepto de vulnerabilidad energética, utilizado tanto en el sector eléctrico mexicano como en el ámbito académico de la ingeniería para describir propiedades relacionadas con la infraestructura y su estabilidad frente a diversos escenarios de suministro, demanda, control y gestión de la energía.

En este artículo se propone una revisión de la literatura con los objetivos de definir cómo se conceptualiza la 'sustentabilidad energética', cómo se gestiona en la política mexicana, y cómo se relaciona con el concepto de 'vulnerabilidad energética' en este contexto.

Se ofrece una comprensión clara y estructurada de la definición de sustentabilidad energética para el sector eléctrico mexicano y se propone una discusión conceptual desde la ecología política para detectar áreas de oportunidad para el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional vigente, con el fin de fortalecer las estrategias en su dimensión social y ambiental, destacando algunos los principales hallazgos a partir de la revisión.

ABSTRACT

The concept of energy sustainability has been a central topic in international public debate since the last two decades of the past century. Its relevance in environmental agreements and international reports has influenced Mexican energy policy, integrating into various sectoral development programs and corresponding public policies. In the academic realm, this concept has been approached from different perspectives, incorporating not only the environmental dimension but also the social and economic dimensions. Similarly, the concept of energy vulnerability has been introduced, used both in the Mexican electricity sector and in the academic field of engineering to describe properties related to infrastructure and its stability in the face of various scenarios of supply, demand, control, and energy management.

This article proposes a literature with the objectives of defining how 'energy sustainability' is conceptualized, how it is managed in Mexican policy, and how it relates to the concept of 'energy vulnerability' in this context.

A clear and structured understanding of the definition of energy sustainability for the Mexican electricity sector is offered, and a conceptual discussion from political ecology is proposed to identify areas of opportunity for the current National Electric System Development Program, with the aim of strengthening strategies in its social and environmental dimensions, highlighting some of the key findings from the review.

Palabras Clave:
Sustentabilidad, Sostenibilidad, Desarrollo Sostenible; Transición energética, Eficiencia energética, Seguridad energética, Energías limpias, Vulnerabilidad energética,

INTRODUCCIÓN

En el marco de una crisis global, durante las últimas décadas del siglo pasado se llevaron a cabo eventos y congresos que culminaron en acuerdos internacionales, los cuales impulsaron la inclusión de la sustentabilidad en las agendas políticas nacionales y regionales.

En los documentos oficiales correspondientes a dichos encuentros, así como en las iniciativas de ley, tratados y programas, se utilizan los conceptos "sostenibilidad" y "sustentabilidad" de manera indistinta. De forma similar, términos como "sustentable", "sostenible", "desarrollo sustentable" y "desarrollo sostenible" se emplean de manera intercambiable. Estos conceptos siguen siendo objeto de debate, ya que no existe un consenso estricto que establezca una definición específica y universal, lo que subraya la importancia de brindar una definición clara antes de ser utilizada.

Tal como Pope (2017) señala, la comprensión de la sostenibilidad no es homogénea y puede variar dependiendo del contexto y los objetivos

específicos de la evaluación. Por lo tanto, antes de sugerir cualquier definición o aplicar algún instrumento de evaluación de la sustentabilidad o sostenibilidad, es esencial reflexionar críticamente sobre qué se entiende por sostenibilidad en el contexto específico en el que se está trabajando. Esta reflexión garantiza que los procesos de evaluación estén alineados con los objetivos normativos de la sostenibilidad establecidos, ya que, sin una definición clara y consensuada, los resultados de las respectivas evaluaciones podrían ser interpretados de manera diversa o incluso errónea.

Es importante destacar que las propuestas de este trabajo se alinean con los planteamientos teóricos de la ecología política. Por lo tanto, antes de introducir las definiciones de "sustentabilidad energética" y "vulnerabilidad energética" que guiarán el análisis, resulta pertinente establecer los conceptos de "sustentabilidad" y "vulnerabilidad".

Definición sustentabilidad según la ecología política

Desde la lente de la ecología política, la sostenibilidad implica justicia y cambios de fondo en las relaciones socioambientales que existen en el modelo de desarrollo económico hegemónico. Ir hacia la sostenibilidad implicaría coherencia con las reflexiones críticas y profundas respecto a los procesos de globalización y las políticas de desarrollo para la modernidad industrializante. Entonces, es preciso cuestionar la inscripción del término "desarrollo sustentable" o "desarrollo sostenible" en los principios de la "sostenibilidad" o "sustentabilidad" (que para fines del presente trabajo, "sustentabilidad" y "sostenibilidad" se utilizarán como sinónimos debido al contexto de la política pública mexicana, donde se emplean de forma indistinta[1]).

La idea de Desarrollo Sostenible surge públicamente de forma oficial en el Informe de Brutland, *Nuestro futuro común*, de 1987 y se define como "el desarrollo que permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro de satisfacer sus propias necesidades" (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], s.f.). Este concepto se ha popularizado y también las interpretaciones y precisiones de su contenido quedan abiertas al contexto de donde se aplique, pues, de acuerdo con el investigador Edgar González Gaudiano, se trata de conceptos políticos y no puramente científicos (Peralta Vázquez, 2024). Ejemplo de ello es la definición expuesta en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (2024), donde se define Desarrollo Sustentable como:

> El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.(p.3)

Sin embargo, de acuerdo con Bermejo Gómez de Segura (2014), desde el punto de vista conceptual, "desarrollo sostenible" resulta un oxímoron, porque desarrollo es interpretado como crecimiento ilimitado, lo que no es sostenible. Entonces, se observa una clara diferenciación entre el concepto de sostenibilidad y desarrollo sostenible, ya que el primero cuestiona directamente los modelos desarrollistas y plantea un cambio de paradigma del sistema económico, tecnológico y relacional con el socioecosistema, con la noción de justicia en su más amplio espectro; mientras que el segundo propone cambios en las formas de llevar a cabo las actividades de las diferentes dimensiones de la vida humana moderna, sin modificaciones profundas de contenido, mucho menos estructurales.

Definición vulnerabilidad según la ecología política

En el contexto de la ecología política, la vulnerabilidad no se limita a la simple exposición a amenazas externas, ya sean naturales o antrópicas, sino que está profundamente entrelazada con factores históricos, institucionales y de poder. Estos factores recrean inequidades socioeconómicas, haciendo que ciertos individuos, comunidades o sistemas sean más susceptibles a los desastres (Lazos-Chavero et al., 2022, p. 2). La vulnerabilidad implica tanto la predisposición estructural como la capacidad diferencial de los grupos sociales para anticipar, confrontar y recuperarse de los impactos (Ruiz Rivera, 2012).

Por otro lado, es crucial entender que en la vulnerabilidad existen no linealidades y propiedades emergentes, lo que la convierte en una propiedad de sistemas sociales, tecnológicos y ambientales acoplados e interactivos, caracterizados por relaciones de retroalimentación complejas y trayectorias de cambio (Turner et al., 2003; Adger, 2006; Gallopín, 2006). Este enfoque subraya la interdependencia y la naturaleza teleconectada de las vulnerabilidades, que no solo son modeladas por procesos locales, sino también por dinámicas globales de cambio sociocultural y económico.

Sustentabilidad energética como concepto teórico y su relación con la vulnerabilidad energética

En continuidad con los conceptos de sustentabilidad y vulnerabilidad previamente definidos, podemos entender la "sustentabilidad energética" como la aplicación de los principios de la sustentabilidad al ámbito de la energía. De manera similar, la "vulnerabilidad energética" se refiere a la predisposición de los sistemas energéticos a ser afectados por factores externos, ya sean de origen natural o social. Es importante destacar que ambos conceptos, aunque derivados de "sustentabilidad" y "vulnerabilidad", han tenido su propia evolución y

[1] Tanto diferentes autores distinguen los conceptos de sustentabilidad y sostenibilidad como también existen quienes los reconocen como sinónimos. En este estudio se reconoce la validez de ambos argumentos siempre que se especifique por qué se decide un término o el otro para evitar interpretaciones erróneas.

uso como frases nominales, lo que ha contribuido a la falta de un consenso estricto sobre su definición y aplicación en el contexto energético.

Zárate (2023) sugiere que la sostenibilidad de los sistemas energéticos está intrínsecamente vinculada al modelo de desarrollo en el que se insertan. En este sentido, lograr una verdadera sustentabilidad energética no se limita a mejorar la eficiencia de los sistemas o cambiar las tecnologías de generación, sino que requiere una reestructuración profunda de las bases económicas y sociales que sustentan su producción y consumo. Además, Zárate señala que las tecnologías renovables actuales, aunque se han presentado como propulsoras de sostenibilidad, están imbricadas en problemáticas ambientales y sociales que quedan disimuladas detrás del eslogan legitimador para los poderes políticos y económicos hegemónicos que sirven al modelo de desarrollo neoliberal. Su análisis crítico muestra cómo la integración de sistemas de energía renovable en el portafolio energético del país no es solo una cuestión técnica, sino también un reflejo de las dinámicas de poder existentes, que impiden la participación activa, consciente y democrática de la población, y con ella, el cambio social que implicaría el camino hacia la sostenibilidad energética.

Por su parte, Bellamy Foster (2010) aporta al soporte teórico de esta problemática a través de la Paradoja de Jevons, argumentando que los incrementos en la eficiencia energética, en un sistema capitalista, suelen traducirse en un mayor consumo de recursos, dado que la expansión económica resultante contrarresta los ahorros energéticos logrados. Así, la eficiencia, lejos de ser una solución definitiva, puede perpetuar un ciclo de consumo insostenible. Es importante destacar que, si bien los argumentos de Zárate y Foster no niegan la necesidad de implementar cambios tecnológicos para mejorar la eficiencia energética y avanzar en la descarbonización, ambos coinciden en que son los cambios estructurales los que resultan imprescindibles para lograr una verdadera sostenibilidad.

Ahora bien, desde una perspectiva más técnica y menos interdisciplinaria, como la de Díaz Saldierna y Leyva Ramos (2022), se indica que la sustentabilidad energética debe interpretarse como un equilibrio entre el uso de los recursos energéticos para satisfacer la demanda y la protección del medio ambiente. Desde un ángulo diferente, Úrsula Oswald (2017) subraya que la seguridad energética está intrínsecamente vinculada a la sustentabilidad, y advierte que no puede ser abordada exclusivamente desde una perspectiva tecnológica y ambiental; en cambio, debe incorporar las dimensiones geopolítica y económica, que reconozcan las interdependencias y complejidades del sistema energético global. Si bien estos enfoques son valiosos, corren el riesgo de simplificar la complejidad inherente al concepto de sustentabilidad energética, reduciéndolo a una cuestión de gestión de recursos y política en su sentido macroeconómico.

Los argumentos de Zárate (2023) y Foster (2010) aportan evidencia para afirmar que los cambios tecnológicos, implementados incluso en todo el ciclo de vida de la cadena energética, no bastarán si se piensa en modelos energéticos realmente sustentables. Asimismo, Úrsula Oswald (2017) contribuye a las reflexiones sobre el papel de la vulnerabilidad energética, analizada desde una perspectiva de la seguridad como factor fundamental de la sostenibilidad, que, de acuerdo con Romero (2022), está íntimamente ligada a las capacidades de acceso, independencia en la administración, distribución y consumo de los recursos energéticos, coincidente con lo señalado por Oswald desde su abordaje geopolítico. En ese tenor, la adaptación de la metodología propuesta por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe para la evaluación de la sustentabilidad del sistema energético mexicano, en términos del desarrollo de Sheimbaum Pardo (2009), también relaciona la vulnerabilidad energética intrínsecamente con la sustentabilidad a partir de los temas autarquía energética, robustez frente a cambios externos y alcance de recursos fósiles.

Entonces, ¿Cómo debería definirse la sustentabilidad energética desde una perspectiva crítica y holística? El entendimiento de las dinámicas geopolíticas en materia de recursos es tan necesario como los análisis del socioecosistema contextuales e históricos. El presente trabajo propone que la sustentabilidad energética deberá impulsarse como causa y consecuencia de un cambio de paradigma económico y político que, contrario al modelo de desarrollo actual, privilegie la equidad en las relaciones socioecosistémicas antes que el crecimiento económico, guardando plena coherencia con el derecho a un medio ambiente sano, además de garantizar el acceso justo a la energía y la participación democrática de la población en la toma de decisiones de la materia, en sus diferentes escalas y procesos de la cadena productiva.

Sustentabilidad energética en la política energética mexicana

En los últimos veinte años, la política energética mexicana ha experimentado una evolución gradual mediante reformas e implementación de leyes que pretenden alinearse con los compromisos macroeconómicos, energéticos, ambientales y sociales, tanto a nivel nacional como regional e internacional. Este proceso de adaptación refleja un creciente reconocimiento de la importancia de la dimensión social de la energía, un aspecto fundamental para su sustentabilidad.

En este análisis, se ha delimitado el enfoque a la dimensión eléctrica de la energía en el ámbito nacional, debido a su papel crucial en la transición energética y su relevancia en temas de justicia social, como la equidad de género y la mitigación de la pobreza energética. Los Programas Sectoriales de Energía han sido seleccionados como base documental, ya que son documentos oficiales de acceso público, disponibles en línea, cuya publicación ha continuado sin interrupciones (aunque con algunas modificaciones) hasta la fecha.

Se revisaron también los documentos correspondientes a la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) de 2013, la Ley de Transición Energética (LTE) de 2015, así como la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, publicada en 2020, y su actualización prevista para 2024, ya que se trata de instrumentos diseñados para desarrollar políticas y estrategias más específicas, orientadas a fomentar tecnologías limpias y avanzar

hacia un modelo energético más equitativo y sustentable. Por último, con la intención de poner foco en la dimensión eléctrica actual, se analizó el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2038.

Metodología

Para el análisis de los datos textuales, se utilizó ChatGPT-4 de OpenAI para generar nubes de palabras. Este modelo permitió identificar los términos más relevantes y su frecuencia de aparición, contribuyendo a una mejor visualización y comprensión de los temas principales discutidos en el corpus analizado. En el prompt se indicó realizar un Análisis de Términos Relevantes mediante TF-IDF, ajustado con criterios de exclusión e inclusión de bigramas, lo que ayudó a identificar y resaltar las palabras y frases clave, eliminando aquellas que no aportan significativamente al contenido principal. Entre los criterios de exclusión se encuentran conectores lógicos y de transición, palabras funcionales comunes, pronombres y artículos, nombres genéricos de entidades e instituciones, unidades de medición, adverbios comunes, números romanos, verbos comunes, términos relacionados con el campo semántico de "ley", y palabras no relevantes para el análisis como "siguiente", "caso", y "y". Las 50 palabras más frecuentes de cada texto se verificaron manualmente con la finalidad de verificar el análisis de la herramienta comercial de inteligencia artificial utilizada y contextualizar mejor el brigrama o palabra en cuestión en función del texto.

Como colofón, cabe mencionar que se optó por una herramienta de inteligencia artificial comercial con versión gratuita, con el objetivo de demostrar la sencilla replicabilidad de este tipo de análisis de texto. Estas herramientas tienen la capacidad de ofrecer una primera mirada hacia la política pública, especialmente para aquellas personas que, debido a distancias culturales, enfrentan un acceso asimétrico a la información, lo que se traduce en un obstáculo adicional para su participación en las decisiones públicas, en este caso, en materia energética. Resultados como las nubes de palabras actúan como aliadas didácticas e ilustrativas en la introducción a documentos que consideramos importantes para la vida pública, particularmente aquellos que son extensos y de carácter legal e institucional.

Resultados

A partir del análisis de las nubes de palabras que corresponden a los Programas Sectoriales de Energía, se puede observar que conforme pasaron los sexenios, el discurso para el sector energético fue cambiando. Si bien, en los dos primeros protagonizan las palabras “sector”, “desarrollo” y “energía”, sus tamaños dentro de sus figuras correspondientes tuvieron variaciones que corresponden a la frecuencia y relevancia de estos términos dentro de sus respectivos textos. Las palabras “gas”, “petróleo”, “inversión”, “recursos”, “crecimiento”, “investigación”, “mercado”, “calidad” e “inversión” son algunos conceptos que también se distinguen en la nube de la Figura 1. Este primer acercamiento a la nube puede dar cuenta de las políticas energéticas durante el gobierno del expresidente que acuerdo con Gutiérrez (2008), en su administración el negocio de los hidrocarburos fue especialmente favorable para el mercado internacional.

En la Figura 2, la palabra “renovables” se hace presente, igual que “estrategia”, “climático”, “tecnológico”, “eficiencia”, “indicadores”, “información” e “inversión”. A través de la nube de palabras hecha con la información del Programa Sectorial de aquel sexenio, se observan algunos conceptos del discurso de Desarrollo Sustentable, el cual ya estaba sobre la plática política en ese entonces. “Impulsar”, “gestión”, “climático” y “promover” son términos también presentes en la nube, lo cual da una idea también de los compromisos en materia ambiental que para entonces ya se reflejaban en la política energética mexicana. Como datos adicionales, durante ese sexenio se celebró en Cancún, México, la Cop16 (Ortíz Palafox, 2021).

La siguiente nube de palabras, en la figura 3, da cuenta de la política energética de un sexenio que comenzó con una reforma energética muy importante para el país. Si bien, no son las más grandes, se distinguen también las palabras, “desarrollo”, “gas”, “objetivo”, “planeación”, “renovables”, “tecnología”, “limpias”, “distribución”, “proyectos”, “generación” y “eléctrica”, las cuales en su conjunto dan cuenta del centro de dicha reforma. “Línea”, “energía” y “nacional” son términos predominantes en esta figura, cabe destacar que en la gran mayoría de las menciones, “línea” hace referencia a las líneas de transmisión y distribución del Sistema Interconectado Nacional, cuyo papel durante la administración del expresidente Peña Nieto sigue siendo tema de debate hasta nuestros días por su relevancia en los negocios internacionales energéticos sin haber recibido la inversión necesaria.

Por su parte, en la Figura 4 las palabras “Nacional” y “Energética” muestran un espacio mucho mayor al de las demás. “CFE”, “producción” y “PEMEX” tienen un papel importante también en la nube de palabras, al igual que “eficiencia”, “información”, “línea”, “fuente”, “producción” y “generación”; todas ellas revelan una parte importante de la política energética del sexenio del aún presidente López Obrador, en el que se ha buscado la seguridad energética a partir de proyectos nacionales, en su mayoría, dependientes de combustibles fósiles.

En cuanto a las figuras 5, 6, 7 y 8, se hacen presentes “consumo”, “eficientes”, “tecnologías”, “limpias”, “renovables”, “transición”, “información”, entre otras. Se observan también “fondos”, “social”, “certificados” y “sustentable”, y muy pequeño también se observa “mujeres”, lo cual refleja que el tema de género se hace presente ya en estas estrategias.

Por último, de acuerdo con la nube que corresponde al Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2038 (Figura 9), “planeación”, “distribución”, “transformación” y “distribución” son las grandes protagonistas. Entre otras muchas con poco peso, aparece “sustentabilidad” (marcada en rojo intencionalmente). En ese sentido, una recomendación al PRODESEN vigente para poder comenzar a

alinearse con la sostenibilidad descrita en el presente trabajo es incluir en el programa los temas de justicia ambiental y energética pendientes debido a proyectos energéticos llevados a cabo en administraciones pasadas.

Diversos análisis pueden surgir a partir de las impresiones a la vista que arrojan las nubes de palabras. A continuación, se muestran las diferentes nubes de palabras, una por cada documento.



Figura 1. Programa Sectorial de la Energía 2001-2006.
Nube de palabras.



Figura 2. Programa Sectorial de la Energía 2007-2012.
Nube de palabras.



Figura 3. Programa Sectorial de la Energía 2013-2018.
Nube de palabras.



Figura 4. Programa Sectorial de la Energía 2020-2024.
Nube de palabras.



Figura 5. Ley de Transición Energética
Nube de Palabras



Figura 6. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE).
Nube de Palabras



Figura 7. Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética.
Nube de Palabras



Figura 8. Actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios.
Nube de Palabras



Figura 9. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2038. Nube de Palabras.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de documentos oficiales de política energética mexicana, se demuestra que esta se inscribe en el modelo económico neoliberal, el cual favorece las políticas de crecimiento capitalista. Aunque ha incorporado la agenda del desarrollo sostenible, que propone cambios tecnológicos en diversas partes de los ciclos de vida energéticos y aborda aspectos de justicia y seguridad, no confronta el sistema económico hegemónico. Por otro lado, las nubes de palabras arrojan luz sobre los aspectos clave en materia energética propios de cada sexenio. Acompañadas de revisiones históricas basadas en los términos predominantes en cada uno, estas permiten iniciar nuevos y diversos análisis con potencial de informar o ir más allá de lo planteado en el presente trabajo. Como se menciona en la revisión teórica de este estudio respecto a los conceptos de sustentabilidad energética y su relación con la vulnerabilidad, sin cambios estructurales, el camino hacia la sostenibilidad se verá truncado por las políticas de producción y consumo que implican necesariamente incrementos en la demanda energética.

REFERENCIAS

Adger, W. N., Eakin, H., & Winkels, A. (2009). Nested and teleconnected vulnerabilities to environmental change. *Frontiers in Ecology and the Environment, 7(3)*, 150-157. https://www.jstor.org/stable/25595090

Centro Nacional de Control de Energía. (2024). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2024-2038. https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Prodesen.aspx

Colomés Andrade, N. M., & Valenzuela Sepúlveda, V. H. (2020). Ecología política y crisis civilizatoria: Una revisión necesaria para el debate sociomedioambiental. *Utopía y Praxis Latinoamericana, 25(9, Esp.)*, Universidad del Zulia, Venezuela. https://doi.org/10.5281/zenodo.4110858

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (s.f.). Acerca del desarrollo sostenible. *CEPAL*. https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-sostenible/acerca-desarrollo-sostenible

Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CONASAMI). (2018). *Política energética*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/339973/III-PoliticaEnergetica-junio2018.pdf

Diario Oficial de la Federación. (2024, enero 23). *Acuerdo por el que se emiten las disposiciones de carácter general en materia de energía eléctrica*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5714865&fecha=23/01/2024#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación. (2020, febrero 7). *Acuerdo por el que se establecen los Lineamientos para el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2020-2034*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020#gsc.tab=0

Díaz Saldierna, L. H., & Leyva Ramos, J. (2022). Sustentabilidad energética: Hidrógeno como combustible limpio en la generación de electricidad. *Revista Digital Universitaria (RDU), 23*(3). Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación de Universidad Abierta, Innovación Educativa y Educación a Distancia (CUAIEED). https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.3.2

Foster, J. B., Clark, B., & York, R. (2010). Capitalism and the curse of energy efficiency. *Monthly Review*, *62*(6). https://monthlyreview.org/2010/11/01/capitalism-and-the-curse-of-energy-efficiency

Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, *16*, 293–303. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004

Gutiérrez R., R. (2008). La política petrolera foxista y la reforma energética. *Análisis Económico, 23(52)*, 243-270. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

Lazos-Chavero, E.; Rivera-Núñez, T.; Ruiz-Mercado, I.; Medina-García, M. Vulnerabilities, Environmental Threats, and Recursive Crises under COVID-19: Dilemmas for Beekeeper-Farmers in Yucatan, Mexico. *Agronomy 2022, 12,* 1839. https://doi.org/10.3390/agronomy12081839

Ley de Transición Energética. (2024). Ley de Transición Energética. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf

Ortíz Palafox, K. H. (2021). Sustentabilidad y rendición de cuentas en México. *Revista de Ciencias Sociales (Ve), 27* (Número Especial 3), 234-248.

Oswald, Ú. (2017). Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales, 62*(230), 155-196.https://doi.org/10.1016/S0185-1918(17)30020-X

Peralta Vázquez, C. (2024, mayo 24). Sustentabilidad y sostenibilidad modernizaron el lenguaje político. *Prensa UV*. https://www.uv.mx/prensa/banner/sustentabilidad-y-sostenibilidad-modernizaron-el-lenguaje-politico/

Pope, J., Bond, A., Hugé, J., & Morrison-Saunders, A. (2017). Reconceptualising sustainability assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 62, 205-215. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.11.002

Romero Bravo, J. M. (2022). *Caracterizar vulnerabilidad energética en el contexto mexicano actual* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información. https://www.ri.unam.mx/contenidos/caracterizar-vulnerabilidad-energetica-en-el-contexto-mexicano-actual-3664047?c=4Xjb0e&d=false&q=*:*&i=1&v=1&t=search_0&as=0

Ruiz Rivera, N. (2012). La definición y medición de la vulnerabilidad social: Un enfoque normativo. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 77, 63-74. https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n77/n77a6.pdf

Sheinbaum Pardo, Rodríguez Padilla, V. C., & Robles Morales, G. (2009). Política mexicana e indicadores de sustentabilidad. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía, 40(158),* 99-121. https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2009.158.7770

Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Hovelsrud-Broda, G. K., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 100(14)*, 8074-8079. https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100

Zárate Toledo, E. (2023). Sociología de energías renovables y transformación energética en México. *Estudios Sociológicos, 41*(122), 441-470. El Colegio de México. https://www.jstor.org/stable/10.2307/27225193

Tecnología y Sistemas Fotovoltaicos

ID	TÍTULO	PONENTE
16171	Respuesta Fotovoltaica en materiales Ferroeléctricos como el BFO	José Alberto Luna López
16157	Nanodiamonds Coatings as a Solar Cell Protector.	Jorge Arturo Montes
16175	Cu2ZnSnS4 (CZTS) Material Emergente para Celdas Solares y su Propuesta Experimental para Mejorar sus Propiedades como Capa Absorbedora.	Miguel Martínez Gil
16173	Avances de la tecnología solar fotovoltaica en las tres últimas décadas.	Frank Romo García

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

RESPUESTA FOTOVOLTAICA EN MATERIALES FERROELÉCTRICOS COMO EL BFO

Zaira J. Hernández Simón, José A. Luna López, Gabriel O. Mendoza Conde y José A. David Hernández De La Luz, J. Carrillo López, K. Monfil Leyva
Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores (CIDS-ICUAP), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Col. San Manuel, Cd. Universitaria, Av. San Claudio y 14 Sur, Edificios IC5 y IC6, Puebla, 72570, México, 22-22-29-55-00, **imezaira@gmail.com, jose.luna@correo.buap.mx, gaomec13@gmail.com y jose.hernandez@correo.buap.mx**

H. P. Martínez Hernández
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Apizaco (TecNM-ITA), San Andrés Ahuastepec, Tzompantepec, Av. Instituto Tecnológico No. 418, Tlaxcala, 90491, **haydee.mh@apizaco.tecnm.mx**

Javier Flores Méndez
Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Col San Manuel, Cd. Universitaria, Av. San Claudio y 18 Sur. Edificio FCE1, Puebla 72570, México, 22-22-29-55-00, **javier.floresme@correo.buap.mx**

Eduardo Flores Cuevas
Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación de Estudios Avanzados, Unidad Mérida, Km. 6 Antigua Carretera a Progreso, A.P. 73, Cordemex, México, 99-99-42-94-00, **eduardo.flores@cinvestav.mx**

RESUMEN

Como es bien sabido, el Ferrato de Bismuto ($BiFeO_3$) (BFO) es el material ferroeléctrico por excelencia debido a su alta temperatura de Curie (810 °C). Este material es una de las apuestas principales en el desarrollo de celdas solares que utilicen el efecto fotovoltaico en bulto, en lugar de utilizar el efecto fotovoltaico convencional, que implica la unión de materiales semiconductores de tipo p y de tipo n. El efecto fotovoltaico en bulto presenta ventajas importantes, como un alto voltaje de circuito abierto (Voc) que no está limitado por el modelo Shockley-Queisser. Este efecto se da en los materiales ferroeléctricos, que son aquellos que presentan una orientación interna, espontánea y conmutable que está delimitada por regiones llamadas dominios. Los dominios ferroeléctricos en el material son los que permiten una separación interna de los portadores de carga fotogenerados. Teniendo en cuenta este preámbulo, en este trabajo de investigación se reporta la respuesta fotovoltaica en microesferas huecas de ferrato de bismuto (BFO) y microestructuras con forma de flor con una mezcla de fases ($BiFeO_3$-Bi_2O_3). Estas estructuras se obtuvieron mediante la técnica de Spray Pirolisis Ultrasónico (SPU), que es una técnica de obtención de materiales económica, escalable y sencilla de utilizar. Para observar el cambio en la respuesta fotovoltaica según la polarización y determinar el papel de la ferroelectricidad en el desarrollo del efecto fotovoltaico, se aplicaron diferentes campos eléctricos en el material y se midió su respuesta fotoeléctrica de acuerdo con la orientación interna de sus dominios. Este descubrimiento representa un avance importante en los materiales ferroeléctricos y su aplicación a dispositivos fotovoltaicos, pues los resultados obtenidos son competitivos con los alcanzados utilizando técnicas y estructuras mucho más complejas, como se observa al comparar los resultados de este trabajo con informes recientes de respuesta fotovoltaica del BFO, encontrados por otros investigadores.

ABSTRACT

It is widely acknowledged that $BiFeO_3$ (BFO) is the ferroelectric material par excellence, fundamentally due to its elevated Curie temperature (810 °C). This material represents a significant investment in the development of solar cells that utilize the bulk photovoltaic effect, as opposed to the conventional photovoltaic effect, which involves the union of p-type and n-type semiconductor materials. The bulk photovoltaic effect offers significant advantages, including a high open circuit voltage (Voc) that is not constrained by the limitations of the Shockley-Queisser model. This phenomenon occurs in ferroelectric materials, which are defined as those that exhibit an intrinsic, spontaneous, and switchable orientation, confined to regions known as domains. The ferroelectric domains within the material facilitate an internal separation of the photogenerated charge carriers. Considering the afore mentioned considerations, this research study presents the findings regarding the photovoltaic response in hollow bismuth ferrate (BFO) microspheres and flower-shaped microstructures comprising a mixture of phases ($BiFeO_3$-Bi_2O_3). These structures were obtained via the Ultrasonic Spray Pyrolysis (USP) technique, which is an economical, scalable, and simple method for producing materials. To observe the change in the photovoltaic response according to polarization and to determine the role of ferroelectricity in the development of the photovoltaic effect, different electric fields were applied to the material and its photoelectric response was measured according to the internal orientation of its domains. This discovery marks a significant advancement in the field of ferroelectric materials and their potential applications in photovoltaic devices. The results obtained are competitive with those achieved through more complex techniques and structures, as evidenced by a comparison with recent reports on

the photovoltaic response of BFO by other researchers.

Palabras claves: Respuesta fotovoltaica; efecto fotovoltaico en bulto; BFO; Ferroelectricos; Microestructuras.

INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas y limitaciones más importantes de las celdas solares de silicio es su eficiencia de conversión fotoeléctrica teórica, que ronda el 30 % y está restringida por el llamado límite de Shockley-Queisser. Este límite fue determinado por William Shockley y Hans Queisser, y establece el máximo teórico de eficiencia energética que puede alcanzar una celda solar (de una sola unión) bajo iluminación solar. Este límite se basa en los principios de la termodinámica y la física del estado sólido [1]. Para superar esta limitación, se han investigado diversos materiales como alternativa a las celdas solares de silicio. Entre estos, los que presentan las propiedades más interesantes son los materiales ferroeléctricos, que por definición son los materiales que exhiben ferroelectricidad. La ferroelectricidad es la propiedad que presentan algunos materiales en la cual estos poseen una polarización eléctrica espontánea. Esta polarización espontánea puede manipularse mediante la aplicación de un campo eléctrico externo por debajo de la temperatura de Curie. La temperatura de Curie de un material ferroeléctrico es la temperatura a la que este se vuelve paraeléctrico, es decir, pierde la propiedad de ferroelectricidad [2]. La polarización espontánea en los materiales ferroeléctricos no está uniformemente alineada a lo largo de una misma dirección, sino que generalmente se orienta por regiones. Las regiones donde la polarización espontánea se encuentra uniformemente orientada reciben el nombre de dominios ferroeléctricos y la región entre dos dominios es llamada pared de dominio [3].
Se sabe que, en ocasiones, las paredes de dominio exhiben propiedades que difieren de las del volumen; el ejemplo más conocido es la observación de conductividad en las paredes de dominio en ferroeléctricos aislantes [4].
Si bien la orientación de los dominios ferroeléctricos da lugar a múltiples aplicaciones en el área eléctrica y electrónica, una de las aplicaciones que ha llamado fuertemente la atención de la comunidad científica y tecnológica es el efecto fotovoltaico en bulto, el cual está presente únicamente en materiales ferroeléctricos y potencialmente es uno de los fenómenos que revolucionarán el aprovechamiento de la energía solar.
El efecto fotovoltaico en bulto tiene un principio de operación muy diferente al del efecto fotovoltaico tradicional. En este último, se necesita la unión de un material semiconductor de tipo n con uno de tipo p para formar una diferencia de potencial que permita separar los portadores de carga (electrones y huecos) fotogenerados. Como resultado, se produce un voltaje y una corriente a partir de la energía en forma de luz, es decir, se transforma la energía lumínica en eléctrica. Como se mencionó, el efecto fotovoltaico tradicional requiere la unión forzosa de 2 materiales semiconductores. En el caso del efecto fotovoltaico en bulto, esta unión se produce dentro del material ferroeléctrico, sin necesidad de unir otro material. Esto se debe a la formación de dominios ferroeléctricos internos en el material, que pueden orientarse a voluntad. Los dominios orientados realizan la separación de carga que normalmente ocurriría en la unión p-n [5].
En la Figura 1 a) se muestra de forma esquemática la diferencia entre el efecto fotovoltaico y el efecto fotovoltaico en bulto, tanto en los principios de operación, como en el comportamiento eléctrico mostrando las gráficas de corriente contra voltaje (I-V). Entre las ventajas más destacadas del efecto fotovoltaico en bulto se encuentra el hecho de que no sigue el límite teórico de eficiencia de Schockley-Queisser y se ha demostrado que la generación de Voc es muy superior a la que se obtiene en las celdas solares convencionales [6]. Sin embargo, dada la naturaleza dieléctrica de la mayoría de estos materiales, la corriente fotogenerada aún no alcanza un valor competitivo con las celdas de silicio, por lo que este fenómeno aún se está investigando [7].

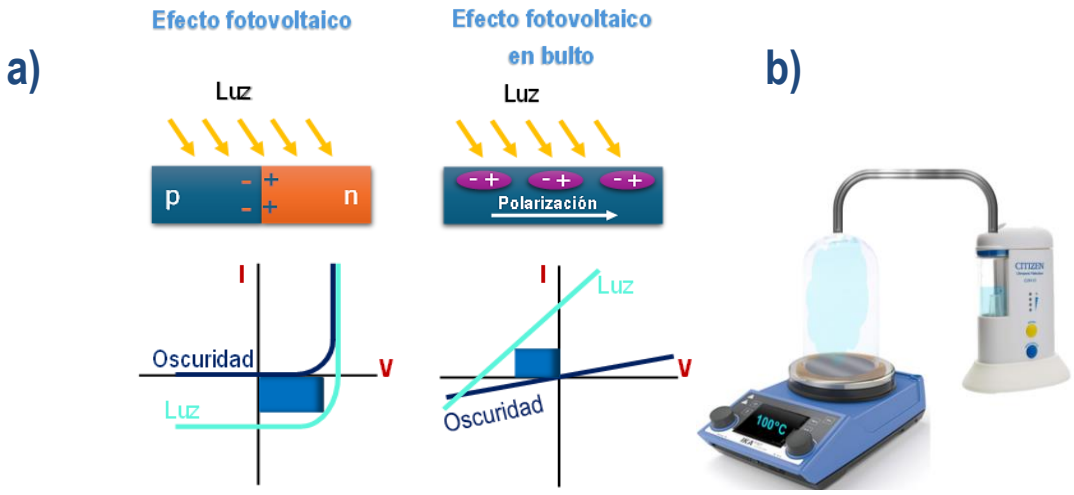


Figura 1. a) Representación esquemática de la diferencia entre el efecto fotovoltaico y el efecto fotovoltaico en bulto, en la parte superior se muestra el principio de operación y en la inferior el comportamiento eléctrico mostrando las curvas I-V y b) esquema de depósito utilizado la técnica de Spray Pirolisis Ultrasónico (SPU).

Uno de los materiales más prometedores en este campo, es la Ferrita de Bismuto ($BiFeO_3$) ya que cuenta con una física fascinante detrás de sus propiedades. Este material tiene una estructura tipo perovskita distorsionada romboédricamente y cuenta con una temperatura de Curie muy elevada (~830°C), por lo que sus propiedades ferroeléctricas pueden ser aplicadas en un número importante de situaciones aún a altas temperaturas. Las propiedades ópticas de este material son notables, y su energía de banda prohibida es baja en comparación con la mayoría de las perovskitas ferroeléctricas, con valores aproximados de 2.6 eV [8]. Esto se sitúa al borde de la absorción en el rango visible, lo que ha generado un gran interés en investigar estos materiales para su uso en el área de la energía fotovoltaica.
Debido a los argumentos anteriores, en este trabajo nos hemos centrado en la obtención de BFO con una morfología modificada (formación de esferas huecas), con mezcla de fases BFO-Bi_2O_3 e incremento de las vacancias de oxígeno, pues se ha informado que contribuyen al incremento de la fotocorriente en este material. Además, se utilizó una técnica de depósito de bajo costo, el spray pirolisis ultrasónico. El esquema de depósito utilizado se muestra en la figura 1 b).
La obtención de microestructuras de BFO con una excelente respuesta fotoeléctrica mediante una técnica de depósito simple y económica, permite su incorporación a numerosos materiales o heteroestructuras, mejorando sus respuestas fotoeléctricas.

PROCESO EXPERIMENTAL

Las microestructuras de BFO se obtuvieron utilizando la técnica de Spray Pirolisis ultrasónico (SPU), que está basada en la descomposición de gotas submicrométricas de la solución del material que se va a depositar. Las gotas se generan por un dispositivo con frecuencia ultrasónica. El aerosol se transporta utilizando un gas de arrastre hasta el sustrato y las gotas de aerosol se convierten en partículas nanoestructuradas mediante temperatura. Utilizando esta técnica, el control de los parámetros fundamentales que determinan las propiedades finales del material es sencillo, por lo que este método de depósito permite la síntesis de una amplia variedad de morfologías, como partículas huecas, partículas densas de diferentes geometrías, películas delgadas, entre otras. El depósito de las microestructuras de BFO, que se muestran en la figura 2, se realizó a 100 °C utilizando un nebulizador con una frecuencia ultrasónica de 2,5 MHz y aplicando un flujo de 2 ml/min. El tiempo de depósito fue de 10 minutos y se realizó sobre un sustrato de silicio tipo n con una resistividad de 1-10 Ω y orientación (1 0 0).
Para preparar la solución precursora se utilizó una molaridad de 0,6 M empleando agua desionizada con los siguientes reactivos: nitrato de hierro nonahidratado al 98 % y nitrato de bismuto pentahidratado al 98 %. Esto provocó la siguiente reacción:

$$Fe(NO_3)_3 * 9\ H_2O + Bi\ (NO_3)_3 * 5\ H_2O \rightarrow BiFeO_3 + 6\ (HNO_3) + 11\ H_2O \quad (1)$$

Después de realizarse el depósito mediante la técnica de SPU, se efectuó un recocido térmico a 500°C durante una hora.
Para caracterizar eléctricamente las microestructuras depositadas, se colocó un contacto superior de óxido de estaño dopado con Indio (ITO) con la finalidad de utilizar un contacto conductor transparente que deje pasar la luz a las microestructuras y nos permita observar el efecto fotovoltaico presente en el material. El contacto superior de ITO se depositó mediante la técnica de SPU a 400°C utilizando la misma frecuencia ultrasónica mencionada en el depósito de BFO y un flujo de 5 ml/min. Se utilizó una mascarilla de acero inoxidable y el área de contactos fue de 0.2 mm^2. Para preparar la solución precursora de ITO se empleó una molaridad de 0.2 M utilizando metanol con los siguientes reactivos: $InCl_3$ 98% y $SnCl_4\ 5*H_2O$ 98%.
La morfología del BFO se estudió mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y, con la finalidad de caracterizar la estructura cristalina y las fases del material, se realizaron mediciones de difracción de rayos X de incidencia rasante.
El poling, que es un proceso de orientación de los dominios ferroeléctricos mediante la aplicación de un campo eléctrico durante un tiempo definido, se realizó de manera vertical, es decir, el contacto se estableció entre el ITO y la parte inferior del silicio, aplicando un voltaje de +60 V y -60 V para el polarizado positivo y negativo, respectivamente, durante 60 segundos. En el caso de las mediciones eléctricas, se utilizó el proceso de poling y las caracterizaciones de corriente vs tiempo (I-t) y voltaje vs tiempo (V-t) se realizaron en un sistema Keithley 4200 SCS aplicando iluminación con una lámpara LED de luz blanca con una potencia de 5 mW/cm^2. Es importante destacar que para obtener el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito utilizando estas mediciones no se debe aplicar polarización alguna, es decir, el incremento en la corriente y el voltaje debe ser ocasionado únicamente por la excitación lumínica. El contacto eléctrico durante las mediciones se realizó de forma horizontal, es decir, entre los contactos de ITO.
Finalmente, se utilizó la microscopía de fuerza de respuesta piezoeléctrica (PFM) para obtener imágenes de los dominios ferroeléctricos y su orientación.

RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés de Scanning Electron Microscopy) se utiliza para observar la morfología de los materiales. Esta técnica se basa en la interacción de un haz de electrones con la superficie del material que se está estudiando. La interacción entre el electrón y el material da lugar a fenómenos que permiten obtener imágenes de alta resolución topográfica debido a los electrones secundarios, los cuales son recolectados por un detector. En la figura 2 a) se muestra la micrografía SEM de una de las esferas de BFO obtenidas, donde se puede apreciar un tamaño aproximado de 1,5 µm. En el inciso b) de la figura 2 se muestra una imagen del depósito de las microestructuras de BFO tomada con un microscopio óptico de alta resolución. Esta imagen se analizó utilizando el software Image J, con lo cual se obtuvo que el tamaño promedio de las microesferas es de aproximadamente 2,5 µm.
Las microestructuras de mayor tamaño tienen una morfología similar a la de una flor y una composición diferente, lo cual se corroboró mediante difracción de rayos X. Un análisis mucho mas amplio y detallado de la morfología y composición de las microestructuras

realizadas se reportó en [9]. De dicha investigación se concluyó que las microesferas son huecas debido a un proceso de maduración de adentro hacia afuera de Ostwald, en el cual los cristales más grandes crecen a partir de los más pequeños, que tienen mayor solubilidad [9].

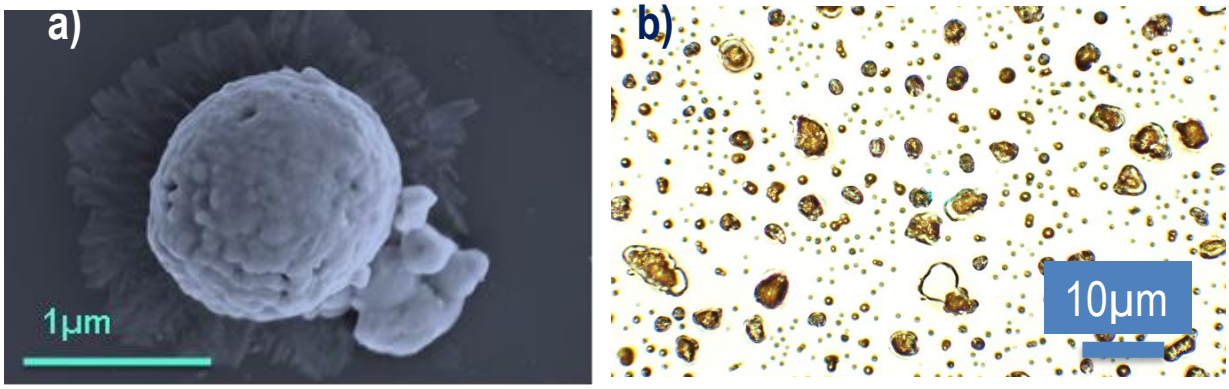


Figura 2. a) Micrografía SEM de la microestructura obtenida en forma de esfera hueca y b) imagen del depósito de las microestructuras de BFO tomada con un microscopio óptico de alta resolución.

La difracción de rayos X (DRX) forma parte de las técnicas de caracterización estructural y permite identificar el material obtenido y de las fases cristalinas presentes. Esta técnica consiste fundamentalmente en la interacción de la estructura cristalina de un sólido con los rayos X. Con el fin de caracterizar estructuralmente el BFO, la figura 3 a) muestra el patrón de difracción donde se identifica la fase romboédrica del BFO, según la ficha ICDD 01-072-2035, con una orientación preferencial en el plano (110). Además, también se observa que existe una mezcla con la fase monoclínica del Bi_2O_3, correspondiente a la ficha ICDD 01-072-0398. Esta mezcla de fases es interesante ya que se ha informado que la unión de BFO y Bi_2O_3 forma una unión de tipo II en la interfaz que podría ser beneficiosa para promover la separación de carga, lo que sugiere una supresión de la recombinación de huecos y electrones, mejorando por lo tanto la fotorrespuesta del material.

El sistema de microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés), está constituido por un escáner, una punta o cantiléver y un sistema de control y retroalimentación. La microscopía de fuerza atómica ha surgido como una técnica poderosa para obtener imágenes no destructivas. Para ello, se realiza un barrido de la punta o cantiléver sobre la muestra de la que se quiere conocer la morfología. En el sistema AFM, el láser incide sobre la punta de barrido y, a medida que se realiza el barrido correspondiente, se produce una deflexión del cantiléver que se traduce en un cambio en la posición de incidencia del láser en el fotodetector, obteniéndose así la información traducida en una imagen.
Como una variante útil del AFM, la microscopía de fuerza de respuesta piezoeléctrica (PFM) permite obtener imágenes de los dominios ferroeléctricos, su orientación y de las paredes de dominio al poner una sonda polarizada en contacto con la superficie del material.
En la figura 3 b) se observa la imagen obtenida mediante PFM que muestra la morfología en representación isométrica, donde se puede apreciar que las variaciones en los granos son de aproximadamente 73 nm. En el inciso c) se observa la medición de amplitud mediante PFM que muestra las paredes de dominio ferroeléctrico, es decir, las regiones que delimitan un dominio ferroeléctrico de otro. Estas paredes se caracterizan en las imágenes por tener un voltaje cero o muy cercano a cero; es decir, que en la imagen se distinguen como regiones negras o muy oscuras, bien delimitadas. Finalmente, para corroborar la existencia de dominios ferroeléctricos en el material, la figura 3 d) muestra la medición de fase mediante PFM, que muestra los dominios ferroeléctricos. En esta imagen, los dominios ferroeléctricos deben estar localizados dentro de las paredes de dominio, tal y como se aprecia, y además deben tener diferentes orientaciones. En la imagen, las zonas más claras corresponden a una orientación cercana a 90°, mientras que las regiones más oscuras con una tonalidad naranja muestran una orientación cercana a -30°.
Una vez corroborada la existencia de dominios ferroeléctricos en el material, estos se orientaron mediante la aplicación de una polarización positiva o negativa (poling, como se describe en la sección de proceso experimental).
La generación de la corriente de corto circuito, así como el voltaje de circuito abierto, se cuantificaron utilizando mediciones de corriente contra tiempo y voltaje contra tiempo, respectivamente. Estas mediciones se realizaron de 3 maneras diferentes; sin aplicación del poling, aplicando un poling positivo y uno negativo, con la finalidad de la influencia de la orientación de los dominios ferroeléctricos en la respuesta fotovoltaica.

La figura 4 a) muestra la medición de voltaje contra tiempo para obtener el voltaje de circuito abierto de acuerdo con la orientación de los dominios ferroeléctricos. La medición correspondiente a un estado de oscuridad en el material es la línea de color negro, y se observa lo esperado: que no existe la generación de voltaje. La línea violeta marca el voltaje de circuito abierto (Vca) obtenido al iluminar el material antes de aplicarle el proceso de poling. Se observa que, en este caso se obtiene el menor voltaje fotogenerado, con aproximadamente 130 mV. El mayor Vca se muestra para un poling positivo (línea roja punteada) con un valor de 225mV, mientras que para el poling negativo se obtienen 150mV. Es interesante destacar que, una vez que se orientan los dominios, el Vca pasa de ser positivo a negativo, lo que podría indicar que los procesos involucrados en la respuesta fotovoltaica son diferentes. Como se reporta en [9], podría existir una amplia

influencia de los defectos estructurales, específicamente de las vacancias de oxígeno, en la respuesta fotovoltaica antes de orientar los dominios ferroeléctricos.

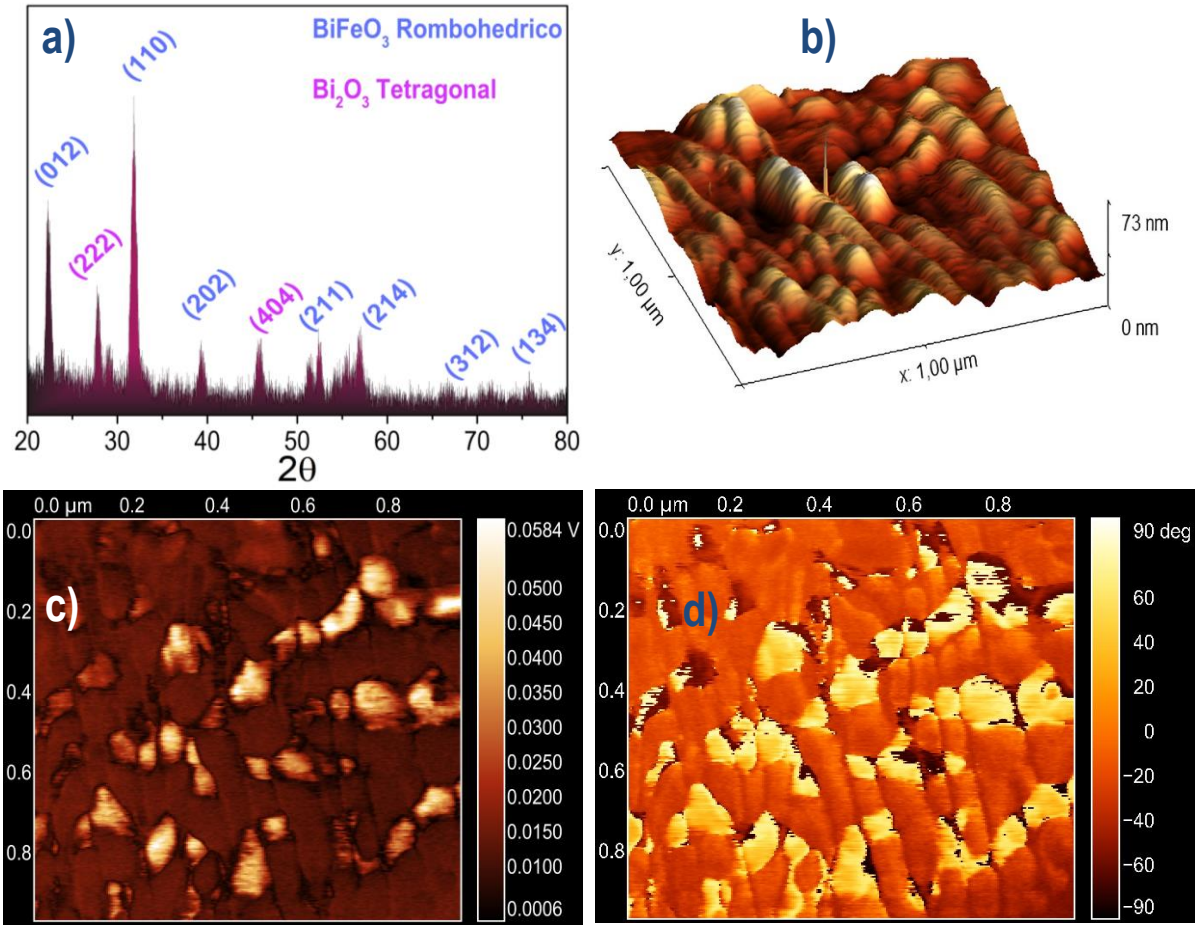


Figura 3. a) Difractograma de las microestructuras depositadas obtenido de la difracción de rayos X, b) imagen obtenida mediante PFM que muestra la morfología en representación isométrica, c) medición de amplitud mediante PFM que muestra las paredes de dominio ferroeléctrico y d) medición de fase mediante PFM que muestra los dominios ferroeléctricos.

En la figura 4 b) se muestra la medición de corriente contra tiempo para obtener la corriente de corto circuito (Icc) de acuerdo con la orientación de los dominios ferroeléctricos. Las mediciones correspondientes a las corrientes de oscuridad en el material se encuentran marcadas con líneas continuas, mientras que las que corresponden a las corrientes una vez iluminado el BFO se muestran con líneas punteadas. Las líneas violetas, que corresponden a la figura 4 a), indican la Icc del material con los dominios orientados al azar, donde se produce un incremento de aproximadamente 5 órdenes de magnitud entre la corriente de oscuridad y la de luz. El mayor Icc se obtiene al aplicar un poling negativo (líneas azules) con una diferencia entre la corriente de oscuridad y la corriente fotogenerada de 6 órdenes de magnitud, mientras que, en el caso del poling positivo, si bien la Icc es un poco mayor que la obtenida con los dominios orientados al azar, el valor de la corriente de oscuridad se incrementa casi un orden de magnitud, por lo cual la diferencia entre la corriente en oscuridad y con luz blanca aplicada disminuye hasta tener una diferencia de 4 órdenes de magnitud Es muy probable que este fenómeno esté asociado con la forma en que la orientación de los dominios ferroeléctricos puede crear o no un potencial interconstruido con el contacto del ITO utilizado. No obstante, con estas mediciones se corrobora que la orientación de los dominios puede ser una herramienta importante para mejorar la eficiencia de las celdas solares.

Los resultados obtenidos respecto a la corriente Icc son muy prometedores al compararlos con otros valores reportados que rondan los nanoamperes [9], además, considerando que la iluminación no corresponde a la luz de un simulador solar cuya, potencia es 20 veces mayor. Si bien es necesaria una investigación más rigurosa respecto a como se puede incrementar el potencial formado entre los dominios ferroeléctricos en este material, los resultados mostrados son interesantes dada la alta corriente obtenida, lo que podría facilitar la implementación de este tipo de estructuras en la fabricación de celdas solares más eficientes a un menor costo, dada la técnica de depósito utilizada.

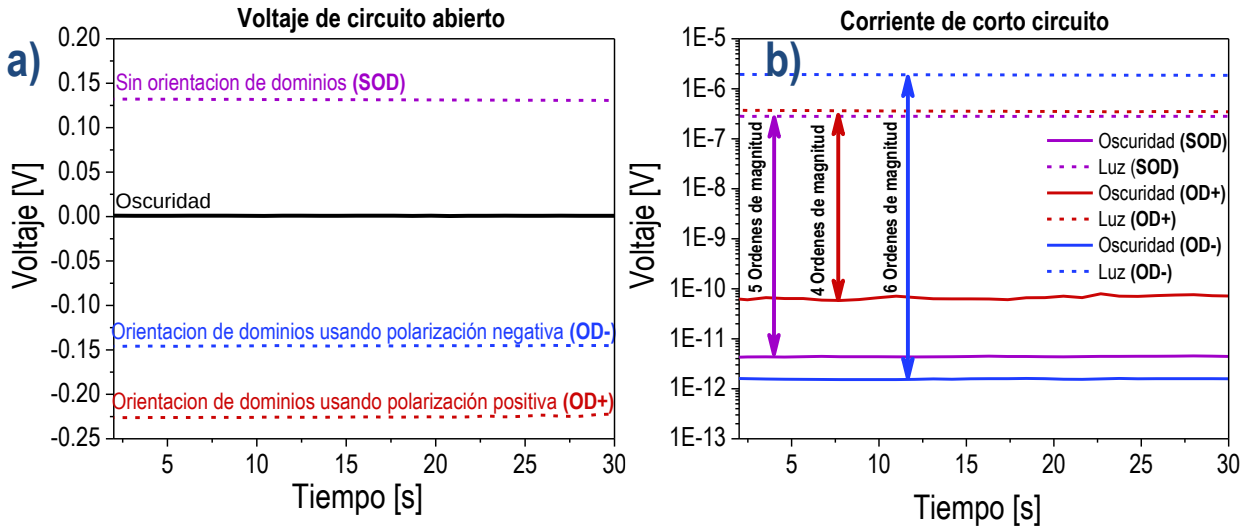


Figura 4. a) Medición voltaje contra tiempo para obtener el voltaje de circuito abierto de acuerdo con la orientación de dominios ferroeléctricos y b) Medición corriente contra tiempo para obtener la corriente de corto circuito de acuerdo con la orientación de dominios ferroeléctricos.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se reporta la obtención de esferas huecas de $BiFeO_3$ y microestructuras de $BiFeO_3$-Bi_2O_3 mediante la técnica ultrasónica de Spray Pirolisis y la formación exitosa de 2 fases en el material: $BiFeO_3$ con estructura romboédrica y Bi_2O_3 con fase monoclínica. Además, se obtuvo una excelente respuesta fotoeléctrica con este material. Los resultados son competitivos con los alcanzados utilizando técnicas y estructuras mucho más complejas al comparar los resultados de este trabajo con informes de respuesta fotovoltaica del BFO encontrados por otros investigadores. Se observa una variación de la fotorespuesta al aplicar polarización eléctrica positiva o negativa, en la que está involucrada la orientación de dominios ferroeléctricos, cuya modificación puede incrementar o disminuir la fotorespuesta. Es importante mencionar que esta investigación podría dar lugar a posibles aplicaciones de estas microestructuras que mejorarían la eficiencia de las celdas solares y los dispositivos fotónicos, ya que se pueden incorporar fácilmente a cualquier material y presentan ventajas dada la técnica de depósito utilizada, que es sencilla y económica.

REFERENCIAS

[1] Rühle, S. (2016). Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells. Solar energy, 130, 139-147.
[2] G. Chen, J. Chen, W. Pei, Y. Lu, Q. Zhang, Q. Zhang, Y. He, Bismuth ferrite materials for solar cells: Current status and prospects, Mater. Res. Bull. 110 (2019) 39–49.
[3] B. Cui, Z. Fan, W. Li, Y. Chen, S. Dong, Z. Tan, S. Cheng, B. Tian, R. Tao, G. Tian, D. Chen, Z. Hou, M. Qin, M. Zeng, X. Lu, G. Zhou, X. Gao, J.-M. Liu, Ferroelectric photosensor network: an advanced hardware solution to real-time machine vision, Nat. Commun. 13 (2022) 1707.
[4] Y. Li, X. Cui, M. Tian, G. Wang, X. Hao, Stable photovoltaic output and optically tunable resistive switching in all-inorganic flexible ferroelectric thin film with self-polarization characteristic, Acta Mater. 217 (2021) 117173.
[5] Li, Y., Fu, J., Mao, X., Chen, C., Liu, H., Gong, M., & Zeng, H. (2021). Enhanced bulk photovoltaic effect in two-dimensional ferroelectric CuInP2S6. Nature communications, 12(1), 5896.
[6] Han, X., Ji, Y., & Yang, Y. (2022). Ferroelectric photovoltaic materials and devices. Advanced Functional Materials, 32(14), 2109625.
[7] S. Zhang, A. Gong, X. Yang, P. Han, N. Sun, Y. Li, L. Zhang, X. Hao, Ultrahigh-performance self-powered photodetectors based on hexagonal YbMnO 3 ferroelectric thin films by the polarization-induced ripple effect, Inorg. Chem. Front. 9 (2022) 6448–6456.
[8] S. Nandy, K. Kaur, S. Gautam, K.H. Chae, B.R.K. Nanda, C. Sudakar, Maximizing Short Circuit Current Density and Open Circuit Voltage in Oxygen Vacancy-Controlled Bi 1– x Ca x Fe 1– y Ti y O 3−δ Thin-Film Solar Cells, ACS Appl. Mater. Interfaces. 12 (2020) 14105–14118.
[9] Simón, Z. J. H., López, J. A. L., De La, J. A. D. H., Conde, G. O. M., Leyva, K. M., Herrera, O. R., ... & Flores, E. (2023). Outstanding photoelectrical response in BiFeO3 hollow microspheres deposited by ultrasonic spray pyrolysis technique. Journal of Alloys and Compounds, 955, 170215.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

NANODIAMOND COATINGS AS A SOLAR CELL PROTECTOR

Jorge A. Montes-Gutiérrez
Instituto de Energías Renovables-Universidad Nacional Autónoma de México. Xochicalco s/n, Azteca, Temixco, Mor., C.P. 62588 Teléfono 777 362 0090.
Departamento de Investigación en Física. Universidad de Sonora. Rosales y Luis Encinas, Hermosillo, Sonora, 83000, México.
dirección de e-mail: jorge.montes@unison.mx.

Rafael García-Gutiérrez
Departamento de Investigación en Física. Universidad de Sonora. Rosales y Luis Encinas, Hermosillo, Sonora, 83000, México
, **dirección de e-mail**: rafael.gutierrez@unison.mx

Frank Romo García
Departamento de Física, Ingeniería y Matemáticas. Universidad de Sonora. Lázaro Cárdenas del Río No.100, Francisco Villa, Navojoa, 85880, México, **dirección e-mail: frank.romo@unison.mx**

Óscar E. Contreras-López
Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada s/n, Ensenada 22860, B.C., México, **dirección e-mail: edel@cnyn.unam.mx**

RESUMEN
Las películas de diamantes han presentado propiedades importantes como la mayor dureza en comparación con cualquier material, inercia química a la corrosión por medios extremadamente corrosivos, resistencia al daño por radiación, excelente aislante eléctrico con estructura adaptada, alta conductividad térmica para diamantes nanocristalinos (NCD), transparencia y Excelente biocompatibilidad para dispositivos médicos implantables, estas propiedades han sido importantes para diversos aparatos como la medicina, industrias aeroespaciales, sistemas mecánicos, electrónicos, microelectromecánicos (MEMS) y nanoelectromecánicos (NEMS), entre otros.

Este proyecto describe el proceso de producción de películas de micro y nanodiamantes cultivadas mediante deposición química de vapor con filamentos calientes (HFCVD) y su caracterización óptica, morfológica y química. El crecimiento de diamantes policristalinos sobre diferentes tipos de superficies proporciona información sobre la incorporación en recubrimientos de protección de células solares.

ABSTRACT
Diamonds films has been present important properties like highest hardness compared with any material, chemical inertness to corrosion by extremely corrosive media, resistance to radiation damage, excellent electrical insulator with tailored structure, high-thermal conductivity for Nanocrystalline diamond (NCD), transparency, and excellent biocompatibility for implantable medical devices, these properties has been important for diverse appliances like medicine, aerospace industries, mechanical, electronic, microelectromechanical systems (MEMS) and nanoelectromechanical systems (NEMS), among others.
This project describes the process for production of Micro- and Nano-diamond films grow by hot filament chemical vapor deposition (HFCVD) and the optical characterization, morphological and chemical characterization. The growth of polycrystalline diamond on different surface types provides information about the incorporation in coatings protection of solar cells.

Palabras claves: Solar cells protector, nanodiamond, coating.

INTRODUCTION
The lifetime of solar cells are around 20 years under exposure to environmental conditions. The silicon (Si) solar cells present a stress and there are affected by cracking induced by thermos-mechanical loads [1]. The commercial Si solar cells present various factors like material properties and different module packaging layers would also impact the occurrence of thermo-mechanical and chemical-based degradation of the interconnects and metallization [2]. A factor of cracked of solar cells is during the installation and delivering, the big problem is the exposure to vibrations and impacts during transportation. The environmental conditions such as snow, wind gusts, hail and rapid temperature variations are responsible for further propagation of cracks [1-2]. The diamond films present a multiple combination of unique properties: extremely hardness, chemical inert, resistant to radiation, high thermal conductivity, excellent electrical insulator, and biocompatible material. The hot filament chemical vapor deposition (HFCVD) and microwave plasm chemical vapor deposition (MPCVD) are the principal techniques for growth polycrystalline diamond films. In CVD techniques is possible synthetized polycrystalline diamond films with different properties, grain size, doping, roughness and inclusive grown on different substrate surface like metal, metal oxides and semiconductor materials, and boosting the integration of polycrystalline diamond films in several semiconductor industries, micro- and nano-electromechanical systems (MEMS and NEMS) manufacturing, coatings of tools metal, among others [3-7].

The principal technique HFCVD has been studied during the decades trying to modify some characteristics and properties of diamond films adjusting parameters like temperature filament, temperature substrate, pressure, gas ratios, mixture of gases, time, and surfaces. The fundamental properties of diamond films undoped are induced by radicals produced during the, the main radical's precursors for NCD are CHx (x=1,2,3) generated by cracking of CH_4 molecules inserted in HFCVD system [3]. The morphological characterization by scanning electron microscopy (SEM), chemical characterization by Raman spectroscopy and reflectance by UV-Vis. In this work describe information about of mechanism of growth polycrystalline diamond films and reflectance, morphological, and chemical characterization.

METHODOLOGY

The NCD films samples S1 and S2 were grown on silicon wafer by HFCVD reactor with capacity of cover uniform films on substrates with 100 mm in diameter. The surfaces substrates were seeded with nanodiamond particles solution (2-5 nm dimensions) in an ultrasonic bath. The difference between S1 and S2 is methane gas flow. The parameters of growing S1 and S2 of NCD films are describe in table 1.

Table 1. Growth parameters for S1 and S2 samples of NCD films on Si.

Parameters	S1	S2
H_2 (sccm)	200	200
CH_4 (sccm)	3	6
Pressure (Torr)	10	10
Filament Temperature (°C)	2200	2200
Substrate temperature (°C)	550	550

The topography and grain size were observed by scanning electron microscopy in a SEM JEOL JSM-7800F and were analyzed by "Image J" software. The chemical bonds of diamond films were studied in a Thermo Scientofoc Raman Spectrometer with a 532nm wavelength laser bean excitation. The reflectance was measured in a UV-Vis (Perkin-Elmer, Lambda 20) en un intervalo de 1100 a 200 nm.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 1 shows SEM micrographs of NCD films on Si wafer, to simple view on the images is possible see differences in colors, S2 is showed most dark than S1. The surface morphology of S1 present some flat areas, and S2 is possible see a roughness in tips form. For both samples S1 and S2 were analyzed the grain size in plain view, for S1 is obtained a mean grain size of ~370 nm and for S2 the mean grain size were ~300 nm. The thickness of diamond films were measurement by cross-section SEM for S1 is ~370nm and S2 is ~1.75 µm.

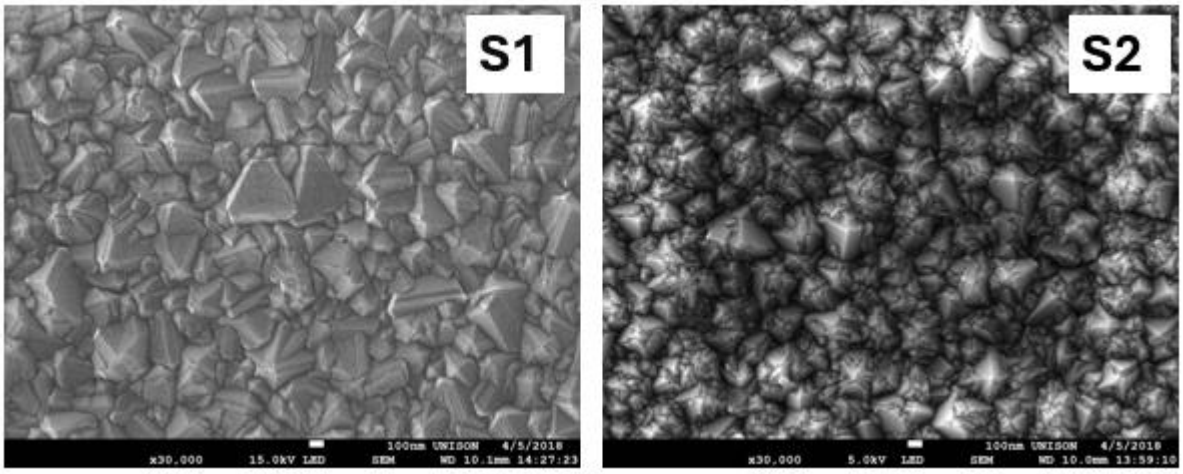


Figure 1. SEM results of nanodiamonds films by HFCVD, S1 in left (3 sccm of CH_4) and S2 in right (6 sccm of CH_4).

Figure 2 shows the Raman spectroscopy result of two samples, In S1 and S2 is appreciated the diamond peak at 1333 cm-1 of sp^3 C-C chemical bond at 1333 cm-1, is possible see G-Band to 1560 cm-1 of sp^2 C-C chemical bond related to graphite. Besides, is possible see two more signals at 1150 cm^{-1} and 1450 cm^{-1} corresponds to [-C-C-]n chemical bonds of trans-polyacetylene (t-PA). Both samples present high quality of polycrystalline diamond films. For S2 the G-Band, the relative intensity is near of diamond peak, in contras with S1 the G-Band, the relative intensity is smaller than diamond peak [13-14].

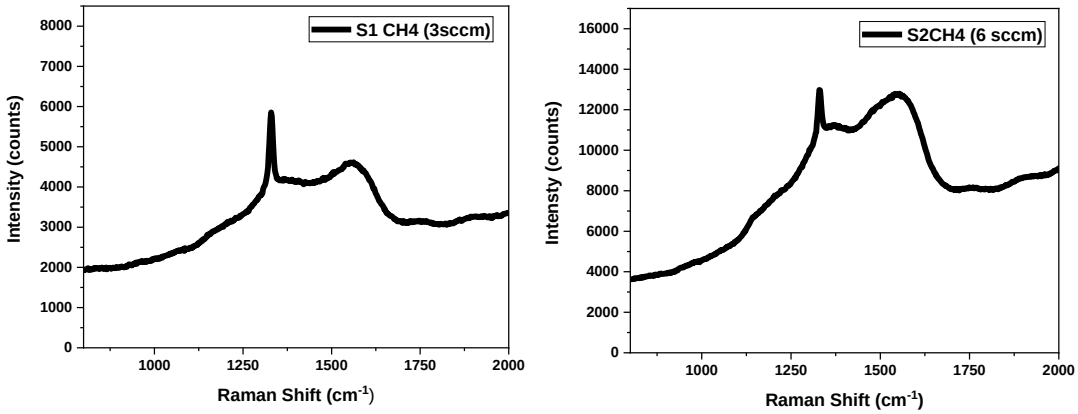


Figure 2. Raman spectroscopy of nanodiamond films S1 and S2 using a 532-laser beam.

Figure 3 show the reflectance of diamond films, S1 present more maximus and minimums than S2. The sample S2 increase gradually from 500 nm of wavelength, while S1 begin from 250 nm. Petrich and Stenzel (1993), describe a model of transmittance for nanodiamond films that consider the effects of surface roughness in terms of surface scattering and coherence disturbance [8]. The behavior of S1to most reflectance in UV region (at 50%) and increase to infrared region (at 70%). S2 increase gradually from 500 nm (30%) to 1000 nm (60%).

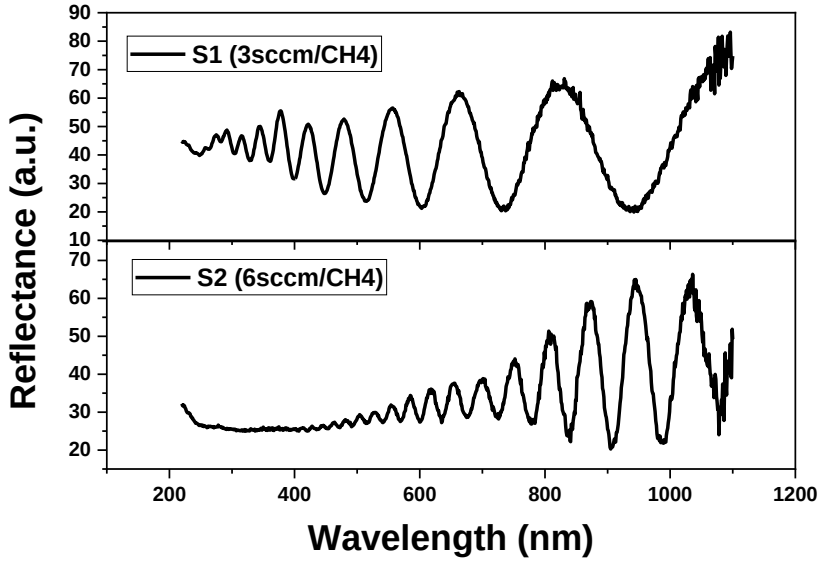


Figure 3 Reflectance of nanodiamond films S1 and S2.

CONCLUSION

The nanodiamond films present diverse interesting characteristics that can provide protection on solar cells against of environmental conditions principally reducing temperature and degradation of silicon surface. In a respect the optical results of reflectance, is necessary study most conditions of diamond films growth that can be support the major reflection in UV zone to reduce silicon surface degradation and reduce the reflection in more zones of spectrum.

REFERENCES

1. 1. Paggi, M., Berardone, I., Infuso, A., & Corrado, M. (2014). Fatigue degradation and electric recovery in Silicon solar cells embedded in photovoltaic modules. *scientific reports*, *4*(1), 4506.
2. 2. Kumar, S., Meena, R., & Gupta, R. (2021). Finger and interconnect degradations in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *230*, 111296.
3. E.M.A. Fuentes-Fernandez, J. J. Alcantar-Peña., G. Lee, A. Boulom, H. Phan, B. Smith, T. Nguyen, S. Sahoo, F. Ruiz-Zepeda, M.J. Arellano-Jimenez, P. Gurman, C.A. Martinez-Perez, M.J. Yacaman, R.S. Katiyar, O. Auciello, Synthesis and characterization of microcrystalline diamond to ultrananocrystalline diamond films via Hot Filament Chemical Vapor Deposition for scaling to large area applications, Thin Solid Films, 603 (2016) 62–68.
4. J. E. Butler and A. V. Sumant, The CVD of Nanodiamond Materials. Chem. Vap. Deposition, 14 (2008) 145–160.
5. O. Auciello, P. Gurman, M. B. Guglielmotti, D.G. Olmedo, A. Berra and M. J. Saravia, "Biocompatible Ultrananocrystalline Diamond Coatings for Implantable Medical Devices". MRS Bulletin, 39 (07) (2014) 621 – 629.
6. O.A. Williams, Nanocrystalline Diamond. Diamond & Related Materials, 20 2011 621–640.
7. O. Auciello, J. Birrell, J. A Carlisle, J. E. Gerbi, X. Xiao, B. Peng, H. D. Espinoza, Materials science and fabrication processes for a new mems technology based on ultrananocrystalline diamond thin films, J. Phys.: Condens. Matter, 16 (2004) 539–552.
8. Petrich, R., & Stenzel, O. (1994). Modeling of transmittance, reflectance and scattering of rough polycrystalline CVD diamond layers in application to the determination of optical constants. Optical Materials, 3(1), 65-76.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) MATERIAL EMERGENTE PARA CELDAS SOLARES Y SU PROPUESTA EXPERIMENTAL PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES COMO CAPA ABSORBEDORA

Miguel Martinez-Gil 1*, Rafael Verdugo-Miranda 2 Rolando Flores-Ochoa 3 Frank Romo-García 4
Departamento de Física, Matemáticas e Ingeniería, Universidad de Sonora, Campus Navojoa, Blvd. Lazaro Cardenas # 100 Col. Francisco Villa, Navojoa, Sonora, C.P. 85880, México.
***Correo:** Miguel.Martinezgil@unison.mx

Luis Miguel Medina-Zazueta 5 Departamento de Física, Universidad de Sonora Campus Hermosillo, Hermosillo 83000, Sonora, México.
Christian Javier Salas-Juárez 6 Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, del IPN. Ciudad de México.

RESUMEN

La carrera sobre el mejoramiento de la eficiencia en celdas solares tiene grandes desafíos debido a que muchos de los materiales que se utilizan como capa absorbedora para el funcionamiento de la celda, presentan una gran complejidad como sus procesos de síntesis, estabilidad química, alto costos, entre otros. Dentro de las celdas solares más destacadas se encuentran las basadas en perovskistas hibridas, sensibilizadas por colorantes, kesteritas, entre otros.

Las celdas solares basadas en kesteritas están constituidas principalmente por un material cuaternario que presenta la estructura cristalina tetragonal que contiene Cu-Zn-Sn-S (CZTS). En los últimos reportes en la literatura, este material ha presentado una eficiencia del 13% de conversión de energía fotovoltaica. Además, teóricamente puede llegar hasta el 30% de eficiencia. Este material tiene como objetivo sustituir algunos materiales que se usan comercialmente como las celdas solares basadas en tecnologías de CdTe y Cu-In-Ga-Se (CIGS). Estos materiales presentan una eficiencia del 22.1% y 22.6%, respectivamente. En comparación con las celdas solares de CZTS, las celdas basadas en CIGS presentan una mayor eficiencia. Sin, embargo, el CdTe es un material que presenta una alta toxicidad. Por otro lado, el CIGS contiene metales como In y Ga, los cuales son escasos y tienen un alto costo y demanda en otro tipo tecnologías.

Es por ello, que el CZTS es un candidato para sustituir a estos materiales, ya que el CZTS está compuesto por metales que no presentan una alta toxicidad, son abundantes en la corteza terrestre y asimismo tienen un bajo costo. Sin embargo, existen grandes retos para el CZTS, desde la modulación de la estequiometria para controlar las propiedades ópticas y eléctricas adecuadas para el funcionamiento en una celda solar, esto crea un gran desafío para los grupos de investigación, ya que las propiedades del material dependerán del tipo de métodos y parámetros que se manejen. En este trabajo, presentamos una alternativa experimental de síntesis para CZTS utilizando técnicas en solución química como Deposito en Baño Químico y/o SILAR variando las capas de forma individual de SnS, CuS, y ZnS, de esta manera esta metodología permitirá controlar el espesor de las diferentes capas, esto tendrá un impacto en las propiedades eléctricas y ópticas del material CZTS.

Palabras claves: Celdas Solares Emergentes; Kesteritas: Tratamientos Térmicos; Materiales con baja toxicidad;

Introducción

El Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) es un material semiconductor cuaternario de la familia de las kesteritas que ha atraído gran interés en el desarrollo de celda solares de bajo costo y alta eficiencia El CZTS presenta una estructura cristalina tetragonal, es un semiconductor tipo-*p*, cuenta con un coeficiente de absorción mayor a 1×10^4 cm^{-1} y una energía de banda prohibida de 1.5 eV. Este material ha tenido un gran interés debido a que está compuesto por elementos abundantes en la corteza terrestre y presentan una baja toxicidad, lo que lo hace una alternativa sostenible a materiales más convencionales como el silicio, el teluro de cadmio CdTe y el $CuInGaSe_2$ (CIGS) (En el caso del CdTe presenta un alto riesgo a la salud por su relación a la generación de cáncer. Por otro lado, el CIGS está conformado por dos elementos que tiene una alta demanda y son de alto costo en este caso son el indio (In) y el galio (Ga). Es por el que en los últimos años ha salido algunos materiales llamados emergentes como son los perovskitas hibridas y el CZTS. Este último ha sido sintetizado por diferentes tanto por métodos físicos y químicos, algunos ejemplos pulverización catódica, evaporación térmica.

Antecedentes

El CZTS en forma de película delgada fue reportado por primera vez en 1988 por Nakazawa en la Universidad de Shinshu, empleando la técnica de pulverización catódica resultado unas películas con propiedades ópticas apropiadas para su aplicación en celdas solares. En 1996 Katagiri en el Colegio Nacional de Tecnología de Nagaoka, desarrolla la primera celda solar utilizando como capa activa el CZTS la cual presento una eficiencia de 0.66 %, sintetizando las películas de CZTS por evaporación por haz de electrones y con ayuda de una sulfurización.

La arquitectura de la celda solar fue Vidrio-Mo-CZTS-CdS-AZO. Mas adelante, Friedlmeier, y colaboradores en 1997 en la Universidad de Stuttgart mejoraron el rendimiento de la celda solar obteniendo un 2.7%. Mas adelante en 2008 Katagiri volvió hacer un reporte de una celda solar de CZTS con una eficiencia de 6.67% a través de co-depósitos pulverización catódica, donde estudiaron el efecto de la composición química, siendo uno de los trabajos claves para la popularización del CZTS. En 2010 se logró una eficiencia de 10 % por un grupo de investigación de IBM utilizando un método por solución por hidracina. En 2014 Wang y colaboradores reportaron una eficiencia de hasta un 12.6% empleando también por hidracina, solo que añadieron selenio como sustituto de azufre quedando de la siguiente manera CZTSe. Sin embargo, desde entonces se han hecho grandes esfuerzos para contrarrestar los fenómenos que no hacen aumentar la eficiencia en las celdas solares basadas en CZTS. Los principales efectos negativos, es la formación de fases secundarias durante la cristalización de la fase cuaternaria, por ejemplo, en las propiedades ópticas es la variación de la energía de banda prohibida, donde presentan las siguientes fases secundarias con su respectiva banda de energía prohibida: Cu_2SnS_3 (0.93–1.35 eV), Cu_2S (1.2 eV), and SnS (1.3 eV). En consecuencia, reduciendo el voltaje en corto circuito y afectando directamente a la eficiencia. Por otro, lado ha sido reportado que si la composición química, presenta un enriquecimiento en cobre aumenta la conductividad eléctrica y los portadores de carga haciendo que la movilidad disminuya considerablemente y afecte negativamente a la eficiencia de la celda solar.

Otras de las dificultades experimental, se centran a las pérdidas de azufre o selenio, durante los tratamientos térmicos. Es por esto, que los tratamientos térmicos para formar la fase cuaternaria de CZTS son llevados a cabo en una atmosfera de azufre o selenio. Si esto no fuera de esta manera, daría pie formar fases de óxidos metálicos, lo cual también tienen un efecto negativo en las propiedades ópticas como el aumento de la energía de banda prohibida. Esto dificulta a que el CZTS deba ser tratado térmicamente con atmosferas controladas.

Una de las alternativas para disminuir las fases secundarias es empleando atacantes químicos sobre la superficie de las películas de CZTS como cianuro de potasio (KCN), peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y también ácido clorhídrico (HCl). En el caso del KCN ataca principalmente a fases secundarias de cobre como CuS, el H_2O_2 previene la formación de fases ternarias basadas en Cu y Sn. Por último, el HCl reduce las fases secundarias de ZnS. Estos por procesos de decapados empleando métodos húmedos hacen más complejos los procesos de fabricación de las celdas solares de CZTS y en consecuencia su eficiencia. Por lo que es necesario buscar alternativas que ayuden mejorar y reducir las fases secundarias y monitorearlas con alguna propiedad física como los son las propiedades ópticas o eléctricas.

Actualmente existen diversos métodos de síntesis para obtener CZTS de los más populares podemos encontrar a pulverización catódica la cual es una técnica que se basa en la erosión de un objetivo con ayuda de gas ionizante que es dirigido por un campo eléctrico, esta técnica ha podido registrar películas de CZTS con una alta cristalización y controlando de una gran manera el espesor de sus capas metálicas con sus diferentes objetivos. Sin embargo, durante el proceso de depósito puede presentar perdidas de azufre, orillando a utilizar una variante pulverización catódica reactiva con un gas de ácido sulfhídrico H_2S. Por otro lado, en otra técnica de vacío como lo es la de depósito por pulsación laser (PLD por sus siglas en ingles) para esta técnica es necesario preparar un objetivo de CZTS que será irradiado por el láser y de esta manera ser depositado en el sustrato por la ablación de este y subsecuentemente sometido a un tratamiento térmico. Esta técnica puede controlar en gran medida la estequiometria, baja temperatura de reacción y alta cristalinidad. Por otra parte, se encuentra el depósito por evaporación la cual involucra principalmente precursores metálicos y H_2S para la formación de CZTS, teniendo procesos de depósito rápidos de alrededor unos cuantos minutos. Sin embargo, todos estos procesos presentan altos costos al querer hacerlos escalables de forma industrial debido a los sistemas de alto vacío y complementos complejos.

Una alternativa para buscar procesos escalables a grandes escalas son las técnicas que no involucran vacío como lo son las técnicas por solución química, mencionando algunas se encuentra el espray pirolisis que utiliza una solución que contiene todos los precursores que se necesitan para formar el CZTS, los cuales son depositados sobre un sustrato que a su vez se encuentra en una placa de calentamiento que ayuda a evaporar los solventes que contiene la solución precursora. La versatilidad de esta técnica es que puedes modular a la composición química desde la solución precursora. También podemos encontrar la técnica de electrodeposición que también emplea soluciones de precursores y es posible también controlar la estequiometria de cierta medida. Sin embargo, siempre es necesario contar con un sustrato conductor para llevar el proceso.

Otra técnica que ha reportado síntesis de CZTS es el depósito por baño químico DBQ, por esta técnica se ha reportado el uso de co-depósitos de cada binario que conforma el CZTS debido a la dificultad que sería depositar los 3 binarios precursores en un solo deposito. Por lo tanto, la vía más natural es el uso de co-depósitos. También existen reportes de una técnica que como el método SILAR (por sus siglas en inglés Succesive Ion Reaction Adsorption Layer). Estas dos técnicas por solución química son una alternativa para poder escalar materiales en forma de película delgadas y debido a su bajo costo son populares en la síntesis de CZTS [1][2].

Propuesta Experimental CZTS.

La propuesta experimental consiste en varias alternativas de co-depósitos de tri-capas o bicapas empleando DBQ y/o SILAR. Para ello, es necesario tener la síntesis de las fases binarias o ternarias de CZTS: sulfuro de cobre (CuS), sulfuro de estaño (SnS), sulfuro de zinc (ZnS), sulfuro de cobre zinc (CuZnS) y sulfuro de cobre estaño (Cu_2SnS_3). De forma combinada contamos con los parámetros de síntesis de los tres binarios CuS, ZnS y SnS y de un ternario CuZnS. Esto aumenta la posibilidad al momento de crear capas antes de someterlas a un tratamiento térmico. Donde los materiales necesarios para llevar a cabo esto, es sulfato de cobre ($CuSO_4$), sulfato de zinc ($ZnSO_4$), sulfato de estaño ($SnSO_4$), sulfuro de sodio Na_2S, tiourea, tiocetamida, trietanolamina, hidróxido de sodio NaOH, hidróxido de amonio (NH_4OH) [3] [4][5].

A partir del proceso de DBQ se sugiere que se podrá controlar las diferentes capas binarias a través de las tasas de depósito y el espesor de estas mismas. De igual manera esto se aplicará para el método de SILAR. En la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático del proceso propuesto, este consiste en crear cada capa con alguna de las técnicas en solución como DBQ o SILAR. Las cuáles serán sometidas a un

tratamiento térmico con una atmosfera controlada y será caracterizadas para monitorear de forma indirecta la presencia de fases secundarias con pruebas eléctricas y ópticas.



Figura 1.- Diagrama esquemático para formación de la fase cuaternaria CZTS por DBQ o SILAR.

En la Figura 2 se muestra las otras posibles configuraciones de los procesos de co-depósitos empleando de forma combinada las técnicas de DBQ y el método SILAR, esto dará pie a poder modificar de una mejor manera el espesor de cada una de las capas. Ya que en la formación de diferentes capas o co-depósitos se puede presentar efectos negativos como el desprendimiento de una capa inferior por efecto del pH.

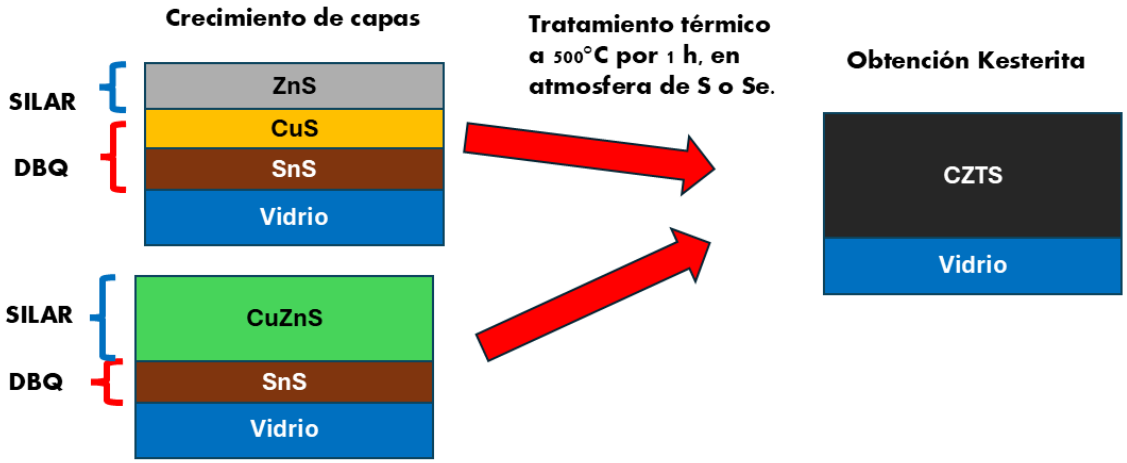


Figura 2.- Diagrama esquemático para formación de la fase cuaternaria CZTS combinando DBQ y SILAR.

Resultados Preliminares para obtener CZTS.

Basado en los parámetros de síntesis de los trabajos previos de D. Cabrera German *et al* (2019,2019 y 2024), se sintetizaron películas de CuS y SnsS por DBQ, y ZnS y CuZnS por el método SILAR. Estas películas fueron caracterizadas de forma óptica a partir de la espectroscopia de Ultravioleta-Visible empleando un equipo Thermo Scientific Evolution 220. Dando como resultado los espectros de transmitancia de forma individual (Figura 3). De esta manera es posible ver las diferencias entre las capas precursosras de CZTS, aunque presenten comportamientos muy diferentes como el porcentaje de transmitancia o las zonas de absorción de cada película. Cuando estas se combinen cuando se fabriquen las bicapas o tricapas, estas propiedades deben de cambiar abruptamente como el porcentaje de transmitancia o la energía de banda prohibida. Sin embargo, hasta el momento es necesario continuar analizando las capas binarias o ternarias.

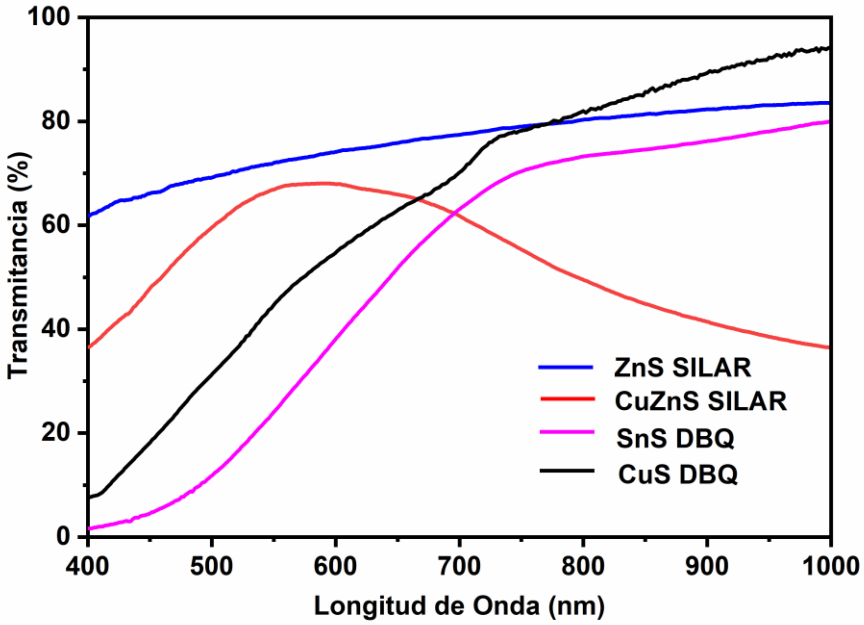


Figura 3.- Diagrama esquemático para formación de la fase cuaternaria CZTS combinando DBQ y SILAR.

Conclusiones.

Para poder llevar a cabo la obtención de CZTS será necesario crear la tricapas o bicapas empleando binarios y ternarios obtenidos por las técnicas en solución de DBQ y SILAR. Además, es necesario llevar a cabo los tratamientos térmicos para que estas mismas capas se sintericen y formen la fase cuaternaria del CZTS. Por lo tanto, es indispensable contar con un sistema tratamiento que cuente con atmósfera controlada para evitar las pérdidas de azufre o selenio intercalando entre las diferentes capas obtenidas por DBQ y SILAR. La parte experimental se encuentras en el desarrollo del sistema de tratamientos térmicos con atmosfera controlada para incorporar azufre o selenio. Para posteriormente analizar de forma eléctrica y óptica.

REFERENCIAS

[1] U. A. Shah *et al.*, "A Deep Dive into Cu 2 ZnSnS 4 (CZTS) Solar Cells: A Review of Exploring Roadblocks, Breakthroughs, and Shaping the Future," *Small*, vol. 20, no. 30, Jul. 2024, doi: 10.1002/smll.202310584.

[2] S. Sengupta, R. Aggarwal, and M. Raula, "A review on chemical bath deposition of metal chalcogenide thin films for heterojunction solar cells," *J. Mater. Res.*, vol. 38, no. 1, pp. 142–153, Jan. 2023, doi: 10.1557/s43578-022-00539-9.

[3] D. Cabrera-German *et al.*, "Assessing the chemical state of chemically deposited copper sulfide: A quantitative analysis of the X-ray photoelectron spectra of the amorphous-to-covellite transition phases," *Appl. Surf. Sci.*, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.03.054.

[4] D. Cabrera-German, M. Martínez-Gil, L. Fuentes-Ríos, Z. Montiel-González, D. A. Mazón-Montijo, and M. Sotelo-Lerma, "Insights into the SILAR Processing of Cu x Zn 1– x S Thin Films via a Chemical, Structural, and Optoelectronic Assessment," *ACS Omega*, vol. 8, no. 50, pp. 48056–48070, Dec. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c06848.

[5] M. S.-L. D. Cabrera-German, J.A. García-Valenzuela, M. Cota-Leal, M. Martínez-Gil, R. Aceves, "Detailed characterization of good-quality SnS thin films obtained by chemical solution deposition at different reaction temperatures," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 89, pp. 131–142, doi: 10.1016/j.mssp.2018.09.009.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

AVANCES DE LA TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LAS TRES ÚLTIMAS DÉCADAS

Frank Romo García, Rafael Verdugo Miranda, Rolando Flores Ochoa, Miguel Martínez Gil
Departamento de Física, Matemáticas e Ingeniería, Universidad de Sonora Campus Navojoa, Lázaro Cárdenas del Rio 100, Navojoa, Sonora 85880, México, 642 425 9950, **frank.romo@unison.mx, rafael.miranda@unison.mx, rolando.flores@unison.mx, miguel.martinezgil@unison.mx**

Rafael García Gutiérrez
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora Campus Hermosillo, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora 83000, México, 642 425 9950,
rafael.gutierrez@unison.mx

RESUMEN

La energía solar fotovoltaica es la tecnología eléctrica solar más utilizada en el mundo en la actualidad. Un conjunto fotovoltaico de 10 m^2 no es menos eficiente por unidad de área que un conjunto de 10 km^2. Esto contrasta con otras fuentes de generación, como los generadores térmicos o generadores eólicos, que pierden eficiencia a medida que se reduce la escala. Una celda solar fotovoltaica se puede definir como un dispositivo electrónico que convierte la luz solar en electricidad. Una sola celda (15 cm^2) es capaz de producir de 4 a 5 W, mientras que un panel o módulo de 1×1.5×0.04 m produce entre 260 a 320 W. En cuanto a materiales utilizados para fabricar celdas solares fotovoltaicas es importante mencionar que el silicio domina el panorama fotovoltaico actual y se pronostica que seguirá siendo la tecnología fotovoltaica líder implementada durante al menos la próxima década. Las celdas solares de silicio constituyen más del 90% de la producción de paneles solares en el mundo. Existen celdas solares basadas en películas delgadas semiconductoras que en la actualidad constituyen aproximadamente el 10 % de la capacidad de producción mundial de módulos fotovoltaicos. Las tecnologías fotovoltaicas comerciales de película delgada están representadas principalmente por teluro de cadmio (CdTe), selenuro de cobre, indio y galio (CIGS) y silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H). Una desventaja clave de los módulos comerciales de película delgada de hoy en día es que tienen una eficiencia promedio comparativamente baja, generalmente en el rango de 12% a 15%, en comparación con 15 % a 21 % para las de silicio. También existen las llamas tecnologías emergentes para sistemas fotovoltaicos como las celdas basadas en sulfuro de cobre, zinc y estaño (CZTS) que representa una alternativa a los CIGS y han alcanzado eficiencias en laboratorio hasta del 12.6 %. También tenemos las celdas de perovskita donde el material de perovskita más ampliamente investigado es el haluro de plomo híbrido orgánico-inorgánico. Esta tecnología muestra eficiencias que avanzan del 10.9 % al 20.1 % en menos de tres años de desarrollo. La tecnología de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) son celdas fotoelectroquímicas que consisten en un armazón inorgánico transparente (típicamente una película de dióxido de titanio nanoporoso) sensibilizado con moléculas de colorante orgánico que absorben la luz (generalmente complejos de rutenio). Si bien la tecnología de silicio domina el mercado fotovoltaico en la actualidad, las tecnologías alternativas están evolucionando rápidamente. La celda solar del futuro puede ser una versión refinada de las celdas comerciales actuales o una tecnología completamente nueva. Además, La aplicación de la nanotecnología en la innovación de dispositivos electrónicos fotovoltaicos y otras áreas de las energías renovables puede ser la tecnología que nos separe de los combustibles fósiles en un futuro cercano.

ABSTRACT

Photovoltaics is the most widely used solar electric technology in the world today. A 10 m^2 photovoltaic array is no less efficient per unit area than a 10 km^2 array. This is in contrast to other generation sources, such as thermal generators or wind generators, which lose efficiency as the scale is reduced. A photovoltaic solar cell can be defined as an electronic device that converts sunlight into electricity. A single cell (15 cm2) is capable of producing 4 to 5 W, while a 1x1.5x0.04 m panel or module produces between 260 to 320 W. Regarding the materials used to manufacture photovoltaic solar cells, it is important to mention that silicon dominates the current photovoltaic landscape and is forecast to remain the leading photovoltaic technology implemented for at least the next decade. Silicon solar cells make up more than 90% of solar panel production worldwide. There are solar cells based on semiconductor thin films which currently make up about 10% of the world's PV module production capacity. Commercial thin film PV technologies are mainly represented by cadmium telluride (CdTe), copper indium gallium selenide (CIGS) and hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H). A key disadvantage of today's commercial thin film modules is that they have comparatively low average efficiency, typically in the range of 12% to 15%, compared to 15% to 21% for silicon. There are also so-called emerging technologies for PV systems such as copper zinc tin sulfide (CZTS) cells which represent an alternative to CIGS and have achieved laboratory efficiencies of up to 12.6%. There are also perovskite cells where the most widely investigated perovskite material is the organic-inorganic hybrid lead halide. This technology shows efficiencies advancing from 10.9% to 20.1% in less than three years of development. Dye-sensitized solar cells (DSSC) technology are photoelectrochemical cells consisting of a transparent inorganic scaffold (typically a nanoporous titanium dioxide film) sensitized with light-absorbing organic dye molecules (usually ruthenium complexes). While silicon technology dominates the photovoltaic market today, alternative technologies are rapidly evolving. The solar cell of the future may be a refined version of today's commercial cells or an entirely new technology. Furthermore, the application of nanotechnology in the innovation of photovoltaic electronic devices and other areas of renewable energy may be the technology that wean us off fossil fuels in the near future.

Palabras claves: Energía Solar, Tecnología fotovoltaica, silicio, películas delgadas, tecnología solar emergente

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se han reducido los costos de la energía solar considerablemente y la capacidad instalada ha crecido muy rápidamente. Sin embargo, hoy en día sólo alrededor del 1% de la generación de electricidad en el mundo proviene de energía solar. Se contemplan tres desafíos principales para lograr una mayor expansión en la utilización de energía solar para la producción de energía eléctrica: desarrollar nuevas tecnologías solares, integrar la generación solar a gran escala en los sistemas eléctricos existentes y diseñar políticas eficientes para apoyar la implementación de la tecnología solar. De modo general, existen dos formas de generar electricidad utilizando energía solar, mediante sistemas fotovoltaicos (PV) y energía solar térmica. Estas dos tecnologías difieren en aspectos importantes. La energía solar térmica utiliza concentradores de energía solar (CSP) mediante arreglos de espejos y torres centrales de concentración. Una planta CSP es una instalación única a gran escala, normalmente con una capacidad de generación de 100 megavatios (MW), que puede diseñarse para almacenar energía térmica y utilizarla para generar energía en horas con poca o ninguna luz solar. Los sistemas fotovoltaicos, por el contrario, pueden instalarse a diferentes escalas, desde plantas de servicios públicos con una capacidad superior a 1 gigavatio (GW) hasta instalaciones residenciales en azoteas con capacidades menores a 10 kilovatios (kW). Además, la tecnología PV puede utilizar toda la radiación solar incidente, mientras que la tecnología CSP utiliza solo la irradiancia directa y, por lo tanto, es más sensible a la radiación solar. La tecnología solar fotovoltaica más utilizada en la actualidad es basada en obleas de silicio cristalino (c-Si), está tecnología tiene la capacidad necesaria para la producción de módulos de c-Si a gran escala. Sin embargo, las tecnologías actuales de c-Si también tienen limitaciones técnicas importantes, como la alta complejidad de fabricación y su baja absorción de luz intrínseca. Como resultado de las limitaciones de la tecnología basada en silicio cristalino ha surgido la necesidad de realizar investigación de alternativas fotovoltaicas. Una de las alternativas a las celdas solares de silicio son las tecnologías de película delgada, principalmente las celdas solares de película delgada basadas en telururo de cadmio (CdTe) y de seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), constituyen aproximadamente el 10% del mercado fotovoltaico en la actualidad y ya son competitivas en términos de costos con el silicio. Desafortunadamente, algunas tecnologías comerciales de película delgada se basan en elementos escasos, lo que hace poco probable que puedan lograr un despliegue a escala de gigas o teravatios a un costo razonable. Varias tecnologías emergentes de película delgada aún se encuentran en la etapa de investigación. Hoy en día se utiliza la nanotecnología para la fabricación de materiales y estructuras de dispositivos novedosos y tienen el potencial de proporcionar un rendimiento superior con una menor complejidad de fabricación y un menor costo de módulo. Sistemas fotovoltaicos ligeros y la compatibilidad con la instalación en formatos flexibles, ofrecen la promesa de permitir reducciones en los costos con tecnologías de película delgada. Además de la tecnología fotovoltaica basada en películas delgadas, también se tiene tecnologías emergentes como las celdas solares de perovskitas, celdas solares orgánicas (OPV), celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC), celdas solares de puntos cuánticos (QDSC), celdas solares de multi-uniones (MJ), entre otras. El objetivo de este trabajo es la divulgación científica de la evolución de la tecnología fotovoltaica a nivel mundial en las últimas tres décadas, abordando los últimos récords reportados de eficiencia para las principales tecnologías fotovoltaicas, su clasificación y los estudios comparativos que se han publicado.

CELDAS FOTOVOLTAICAS BASADAS EN OBLEAS DE SILICIO.

Las celdas solares de silicio cristalino (c-Si) constituyeron aproximadamente el 90% de la capacidad de producción mundial de módulos en los últimos años y son las más estudiadas de todas las tecnologías fotovoltaicas. Las celdas solares de silicio se clasifican como monocristalinas (mono-Si) o policristalinas (poli-Si). Los monocristales normalmente se forman utilizando un proceso llamado Czochralski; los lingotes cilíndricos que se obtienen mediante este proceso se cortan en obleas cuadradas, lo que da como resultado la distintiva geometría de la celda solar de silicio con orillas cortadas. Una variante de alta eficiencia es la heterounión con arquitectura de capa fina intrínseca (HIT), que combina una oblea mono-Si de tipo n con películas delgadas de silicio amorfo. Estas películas pasivan los defectos superficiales y pueden aumentar los voltajes de circuito abierto en un 5% a 10% en comparación con las celdas mono-Si. Las obleas multicristalinas se forman típicamente mediante fundición en bloque a partir de silicio líquido y consisten en granos cristalinos orientados aleatoriamente con tamaños de alrededor de 1 cm^2. Debido a que los límites de grano dificultan la extracción de carga, su presencia en celdas poli-Si reduce el rendimiento en relación con las celdas mono-Si. Una limitación fundamental del mono-Si es su banda prohibida indirecta, que conduce a una absorción de luz débil y requiere obleas con espesores del orden de 100 µm. Los desafíos tecnológicos clave incluyen estrictos requisitos de pureza del material, un factor de forma restringido y procesos de fabricación de celdas. En la figura 1 se muestra el gráfico de la evolución de la eficiencia de las celdas solares de distintas tecnologías fotovoltaicas publicado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) del Departamento de Energía de Estados Unidos de América. En noviembre de 2023 se alcanzó la eficiencia récord de 27.1% (figura 1, en circulo azul rellenado) para una celda solar de mono-Si de heterounión con capa fina intrínseca. Además, una celda solar de mono-Si de arquitectura regular utilizando un concentrador de 93 soles ha alcanzado hasta el 27.6% de eficiencia (figura 1, cuadrado azul medio-rellenado).

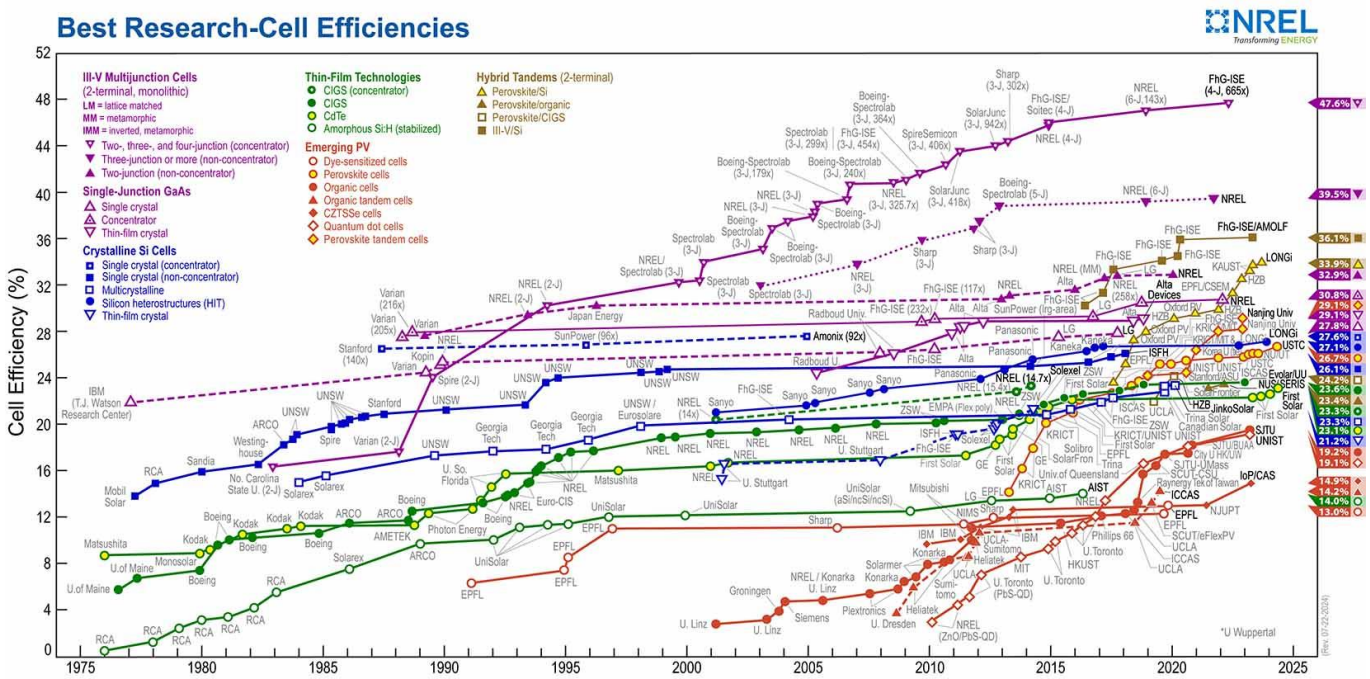


Figura 1. Evolución de la eficiencia de las celdas solares de distintas tecnologías fotovoltaicas por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL)

CELDAS FOTOVOLTAICAS BASADAS EN PELÍCULAS DELGADAS.

Las celdas solares de película delgada se fabrican depositando capas muy delgadas (alrededor de unas cuantas micras) de diferentes materiales. Las tecnologías de película delgada comerciales están representadas principalmente por el teluro de cadmio (CdTe), el seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) y el silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H). Estos materiales absorben la luz de manera 10 a 100 veces más eficiente que el silicio, lo que permite el uso de películas muy delgadas. La utilización de poca materia prima para su fabricación es clave de estas tecnologías para obtener ventaja con la tecnología de silicio. Las fábricas avanzadas pueden producir módulos de película delgada de una manera altamente optimizada y automatizada, lo que conduce a bajos costos de producción.

Una película de 300 nanómetros (nm) de a-Si:H puede absorber aproximadamente el 85 % de los fotones solares por encima del ancho de banda en una sola pasada, lo que permite la producción de celdas solares ligeras y flexibles. Una celda a-Si:H se puede combinar con celdas basadas en aleaciones de silicio-germanio amorfo (a-SiGe) para formar una celda multiunión (MJ). La mayoría de los módulos a-Si:H comerciales actuales utilizan celdas MJ. A pesar de que el silicio es barato, abundante y no tóxico, las celdas de a-Si:H solo son adecuadas para aplicaciones de pequeña escala y bajo consumo, debido a su susceptibilidad a la degradación inducida por la luz (conocida como efecto Staebler-Wronski) y su baja eficiencia en comparación con otras tecnologías de película delgada limitan su adopción en el mercado. El récord de eficiencia para una celda de a-Si:H es de 14% registrado en mayo del 2016. La figura 2 muestra el gráfico del NREL resaltando las tecnologías de película delgada. En la figura 2 con el circulo verde sin relleno se puede identificar el avance de las celdas a-Si:H.

El teluro de cadmio es la tecnología fotovoltaica de película delgada más utilizada en todo el mundo. El CdTe es un semiconductor favorable para la captación de energía solar, con una fuerte absorción en todo el espectro solar y una banda prohibida directa de 1.45 eV. Eficiencias récord del 23.1% (figura 1, circulo verde con relleno amarillo). Los procesos de fabricación del CdTe resultan en un alto rendimiento y ofrecen costos por modulo más bajos de cualquier tecnología fotovoltaica del mercado actual, aunque se requieren temperaturas de procesamiento relativamente altas. La toxicidad del cadmio y la escasez de telurio han motivado la investigación de materiales alternativos que presentan una facilidad de fabricación similar, pero dependen de elementos abundantes y no tóxicos.

El seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) es un semiconductor compuesto con una banda prohibida directa de 1.1 a 1.2 eV. Al igual que el CdTe, las películas de CIGS se pueden depositar mediante una variedad de técnicas basadas vapores químicos o solución. Además, los depósitos pueden realizarse sobre sustratos flexibles, metal o poliimida, favorables para aplicaciones fotovoltaicas integradas en edificios y otras aplicaciones no convencionales. Las celdas solares CIGS exhiben una alta resistencia a la radiación, una propiedad necesaria para aplicaciones espaciales. Las eficiencias récord se sitúan en el 23.6% registrada en mayo del 2023 para las celdas de laboratorio. En la figura 2 se muestra el dato de la celda CIGS récord en un círculo verde rellenado, Sin embargo, existen importantes desafíos que hay que considerar como las propiedades de la película, la escases de indio, límites de grano, un bajo voltaje de circuito abierto y la dificultad para producir celdas MJ de alta calidad.

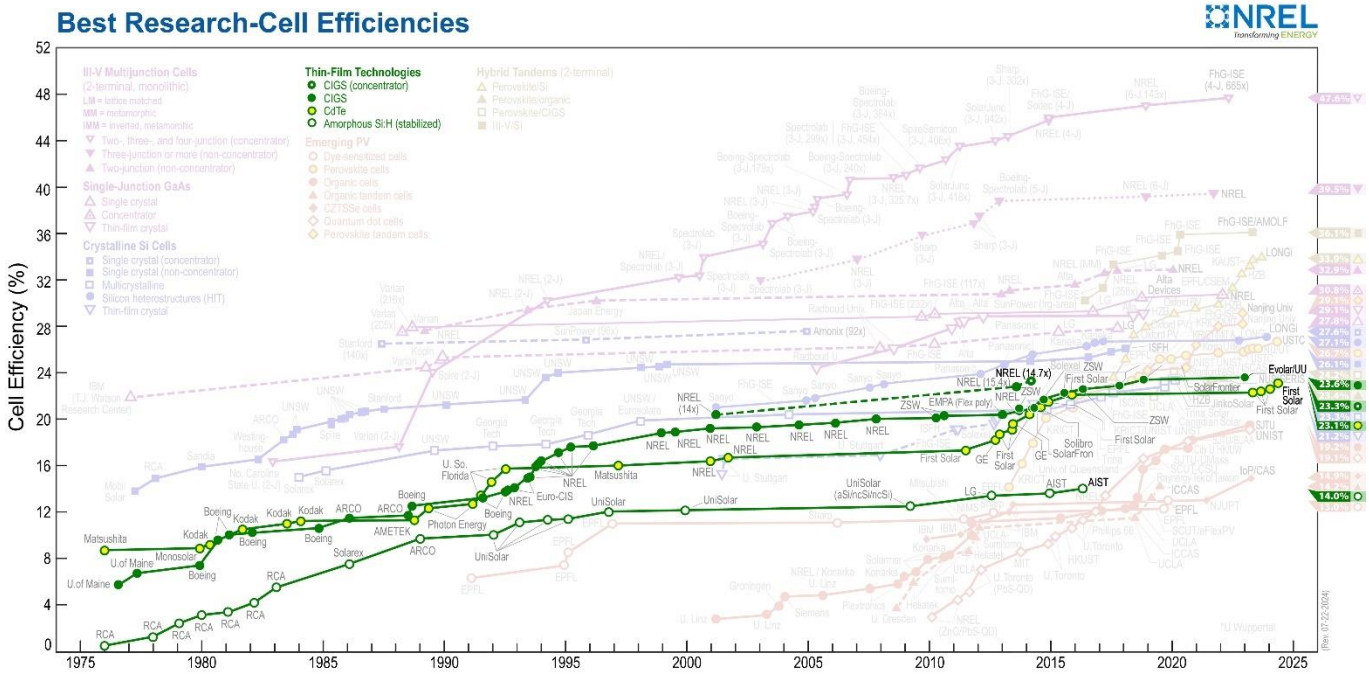


Figura 2. Gráfico del NREL resaltando las tecnologías de película delgada

TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS EMERGENTES

El sulfuro de cobre, zinc y estaño (CZTS) es una alternativa interesante a las celdas CIGS, ya que los materiales con los que se fabrican son abundantes en el planeta. Sin embargo, hay que considerar que existe un desafío clave para la fabricación de las celdas CZTS que implica la gestión de una clase de defectos conocidos como desorden de cationes: la sustitución no controlada de cationes de Cu y Zn crea defectos puntuales que pueden dificultar la extracción de carga y reducir el voltaje de circuito abierto. Las eficiencias de celdas de laboratorio con récord certificado en abril del 2023 alcanzaron el 14.9%. . La figura 3 muestra el gráfico del NREL resaltando las tecnologías de Emergentes. En la figura 3 se muestra el dato de la eficiencia récord registrada de las CZTS utilizando un rombo de color rojo rellenado.

Las celdas solares de perovskita han retomado importancia en la investigación debido a que mostraron un sustancial avance en su eficiencia pasando del 10.9% al 26.7% en los últimos cinco años de desarrollo. El comportamiento del avance de la eficiencia se muestra en la figura 3 utilizando un círculo rojo relleno de amarillo para identificar este tipo de tecnología. Las celdas de perovskita iniciaron a partir de celdas solares sensibilizadas con colorante de estado sólido. El término "perovskita" se refiere a la estructura cristalina de la película que absorbe la luz, y el material de perovskita más ampliamente investigado es el híbrido orgánico-inorgánico de haluro de plomo. Las películas policristalinas se pueden formar a bajas temperaturas por depósito de soluciones químicas. Las ventajas clave de esta clase de material incluyen longitudes de difusión de portadores de carga largas, bajas pérdidas por recombinación, bajo costo de materiales y el potencial para el ajuste de la banda prohibida por sustitución de cationes o aniones. Sin embargo, los desafíos tecnológicos clave para el desarrollo de esta tecnología fotovoltaica incluyen el control de la morfología de la película y las propiedades del material, la alta sensibilidad a la humedad, la estabilidad y el uso de plomo tóxico.

La energía fotovoltaica orgánica (OPV) utiliza pequeñas moléculas orgánicas o polímeros para absorber la luz incidente. Estos materiales consisten principalmente en elementos abundantes en el planeta y se pueden ensamblar en películas delgadas mediante métodos de depósito de bajo costo, como la impresión por inyección de tinta y la evaporación térmica. Las tecnologías OPV de moléculas pequeñas y polímeros, al igual que las celdas de perovskita han registrado importantes avances en los últimos cinco años pasando de una eficiencia de 12.3% al 19.2% para el 2023. En la figura 3 se muestra el avance de las celdas orgánicas identificadas con un círculo rojo rellenado. Sin embargo, la eficiencia de las celdas de gran área sigue siendo mucho menor. Las principales preocupaciones incluyen el transporte ineficiente de pares electrón-hueco excitados y portadores de carga, bajo rendimiento en grandes áreas, poca estabilidad a largo plazo bajo iluminación y límites de eficiencia final comparativamente bajos.

La tecnología de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) son celdas fotoelectroquímicas que consisten en un armazón inorgánico transparente sensibilizada con moléculas de colorante orgánico que absorben la luz. las DSSC suelen utilizar un electrolito líquido para transportar iones a un contraelectrodo de platino a diferencia de las tecnologías fotovoltaicas convencionales que se basan en semiconductores de estado sólido para transportar electrones y generar una corriente a partir de fotones. El registro de eficiencia más alto que se ha reportado para las DSSC es de 13% registrado en 2020. En la figura 3 se muestra el avance en la eficiencia de las DSSC utilizando un circulo con contorno rojo y relleno blanco para identificarla. La ventaja de esta tecnología es que se pueden beneficiarse de materiales de bajo coste, un montaje sencillo y la posibilidad de módulos flexibles. Los principales retos implican una estabilidad limitada a largo plazo bajo iluminación,

estabilidad térmica, una baja absorción en el infrarrojo cercano y bajos voltajes de circuito abierto.

La energía fotovoltaica de puntos cuánticos (QDSC) utiliza nanocristales procesados en solución, también conocidos como puntos cuánticos (QD), para absorber la luz. La capacidad de ajustar el espectro de absorción de los nanocristales permite la recolección eficiente de fotones del infrarrojo cercano. El rápido avance en la nanotecnología ha permitido que las tecnologías QDSC estén mejorando constantemente, lo que ha permitido que estas celdas hayan duplicado su eficiencia en los últimos diez años, registrando un récord en 2023 de 19.1% para una celda de laboratorio. En la figura 3 se observa la eficiencia las QDSC identificadas con un rombo con contorno rojo y relleno blanco. Sin embargo, hay que lidiar con importantes desafíos que incluyen una comprensión completa de la química de superficie de los puntos cuánticos, baja movilidad de los portadores de carga y voltajes bajos de circuito abierto.

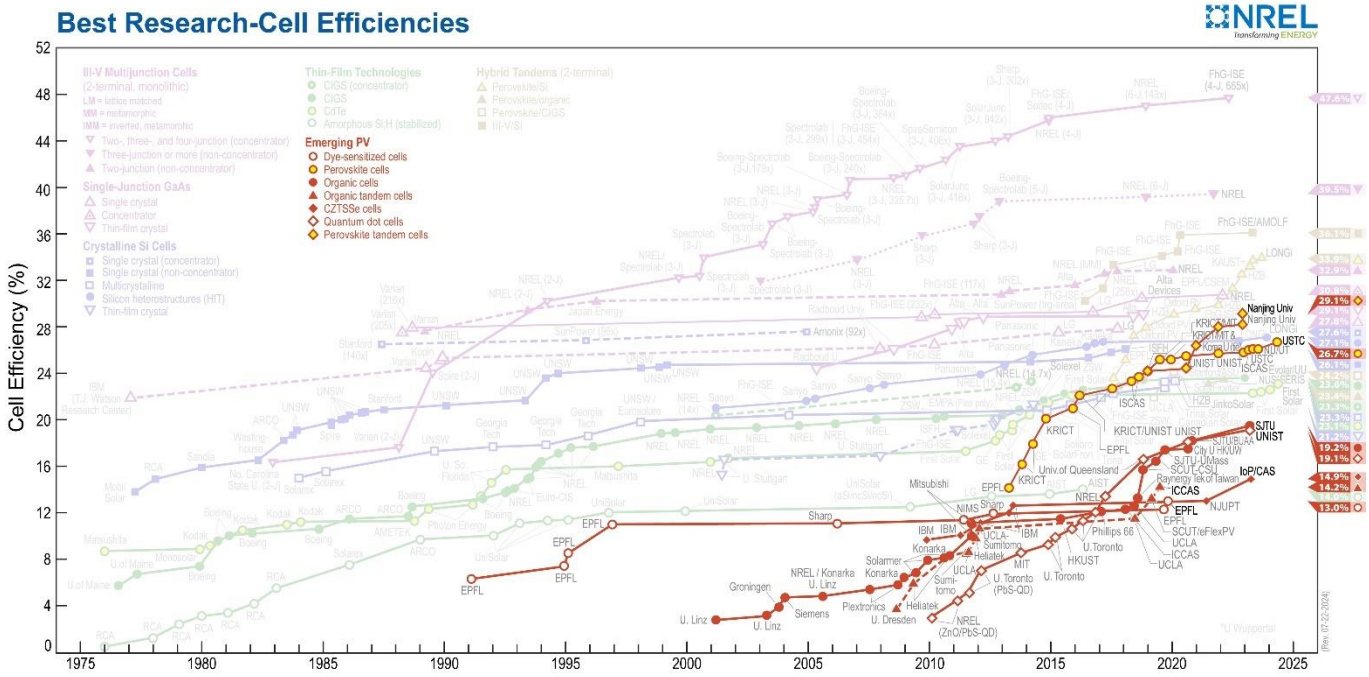


Figura 3. Gráfico del NREL resaltando las tecnologías fotovoltaicas emergentes.

CELDAS SOLARES DE MULTIUNIÓN III-V

Las celdas solares de multiunión III-V (MJ III-V) o también conocidas como tándem se basan en el apilamiento de distintas configuraciones de materiales semiconductores basados en elementos de la table periódica del grupo III y del grupo V para aprovechar distintas porciones del espectro solar y realizar el efecto fotovoltaico por separado en cada capa para después sumarlo en la eficiencia total de la celda. Los elementos del grupo III que se utilizan principalmente son aluminio, galio e indio y se combinan con el arsénico y fósforo para formar compuestos semiconductores con distintos niveles de banda prohibida. Esta tecnología de MJ es la tecnología fotovoltaica que mayor eficiencia ha presentado a lo largo de la historia. En la figura 4 se aprecia el gráfico del NREL resaltando las tecnologías de MJ III-V. En la figura 4 se puede identificar con un triángulo de color morado el récord de eficiencia de 32.9% registrado en 2020 para dos uniones de basados en capas de GaInP/GaAS. También, se puede observar el récord para tres uniones basadas en GaInP/GaAs/GaInAs mostrando una eficiencia de 39.5% registrado en 2021 y se puede identificar en el gráfico con un triángulo de color morado invertido. Es importante mencionar que esos tipos de celdas pueden trabajar a altas concentraciones de energía solar mediante espejos y aumentar aún más su eficiencia como se observa en la figura 4 para las eficiencias de MJ III-V con concentración identificado con un triángulo invertido con contorno morado y relleno blanco se observa que la eficiencia más alta obtenida es de 47.1% alcanzada por una celda de más de cuatro uniones basadas en distintas configuraciones de AlGaInP/AlGaAs/GaAs/GaInAs.

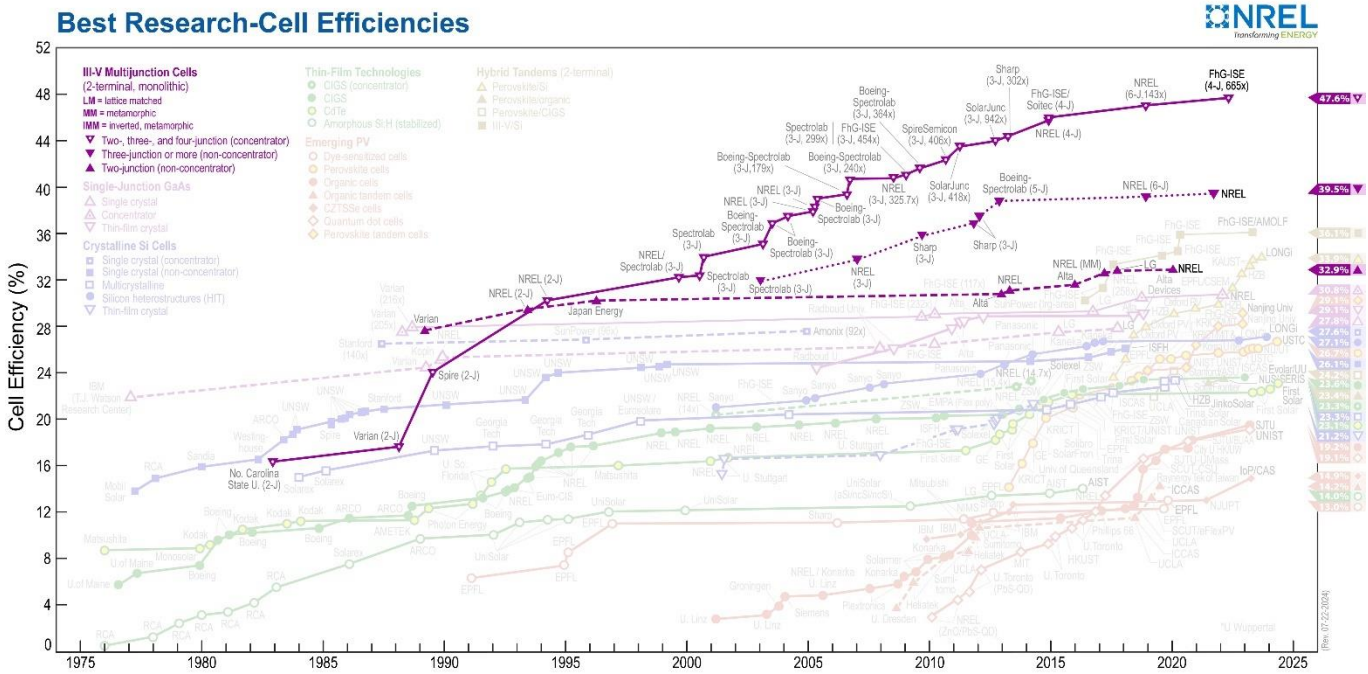


Figura 4. gráfico del NREL resaltando las tecnologías de MJ III-V.

CONCLUSIONES

La energía solar es un recurso energético ilimitado que puede y debería ser la primera opción como fuente externa de energía para la humanidad. La investigación en materiales está realizando esfuerzos para desarrollar nuevas tecnologías en el área de energías renovables o mejorar la tecnología existe. Si bien la tecnología de silicio domina el mercado fotovoltaico en la actualidad, las tecnologías alternativas están evolucionando rápidamente. La celda solar del futuro puede ser una versión refinada de las celdas comerciales actuales o una tecnología completamente nueva. La aplicación de la nanotecnología en la innovación de dispositivos electrónicos fotovoltaicos y otras áreas de las energías renovables puede ser la tecnología que nos separe de los combustibles fósiles.

REFERENCIAS

Jean, J., P.R. Brown, R.L. Jaffe, T. Buonassisi, and V. Bulovic. “Pathways for Solar Photovoltaics.” Energy & Environmental Science 8, no. 4 (2015): 1200–1219. http://dx.doi.org/10.1039/C4EE04073B Ray R. (1981). Nonlinear dynamics model of a solar steam generator, Solar Energy, Vol. 26, No. 4, p. 297-306.

Energy Initiative Massachusetts Institute of Technology. “The future of solar energy an interdisciplinary MIT study” (2015) ISBN (978-0-928008-9-8).

Bony, L. S. Doig, C. Hart, et al. *Achieving Low-Cost Solar PV: Industry Workshop Recommendations for Near-Term Balance of System Cost Reductions*, Rocky Mountain Institute. (September 2010). http://www.rmi.org/Content/Files/BOSReport.pdf

National Renewable Energy Laboratory Technical Report. NREL (agosto 2024). https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

Martin A. Green et al. “Solar cell efficiency tables (Version 61)”. Prog Photovolt Res Appl. 2023; 31:3–16. Wiley. DOI: 10.1002/pip.3646

Martin A. Green et al. “Solar cell efficiency tables (Version 62)”. Prog Photovolt Res Appl. 2023; 31:651–663. Wiley. https://doi.org/10.1002/pip.3726

Martin A. Green et al. “Solar cell efficiency tables (Version 63)”. Prog Photovolt Res Appl. 2024; 32:3–13.. Wiley. DOI: 10.1002/pip.3750

Energía y Medio Ambiente/ Solar Térmica

ID	TÍTULO	PONENTE
16100	Batería Ni-Zn base cemento portland para el almacenamiento de energía eléctrica provenientes de fuentes renovables.	Carlos Paulino Barrios
16142	La nanotecnología en las energías renovables: problemas y soluciones.	David Eduardo Márquez

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

BATERÍA Ni-Zn BASE CEMENTO PORTLAND PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA PROVENIENTES DE FUENTES RENOVABLES

C.P. Barrios Durstewitz*, R.E. Núñez Jaquez, S.E. González Hernández, S.K. Luna Arellanes, M.A. López
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Pról.
Ángel Flores S/N, C. U., C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa, México,Teléfono 668 812 7641,
dirección de e-mail: durstewitz@uas.edu.mx

J.A. Cabral Miramontes
Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIA).

RESUMEN

La intermitencia en algunas de las fuentes de energía renovables, como la solar y eólica, es un problema que hace necesario el uso de un sistema de almacenamiento de la energía para garantizar un suministro y aprovechamiento continuo a partir de estas fuentes. Recientemente se ha propuesto el utilizar edificaciones para el almacenamiento de la energía eléctrica, aprovechando la gran área exterior con la que cuentan, convirtiendo las paredes en dispositivos de almacenamiento como capacitores o celdas electroquímicas (baterías). En el presente trabajo se presenta una descripción de la construcción y evaluación de un prototipo de batería con matriz de pasta de cemento para aplicaciones de baja potencia. En su fabricación se emplea fibra de carbono recubierta de níquel y zinc a través del proceso de electro-deposito. Como electrolito se empleó polímero súper-absorbente disperso en la matriz de pasta de cemento. El diseño de la batería de pasta de cemento se basa en la forma por capas o tipo sándwich. Se evaluó el desempeño eléctrico de esta batería mostrando que alcanzó un voltaje de circuito abierto de 0.597 V y una densidad de energía de 5.29 mWh/m^2.

ABSTRACT

The intermittency in some renewable energy sources, such as solar and wind, is a problem that makes it necessary to use an energy storage system to guarantee continuous supply and use from these sources. Recently, it has been proposed to use buildings to store electrical energy, taking advantage of the large outdoor area they have, converting the walls into storage devices such as capacitors or electrochemical cells (batteries). This work presents a description of the construction and evaluation of a battery prototype with a cement paste matrix for low power applications. In its manufacture, carbon fiber coated with nickel and zinc is used through the electro-deposition process. As electrolyte, superabsorbent polymer dispersed in the cement paste matrix was used. The design of the cement paste battery is based on the layered or sandwich shape. The electrical performance of this battery was evaluated showing that it reached an open circuit voltage of 0.597 V and an energy density of 5.29 mWh/m^2.

Palabras claves: Batería, Cemento, Fibra de carbono, Recubrimiento electrolítico, Polímero super absorbente, Zn-Ni.

INTRODUCCIÓN

La intermitencia en algunas de las fuentes de energía renovables, como la solar y eólica, es un problema que hace necesario el uso de un sistema de almacenamiento de la energía para garantizar un suministro y aprovechamiento continuo a partir de estas fuentes. En años recientemente se ha propuesto el utilizar edificaciones para el almacenamiento de la energía eléctrica, aprovechando la gran área exterior con la que cuentan, convirtiendo las paredes en dispositivos de almacenamiento como capacitores o celdas electroquímicas (baterías). El tema de las baterías base cemento son un campo poco explorado pero emergente de investigación y desarrollo en el campo del almacenamiento de energía, aunque se encuentran en las etapas iniciales de desarrollo, se han llevado a cabo diversas investigaciones y experimentos con el objetivo de evaluar la viabilidad y el potencial como alternativa a las baterías convencionales. Las baterías base cemento tienen un gran potencial de uso y aplicaciones debido a que la energía que producen se puede clasificar en “energía renovable”.
En el contexto de la investigación y desarrollo de baterías basadas en cemento, se han explorado diversas composiciones y diseños con el objetivo de mejorar su rendimiento y eficiencia. Algunos de los aspectos clave de estas baterías incluyen la selección de electrolitos, la incorporación de materiales conductores, como la fibra de carbono, y la optimización de la estructura para aumentar la densidad de energía y la durabilidad [1,2].

Para poder aplicar a desarrollar estas baterías de manera segura es necesario vencer distintos retos basados la mejora de la conductividad iónica para superar el desafío de la baja conductividad iónica del cemento basado en el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$, solucionando lo anterior, añadiendo materiales con alta conductividad energética tales como carbonos, óxidos metálicos o polímeros conductores con el objetivo de mejorar la conductividad iónica del cemento [3]. En el presente trabajo se presenta un estudio del desempeño eléctrico de una batería Ni-Zn con matriz pasta de cemento.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El diseño de la batería base cemento consistió en una celda tipo sándwich como se puede apreciar en la figura 1. Para su fabricación se empleó cemento portland compuesto CPC 30R con una relación agua/cemento de 0.6, las dimensiones de la batería fueron de 100 mm x 100 mm con una estructura de tres capas, cada una de 5mm de espesor. Una capa corresponde al cátodo conformado por pasta cemento y fibra de carbono recubierta con níquel a través del proceso de electrodeposición, la capa intermedia o separador electrolítico consistió en

una pasta de cemento en la cual el agua de amasado consistió en una solución de LiOH y KOH. La tercera capa conforma el ánodo, donde también se mezcló el cemento portland con fibra de carbono recubierta con zinc. Como colectores de corriente eléctrica en la celda se utilizaron listones de malla de titanio MMO. Se fabricaron dos celdas con la diferencia que, a una de ellas de forma adicional se incorporó en la mezcla del separador electrolítico un polímero superabsorbente (PSA) en polvo con una proporción en peso de 10% en base al peso de agua y evaluar el desempeño de la batería al agregar el PSA en el separador.

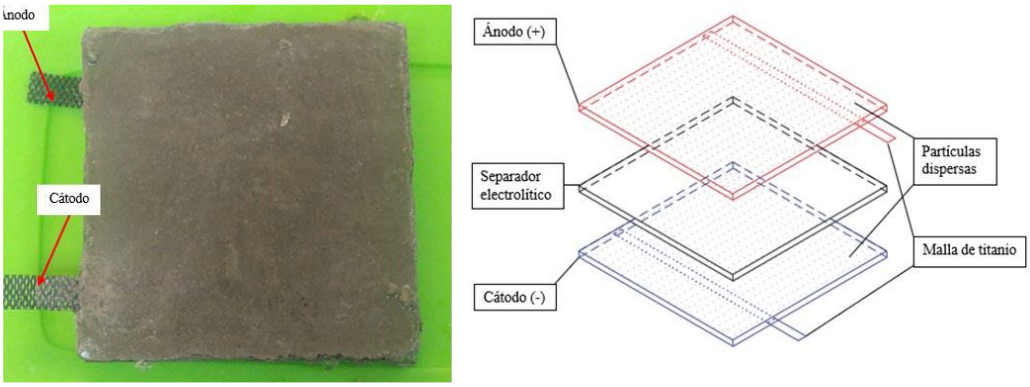


Figura 1. Estructura de la batería base cemento.

Los ensayos realizados para evaluar el desempeño de las baterías base cemento fueron los siguientes.

Ciclos de carga y descarga (Ciclabilidad)

La realización de múltiples ciclos de carga y descarga permite evaluar la estabilidad y la capacidad de la batería a lo largo del tiempo. Y en el caso específico de las baterías base cemento, estos ciclos de carga y descarga son importantes para evaluar su comportamiento electroquímico, la eficiencia de los materiales utilizados y la estabilidad de la interfaz electrodo-electrolito. Esto permite optimizar el diseño de las baterías y mejorar su rendimiento y durabilidad [6]. Al medir la carga de la batería, se determina la cantidad de energía que puede almacenar en un período de tiempo específico. Esto es importante para conocer la capacidad de la batería y determinar si cumple con los requisitos de energía necesarios para su aplicación. Por otro lado, medir la descarga de la batería proporciona información sobre cómo se comporta al liberar energía y cuánto tiempo puede suministrar una corriente constante antes de agotarse. Esta información es crucial para determinar la autonomía de la batería y su capacidad para alimentar dispositivos o sistemas durante un período determinado.

Para evaluar el rendimiento de la batería basada en cemento, se llevó a cabo un proceso de carga y descarga. En la fase inicial de carga, se suministró una corriente rectificada de 1 voltio durante un período de 60 minutos. Posteriormente, en la fase de descarga, se midió el voltaje utilizando un Protoboard y una resistencia de 100 Ω, con una potencia de 1 V, durante un lapso de 120 minutos. Es importante destacar que se recomendó sumergir la batería en agua, lo que permitiría que el hidrogel absorbiera una mayor cantidad de humedad, mejorando así la conductividad iónica. Durante este proceso, la corriente fluía a través de la resistencia eléctrica, lo que resultaba en una estabilización de las mediciones.

La forma de analizar los resultados es a través de una tabla que contenga el total de ciclos, la capacidad, la energía que emite y la densidad de energía de la batería se calculará con las siguientes ecuaciones:

$$Capacidad = \int_{to}^{t} I(t)\,dt\ [=]\ mAh \qquad (1)$$

Donde

$I\ [=]\ corriente\ en\ mA$

$t\ [=]\ tiempo\ en\ horas$

$$Energía = \int_{to}^{t} P\,dt = \int_{to} \left(R\,I^2\,(t)\right) dt = R\int_{to}^{t} I^2\,(t)\,dt\,[=]\,Wh \qquad (2)$$

Donde

$I\,[=]\,corriente\ en\ A$

$t\,[=]\,tiempo\ en\ horas$

$P\,[=]\,potencial\ en\ V$

Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

Para la batería considerada en este trabajo se realizó un análisis mediante la EIS con los siguientes parámetros: una amplitud de señal de voltaje de 20mV, un barrido de frecuencia de 50kHz a 100mHz, el área de los electrodos se consideró como 100 cm^2 y 60 puntos por ensayo. El equipo empleado para la obtención de los datos fue un potenciostato Field Machine, marca ACM Instruments. La conexión se realizado de la siguiente manera: en el polo (+) de la batería se conectó el electrodo de trabajo WE y en el polo (-) de la batería se conectó el electrodo auxiliar (contraelectrodo) y el electrodo de referencia. El análisis y ajuste de los datos obtenidos al circuito equivalente, mostrado en la Figura 2, se llevó a cabo utilizando el paquete EIS Spectrum Analyser.

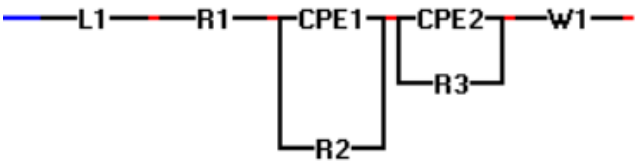


Figura 2. Circuito equivalente de la batería**.**

En la Figura 2, se muestra el circuito equivalente empleado para el ajuste de los datos experimentales obtenidos de EIS, donde L1 es la inductancia relacionada con los cables y electrodos, R1 corresponde a la resistencia Rb, CPE1 es la capacitancia de la superficie de film en los electrodos (CSEI), R2 la resistencia de las especies absorbidas en la superficie (RSEI), CPE2 la capacitancia de la doble capa electroquímica asociada a la transferencia de carga, R3 es la resistencia a la transferencia de carga en lo os electrodos, W1 es la impedancia de Warburg debido a la difusión de las especies activas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al construirse la batería base cemento, se observó que con el PSA se puede mejorar la conductividad iónica del electrolito de cemento, lo que resulta en una mayor eficiencia de la batería, por ello se desarrollaron dos tipos de baterías. Para medir el desempeño de las baterías base cemento se propusieron dos tipos de pruebas como herramientas importantes para medirlo e identificar los posibles problemas, como la degradación de los electrodos, o la perdida de la capacidad de almacenamiento. Para ello se utilizaron las pruebas de carga descarga y la espectroscopia de impedancia electroquímica. Durante el ciclo de carga, se aplica una corriente controlada a la batería para cargarla a su capacidad máxima. Se monitorea el voltaje y la corriente durante este proceso para evaluar cómo la batería se carga y retiene la energía. Se registran los datos de carga, como la capacidad total alcanzada y el tiempo requerido para cargar la batería por completo.

La prueba de impedancia, por otro lado, evalúa la resistencia interna de la batería. Se aplica una señal de frecuencia específica a la batería y se mide la respuesta de impedancia. Esto proporciona información sobre la calidad de los materiales y la integridad de los componentes internos de la batería.

Ciclos de carga y descarga

El periodo de carga de la batería fue de 60 minutos a 1 V y la descarga fue de 120 minutos, con un total de 16 horas a la descarga y ocho horas de carga, con un total de 24 horas de ciclos carga descarga, la Gráfica 1 muestra el rendimiento de la batería sin PSA de los ocho ciclos de carga y descarga. El rendimiento medio de la batería en los ocho ciclos fue de 0.37 mAh y se detalla en la Tabla 2 donde se analizan tres factores esenciales, la capacidad de la batería, la energía que esta emite.

En la figura 3 se observan los ocho ciclos de carga descarga de la batería base cemento sin PSA, se observa que la corriente es variable debido a que no se reguló la corriente a la carga con una resistencia, caso contario del voltaje, ya que el potencial siempre fue el mismo debido a distintos factores como:

La capacidad residual, que consiste en que después de cada ciclo de carga y descarga, puede haber una pequeña cantidad de capacidad residual en la batería. Esto puede afectar la corriente de carga en el siguiente ciclo, ya que la batería no se carga desde cero.

Pérdida de capacidad energética, ya que, con el tiempo y el uso repetido, las baterías pueden experimentar una pérdida gradual de capacidad. Esto significa que la cantidad de carga que la batería puede almacenar disminuye con el tiempo, lo que puede afectar la corriente

de carga en cada ciclo.

Variaciones en la resistencia interna, ya que las baterías tienen una resistencia interna que puede variar con el tiempo y las condiciones de uso. Esta resistencia puede afectar la corriente de carga, ya que una resistencia más alta puede limitar la cantidad de corriente que fluye hacia la batería.

Condiciones de carga donde el método y las condiciones de carga utilizados pueden influir en la corriente de carga. Factores como la tensión de carga, la temperatura y la duración de la carga pueden afectar la corriente de carga en cada ciclo.

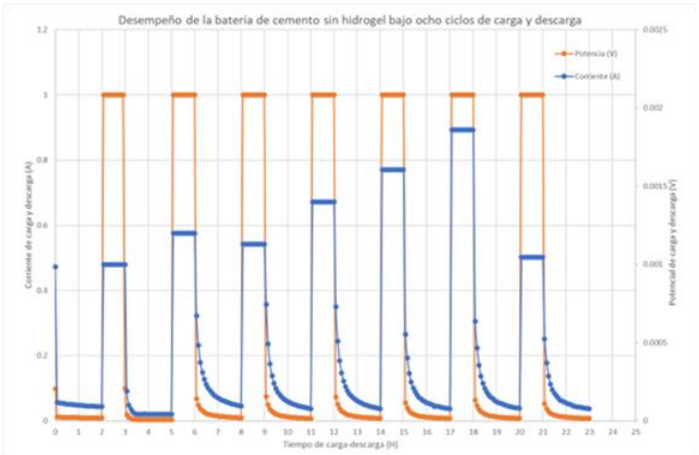


Figura 3. Ciclos de carga descarga de la batería base cemento Ni-Zn sin PSA con una resistencia de 100 Ohm 1watt.

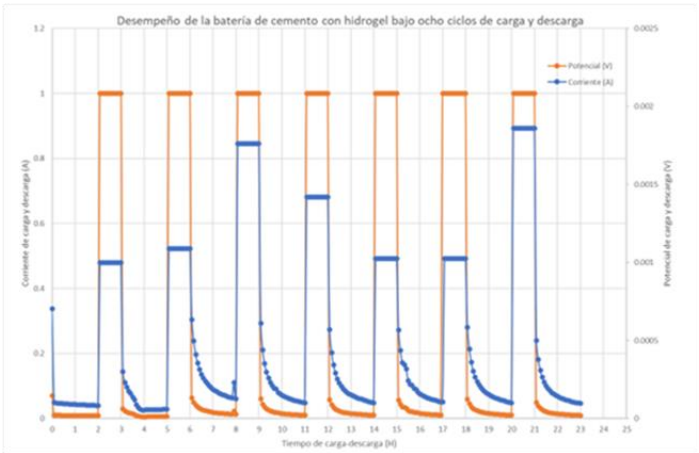


Figura 4. Ciclos de carga descarga de la batería base cemento Ni-Zn con PSA con una resistencia de 100 Ohm 1watt

En la figura 4 se muestran los ciclos de carga descarga de la batería base cemento Ni-Zn con PSA con una resistencia de 100 Ohm 1watt. Los ciclos de carga y descarga son similares a los que no contienen el PSA, que consiste en realizar la prueba durante 60 minutos de carga y 120 minutos de descarga con una capacidad de la batería es de 0.39 mAh durante los ocho ciclos de prueba.

La Tabla 1 muestra de forma detallada el desempeño general de las baterías en los ciclos de carga descarga, teniendo en cuenta tres factores esenciales, la capacidad de la batería, la energía que esta emite y finalmente la densidad energía total de cada ciclo, obteniendo 0.39 mAh, 0.042 mWh y 4.24 mWh/m^2 respectivamente. Los datos anteriores fueron obtenidos a través de una media aritmética durante el total de los ciclos carga y descarga. Los dos primeros ciclos se realizaron en seco, es decir, sin estar en el agua.

Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

En las Figuras 5 y 6 se muestran los diagramas de Nyquist de la batería. Se evaluó el efecto que tiene en el desempeño de la batería la adición de un PSA en el separador, al considerar dos estados al desmolde de la batería y después de cargar la batería aplicando un voltaje de 1 V durante un tiempo de carga de 2 horas.

En ambos casos se observa que al desmolde en la región de bajas frecuencias tiende a presentarse un comportamiento difusivo caracterizado por la línea recta a un ángulo de 45°, mientras que a altas frecuencias se presenta un semicírculo que intercepta el eje real indicando la resistencia de la celda (Rb), en el rango de frecuencias medias no se aprecia el segundo semicírculo. A la carga en la celda se aprecia un cambio en el diagrama, el cual tiende a moverse hacia el lado derecho del eje real y la aparición de una deflexión de la impedancia

compleja en el rango de frecuencias medias, siendo este un indicativo de un mayor SOC.

Tabla 1. Rendimiento de las baterías Ni-Zn con y sin PSA con ocho ciclos de carga y descarga. Cada ciclo de carga consiste en 60 minutos y de descarga de 120 minutos**.**

Ciclo de descarga	Capacidad de la batería (mAh)		Capacidad de la batería (mAh)		Densidad de energía* (mWh/m2)	
	Sin PSA	Con PSA	Sin PSA	Con PSA	Sin PSA	Con PSA
1	0.2398	0.20704	0.0061	0.00368	0.606300	0.368370
2	0.1804	0.25383	0.0147	0.01190	1.470500	1.189600
3	0.5469	0.54692	0.0689	0.06890	6.890000	6.890000
4	0.4894	0.49308	0.0507	0.03840	5.073900	3.840400
5	0.0384	0.03840	0.0546	0.05464	5.464100	5.464100
6	0.4787	0.52646	0.0717	0.04748	7.165000	4.747500
7	0.5263	0.51337	0.0834	0.04701	8.336800	4.701400
8	0.4698	0.50675	0.0732	0.06764	7.320300	6.764000

En la Tabla 2 se muestran los resultados del ajuste de los datos de impedancia obtenidos del ensayo, en el cual se aprecia que la R1 correspondiente a la Rb tiende a incrementarse al cargar la batería, tanto en el caso de la batería sin PSA como en la que contiene PSA. En cuanto a R3, el cual corresponde a Rct se observa que en el caso sin PSA se mantiene en el orden de 1100 Ohm-cm2, tanto al desmolde como después de la carga; pero en el caso que contiene PSA en separador se parecía que hay una disminución de Rct, en el orden de los 700 Ohm-cm2 lo que indica que se logra un mayor SOC. Esto se puede corroborar también con el potencial de celda (Ecell), en el cual al desmolde sin PSA se obtuvo un valor de 177 mV al aplicar la carga se incrementó a 434.47 mV, pero al adicionar el PSA al desmolde se tuvo un Ecell de 294.4 mV y al cargar se alcanzó un valor de 672.81mV. Por lo cual se puede observar que la adición del PSA en el separador mejoro el desempeño electroquímico del sistema.

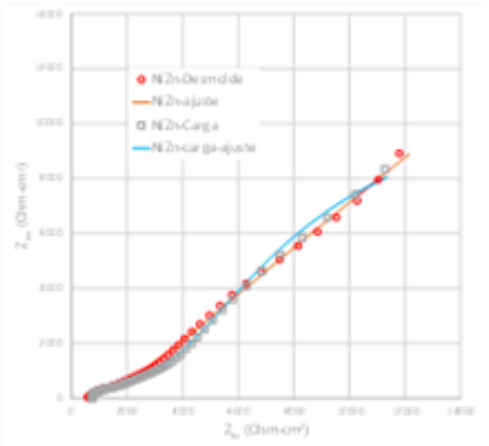


Figura 5. Diagrama EIS de Nyquist de batería Ni-Zn sin PSA**.**

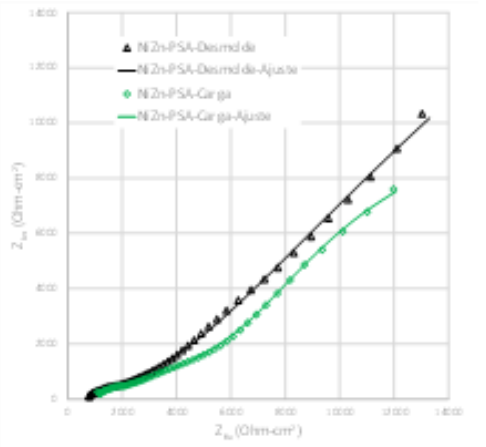


Figura 6. Diagrama EIS de Nyquist de batería Ni-Zn con PSA**.**

CONCLUSIONES

La batería de pasta de cemento con fibra de carbono recubierta con níquel para el ánodo y zinc para el cátodo es capaz de brindar un voltaje de retención de 50 mV y una densidad energética de 0.53 mWh. La capacidad energética de la batería depende de la humedad de la batería, por ello el uso de hidrogel es satisfactorio y produce una diferencia en el intercambio iónico. Una vez analizados los campos de ciclos de carga descarga y las reacciones químicas se concluye que se trata de una batería recargable o secundaria.

Desde el análisis de la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) se puede ver que la batería que no contienen PSA, no hay variación que afecte el desempeño de la batería con respecto a las dos pruebas realizadas al desmolde y cargada durante dos horas; pero en las mismas condiciones, el que si contiene PSA se ve la diferencia, donde tienen un mejor desempeño, respecto al que no tiene hidrogel..

Tabla 2. Valores de elementos del circuito equivalente ajustados a los diagramas de EIS.

	Desmolde	Carga	PSA-Desmolde	PSA-Carga
E_{cell} (mV)	177	434.47	294.4	672.81
R1 (Ω-cm^2)	414.61	645.3	721.44	819.11
R2 (Ω-cm^2)	2065.3	446.62	1619.8	2551.5
R3 (Ω-cm^2)	1114.3	1136.6	719.5	692.14
P1 (uF$^{(n-1)}$/cm^2)	28.396	9.0848	55.197	14.955
n1	0.40001	1	0.44706	0.40684
P2 (uF$^{(n-1)}$/cm^2)	292.24	3.8253	2.7869	23.912
n2	1	0.61301	0.65792	0.92992
L1 (H-cm^2)	3.60E-04	3.02E-04	8.29E-05	2.56E-05
Aw (Ω-cm^2-s$^{-1/2}$)	6781.4	6575	8059.7	5957.8

REFERENCIAS

[1]. J. Baigorri, F. Zaversky, and D. Astrain (2023), Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 185, no. August, El)sevier Ltd, p. 113633,. doi: 10.1016/j.rser.2023.113633.
[2]. A. Byrne, N. Holmes, and B. Norton (2015), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 96, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/96/1/012073.
[3]. J. Wang, P. Zhan, and D. Zhang (2023), Cem. Concr. Compos., vol. 138, no. February, p. 104987, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104987.
[4]. N. Y. A.-T. Abdel Salam Hamdy Makhlouf (2019), Advances in Smart Coatings And Thin Films For Future Industrial and Biomedical Engineering Applications, 1st ed., N. Y. A.-T. Abdel Salam Hamdy Makhlouf, pp. 407–427. [Online]. Available: https://www.elsevier.com/books/T/A/9780128498705
[5]. M. Zúñiga-Ayala, O. Juárez-Alvarado, A. Aranda-Fraustro, R. Velazquéz-Espejel, B. Becerra-Luna, and M. Peña-Duque (2017), Arch. Cardiol. México, vol. 87, no. 1, pp. 81–82, doi: 10.1016/j.acmx.2016.09.002.
[6]. N. H. Menzler and Q. Fang (2020), Journal of Power Sources Advances, vol. 6, no. August, Elsevier Ltd, p. 100041. doi: 10.1016/j.powera.2020.100041.
[7]. Babaeiyazdi, A. Rezaei-Zare, and S. Shokrzadeh (2021), Energy, vol. 223, Elsevier Ltd, p. 120116. doi: 10.1016/j.energy.2021.120116.
[8]. Y. Lu, C. Z. Zhao, J. Q. Huang, and Q. Zhang (2022), Joule, vol. 6, no. 6, Elsevier Inc., pp. 1172–1198. doi: 10.1016/j.joule.2022.05.005.
[9]. W. Choi, H. C. Shin, J. M. Kim, J. Y. Choi, and W. S. Yoon (2020), Journal of Electrochemical Science and Technology, vol. 11, no. 1, pp. 1–13. doi: 10.33961/jecst.2019.00528.
[10]. L. Wang, Z. Song, L. Zhu, and J. Jiang (2023), iScience, vol. 26, no. 4, p. 106463, doi: 10.1016/j.isci.2023.106463.
[11]. X. Zhou, J. Huang, Z. Pan, and M. Ouyang (2019), Journal of Power Sources, vol. 426, no. April, Elsevier, pp. 216–222, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.04.040.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

LA NANOTECNOLOGÍA EN LAS ENERGÍAS RENOVABLES: PROBLEMAS Y SOLUCIONES

David E. Márquez Ruiz, Aranxa Sánchez Bojórquez, Laura G. Ceballos Mendivil
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Prolongación Ángel Flores S/N Fracc. Las Fuentes, Los Mochis, Sinaloa, C.P. 81223, México, (668) 812 7641, **davideduardomaquezruiz.24.uas@gmail.com, aranxasanchezbo@gmail.com, laura.ceballos@uas.edu.mx**

RESUMEN

Con el aumento de consumo energético mundial es necesario optar por opciones viables que permitan satisfacer las necesidades de la población sin comprometer el ecosistema a futuro. Las energías renovables son una opción viable para suplir esta necesidad, sin embargo, tienen desventajas en cuanto a captación de energía y costos se refiere. Una solución que está en auge en los últimos años es la implementación de la nanociencia y la nanotecnología para desarrollar tecnologías que permitan una mejor optimización en las energías renovables. En el presente trabajo se mostrará la investigación realizada sobre los problemas que se tienen actualmente en materia de energías renovables y cómo está influyendo la nanotecnología para encontrar una solución a no muy largo plazo. La nanociencia y nanotecnología, ciencias interdisciplinarias, permiten la búsqueda de soluciones a estos problemas. Estudios realizados muestran la mejora en eficiencia de celdas solares fotovoltaicas al utilizar recubrimientos de nanopartículas de silicio. Entre otras cosas, la nanotecnología permite mejorar dispositivos ya existentes, así como el diseño de nuevos dispositivos que suplan de forma efectiva la demanda energética de manera sostenible.

ABSTRACT

With the increase in global energy consumption, it is necessary to opt for viable options that meet the needs of the population without compromising the ecosystem in the future. Renewable energies are a viable option to meet this need, however, they have disadvantages in terms of energy capture and costs. A solution that has been on the rise in recent years is the implementation of nanoscience and nanotechnology in order to develop technologies that allow better optimization of renewable energies. This paper will show the research conducted on the current problems in renewable energies and how nanotechnology is influencing the search for a medium-term solution. Nanoscience and nanotechnology, interdisciplinary sciences, allow the search for solutions to these problems. Studies carried out show the improvement in terms of efficiency of photovoltaic solar cells by using silicon nanoparticle coatings. Among other things, nanotechnology allows the improvement of existing devices, as well as the design of new devices that effectively supply energy demand in a sustainable way.

Palabras claves: energías renovables, desventajas, nanociencia, nanotecnología, soluciones, celdas fotovoltaicas.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, la humanidad ha buscado y se ha valido de diversas fuentes de energías para satisfacer las necesidades de la sociedad, y entre ellas siempre han figurado las energías renovables. La historia nos remite a los inicios de las civilizaciones cuando se descubrió el fuego, en la edad media la utilización del viento como fuente de energía para impulsar veleros o molinos, en épocas no muy antiguas la utilización de la biomasa como combustible, hasta llegar a la época actual en la cual se han explotado diferentes tipos de fuentes alternativas de energía (Roldán Viloria, 2013).

Sin duda, con todo lo anteriormente mencionado cabe resaltar la importancia de la búsqueda de mejores fuentes de energía que permitan satisfacer de mejor manera las necesidades de cada tipo de población. No obstante, si bien las energías renovables parecen ser una buena solución a la demanda energética global a largo plazo, actualmente no son una opción viable para un cambio inmediato, pues cuentan con ciertas desventajas que las hacen lucir no tan favorables en comparación con las energías no renovables que se han utilizado durante muchos más años.

Ahora bien, mientras el sector energético ha ido en aumento con los años, las diferentes ramas de la ciencia lo han hecho a la par y en los últimos años ha surgido una rama de la ciencia que ha permitido dar soluciones a las desventajas que presentan las energías renovables, esta es “la nanotecnología”. La nanotecnología permite el estudio de las propiedades de diversos materiales que favorecen a un mejor aprovechamiento de las energías renovables.

Por tanto, en el presente trabajo de investigación se tratarán diversos puntos sobre como la nanotecnología influye en la mejora de las energías renovables, mostrando las deficiencias más comunes que presentan y se presentan trabajos que se hacen actualmente para mitigar las deficiencias referentes a la eficiencia, haciendo énfasis en las investigaciones recientes sobre celdas fotovoltaicas y el uso de la nanotecnología.

Las energías renovables

Para comenzar es necesario dejar en claro qué se considera una energía renovable. Una energía renovable es aquella que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, y se puede clasificar dependiendo de su procedencia, obtención, etc. (Roldán Viloria, 2013).

Si bien las energías renovables son muy diferentes unas de otras, la mayoría de ellas comparte una serie de desventajas que las hacen no

tan rentables a corto plazo. Entre las principales desventajas o inconvenientes que encontramos relacionados con los diferentes tipos de energías renovables se encuentran:

- Dificultades de almacenamiento.
- Baja eficiencia en rendimiento.
- Elevados costos de producción e implementación.

Ahora bien, en el caso de la energía solar, la cual es la más accesible y habitual debido al recurso que utiliza como fuente de energía, los principales problemas presentados están relacionados con la baja eficiencia de captación de las celdas fotovoltaicas, siendo bajos en comparación con la energía recibida.

Estudios realizados por la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba, muestran como una celda solar promedio, con recubrimiento de silicio, tiene una eficiencia en captación de entre el 16% y 29%, aunque se han encontrado celdas solares que pueden superar ese porcentaje, pero elevando significativamente su costo, por lo que se considera a la celda solar con recubrimiento de silicio el promedio actual comercial (Figueredo, 2024).

LA NANOTECNOLOGÍA

Una vez se han dejado en claro los inconvenientes que presentan las energías renovables es pertinente hablar sobre la nanotecnología y antes de profundizar en el tema, es necesario definir que es la nanociencia y la nanotecnología.

- Nanociencia: rama de la ciencia enfocada al estudio de materiales a escala nanométrica, enfocándose en comprender sus comportamientos y propiedades.
- Nanotecnología: Aplicación de la nanociencia en el diseño, caracterización y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas complejos mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica. (Mendoza Uribe, 2007)

Si bien, estos términos son relativamente nuevos, el ser humano tiene siglos haciendo uso de la nanociencia sin saberlo. Un ejemplo conocido de esto son los vitrales de la edad media y el renacimiento, en los cuales se utilizaban nanopartículas metálicas por medio de técnicas empíricas para obtener colores vivos y duraderos.

Hoy en día, las aplicaciones de la nanociencia y la nanotecnología son muy diversas y van más allá de técnicas para pigmentar vitrales, pues abarcan campos como la medicina, agricultura, biotecnología y diversas ramas de la ingeniería, teniendo constantes avances y mejoras.

LA NANOTECNOLOGÍA EN LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Dejando de lado este tipo de aplicaciones, ¿por qué es relevante la nanociencia y nanotecnología? Porque el estudio profundo de este tipo de ciencia permite un mejor conocimiento de los materiales y su comportamiento con respecto a sus propiedades.

Hablando de las energías renovables, la nanotecnología ha beneficiado en el desarrollo de materiales con mejores propiedades mecánicas, térmicas y ópticas, haciendo que energías como la eólica (tanto on-shore como off-shore) y la hidráulica sean más rentables, pues tener materiales que generen palas y turbinas más ligeras, recubrimientos que soporten el óxido y demás mejoras plantean un futuro favorable a las energías renovables (Peña, 2014).

Aunque la nanotecnología tiene una amplia aplicación en los diversos tipos de energías, propiciando el desarrollo de mejores materiales, lo cierto es que la energía solar, y en especial la energía solar fotovoltaica, ha sido la más beneficiada por la nanotecnología en comparación a otras.

Energía solar

Haciendo énfasis en la energía solar, se pueden resaltar ciertos aportes realizados en los últimos años de investigación.

- Trabajos realizados por la Universidad de Sonora demuestra que utilizar nanopartículas de Si de entre 1 y 10 nm mejoran el rendimiento de las celdas fotovoltaicas llevándolas hasta a un rendimiento del 45.64% sin elevar sustancialmente los costos. (Martínez Zamora, 2022).
- Estudios realizados por el departamento de Química de la Universidad de Milán, Italia, muestran que las celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSCs) tienen un gran impacto positivo en la eficiencia y que son una alternativa eco sustentable, y que usar complejos de Cu como alternativa de mediador redox juega un papel importante para la mejora de este tipo de sistemas. (Colombo, 2021).
- Trabajos realizados por un grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería Mochis de la Universidad Autónoma de Sinaloa muestran el uso de nuevos complejos dinucleares de Cu(1) con ligandos de Triazina y Metano de trifenilfosfina como una opción viable para sustituir al tinte de rutenio (N719) en DSSCs. De esta manera permite tener celdas solares con una buena eficiencia, a costos no tan elevados y sin la toxicidad presentada en el tinte de rutenio. Además, este estudio permite visualizar el futuro de DSSCs hacia celdas a costos menores y diversas investigaciones que sugieren un mejor rendimiento (Peñuelas, 2023).

Lo anteriormente mencionado son simplemente algunos ejemplos palpables de la importancia de la nanociencia y la nanotecnología en el estudio, desarrollo y sinterización de diversos materiales para la mejora de celdas fotovoltaicas. Así como estos, existen más estudios realizados que respaldan la importancia que presenta la nanotecnología en la búsqueda de mejoras en las diversas fuentes de energías renovables existentes y el papel crucial que juegan en la búsqueda de un futuro sostenible.

CONCLUSIÓN

La demanda energética mundial es cada vez mayor y es necesario encontrar formas de mejora para las diversas fuentes de energía renovables que se tienen hoy en día. La nanociencia y nanotecnología son ramas interdisciplinarias que permiten tener un estudio profundo

de materiales que sean capaces de suplir las necesitades emergentes de la sociedad, tanto para mejorar dispositivos ya existentes como desarrollar mejores dispositivos. Por tanto, resulta indispensable la intervención de la nanotecnología en la búsqueda de mejoras en eficiencia, costos y reducción de contaminación relacionadas con la producción de energía renovable en pro de la sostenibilidad energética.

REFERENCIAS

Colombo, A. D. (2021). Copper complexes as alternative redox mediators in dye-sensitized solar cells. *Molecules, 26, 1*, 194.

Figueredo, Y. G. (2024). Evaluación de eficiencia en celdas solares según parámetros electro-ópticos. *Universidad & ciencia, 13(1)*, 10-20.

Martínez Zamora, J. A. (2022, junio 24). Efecto superficial de un recubrimiento basado en nanopartículas de silicio sobre una celda solar para la mejora de su eficiencia. Tess de Maestría, Hermosillo, Sonora.

Mendoza Uribe, G. L. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles latinoamericanos, 14, 29*, 161-186.

Peña, I. G. (2014). Energía eólica: Políticas de incentivos. *Revista Nano Ciencia y Tecnología, 2, 1*, 18-25.

Peñuelas, CA, Campos-Gaxiola, JJ, Soto-Rojo, R., Cruz-Enríquez, A., Reynoso-Soto, EA, Miranda-Soto, V., Glossman-Mitnik, D. (2023). Síntesis de un nuevo complejo dinuclear de Cu (I) con un ligando de triazina y metano de difenilfosfina: estructura de rayos X, propiedades ópticas, cálculos de DFT y aplicación en DSSC. *Inorgánicos*, *11* (10), 379.

Roldán Viloria, J. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber.* Ediciones Paraninfo, SA.

Tecnologías y Sistemas Térmicos Solares /Edificios Bioclimáticos

ID	TÍTULO	PONENTE
16086	En la búsqueda de un sistema innovador de concentración solar híbrido para la producción de calor y electricidad: Diseño y construcción.	Ricardo Ruíz Rodriguez
16129	Simulación térmica de una vivienda con muros de pacas de paja y otra de material convencional climatizadas natural y artificialmente en La Paz, BCS.	Bryanda Belén Gutiérrez
16083	Evaluación experimental de una mezcla binaria como fluido de trabajo en un concentrador cilindro parabólico.	Jesús Javier Luna
16098	Cálculo de la eficiencia térmica experimental de un CCP en la UAM-Iztapalapa	Jorge Ramos Sierra

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

EN LA BÚSQUEDA DE UN SISTEMA INNOVADOR DE CONCENTRACIÓN SOLAR HÍBRIDO PARA LA PRODUCCIÓN DE CALOR Y ELECTRICIDAD: DISEÑO Y ANÁLISIS ÓPTICO.

Ricardo Ruiz Rodríguez, Gustavo A. Acevedo Ramírez
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, CP 20200, Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Arturo Díaz Ponce, Manuel I. Peña Cruz*
CONAHCYT - Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, CP 20200, Aguascalientes, Aguascalientes, México, *mipec@cio.mx

RESUMEN

En el contexto de cambio climático y la creciente demanda energética, el desarrollo de sistemas híbridos solares que combinan celdas fotovoltaicas con tecnologías de concentración solar térmica se presenta como una solución efectiva e innovadora para generar electricidad y calor de manera sustentable. Estos sistemas ofrecen mayor eficiencia debido a la integración con sistemas de almacenamiento y contribuyen a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este trabajo se presenta el diseño y análisis de un prototipo de concentrador solar fotovoltaico híbrido basado en un sistema de canal parabólico un con concentrador secundario. Se emplea el programa de Tonatiuh para realizar el análisis de trazado de rayos de los elementos ópticos del sistema. Las simulaciones realizadas muestran resultados prometedores en el diseño óptico y mecánico del sistema. Se ha logrado un diseño que garantiza una distribución uniforme de flujo radiativo sobre el arreglo de celdas fotovoltaicas, con un flujo radiativo promedio de alrededor de 7 soles; reflejando así un desempeño óptico adecuado para las aplicaciones previstas. El sistema cuenta con un ensamble mecánicamente viable que permite soportar y mantener en alineación el concentrador primario y concentrador secundario, además de posicionar estratégicamente un disipador de calor por convección forzada para mantener en temperatura ideal las celdas fotovoltaicas sometidas a concentración. Se presenta el prototipo del concentrador solar de canal parabólico al cual se examina que la curvatura característica coincida con la curvatura ideal mediante técnicas de fotogrametría.

ABSTRACT

In the context of climate change and increasing energy demand, the development of hybrid solar systems that combine photovoltaic cells with concentrating solar thermal technologies emerges as an effective and innovative solution for generating electricity and heat sustainably. These systems offer higher efficiency due to their integration with storage systems and contribute to the energy transition towards cleaner and more sustainable energy sources. This work presents the design and analysis of a hybrid photovoltaic solar concentrator prototype based on a parabolic trough system with a secondary concentrator. The Tonatiuh software is used to perform ray-tracing analysis of the system's optical elements. The simulations show promising results in the optical and mechanical design of the system. A design has been achieved that ensures a uniform distribution of radiative flux over the photovoltaic cell array, with an average radiative flux of around 7 suns, thus reflecting adequate optical performance for the intended applications. The system features a mechanically viable assembly that supports and maintains alignment of the primary and secondary concentrators, in addition to strategically positioning a forced convection heat sink to keep the photovoltaic cells under concentration at an ideal temperature. The parabolic trough solar concentrator prototype is presented, and it is examined to ensure that its characteristic curvature matches the ideal curvature using photogrammetry techniques.

Palabras clave: Concentración, Fotovoltaico, Híbrido, Solar, Óptico, Parabólico, Energía, Prototipo, Eléctrica, Térmico.

INTRODUCCION

En la actualidad, la mayor parte del consumo energético mundial proviene de combustibles fósiles, que representan aproximadamente el 79% del total de la energía utilizada [1]. Sin embargo, este proceso ha traído consigo efectos negativos en el medio ambiente e incluso en la salud humana, teniendo un impacto directo en el cambio climático, donde la principal consecuencia es la emisión de gases de efecto invernadero, concretamente dióxido de carbono (CO2). Otro factor negativo importante es que los combustibles fósiles son recursos no renovables por lo que su extracción y consumo se está agotando gradualmente, lo que ocasiona preocupaciones en relación de la seguridad energética. Por estos motivos se tiene la necesidad de buscar alternativas sostenibles que contribuyan a reducir esa gran dependencia. En este contexto se considera la energía solar como una alternativa factible e innovadora en el ámbito de las energías renovables [2]. Entre las principales aplicaciones de esta energía se tiene la tecnología fotovoltaica, la cual convierte la luz solar directamente en electricidad mediante celdas solares basadas en semiconductores. Por otro lado, la tecnología de concentración solar la cual utiliza espejos o lentes para enfocar una gran cantidad de luz solar en un receptor, donde se convierte en calor y, posteriormente, en electricidad mediante un generador térmico. Los sistemas híbridos que combinan concentración solar con sistemas fotovoltaicos pueden optimizar la generación de energía al utilizar la concentración solar para producir energía térmica y eléctrica al mismo tiempo. Esta combinación permite mejorar la eficiencia general, demandar menor área de instalación y proporcionar soluciones más robustas para la transición hacia fuentes de

energía sostenibles.[3]

Respecto a los sistemas híbridos que plantean el uso de sistemas de concentración solar con sistemas fotovoltaicos (FV), se han encontrado distintos trabajos en los que principalmente el factor común corresponde a una mala uniformidad en la distribución de radiación en las celdas fotovoltaicas, lo cual puede causar estrés térmico o disminución de la vida útil de las celdas FV, además de la disminución de la eficiencia óptica del sistema.

En el sistema hibrido diseñado por Soltani et al. [4] hicieron uso de celdas FV que colocaron en un lateral de un tubo absorbente colocado en el eje focal de un concentrador parabólico, sus resultados demuestran una eficiencia térmica de 57 % y eléctrica del 7.5 % debido a que no tomaron en cuenta la distribución no uniforme de la radiación en las celdas fotovoltaicas generada por el concentrador parabólico. Otro trabajo similar, es el desarrollado por Mohsenzadeh et al. [2] en el que colocaron dos arreglos de celdas FV de silicio a los lados exteriores de un conducto triangular de refrigeración que colocaron en el eje focal de un concentrador parabólico, en sus resultados obtuvieron una eficiencia térmica de 46.16 % y una eléctrica de 4.83 %, adjudicando una mala eficiencia óptica del concentrador utilizado, por lo que justificaban un aumento en las eficiencias realizando un remplazo del concentrador. En el trabajo desarrollado por Indira et al. [5] se incorporaron celdas FV y generadores termoeléctricos que compartían un mismo sistema de enfriamiento y en el que además concentraban radiación solar por medio de un concentrador de canal parabólico en las celdas FV y con un concentrador parabólico compuesto en los módulos termoeléctricos, obtuvieron como resultado una eficiencia térmica de 40 % y una eléctrica de 4.86 %. De igual manera, al anterior adjudicaban una eficiencia eléctrica baja debido a la mala eficiencia óptica del material utilizado en los concentradores, así como perdidas ópticas derivadas de la mala alineación en ambos sistemas de concentración solar utilizados.

En respuesta a las deficiencias identificadas en la distribución de la radiación y la eficiencia óptica de los sistemas híbridos revisados, en este trabajo se propone un diseño óptico innovador que aborde estos problemas de manera integral. El sistema propuesto está basado en dos principales criterios: 1) la concentración solar deberá de mantenerse alrededor de los 7 soles (7000 W/m^2) para evitar el daño en la celda FV, 2) el flujo radiativo deberá presentar una uniformidad homogénea en la celda FV, garantizando así una distribución equitativa de la radiación solar. Partiendo con las restricciones anteriores, es relevante mencionar que, en el Centro de Investigaciones en Óptica unidad Aguascalientes, ya se disponía con el arreglo de celdas fotovoltaicas a utilizar, las dimensiones de dicho arreglo de celdas ya encapsuladas son 18.5 cm de ancho por 190 cm de largo, esto corresponde a la conexión de 14 celdas fotovoltaicas de la marca SunPower modelo Maxeon Gen II, las cuales de manera individual tienen una dimensión de 12.5 cm por 12.5 cm. La propuesta para integrar el arreglo fotovoltaico con el concentrador de canal parabólico consiste en situar las celdas fotovoltaicas en la parte central del concentrador parabólico, que se clasificará como concentrador primario y la incorporación de un concentrador secundario que permita redireccionar los haces de luz que por defecto se acumulan en el foco lineal de primario hacia el área de las celdas fotovoltaicas.

El siguiente trabajo se organiza de la siguiente forma. Primeramente, se presenta el diseño óptico propuesto del sistema basado en los criterios antes establecidos. Posteriormente se presenta el diseño mecánico del sistema, el cual está limitado a un criterio que basa el sistema mecánico en una estructura factible de construir y de fácil armado, de tal forma que el sistema completo sea modular y pueda desglosarse en partes que sean de fácil fabricación. Finalmente se presenta el soporte del concentrador primario ensamblado ya que se estarán realizando pruebas fotométricas a la geometría obtenida para una posterior comparación con la geometría ideal simulada. El presente proyecto se enfoca en diseñar y analizar el desempeño óptico de un sistema de concentración solar de foco lineal para producir energía eléctrica y térmica. Para lo cual se hará uso de celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino integradas en un concentrador de canal parabólico. El arreglo fotovoltaico se une a un sistema de refrigeración diseñado para mantenerlo a baja temperatura. El calor extraído se transferirá a un líquido refrigerante, en este caso agua, la cual será almacenada para su uso futuro.

DISEÑO DEL CONCENTRADOR

Diseño Óptico

La validación del diseño óptico del sistema se llevó a cabo utilizando el programa Tonatiuh, el cual permite modelar la geometría de distintos tipos de concentradores solares y realizar simulaciones para evaluar su rendimiento óptico. Para el diseño geométrico de los elementos reflectores del concentrador primario y secundario, se utilizó SolidWorks.

El desafío del diseño fue encontrar una geometría que permita redirigir la radiación solar concentrada en el eje focal del concentrador parabólico hacia la ubicación donde se colocó el arreglo de celdas fotovoltaicas (FV). Una vez diseñado en SolidWorks, el modelo se importó a Tonatiuh para su evaluación.

El concentrador secundario fue diseñado con una geometría semi triangular con el vértice hacia abajo y dos pares de segmentos lineales, como se muestra en la Figura 2. Los segmentos inferiores (más pequeños) optimizan el aprovechamiento de la radiación concentrada en el eje focal del concentrador parabólico, mientras que los segmentos superiores están diseñados para concentrar la radiación sobre las celdas FV de manera uniforme. Este componente tiene como objetivo redirigir los rayos solares del concentrador primario hacia las celdas FV inferiores. Además, como se ilustra en la Figura 1, se incorporó una línea de 14 celdas FV conectadas en serie en la parte central del reconcentrador primario.

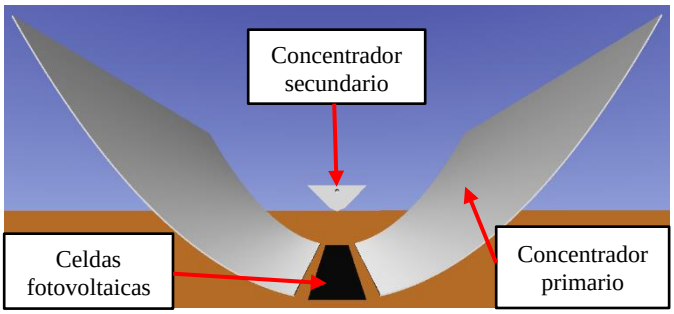


Figura 1. Sistema óptico propuesto

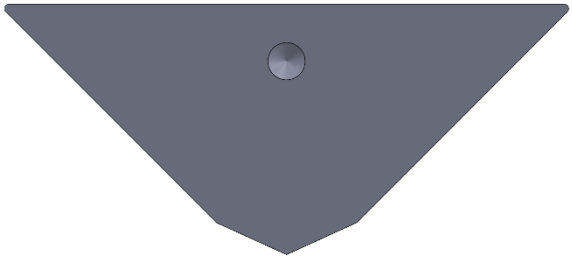


Figura 2. Geometría del concentrador secundario

Una vez que se agregaron los elementos principales del sistema en Tonatiuh (ver Figura 1) se realizó el análisis de trazados de rayos en el sistema óptico propuesto. En la Figura 3 es posible observar el comportamiento de la trayectoria que realizan los rayos que inciden de manera perpendicular al concentrador primario, con ayuda del concentrador secundario propuesto se observa que una gran cantidad de rayos terminan incidiendo sobre la superficie representada como el arreglo fotovoltaico. Por otra parte, en la Figura 4 se muestra la distribución de flujo que incide en la superficie receptora, la cual se mantiene parcialmente uniforme.

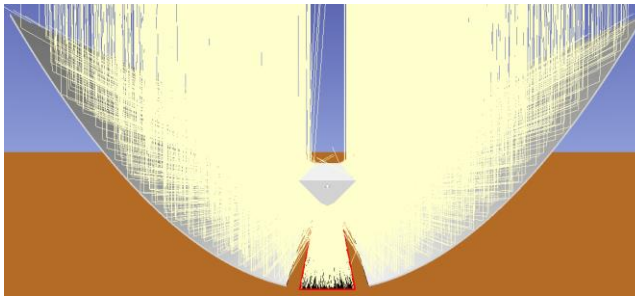


Figura 3. Simulación de trazado de rayos en sistema óptico propuesto

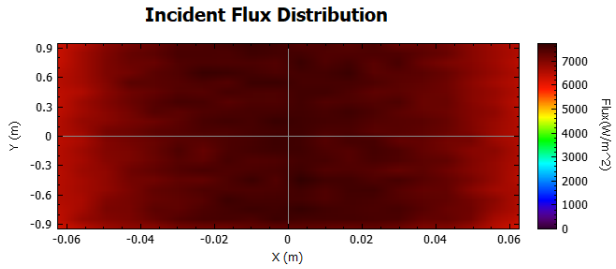


Figura 4. Distribución de flujo incidente sobre las celdas fotovoltaicas

La distribución de flujo incidente se puede validar con lo que se presenta en la Tabla 1 y Figura 5, donde se observa la distribución de flujo correspondiente al eje vertical y a eje horizontal de la superficie receptora, idealmente en el eje vertical no se presentan variaciones notables puesto que, al estar analizando un concentrador de eje focal, esta sección tiende a mantenerse constante. En cuanto a los valores obtenidos se tiene que el factor de concentración promedio alcanzado es de alrededor de 7.2 soles y además se obtiene un flujo máximo con un factor de concentración de alrededor de 7.7 soles, esta simulación se realizó en condiciones ópticas ideales para cada elemento utilizado, se tiene en consideración la posible variación dada por el índice de reflectancia de cada material que será aplicado , sin embargo, el estudio de esta etapa se centra en lograr una distribución de flujo de energía lo más uniforme posible sobre la superficie de las celdas fotovoltaicas.

Tabla 1. Parámetros del flujo de energía distribuido sobre la superficie de las celdas

Parámetro	Resultado
Potencia total	1700.87 W
Flujo promedio	7199.44 W/m^2
Flujo máximo	7733 W/m^2
Uniformidad	0.0511142

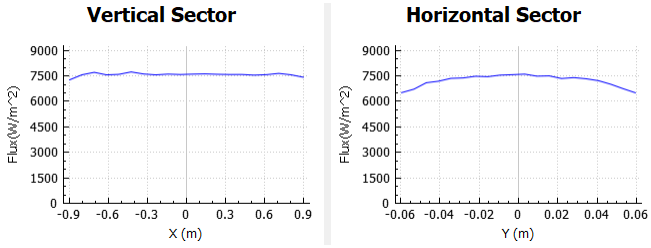


Figura 5. Distribución de flujo incidente para cada eje en la superficie de las celdas

Diseño mecánico

Una vez verificado que el desempeño óptico del sistema es apropiado para el uso de las celdas fotovoltaicas, se procedió a realizar el diseño estructural que debería mantener rígida la forma de las láminas reflectivas del canal parabólico del concentrador primario. Importante enfatizar que el propósito fundamental del diseño mecánico es estructurar el sistema de tal forma que sea modular/ensamblable, por lo tanto, la estructura deberá de ser rígida y fácil de armar.

El procedimiento de este sistema consistió en diseñar componentes fáciles de adquirir o maquinar y así mismo que el ensamble de todos los componentes sea factible y sencillo para que cualquier persona sin conocimientos avanzados en el tema, sea capaz de armarlo con un simple instructivo y herramientas básicas.

En la Figura 6 se muestra la estructura del concentrador parabólico incorporando la subestructura del concentrador secundario, se puede observar el uso de 2 placas laterales que además de dar soporte y rigidez a toda la estructura, ayudaran a posicionar al concentrador secundario en la ubicación precisa para que este desempeñe su funcionamiento correctamente, en estas placas laterales se colocaran los ejes de rotación necesarios para posteriormente incorporar el sistema de seguimiento solar que requiere este concentrador.

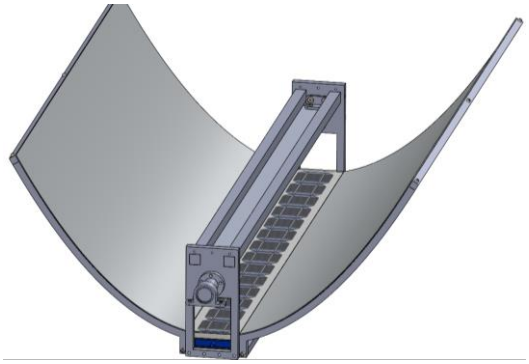


Figura 6. Diseño con visualización del posicionamiento del concentrador secundario

El diseño preliminar del prototipo totalmente ensamblado se puede observar en la Figura 7, donde es posible observar la colocación de 2 arreglos de celdas fotovoltaicas, un primer arreglo fotovoltaico colocado en la parte inferior el cual será el que estará recibiendo la radiación del concentrador de canal parabólico con ayuda del concentrar secundario, mientras que se tiene un arreglo de celdas fotovoltaico en la parte superior, se posiciona así con el objetivo de aprovechar el efecto de sombreado causado por la colocación del concentrador secundario, por lo que este arreglo de celdas fotovoltaico solo estará recibiendo la concentración directa de 1 sol. Por otro lado, representado de forma provisional se tiene el posicionamiento del motor que ayudará a efectuar el seguimiento solar del concentrador, así como la representación del tanque térmico en el que se almacenará el agua que estará fluyendo por el disipador para el enfriamiento de las celdas.

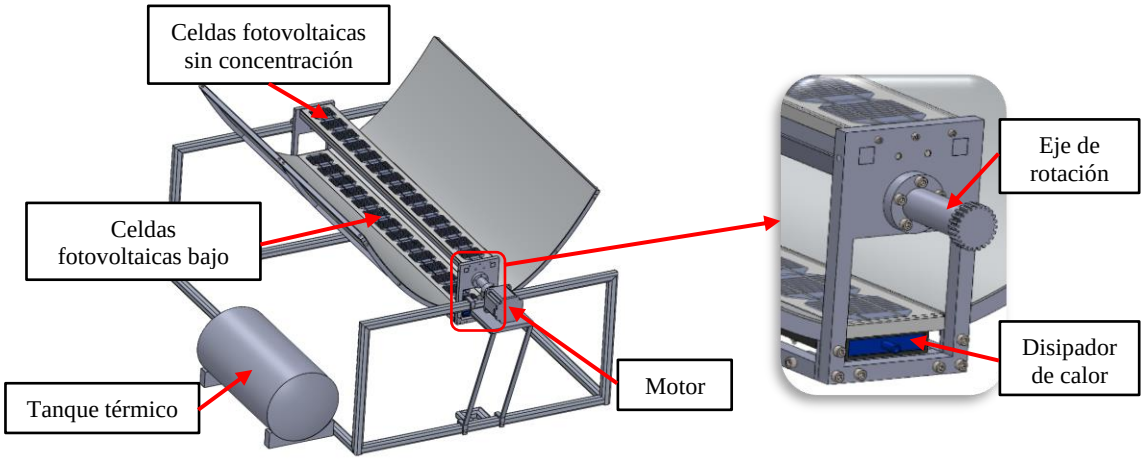


Figura 7. Ensamble del sistema de concentrador solar de canal parabólico

CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA SOPORTE DEL CONCENTRADOR

En las Figuras 8 y 9 se presenta la estructura del concentrador parabólico primario sujeto a las placas laterales que integran el concentrador secundario, el cual se soporta tanto de las placas laterales como de dos tubulares que están colocados como travesaños entre las placas con el objetivo de evitar que el concentrador secundario se deforme por peso y longitud. Hasta el momento de redacción del presente extenso el sistema se encuentra en proceso de alineación del concentrador secundario, para posteriormente realizar el laminado de ambos concentradores.

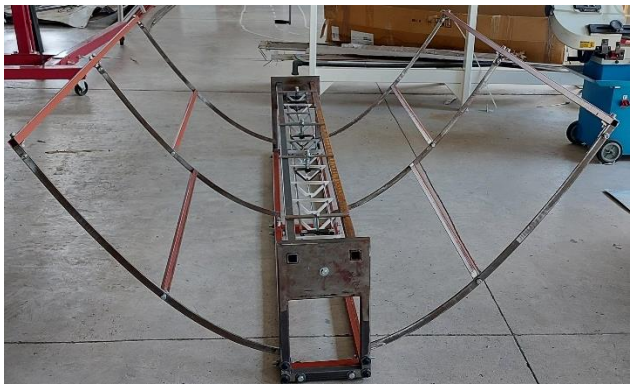


Figura 8. Montaje de la estructura del concentrador

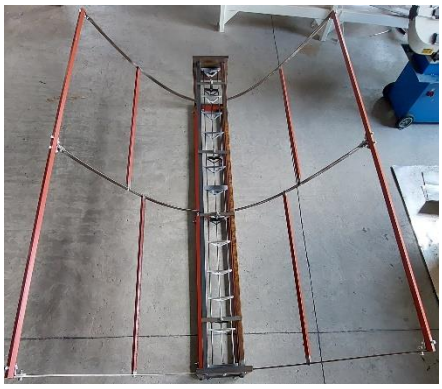


Figura 9. Estructura del concentrador vista superior

VERIFICACIÓN GEOMETRICA DEL SISTEMA PROPUESTO

Con el objetivo de verificar la curvatura del concentrador primario, se emplea la técnica de fotogrametría la cual consiste en utilizar fotografías para determinar la forma, dimensiones y posición de un objeto en cualquier espacio, se basa en la intersección de dos o más imágenes tomadas desde diferentes ángulos lo que permite obtener información tridimensional de los objetos analizados.

En este caso esta técnica es de gran utilidad ya que permite dimensionar la estructura del concentrador de canal parabólico y establecer la geometría de la curvatura que se obtiene al momento del ensamble, de tal modo que permite realizar una comparación digital de la curva del concentrador ensamblado con la curva del concentrador ideal resultado del diseño, la importancia de estos análisis radica en que para este tipo de concentrador solar la geometría obtenida deberá de ser precisa, de lo contrario se tiene el riesgo de que la radiación solar no se concentre en el área que se requiere.

Para este análisis se consideraron 62 imágenes del concentrador, las cuales fueron tomadas desde diferentes ángulos y distancias con una cámara de la marca Nikon, modelo D3300. La Figura 10, presenta una muestra de las imágenes analizadas en el presente estudio, como se puede observar se colocaron diferentes figuras en distintas partes del concentrador primario debido a que estas figuras las analiza el programa para llevar a cabo un modelado 3D con los puntos que localiza, el programa utilizado para este proceso es Photo Modeler.

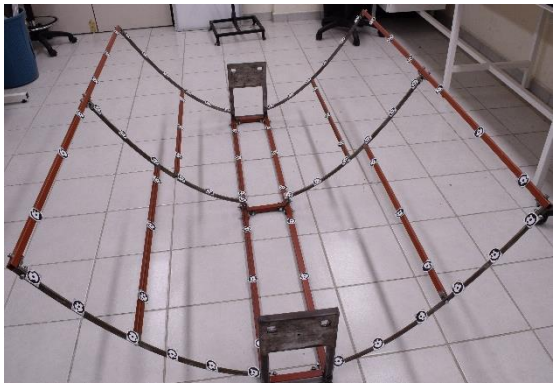


Figura 10. Colocación de códigos en el concentrador parabólico

Para que el análisis pueda efectuarse satisfactoriamente es necesario realizar una calibración inicial en el programa, esto corresponde a tomar fotografías de una serie de puntos y figuras que se imprimen en una misma hoja y que el mismo programa proporciona. Una vez realizada la calibración se ingresaron las 62 imágenes y el programa en cuestión de minutos fue localizando las coordenadas de cada una de las figuras que se utilizaron y fue desarrollando un modelo 3D en el que posicionaba cada una de las figuras en una malla de puntos, lo cual se puede observar en las Figuras 11 y 12.

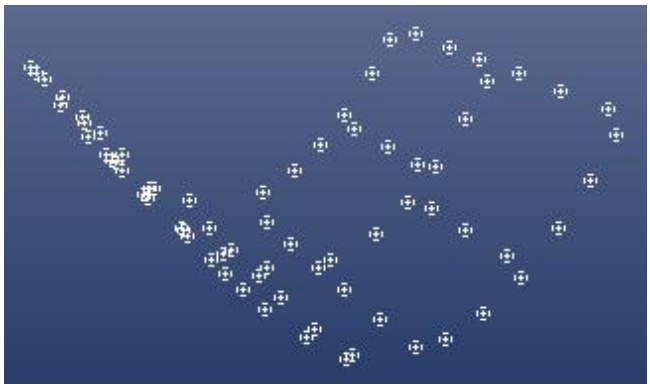


Figura 11. Malla de puntos del concentrador parabólico vista isométrica

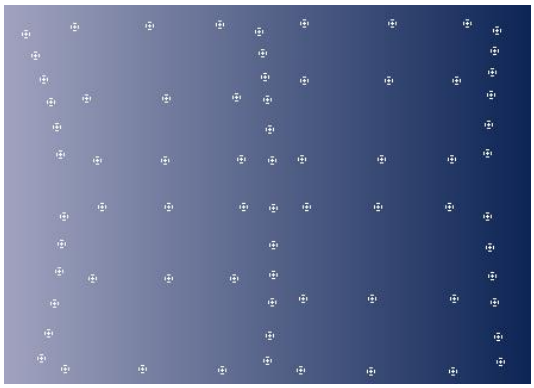


Figura 12. Malla de puntos del concentrador parabólico vista superior

Como se puede observar en las figuras anteriores, el programa logro situar cada una de las figuras colocadas en el concentrador parabólico como puntos en un espacio tridimensional, el trabajo subsecuente consiste en conectar cada uno de los puntos graficados de tal manera que se modele la curvatura del concentrador parabólico. Una vez formada dicha curva será posible exportar el modelo en 3D para importarlo en SolidWorks y realizará la debida comparación con la curva ideal diseñada inicialmente para el concentrador parabólico. Esto permitirá obtener una visión inicial de si el concentrador primario está correctamente ensamblado y ofrecerá la oportunidad de proceder con el montaje completo del sistema.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño y análisis óptico de un innovador sistema híbrido de concentración basado en un canal parabólico. Las simulaciones realizadas con el software Tonatiuh confirmaron la viabilidad del diseño óptico y mecánico del sistema, evidenciando una distribución uniforme del flujo radiativo y un factor de concentración promedio de aproximadamente 7 soles. Además, el diseño modular del sistema facilita su construcción y mantenimiento, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en diversos entornos. Se presentan también resultados preliminares sobre la construcción de la estructura de soporte del concentrador primario y su validación geométrica mediante fotogrametría, lo que asegura que la curvatura construida coincide con la especificada en la simulación.

El avance logrado en el desarrollo de este sistema híbrido de concentración solar constituye un paso significativo hacia una generación de energía más sostenible. Al combinar celdas fotovoltaicas con tecnologías de concentración solar térmica, se mejora la eficiencia en la producción de electricidad y calor, abordando así la creciente demanda energética y los desafíos del cambio climático. Este proyecto no solo contribuye a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, sino que también establece un modelo innovador que puede ser optimizado en futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la energía solar.

REFERENCIAS

[1] REN21. 2023. Renewables 2023 Global Status Report Collection, Global Overview

[2] Soltani, S., Kasaeian, A., Sokhansefat, T., & Shafii, M. B. (2018). Performance investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system integrated with parabolic trough collector. Energy Conversion and Management, 159, 371-380

[3] Liu, M., & Li, Q. (2020). A review of hybrid photovoltaic-thermal systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 127, 109861.

[4] Mohsenzadeh, M., & Shafii, M. B. (2017). A novel concentrating photovoltaic/thermal solar system combined with thermoelectric module in an integrated design. Renewable Energy, 113, 822-834.

[5] Indira, S. S., Vaithilingam, C. A., Sivasubramanian, R., Chong, K. K., Narasingamurthi, K., & Saidur, R. (2022). Prototype of a novel hybrid concentrator photovoltaic/thermal and solar thermoelectric generator system for outdoor study. Renewable Energy, 201, 224-239.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

SIMULACIÓN TÉRMICA DE UNA VIVIENDA CON MUROS DE PACAS DE PAJA Y OTRA DE MATERIAL CONVENCIONAL CLIMATIZADAS NATURAL Y ARTIFICIALMENTE EN LA PAZ, B.C.S.

Federico Poujol Galván, Oscar Reséndiz, Madelein Galindo De La Cruz, Bryanda Belén Gutiérrez Caballero y Georgina Avilés Escobar
Departamento de Ingeniería en Pesquerías, Universidad Autónoma de Baja California Sur, km 5.5 Carretera al Sur, La Paz, B.C.S, CP 23080, México,
Teléfono 612 1238800 ext 6210, **ftpoujol@uabcs.mx.**

Víctor Sevilla
Departamento de Geología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, km 5.5 Carretera al Sur, La Paz, B.C.S, CP 23080, México,

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa desde el punto de vista térmico a las pacas de paja como material de construcción de vivienda para un clima cálido como el de La Paz, Baja California Sur. Para tal fin se simula el comportamiento térmico de una vivienda construida con pacas de trigo y otra construida con un material convencional como block de concreto hueco. Las dos viviendas simuladas sólo difieren en el tipo de material que se usa para las paredes externas. La simulación se hizo con el software Design Builder, mediante el cual se calcularon las temperaturas en el interior de viviendas en condiciones de ventilación natural equivalentes a ventilación nocturna y paredes de baja absortancia, así como los consumos de energía con climatización artificial. Los resultados indican comportamientos térmicos similares del material evaluado y el convencional en condiciones de ventilación natural, ambos con temperaturas de aire interiores en donde el confort se alcanza con velocidades moderadas del aire. En condiciones de climatización artificial se observa un mejor comportamiento de las casas de pacas de paja comparado con el de las casas de material convencional en esas condiciones. Adicionalmente los resultados plantean la interrogante de que para el clima de La Paz y el rango de difusividades térmicas del estudio (2.5-7 x 10^7 m^2/s) la aplicación de costosos aislantes convencionales se justifique en casas operadas sin climatización artificial, en comparación con otras medidas menos costosas como la ventilación y los recubrimientos de baja absortancia.

ABSTRACT

A thermal evaluation of Straw bales as a construction material for housing in a warm climate, such as that of La Paz, Baja California Sur is carried out in this work. To that end the thermal behaviour of a house with external walls made of straw bale material for their external walls, other features were mantained without change. The simulations were carried out with the Design Builder software, by means of which the inside temperature of both houses were calculated under natural ventilation conditions, and also the refrigeration loads to keep thermal confort conditions inside The results show similar thermal performance for the straw bale house and the conventional house under natural ventilation conditions, both showing inside air temperatures in which thermal comfort is attainable with moderate air velocities.. A better performance for the straw bale house in comparison to that of the house with conventional walls is seen when air conditioning is used. In addition the results of this study pose the question that the use of conventional thermal insulation material be necessary for La Paz in the range of thermal diffusivities of this study (2.5x10^{-7} m^2/s a 7 x10^{-7} m^2/s) in the case of houses without artificial means of cooling, in comparison with less costly passive cooling strategies such as low absortance walls and night ventilation.

Palabras clave: Simulación térmica, aislantes térmicos orgánicos, clima cálido, confort, arquitectura bioclimática

INTRODUCCIÓN

La paja proviene de los tallos no consumidos de cereales, como el trigo, el arroz, etc Tradicionalmente prevalece la idea de que una casa construida con paja no podía ser segura, pero autores como Rikki Nitzkin y Maren Termens (2010) argumentan en contra de esa noción indicando propiedades de resistencia al fuego y al viento y durabilidad, y señalan beneficios en términos de costos de material y ahorro de energía. Brojan *et al* (2013) también encuentran beneficios económicos de las pacas de paja respecto de materiales convencionales como el ladrillo. Otros autores como D'Allesandro *et al* (2017) reconocen el potencial energético de la paja como material de construcción, pero mencionan algunos temas de sustentabilidad, como el requerimiento de combustibles y emisiones de gases de invernadero asociados al cultivo de cereales que dan la paja como subproducto.

La paja ha sido comentada como un material de baja conductividad térmica, por tal razón resulta interesante considerar la posibilidad de incorporarla como material de construcción en clima cálido. La Paz, en efecto, cuenta con un clima cálido, con temperaturas máximas que en ocasiones superan los 40 °C en verano. Debido a que es un clima seco también presenta importantes oscilaciones de temperatura en algunos meses de verano, sobre todo al inicio de este y en menor medida hacia el final, cuando la humedad aumenta por la temporada de huracanes.

ANTECEDENTES

Entre los investigadores que han abordado el tema de las pacas desde el punto de vista térmico Asdubali *et al* (2015) hacen una reseña de la literatura de materiales de construcción no convencionales, entre estos las pacas de paja. En este trabajo consideran diferentes aspectos, particularmente las propiedades térmicas y comentan sobre valores de conductividad reportados en el rango de (0.038 a 0.067). Hacen empero la observación de que el comportamiento dinámico del edificio depende más bien de la difusividad térmica, más que de la conductividad térmica. En esto coinciden en cierta manera con la apreciación de Barrios *et al* (2011) quienes señalan a la difusividad térmica como un mejor predictor del comportamiento térmico en edificios no climatizados naturalmente. Esto se alinea con el estudio de Douzane, et al (2016) donde se centraron en la evaluación del rendimiento higrotérmico de una vivienda construida de balas de paja, mediante una metodología integrada de investigación experimental en laboratorio y simulaciones térmicas dinámicas. Esto permitió analizar el comportamiento de la vivienda durante los periodos de invierno y verano. El estudio revelo, que las paredes de balas de paja proporcionan una inercia térmica significativa en verano. Además, se observó que la envolvente del edificio actúa como amortiguador de las variaciones meteorológicas y mejora el confort térmico.

El comportamiento dinámico fue analizado experimentalmente por Gallegos et al (2017), así como por Garas y Allam(2011) quienes estudian construcciones con paredes con pacas de paja midiendo las temperaturas de las paredes y del interior. Arumi-Noe (2016) hace un estudio analítico en el que comenta que las pacas de paja tienen una difusividad térmica baja que les permite amortiguar las oscilaciones de temperatura en forma parecida al adobe en condiciones de no ventilación ni climatización artificial.

Chamila et al (2012) llevan a cabo un estudio experimental y hacen simulaciones para comparar el comportamiento térmico de una casa de pacas de paja y otra de ladrillo en Sri Lanka, en la temporada de calor y encuentran que la casa de paja se comporta mejor, ya que se obtienen temperaturas más bajas del aire en su interior. El estudio no especifica la estrategia de ventilación utilizada, ni la absortancia de las paredes externas.

Tlaiji et al (2022) llevaron a cabo un análisis del comportamiento térmico y mecánico de la construcción a base de paja, incluyendo su resistencia al fuego y al sonido, así como la evaluación del ciclo de vida, el rendimiento energético y la viabilidad económica. Los resultados evidenciaron la necesidad de información en ciertos aspectos, como en la comparación de las fibras de paja con otras fibras naturales y sintéticas, el pH de la paca de paja y la resistencia acústica de la pared de paja mediante nuevas capas adicionales que absorban las ondas acústicas. Se requieren también, estudios sobre el comportamiento energético, análisis de costos y cómo se autorregula la humedad del aire interior en edificios de paja al tamaño del edificio. Resultados que coinciden con D'Alessandro et al (2017) en donde realizaron pruebas en laboratorio y campo de una casa unifamiliar construida con paredes de paca de paja en la región de Umbría, Italia. Las mediciones arrojaron que la transmitancia térmica es comparable a la de los muros construidos con materiales tradicionales, sin embargo, el aislamiento acústico es deficiente debido a la composición liviana de la pared.

Si bien los estudios mencionados dan una indicación del potencial amortiguador térmico de este tipo de materiales orgánicos queda el interrogante de cómo se compara el comportamiento de las pacas con el de materiales convencionales cuando el clima obliga a usar estrategias como la ventilación y la baja absortancia de las paredes, las cuales evidencian potencial para reducir la importancia relativa de las paredes como elemento regulador de la temperatura interior. Por tal motivo en el trabajo presente se simula el comportamiento térmico de viviendas con paredes de pacas de trigo y paredes convencionales de block hueco de concreto, considerando condiciones de ventilación natural, paredes de baja absortancia, y un clima como el de La Paz, B.C.S, para generar información que ayude a decidir qué tan conveniente resulta cambiar el material convencional por las pacas de trigo en viviendas que se operarían sin aire acondicionado. Para el mismo fin también se ha calculado con el mismo programa de simulación el consumo de electricidad para refrigeración para los dos tipos de materiales, considerando que algunos usuarios tienen posibilidades de usar aire acondicionado para lograr condiciones de confort.

MÉTODOS

La casa simulada corresponde aproximadamente a una casa de pacas de paja trigo ya construida cuyo plano se muestra en la Figura 1 y fachada en la Figura 2, la cual se simula como una vivienda a base de pacas de paja, sin especificar el tipo de cereal. Para simplificar el estudio no se incluyeron en el análisis las estructuras colindantes. Estas reducen por sombreado la ganancia energética en la vivienda, pero ya que el estudio no propone un diseño particular de vivienda, sino que se aboca a una comparación térmica de materiales de pared, se decidió no considerar su efecto.

La vivienda de pacas de paja de paja tiene paredes de ese material amarrado con malla de alambre y encapsulado en mortero cemento. Las pacas tienen un espesor de 35 cm y el espesor de mortero se considera de 1 cm. Las particiones o paredes internas son de block de concreto hueco de 15 cm de espesor, con una capa de mortero de 1 cm. El techo es una estructura de metal, cubierta con madera impermeabilizada que se tomó como triplay de 1 cm de espesor. El piso se consideró como una placa de concreto de 10 cm de espesor. La casa se considera con fachada orientada al norte. La vivienda convencional considerada para el estudio es de las mismas características, pero los muros que dan al exterior se sustituyen por muros de block de concreto hueco de 15 cm con emplaste de mortero (1 cm). Tiene una superficie de construcción cercana a los 50 m^2.

Las simulaciones se hicieron con el programa Design Builder version 4.5.178. La Figura 3 muestra la representación geométrica de la vivienda obtenida con la interfaz de usuario del programa. Se utilizaron datos meteorológicos para la ciudad de La Paz, BCS estimados con el programa Meteonorm. Las propiedades de los materiales base de construcción se indican en la Tabla 1. Estos valores son parte de la base de datos del programa, excepto en el caso de las pacas de paja. Para las pacas de paja de se han tomado valores reportados por

(Arumi-Noé, 2016). Cabe mencionar que las propiedades térmicas dependen del tipo de paja, el contenido de humedad, la forma en que comprime las pacas la máquina utilizada y la orientación de la paca ya que no es un material isotrópico. D'Alessandro (2017) *et al* mencionan otros valores en su discusión de antecedentes: variación de la conductividad térmica en el rango de 0.052 W/mK a 0.152 W/mK, y variación de la difusividad térmica en el rango de $1x\ 10^{-7}$ m^2/s a $3.6x\ 10^{-6}$ m^2/s . Cabe comentar que se hicieron simulaciones en ese rango de variación de la difusividad térmica y no se encontró una variación mayor que 1°C respecto de los resultados reportados en este trabajo para la casa operando con ventilación natural y de 3% de diferencia en consumo de electricidad para enfriamiento para la casa operando con aire acondicionado.

Las propiedades superficiales para la casa de material convencional y de pacas de paja se tomaron como de una absortancia de 0.3 y una emitancia de 0.9. Estas propiedades se especifican para las capas exteriores de mortero, las cuales tienen aplicada pintura de color claro.

Para las temperaturas del suelo se tomaron las exteriores promediadas mensualmente. Otra opción era tomar las del archivo meteorológico para suelo sin perturbar, pero se consideró que las ambientales mensuales eran más realistas dado que la edificación pierde calor hacia el suelo y de esta manera lo va alterando térmicamente a lo largo del verano.

Las casas se simularon con la opción de "ventilación calculada" del programa, con la cual se calcula la cantidad de aire que ingresa de acuerdo con la velocidad y dirección del viento y estimaciones de diferencias de presión, con la restricción de que la temperatura externa sea menor que la interior. Se especificó que el aire ingresa al espacio a través de las ventanas abiertas a un 50% de su superficie.

Se efectuó también con el mismo programa el cálculo de la carga de refrigeración para mantener una temperatura de 24 grados en el interior durante la noche, en la temporada de verano.

Tabla 1. Propiedades Térmicas de los Materiales Base de las Casas Simuladas

Material	**Conductividad(W/m^2K)**	**Calor específico(J/kgK)**	**Densidad(kg/m^3)**	**Difusividad x 10^7(m^2/s)**
Paca de trigo	0.018	387	179	2.58
Block de concreto	0.62	840	1040	7.1

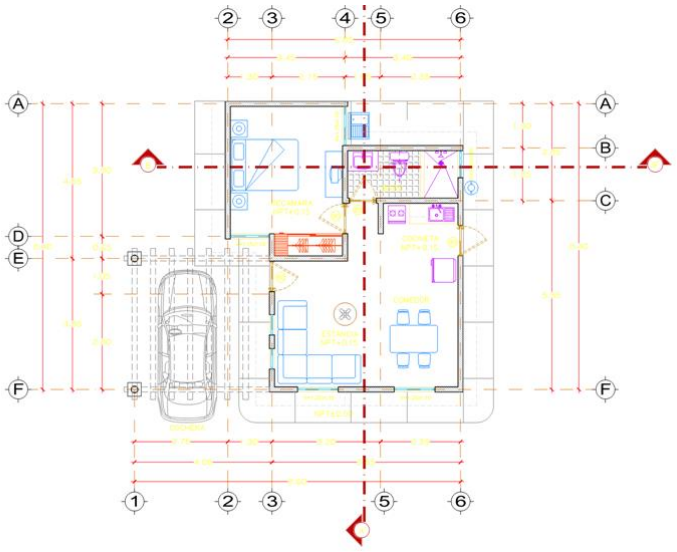


Figura 1. Vista en planta de la casa simulada.

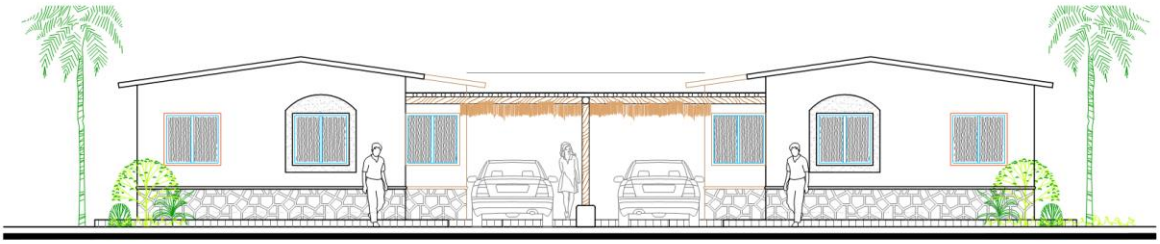


Figura 2. Fachadas de un par de casas de paja de trigo. La de la derecha es la simulada, con orientación norte en la fachada.

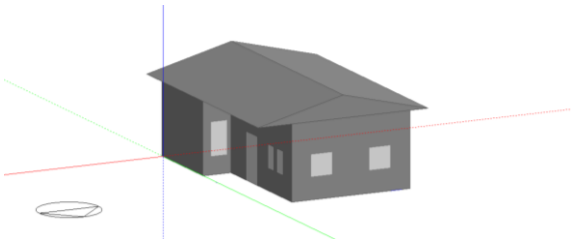


Figura 3. Representación de la geometría de la vivienda simulada en la interfaz de usuario

RESULTADOS

Las Figuras 4 y 5 muestran mediante promedios mensuales de temperaturas para cada hora del día el comportamiento de las viviendas simuladas en meses típicos de verano, en condiciones de ventilación natural. Se observa (Figura 4), que tanto la casa de block como la de pacas de trigo alcanzan temperaturas inferiores a la exterior en el mes de mayo, el cual es parecido en su comportamiento a los meses de junio y octubre (no mostrados por brevedad). Se aprecia que la temperatura en ambas tiene una reducción de 5 grados respecto de la temperatura exterior. Se discute más adelante que las temperaturas máximas del interior alcanzadas (30 °C aproximadamente) corresponden a un límite superior de temperatura neutra según el modelo adaptativo. La Figura 5, la cual corresponde al mes de agosto, indica en ambos tipos de casa unas temperaturas menores que la exterior (35°C), las cuales como se discute más adelante corresponden a condiciones en donde se puede alcanzar el confort con velocidades del aire suficientemente altas.

Como referencia para determinar el grado de confort esperado en las viviendas simuladas presentamos la ecuación de confort térmico adaptativo de Auliciems (citada por Szokolay, 2002):

$$T_n = 17.6 + 0.31T_o$$

Donde T_n es la temperatura de confort y T_o la temperatura promedio mensual, en grados Celsius, con un límite superior para el confort de Tn+2.5 K. , con lo cual tomando como promedios de temperatura exterior en La Paz para mayo y agosto de 27 °C y 31 °C se obtienen límites superiores de confort de 28.5 °C y 29.7 °C.

Por otro lado, la velocidad del aire aumenta en dT las temperaturas de confort (Szokolay, 2002) de acuerdo con la relación:

$$dT = 6v_e - 1.6v_e^2$$

Donde v_e es la velocidad efectiva: velocidad-0.2 m/s. Para 1.5 m/s efectivos proporcionados por brisa o en su defecto ventilador de techo dT = 5K. De tal manera que en esas condiciones de ventilación para usuarios con ropa ligera (0.3 clo) y tasa metabólica de reposo (0.8 met) se pueden tomar como aceptables temperaturas de hasta 33 °C y 36 °C respectivamente para mayo y agosto en La Paz. Así, en mayo se pueden esperar condiciones cercanas al confort en las viviendas simuladas y en agosto únicamente si se recurre a la ventilación mecánica o se presenta brisa y una canalización adecuada de esta.

Como se ha visto, no se presentan grandes diferencias entre el material evaluado y el convencional en el modo de operación de la vivienda de ventilación natural indicado. Cabe recordar que las paredes externas son de baja absortancia y que una mayor carga solar conduciría probablemente a una mayor diferenciación de los comportamientos, cuestión que no se ha abordado en este trabajo ya que el color claro de las paredes es una estrategia de bajo costo comparativamente con otras, por lo que su aplicación es obligada para el ahorro de energía en el logro de condiciones de confort. En vista de que otros autores sí han encontrado un mejor desempeño térmico de las pacas de paja respecto de materiales convencionales como el ladrillo en condiciones de climatización natural en clima tropical (Chamila *et al*, 2012), un

resultado novedoso de este trabajo que amerita mayor estudio es que se muestra evidencia de que estas diferencias en comportamiento térmico en las casas con diferente material en las paredes externas pueden ser menores en ciertas condiciones de operación, estrategias pasivas o climas diferentes.

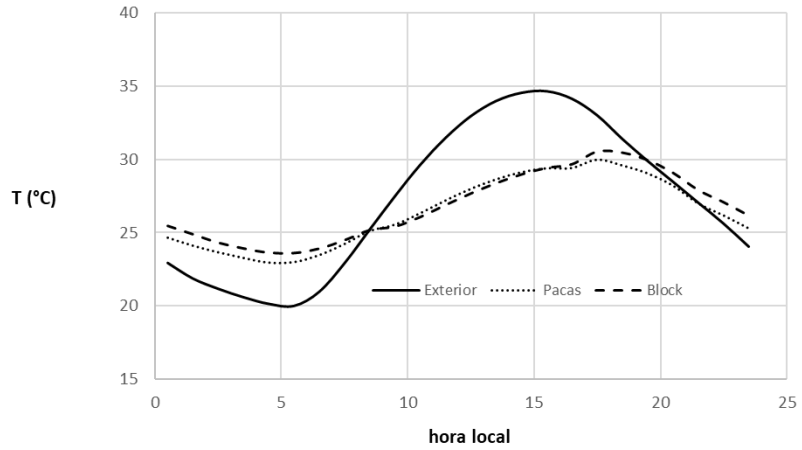


Figura 4. Promedios mensuales de **t**emperaturas horarias externa e interna de la casa de pacas y la casa de block,mes de mayo.

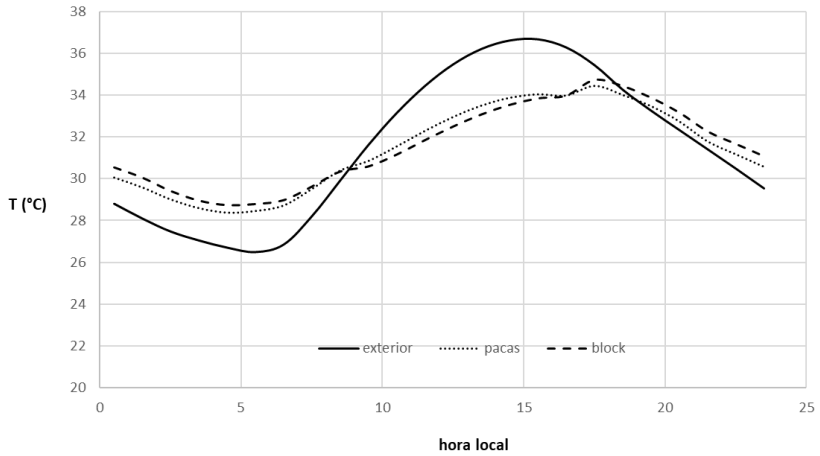


Figura 5. Promedios mensuales de temperatura horarias exterior e interior en las casas de pacas de trigo y de pared de block, mes de agosto.

La tabla 2 indica para los dos tipos de casas, el consumo de electricidad de un sistema de refrigeración (C.O.P 2.8) para mantener la temperatura a 24 grados Celsius. Se observa que con el uso de pacas de trigo se puede reducir este consumo en un 33% en la temporada de verano. Este resultado puede sorprender en vista de que, como ya se comentó, no hay diferencia en el comportamiento térmico de la casa con material convencional y la casa con pacas de paja cuando se operan con ventilación natural; sin embargo, otros autores (Barrios *et al*, 2011) ya han observado que la propiedad que determina el comportamiento térmico cuando la casa está operada con aire acondicionado es la conductividad térmica y en este caso el valor más bajo corresponde a las pacas de paja.

Tabla 2. Consumo de Electricidad para Refrigeración, Casas de Pacas de Paja y de Block

Mes	Pacas de Trigo (kWh)	Block de Concreto (kWh)
mayo	254.8898	418.1253
junio	378.6908	578.2221
julio	636.2589	939.2626
agosto	740.9683	1047.846
septiembre	638.5365	911.8242
octubre	385.6507	612.0395
suma	3034.995	4507.3197

CONCLUSIONES

El uso de pacas de paja se muestra como alternativa interesante, aunque sus beneficios respecto de materiales convencionales en las condiciones de operación y características de la vivienda del presente estudio no son aparentes; sin embargo, el estudio muestra que tanto en la vivienda con el material evaluado como en la vivienda con material convencional se alcanzan condiciones donde el confort se puede obtener con ventilación mecánica en la parte más caliente del verano. Por otro lado, la casa con el material evaluado muestra mejor comportamiento (aproximadamente 30 % menor demanda de energía) que el material convencional en condiciones de climatización artificial (aire acondicionado).

Un resultado novedoso que se obtuvo de manera circunstancial en este trabajo que amerita mayor estudio es que las propiedades térmicas de las paredes pueden no ser determinantes en algunos climas como el de La Paz cuando se usan otras estrategias pasivas como la ventilación y la baja absortancia de la superficie externa de la envolvente, en el caso de viviendas sin climatización artificial en el rango de difusividades térmicas del estudio (2.5-7 x 10^7 m^2/s). De tal manera que la práctica recomendada de aislar térmicamente con materiales convencionales de alto costo debe replantearse para La Paz sopesando su impacto con el de otras medidas como la ventilación y la aplicación de capas de baja absortancia en las paredes, cuando existe la posibilidad de que la vivienda se opere sin climatización artificial.

Finalmente hay que considerar que el hecho de que sea un material de desecho (Cantor,2015), y de hecho un material de captura de carbono, favorece el uso de pacas de paja en comparación con materiales como el block de concreto que requieren grandes cantidades de energía para su producción, por lo que, aunque térmicamente en la modalidad de climatización natural no es superior en las condiciones del presente estudio, ambientalmente en más conveniente.

BIBLIOGRAFÍA

Arumí-Noe, Fco; Hamilton, Kathryn (2016) Thermal inertia of strawbale walls. *Building XIII conference*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes. Ponencia 63. https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1998%20B7%20papers/063_Arumi_Noe.pdf

Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavon S (2015) A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies.* Volume 4, Pages 1-17. Elsevier

Auliciems, A: Towards a psycho-physiological model of thermal perception. *Int J Biometeorolgy*. 25:109-122

Barrios,G;Huelz,G;Rechtman, R;y Rodriguez-Rojas,J.Wall/Roof (2011)Thermal Performance Differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. *Energy and Buildings*.43(1)229-223.

Brojan, L, Petric A, CloustonP.(2013)A Comparative Study of Brick and Straw Bale Wall Systems from Enviromental, Economical and Energy Perspectives. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol 8, No. 11.

Cantor, Andres; Maria, Dana; Manea, Daniela Lucia (2015) Using Wheat Straw in Construction. *ProEnvironment* 8 pp 17 – 23

Chamila,J.P.S., Halwatura,R. U.(2012) Performance of Straw Bale Houses in Tropical Climatic Condition. Disponible en: http://www.civil.mrt.ac.lk/conference/ICSBE2012/SBE-12-200.pdf

D'Alessandro F, Bianchi F, Baldinelli G., Rotili A, Shiavoni S(1917) Straw Bale Constructions: Laboratory, in field and numerical assesment of energy and enviromental performance. *Journal of Building Engineering.* 11 pp. 56-68.

Garas G, Allam M (2011) Thermal Performance of Plastered Rice Straw Bales and Walls: A case Study. *International Journal of Sustainable Development and Planning* Vol. 6, No. 2 226–23

Gallegos R, Magaña-Guzmán T, Reyes-López JA,Romero Hernández MS(2017) Thermal behavior of a straw bale building from data obtained in situ . A case in Northwestern México. · Building and Environment 124 pp 336-341

Rikki Nitzkin y Maren Termens (2010) Casas de paja. *Una guía para autoconstructores*. Ediciones Ecohabitar. Olba (Teruel)

Szokolay, Steven y Tenorio Rosangela (2002). Energy saving in tropical climates and house design for dual mode of operation. *PLEA 2002 Proceedings.*

Disponible ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/PLEA_2002/5_DESIGN_STRATEGIES/SZOKOLAY.PDF

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA MEZCLA BINARIA COMO FLUIDO DE TRABAJO EN UN CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO

Jesús J. Luna Jaime y Yuridiana R. Galindo Luna
[a] Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Licenciatura en energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1 A Sección, Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09310, México,
cbi2162014488@izt.uam.mx

[b] Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1 A Sección, Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09310, México, **ygalindol@izt.uam.mx**

RESUMEN

El sol emite 62,600 KW/m^2, al planeta tierra en dos días llega la energía equivalente a las reservas de carbón, gas y petróleo. La energía solar puede transformarse en energía térmica mediante concentradores solares como el concentrador cilindro parabólico. En este trabajo se propone la evaluación experimental de un concentrador cilindro parabólico (CCP), compuesto por un receptor (utiliza dos tubos concéntricos uno de borosilicato y el otro de cobre), lamina comercial de alta reflectividad, sistema de seguimiento, estructura metálica y sistema hidráulico. Se evaluó la eficiencia térmica del concentrador considerando un fluido base (agua) y una mezcla (agua-etilenglicol 5%), manteniendo un flujo fijo de 6 L/min para ambos fluidos. Se realizaron pruebas el 15 y 30 de abril, con irradiancia directa máxima de 845 w/m^2 para el 15 de abril (fluido base) y 815 W/m^2 para el 30 de abril (mezcla). Los resultados mostraron una eficiencia térmica máxima de 42.59% para el fluido base, mientras que para la mezcla agua-etilenglicol al 5% fue de 43.96%, logrando un incremento del 1.37% con respecto al fluido base. Este análisis nos permite explorar el uso del etilenglicol para mejorar la eficiencia térmica considerando las condiciones de clima de otros estados, con la finalidad de demostrar la viabilidad de la mezcla como fluido de trabajo.

ABSTRACT

The sun emits 62,600 KW/m², in two days, the energy reaching planet Earth is equivalent to the reserves of coal, gas, and oil. Solar energy can be transformed into thermal energy using solar concentrators such as parabolic trough collector. This analyses proposes the experimental evaluation of a parabolic trough concentrator that consist of a receiver (concentric tubes made of borosilicate and copper), high reflectivity commercial sheet, a tracking system, a metal support, and a hydraulic system. The thermal efficiency of the concentrator was evaluated considered two fluids, base fluid (water) and mixture (water- ethylene glycol 5%), maintaining a fixed flow of 6 L/min for both. Tests were conducted on April 15 and 30, with a maximum direct irradiance of 845 W/m² on April 15 (water) and 815 W/m² on April 30 (5% mixture). The results showed a maximum thermal efficiency of 42.59% for the base fluid and 43.96% for the 5% water-ethylene glycol mixture, achieving an increase of 1.37% compared to the base fluid. This analysis allows us to explore the use of ethylene glycol to improve thermal efficiency considering the climate conditions of other locations, in order to demonstrate the viability of the mixture as a working fluid.

Palabras claves: Energía solar, Concentrador Cilindro Parabólico, Eficiencia térmica, Fluido de trabajo, Evaluación experimental.

INTRODUCCIÓN

El sol en términos de la existencia humana es prácticamente una fuente inagotable de energía emitiendo continuamente 62,600 KW/m^2, en dos días el planeta Tierra recibe la energía equivalente a las reservas de petróleo, gas y carbón. Los primeros registros del uso de energía solar son de romanos, griegos y chinos, que aprovechaban el recurso para prender fuego con lentes y espejos. Actualmente existen dos tecnologías como alternativa para aprovechar el recurso solar, sistemas fotovoltaicos y sistemas térmicos los cuales se utiliza para calentamiento de agua, cocción de alimentos, refrigeración y secado de alimentos (Arancibia et al, 2010). Los concentradores solares trabajan con la radiación solar directa, son dispositivos ópticos que reflejan la radiación solar que incide en su área de apertura (tamaño del receptor) y la concentran sobre una superficie absorbente (Almanza et al, 1994). Algunos tipos de concentradores solares son:

- Concentrador disco parabólico: Están compuestos por un captador y un receptor, el primero; en forma de disco parabólico cubierto de espejos, película reflectiva o metal pulido para reflejar la radiación solar y concentrarla en el área focal del paraboloide, donde se sitúa el receptor encargado de transformar la radiación solar en energía térmica, el receptor puede ser un motor Stirling o algún fluido de trabajo, esto depende del uso que se desee dar al concentrador. El concentrador tiene un seguimiento solar de dos ejes (azimut y elevación) (Balado, 2011).

- Concentrador lineal Fresnel: Se componen por captadores y un receptor lineal; en esta tecnología los captadores forman una

superficie compuesta por espejos ligeramente curvos o planos con rotación en un eje, esto para tratar de imitar una superficie continúa. Los espejos dirigen y concentran la radiación solar en la línea focal ubicada en la parte superior de los espejos, donde se encuentra el receptor, este es un tubo absorbedor el cual se encarga de transformar la radiación solar en energía térmica (Ginés, 2018).

- Concentrador cilindro parabólico: Se compone por un receptor y un captador. Como su nombre lo indica el captador es un cilindro parabólico de superficie reflejante, montado en una estructura normalmente con seguimiento en un eje orientado al Norte/Sur o Este/Oeste. En la línea focal (donde se concentra la radiación solar y se transforma en energía térmica) se encuentra el receptor que puede ser un solo tubo o dos tubos concéntricos donde el tubo interior es metálico con un recubrimiento selectivo, buscando tener gran absortividad en el espectro de radiación solar (~94%) y baja emisividad en el espectro infrarrojo (~15%). El tubo exterior es de cristal (borosilicato) con el objetivo de evitar pérdidas de calor convectivas del tubo metálico y proteger el recubrimiento de las diversas condiciones climáticas. Dentro del receptor circula el fluido de trabajo (Fluido caloportador) el cual dependiendo de las temperaturas de operación puede ser agua o una mezcla de agua con refrigerantes para temperaturas moderadas (<200°C) y aceites térmicos o sales fundidas para temperaturas altas (200°C - 450°C) (Ginés, 2018).

El calor útil está relacionado con las propiedades del receptor y del fluido caloportador, el último es de gran importancia debido a que transfiere y almacena la energía térmica. Debido a esto es conveniente mejorar las propiedades termofísicas de fluido caloportador para mejorar la eficiencia global (Krishna et al, 2020). Ahmed Yassen T. (2012) evaluó un concentrador cilindro parabólico con área de apertura de 1.9 m², ubicado en la Universidad de Tikrit (Irak), reporto una eficiencia de (40-65%) para flujos de agua de (20.23-100 Kg/h) y una irradiancia de (240-950 w/m²). Vidriales Escobar L.G. (2007) analizo un concentrador cilindro parabólico con cubierta de vidrio y un área de apertura de 2.56 m^2, con ubicación en Temixco Morelos, el autor reporto una eficiencia del concentrador de 9.5 a 16.7 %, con un flujo de agua de 0.0058 Kg/s y una irradiancia media de 872.6 W/m². Franco J. y Dellicompagni P. (2020) realizaron pruebas en un concentrador cilindro parabólico con área de apertura de 5.41 m^2, con ubicación en la provincia de Salta (Argentina), reportaron una eficiencia no mayor a 25% con un caudal de agua de agua de 1.5 - 17.5 kg/min y con un rango de energía solar incidente de 33 - 42 MJ. Almaraz Almaraz V. V. (2020) realizo pruebas con 4 concentradores solares cilindro parabólicos en el CIIDIR IPN (Oaxaca), considerando un área de apertura total de 13.4754 m^2, utilizo dos fluidos caloportadores (agua y aceite sintético) con flujos de 9, 12 y 15 L/min, la irradiancia para las pruebas con aceite sintético fue 800-900 W/m^2 mientras que para en agua fue de 800-1100 W/m^2. Reporto eficiencias térmicas para el agua de 53-78% y para el aceite sintético 50-58%. Franco Martínez D. et al. (2019) trabajaron con dos concentradores solares cilindro parabólicos en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, con estos prototipos lograron un área de apertura de 6 m^2, usaron un flujo de agua de 0.575 L/min, con irradiancia de 200-900 W/m^2, de acuerdo a sus resultados, determinaron una eficiencia promedió de 70%.

De acuerdo a la revisión, la comunidad científica ha evocado sus esfuerzos en la búsqueda de nuevos fluidos de trabajo, por lo que en este trabajo se presenta la evaluación y comparativa de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico utilizando agua y una mezcla de agua-etilenglicol al 5%, en condiciones climáticas de ciudad de México.

METODOLOGÍA

El concentrador cilindro parabólico que estudiaremos se encuentra en la UAM unidad Iztapalapa con ubicación en latitud 19°21'40.8"N y longitud 99°04'27.5"W. El concentrador tiene una orientación Norte/Sur y un sistema de seguimiento comercial en un eje (Este-Oeste).

Descripción del sistema

El concentrador está compuesto por:

- Captador: Tiene una longitud de 2.51m y 1.08m de ancho, se conforma de una lámina de aluminio de alta reflectancia de la marca comercial Alanod, sujeta a cuatro costillas metálicas encargadas de darle la forma geométrica de cilindro parabólico. Las costillas están unidas en su parte inferior mediante un tubo metálico con baleros en su extremo como se muestra en la Figura 1.
- Estructura metálica: Está compuesta por PTR cuadrado de 1", consta de dos soportes donde descansan los baleros que permiten el movimiento al concentrador.
- Sistema de seguimiento: Compuesto por un actuador lineal comercial y un controlador de 12v. El actuador está sujeto con soportes de montaje al captador y a la estructura metálica.
- Sistema hidráulico: Cuenta con una bomba de ½ HP, tinaco de 250L, llaves de paso, flujómetro y tubería de cobre de ¾"; la tubería cuenta con un bypass para controlar el flujo que pasa por el receptor y dos flujometros.
- Receptor: Consta de dos tubos concéntricos, el tubo interno es de 1" de cobre con recubrimiento de solkote comercial, el tubo exterior es de borosilicato de 2 ½" como se muestra en la Figura 1.

Para medir la radiación solar directa se utilizan dos piranómetros, uno se sombrea con una tira metálica para medir radiación difusa, el segundo mide la radiación global. Se ocupan termómetros digitales para medir la temperatura a la entrada y salida del receptor. Además, se fija el flujo de trabajo mediante las llaves de paso y se verifica en el flujómetro. Estos sensores están conectados a una computadora para

el registro de los datos durante el periodo de prueba.

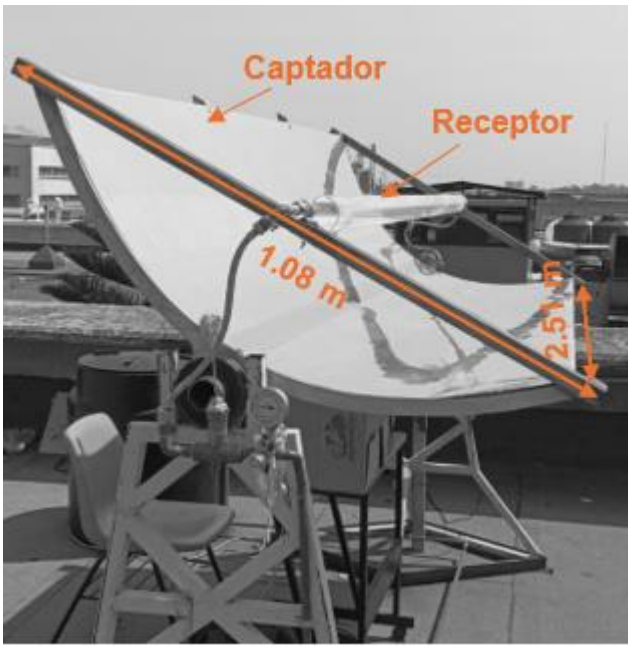


Figura 1, Concentrador cilindro parabólico en UAM Iztapalapa.

Modelo matemático.

La norma ASHRAE 93-1986 (RA 91) determina la eficiencia de un colector solar como el cociente de la energía útil real recolectado y la energía solar interceptada por el área bruta, la norma nos indica la siguiente ecuación para un concentrador solar (ecuación 1):

$$\eta_t = \frac{\dot{m} C_P (T_e - T_i)}{A_a G_b} \quad (1)$$

Donde
$\dot{m}$ = Flujo másico del fluido caloportador (Kg/s)
C_P = Calor específico del fluido caloportador $(J/Kg\,°C)$
T_e = Temperatura del fluido caloportador a la salida del colector $(°C)$
T_i =Temperatura del fluido caloportador a la entrada del colector $(°C)$
A_a = Área de apertura del concentrador (m^2)
G_b = Irradiancia directa en el plano de apertura (W/m^2)

El calor específico se determinó mediante los datos reportados en MEGlobal, obteniendo los valores de la Tabla 1.

Tabla 1, Cp para distintas temperaturas y mezclas de agua-etilenglicol

	Cp [KJ/Kg °C]	
	% Etilenglicol	
T [°C]	**0**	**5**
0	4.20	4.14
10	4.19	4.14
20	4.19	4.14
30	4.18	4.14
40	4.18	4.14

50	4.18	4.15
60	4.19	4.16
70	4.19	4.16
80	4.20	4.17
90	4.21	4.18

RESULTADOS

La evaluación experimental se realizó con un flujo de 6 litros por minuto (LPM) para ambos casos, el día 15 de abril se utilizó agua como fluido caloportador, el 30 de abril se usó la mezcla agua-etilenglicol al 5%. Las pruebas se realizaron en un periodo de 10:30 am a 1:19 pm, con una temperatura ambiente (T_a) de 28°C. Vale la pena mencionar que, en los días de las pruebas, protección civil emitió comunicados de precaución por temperaturas máximas (30-32 °C) (Secretaría de gestión integral de riesgos y protección civil, 2024).

En la Figura 2, se muestra el comportamiento de la irradiancia directa (G_b) con respecto de la hora local, para el 15 de abril se tuvo un valor de G_b máxima de 845 w/m^2, cabe señalar que se registraron intervalos con nubes de 11:09 am a 11:29 am con irradiancia mínima de 515 w/m^2 y de 12:19 pm a 12:39 pm disminuyo el valor de irradiancia directa a 682 w/m^2. El 30 de abril se midió una irradiancia directa máxima de 815 w/m^2, y a las 12:49 pm la irradiancia comenzó a descender hasta valores de 364 w/m^2 a la 1:19 pm.

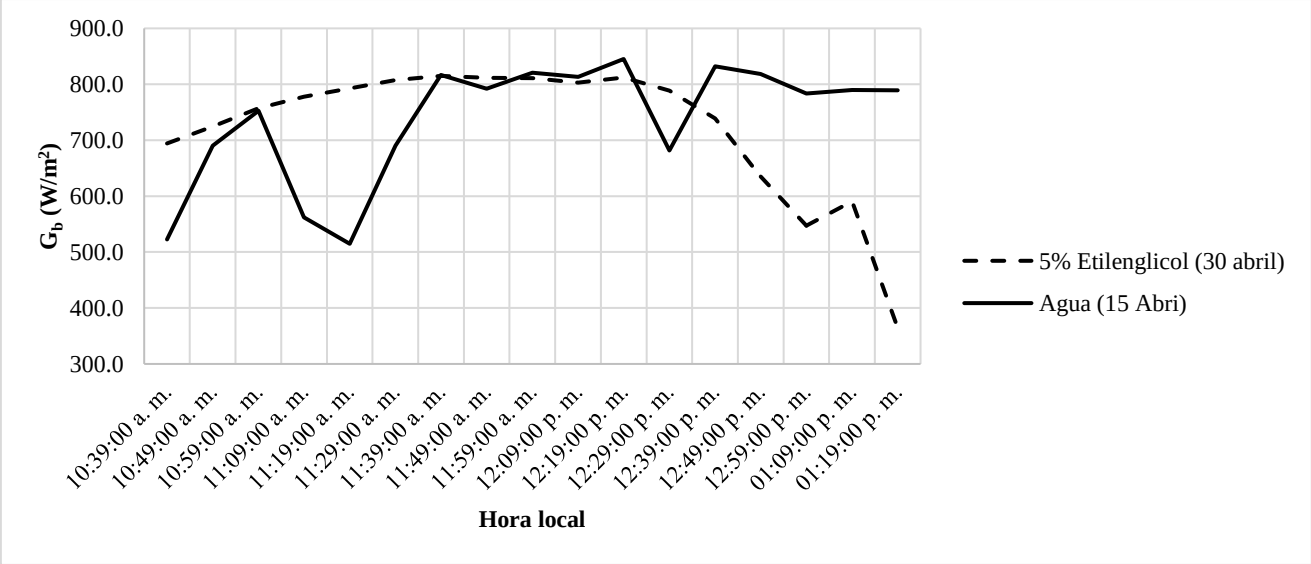


Figura 2, Comparativa de la irradiancia directa durante las pruebas.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la eficiencia promediada cada 10 minutos en comparación con la temperatura de entrada al receptor (T_i) menos la ambiente (T_a) con relación a la irradiancia directa (G_b). Podemos observar que el 15 de abril se calculó una eficiencia máxima de 42.59% en comparación al 30 de abril donde se determinó una eficiencia máxima de 43.96%, con una diferencia de 1.37%, cabe señalar que la diferencia de temperatura promedio a la entrada con respecto a la salida del receptor fue de 1.79 °C para el 15 abril y 1.86 °C para el 30 de abril.

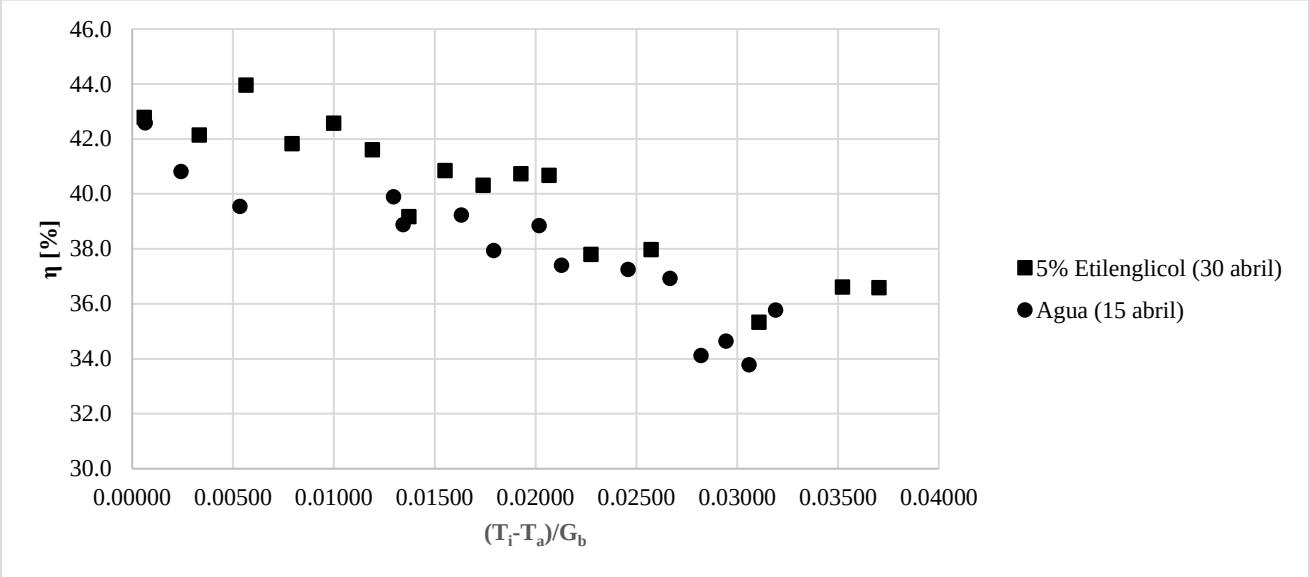


Figura 3, comparación de la eficiencia térmica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó la comparativa de dos fluidos de trabajo agua y la mezcla agua-etilenglicol al 5%, en un horario de 10:30 am a 1:19 pm, el 15 de abril y el 30 de abril, manteniendo fijo un flujo de 6 L/m. En condiciones climáticas de la Ciudad de México.

- Se observó que el valor de radiación directa máxima fue de 845 w/m^2 para el 15 de abril, y 815 w/m^2 para el día 30 de abril. Con valores promedio de 736 w/m^2 y 722 w/m^2, respectivamente. Vale la pena mencionar que durante la prueba del fluido base, se registraron intervalos nubosos.
- Se determinó la eficiencia térmica máxima utilizando agua como fluido de trabajo con un valor de 42.59 %, mientras que su valor promedio fue de 37.85%. Se calculó la eficiencia térmica máxima usando la mezcla agua-etilenglicol al 5%, el valor obtenido fue de 43.96% y un valor promedio de 40.06%.
- La comparativa muestra un incremento del 1.37% en la eficiencia máxima cuando se utiliza la mezcla como fluido de trabajo con respecto al fluido base y un incremento de 2.2% con valores promedio.

Los resultados obtenidos nos motivan a seguir evaluando la mezcla agua-etilenglicol con el objetivo de encontrar el rango óptimo de concentración de etilenglicol para incrementar la eficiencia térmica del CCP.

REFERENCIAS

Ahmed Yassen T. (2012). Experimental and Theoretical Study of a Parabolic Trough Solar Collector, Anbar Journal for Engineering Sciences, Vol. 5, No.1, p.109-125.
Almanza S. R. and Muños. G. F. (1994). Ingeniería de la Energía Solar, p. 77. El Colegio Nacional, México.
Almaraz Almaraz V. V. (2020). Análisis de eficiencia térmica del calentamiento solar de aire mediante un concentrador de canal parabólico como sistema auxiliar en el proceso de secado [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.
American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (1986). Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, No. 93.
Arancibia Bulnes C., Best R. and Brown (2010). Energía del Sol, Ciencia, Vol. 61, No. 4, p. 10-17.
Balado Leal E. (2011). Prototipo de campo de colectores solares cilindro-parabólicos para generación de calor a alta temperatura [Tesis de licenciatura]. Universidad Carlos III, Madrid, España.
Franco J. and Dellicompagani P. (2020). Concentrador solar cilindro-parabólico de bajo costo, para la provisión de energía térmica para pequeña y mediana industria, CIES2020, Lisboa, Portugal.
Franco Martínez D. and Ramírez Silva P. (2019). Estudio de la eficiencia instantánea térmica de un campo de colectores cilíndrico Parabólico, Revista de Sistemas Experimentales, Vol. 6 No. 19, p. 1-5.
Ginés Magaz P. (2018). Comparación de modelos físicos de captadores cilindro-parabólico [Tesis de licenciatura]. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Krishna Y., Faizal M.,Saidur R., K.C. Ng and Aslfattahi N. (2020). State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 152.
MEGlobal (2013). Ethylene Glycol Product Guide.
Secretaría de gestión integral de riesgos y protección civil (15 de abril del2024). LUNES MUY CALUROSO EN LA CDMX. (https://www.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/index.php/comunicacion/nota/150424)
Secretaría de gestión integral de riesgos y protección civil (30 de abril de 2024). MARTES MUY CALUROSO EN LA CDMX (https://www.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/300424)
Vidriales Escobar L.G.(2007). Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de Meéxico, Temixco, Morelos, México.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EXPERIMENTAL DE UN CCP EN LA UAM-IZTAPALAPA

Jorge Ramos Sierra y Yuridiana R. Galindo Luna
[a] Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Licenciatura en energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1 A Sección, Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09310, México, cbi2133013360@izt.uam.mx

[b] Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1 A Sección, Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09310, México, ygalindol@izt.uam.mx

RESUMEN

El aumento en la producción industrial en México y el mundo, demanda un incremento en la generación de energía, pero al mismo tiempo genera problemas de contaminación. La energía solar es una fuente renovable y viable para contribuir a la generación de energía así como para reducir los problemas de contaminación. Los concentradores solares son dispositivos que transforman la irradiación solar en energía térmica y son empleados en diferentes procesos. Este trabajo presenta el estudio de la eficiencia térmica de un tipo en particular de concentrador solar: Concentrador Cilindro Parabólico (CCP) utilizando agua como fluido de trabajo. Se evaluó la eficiencia térmica para el agua como fluido caloportador, a dos diferentes flujos. Las pruebas se realizarón el 7 de febrero con un flujo de 6 l/min y el 11 de Abril con 4 l/min. Las eficiencias térmicas determinadas fueron 48.32 % y 32.8 %, respectivamente.

ABSTRAC

The increase in industrial production in Mexico and the world demands an increase in energy generation but at the same time generates pollution problems. Solar energy is a renewable and viable source to contribute to energy generation and at the same time reduces pollution problems. Solar concentrators are devices that transform solar irradiation into thermal energy and are used in different processes. This work presents the study of the thermal efficiency of a particular type of solar concentrator: Parabolic Trough Concentrator (PTC) that used water as working fluid. The thermal efficiency was evaluated for water as the heat transfer fluid, at two different flow rates. The tests were carried out on February 7 with a flow rate of 6 l/min and on April 11 with 4 l/min. The thermal efficiencies were 48.32 % and 32.8 %, respectively.

Palabras claves: Energías renovables, energía solar, colector cilindro parabólico, fluido caloportador, eficiencia térmica.

INTRODUCCION

México tuvo un crecimiento del 3.7% en la producción industrial en los primeros 9 meses del año 2023 con respecto al año anterior, lo cual demanda una mayor generación de energía. Los sectores de mayor crecimiento fueron la construcción, la generación de electricidad, suministro de agua y gas, la manufactura y la minería. (Forber Mexico , 2023). Con este panorama, se presenta el reto de hacer frente a la creciente demanda de energía y cambiar nuestras actuales prácticas energéticas hacia modelos de generación más limpios. Se consideran energías limpias aquellas fuentes y métodos de producción de energía que generan emisiones o desechos que no superan los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales. Estas fuentes se dividen principalmente en energía hidráulica, energía de biomasa, energía geotérmica, energía eólica y energía solar (SENER, 2021). La energía solar es la principal fuente de energía renovable, la cual es emitida desde el Sol, viaja por el espacio en forma de radiación electromagnética y llega a la superficie terrestre. Esta forma de energía renovable se utiliza principalmente en la generación de electricidad, calentamiento de agua, cocción de alimentos, calefacción y aire acondicionado, entre otras aplicaciones (Gobierno de México, 2016). México es un país privilegiado al tener un promedio diario de irradiación solar que fluctúa entre los 5.66 KWh/m^2 y 6.16 KWh/m^2 al día. Los concentradores solares son dispositivos que sirven para concentrar la radiación solar, estos sistemas utilizan la reflexión de los rayos solares a través de una superficie reflectante y los concentran en un receptor (Insumos Energía Renovable Fotovoltaica en México y su proyección al 2020, s.f.). La tecnología de concentración solar, puede clasificarse como de media y alta temperatura, en esta sección podemos encontrar los siguientes:

- Sistemas de Torre Central: Están compuestos por cientos de espejos, dispuestos de tal manera que reflejan la radiación solar a una región focal situado en lo alto de una torre. Estos sistemas pueden alcanzar temperaturas de hasta 2,000 °C. Los heliostatos, cuentan con un sistema de seguimiento en dos ejes. Los sistemas de torre central pueden usar vapor de agua o sales fundidas como fluido de trabajo y cuentan con tanques donde se almacena este fluido para acumular la energía térmica (LACYQS, 2015).
- Concentrador Lineal Fresnel (CLF): Estos colectores le deben su nombre al inventor francés Augustin Fresnel. Entre sus principales componentes se encuentran los espejos, el receptor y sistema de seguimiento en un eje (Romero, 2019). La superficie reflectiva consta de una serie de espejos largos y estrechos que en su conjunto simulan una parábola. Cada uno de estos espejos tiene un ángulo diferente al resto y todos ellos reflejan la radiación solar a un tubo receptor. Cuando se utiliza agua como fluido caloportador, se presenta un cambio de fase en los tubos para posteriormente usar el vapor de agua en una turbina de vapor saturado (Energías Renovables, 2022).

- Concentrador disco parabólico: Este dispositivo se compone de un disco parabólico cuya superficie es cubierta por un material reflejante, que a su vez dirige los rayos solares hacia una superficie absorbedora ubicada en el eje focal de la parábola. En el punto focal se encuentra el receptor, como su nombre lo indica, absorbe la radiación solar y la transforma en energía térmica (Energías Renovables, 2022).
- Concentrador cilindro parabólico (CCP): Este dispositivo se compone de un cilindro parabólico y un receptor. El receptor consta de un tubo metálico (acero inoxidable, aluminio, etc.) el cual puede poseer un recubrimiento llamado película selectiva para mejorar la absorción de la energía y el tubo receptor el cual es encapsulado en una envoltura de vidrio evacuado. El CCP posee un sistema de seguimiento en un eje (Melo, 2018).

La comunidad académica se ha esforzado por mejorar la tecnología de concentración, algunos ejemplos son los siguientes análisis sobre la eficiencia térmica del agua como fluido de trabajo en un CCP. En el 2017, en la cuidad de Riobamba Ecuador, se calculó la eficiencia térmica de un CCP, la ración solar promedio fue de 4.48 kWh/m^2, el área de apertura de 2.3424 m^2, con un ancho de 1 m y 2.44 m de longitud, el diámetro del receptor fue de 0.0254 m. Se trabajo con 50 litros de agua como fluido caloportador. Se reporto que para una velocidad de 0.034 m/s logro un incremento de 11.6 °C y con una velocidad de 0.12 m/s se reportó un incremento de 3.4 °C. Se concluyó que a menor velocidad del fluido caloportador mayor será el aumento de su temperatura, finalmente determinaron una eficiencia térmica de 34.84% (Chamorro Páez et. al., 2017). En 2022 en la Universidad Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, en la ciudad de Chachapoyas Perú, se evalúo la eficiencia térmica de un CCP. El registro de datos fue en un periodo de 8:30 a 17:00 h. durante 30 días. La radiación promedio fue de 900 Wh/m^2, la superficie reflectiva tuvo una longitud de 2.45 m y un ancho de 1.15 m, el diámetro del tubo receptor fue de ½ pulgada hecho de cobre pintado de color negro, la eficiencia promedio fue de 60% con picos de 70%. (Delgado Rodríguez,2022). En el 2019, en el municipio de Nezahualcóyotl Estado de México, David Franco Martínez y Pablo Ramírez Silva determinaron la eficiencia de un CCP de 2 m de largo y 1.50 m de ancho y un ángulo de apertura de 90°, la radiación solar promedio fue de 650 w/m^2. El fluido caloportador fue agua y tuvo un flujo de 0.575 l/m. El diámetro del tubo receptor fue de 0.05 m. Se determinó que la eficiencia térmica promedio del 70% (Franco Martínez y Ramírez Silva, 2019). Josué Hernández Cancino en el 2016, realizo un trabajo de investigación con el objetivo de generar energía eléctrica a partir de CCP. El trabajo se realizo en el estado de Oaxaca en el municipio de San Agustín Loxita donde la radiación promedio era de 600 W/m$^{2|}$. La longitud del receptor fue de 9.965 m, el área de apertura fue de 10.37 m^2, el flujo fue de 10 l/min. Los autores, reportaron mensualmente un promedio de la eficiencia térmica en un periodo de un año, teniendo el valor más alto en el mes de Abril con un 67.67% de eficiencia térmica, los meses de Mayo, Junio y Julio fueron los de menor eficiencia con 45%.(Josué Hernández Cancino, 2016). En el 2014, Karla M. Velázquez Lucho determino la eficiencia térmica de un CCP en Temixco, Morelos en los meses de Febrero, Marzo, Abril y Mayo. La radiación solar promedio era de 790 W/m^2, la velocidad del viento era entre los 2.2 y 4.5 m/s. Se realizaron pruebas para dos diferentes flujos usando agua como fluido caloportador. Se determinó que la eficiencia térmica para un flujo de 5 l/min fue de 56% mientras que para un flujo de 7 l/m la eficiencia térmica fue de 55% (Velázquez Lucho, 2014).

De acuerdo a los antecedentes reportados, la evaluación de un CCP a diferentes condiciones es interesante debido a la aplicación que esta energía térmica puede tener. En este trabajo se evaluara la eficiencia térmica de un CCP utilizando agua como fluido de trabajo, este dispositivo está ubicado en las instalaciones de la UAM-I en la CDMX (latitud 19°21'40.8"N y longitud 99°04'27.5"W). La variación de los flujos másicos resulta interesante debido al efecto que tiene sobre la eficiencia térmica.

METODOLOGÍA

Descripción del sistema

El CCP con el que se trabajó, se encuentra instalado en la azotea del edificio AT de la UAM-I, la orientación del colector se dispuso en orientación Norte-Sur con seguimiento Este-Oeste, como se muestra en la Figura 1. El captador tiene cuatro costillas metálicas que dan estructura a la lámina. Este descansa sobre una estructura con baleros que permiten el movimiento del captador. El receptor está compuesto por dos tubos, uno dentro del otro, el primero de cobre y el segundo de borosilicato. El sistema cuenta con una bomba de ½ HP, un termotanque de 250 litros, llaves de paso, flujómetro y la tubería de cobre. También tiene un sistema de seguimiento con un actuador lineal y un control de 12 v.

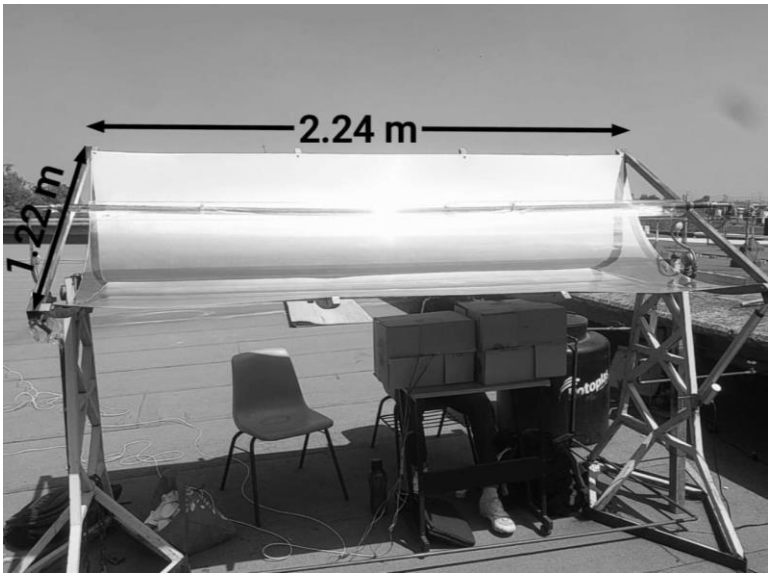


Figura 1. Concentrador cilindro parabólico en UAM Iztapalapa.

En la Tabla 1, se presentan los parámetros de dimensionamiento del captador, receptor y estructura del CCP.

Tabla 1. Dimensiones del CCP.

Parámetro	**Valor**
CAPTADOR	
Material	Aluminio
Reflectividad	0.98
Largo	2.24 m
Ancho	1.22 m
RECEPTOR	
D_e del tubo de cobre	0.0254 m
D_e del tubo de borosilicato	0.0643 m
ESTRUCTURA METALICA	
PTR	0.0254 m

El flujo del agua es determinado a partir del flujómetro, el cual se encuentra en la entrada del tubo receptor. La temperatura del fluido es medido a la entrada y a la salida del tubo receptor con dos termómetros digitales. Para obtener los datos de radiación solar se usan dos piranómetros, uno de ellos se encuentra expuesto al sol procurando que en todo momento esté libre de sombras y obtener así los datos de radiación global, el otro es cubierto por una placa metálica y así medir la radiación difusa.

Modelo matemático.

La evaluación de la eficiencia térmica se realizó de acuerdo con Bellos (Bellos et al. 2017), como el cociente de la energía útil recolectada y la energía solar interceptada por el área de apertura, la norma nos indica la siguiente ecuación para un concentrador solar (ecuación 1):

$$\eta_t = \frac{\dot{m} C_p (Ts - Te)}{A_g G_b} \quad (1)$$

Donde
$\dot{m}$= Flujo másico del fluido caloportador (Kg/s)
C_p= Calor específico del fluido caloportador (J/kg°C)
T_s= Temperatura del fluido caloportador a la salida del colector (°C)
T_e=Temperatura del fluido caloportador a la entrada del colector (°C)
A_g= Área de apertura del concentrador (m^2)
G_b= Irradiancia directa en el plano de apertura (W/m^2)

RESULTADOS

La evaluación experimental fue realizada durante los meses de en Febrero y Abril, en un periodo de 10:00 hasta las 14:00 h., para el estudio se utilizaron dos flujos másicos de agua con valor de 0.1 kg/s y 0.06 kg/s.

En la Figura 2, se observa el comportamiento de la irradiancia solar directa con respecto a la hora local. En esta se muestra, un día típico donde G_b aumenta con el transcurso del día, y disminuye después del mediodía solar. El valor máximo registrado fue de 805.38 W/m^2, alrededor de las 12:43 h, para este día soleado el valor promedio calculado fue de 750.79 W/m^2. Cabe mencionar que aprecian intervalos nubosos al inicio y cercanos a las 13:00 h.

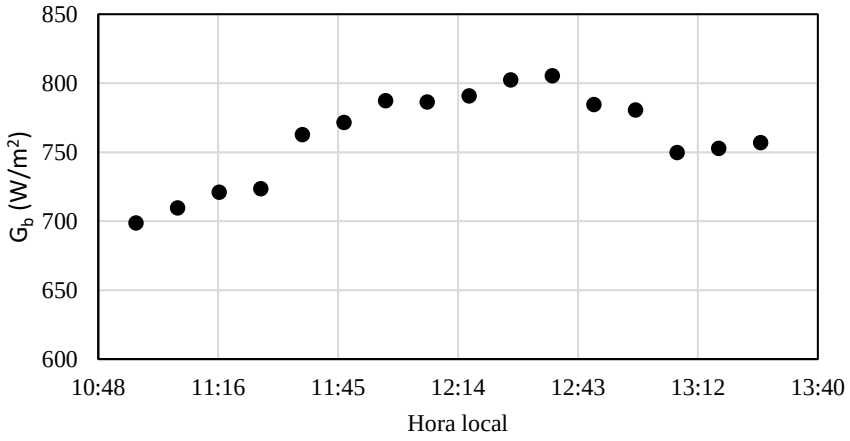


Figura 2. Irradiación directa en la Cuidad de México, correspondiente al 7 de febrero de 2024.

Durante la evaluación experimental la temperatura máxima del agua alcanzada fue de 55.7 °C a la salida del colector, utilizando 0.1 kg/s. Las eficiencias térmicas máximas determinadas fue de 48.32 % y la mínima 17.57 % para el 7 de febrero del año en curso. En la Figura 3, se muestra el comportamiento de la eficiencia térmica con respecto a la hora local.

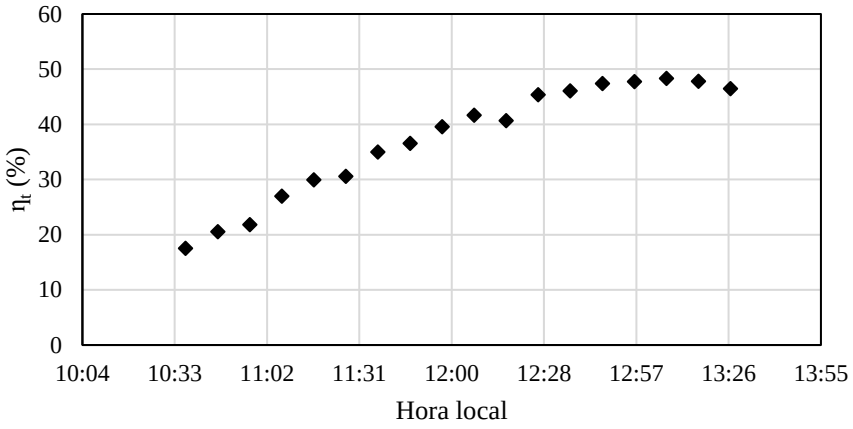


Figura 3. Eficiencia térmica del 7 de febrero.

En la Figura 4 se muestra el promedio de la irradiación solar cada 10 minutos. La grafica muestra el comportamiento de un día típico soleado en la CDMX. La irradiación máxima es de 867 W/m^2, una mínima de 791 W/m^2 y un promedio de 840.33 W/m^2.

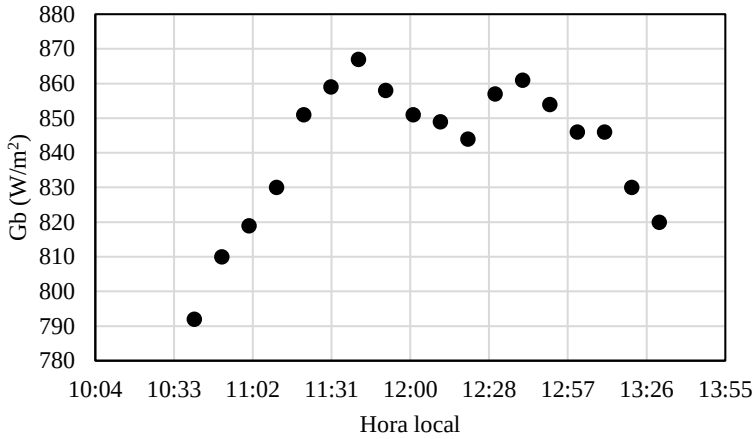


Figura 4. Irradiación directa en la Cuidad de México, correspondiente al 11 de abril de 2024.

En la Figura 5, se observa el comportamiento de la eficiencia con respecto al tiempo local, esta figura muestra una disminución de la eficiencia térmica alrededor del mediodía debido a la presencia de nubes, seguido de un aumento ligero. La eficiencia máxima fue de 32.8 % y la mínima es de 17.01 % teniendo un promedio de 28.44 %.

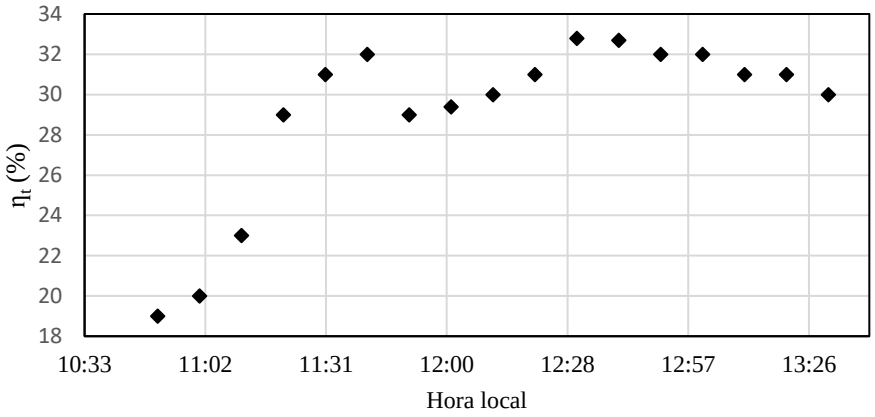


Figura 5. Eficiencia térmica del 11 de abril.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se estudió la eficiencia del agua como fluido caloportador de un CCP utilizando dos flujos 6 l/min y 4 l/min, las pruebas presentadas fueron realizadas el 7 de febrero y el 11 de abril.

- Durante la evaluación del 7 de febrero, se registro un día soleado con valor promedio de Gb de 750.79 W/m^2, para este día la eficiencia térmica máxima calculada fue de 48.32% y la mínima de 17.57% en los periodos de baja irradiancia directa, al usar 0.1 kg/s.
- Al utilizar 0.06 kg/s, la prueba experimental reporto un Gb máximo de 867 W/m^2, en esta prueba se registraron intervalos de nubes, sin embargo, la eficiencia térmica determinada máxima fue 32.8%, correspondiente al 11 de abril.

REFERENCIAS

Energías renovables. (Marzo, 2022). Centrales Fresnel: una tecnología termosolar muy interesante https://www.youtube.com/watch?v=kIjdxqU0ilE

Chamorro Páez A., Arellano Mancheno V., Ordoñez Viñan M., Orozco Santos L., Viteri Nuñez E., Jacome Domínguez E. (Julio, 2017). Evaluación de un calentador solar de agua de cilindro parabólico en la ciudad de Riobamba. Polo del conocimiento, 2,22.

Delgado Rodríguez Y. L. (2022). Evaluación de la eficiencia de un sistema termosolar parabólico con seguimiento mecánico, en la universidad nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Tesis de licenciatura. Chachapoyas, Perú.

Forber México. (Noviembre, 2023). https://www.forbes.com.mx/produccion-industrial-de-mexico-crece-un-3-7-en-los-primeros-tres-trimestres-de-2023-inegi/

Franco Martínez D., Ramírez Silva P. (Junio, 2019). Estudio de la eficiencia instantánea térmica de un campo de colectores cilindro parabólico. Revista de sistemas experimentales, 6:19,1-15.

Gobierno de México. (Febrero, 2016). Obtenido de Secretaria de Energía: https://www.gob.mx/sener/articulos/energia-solar-14defebrerodiamundialdelaenergia.

Hernández Cancino J. (Julio, 2016). Diseño de un campo de captadores cilindro parabólicos (CCP) de generación directa de vapor. Tesis del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Insumos Energía Renovable Fotovoltaica en México y su proyección. 2020. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/58849/insumos_de_energ_a_renovable_fotovoltaica_y_su_proyecci_n_al_2020_SEC.pdf

Melo M. (2018). reporte de inteligencia: energía termosolar. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/341706/IT_termosolar_Final_Rev_1.pdf

Moreno J. (Noviembre de 2015). Estudio comparativo de eficiencias térmicas en colectores solares cilindro parabólicos utilizado diferentes sustancias de trabajo. https://itp.itpachuca.edu.mx/pdf/repositorio_tesis/79200620.pdf

Portilla A. (Junio de 2017). Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento. https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/

Romero I. (Agosto, 2019). Diseño conceptual de un generador de vapor solar combinando tecnología Fresnel y colectores planos. https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/1439/3/MM_David_Alfredo_Delgado_Romero_2019.pdf

SENER. (Febrero, 2021). Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2020-2034 https://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2020-2034

Velázquez Lucho K.M. (Noviembre, 2014). Construcción y evaluación de un concentrador solar de canal parabólico para calor de proceso de baja entalpía. Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana.

SESIÓN POSTER

ID	TITULO	PONENTE
16174	Síntesis de óxido rico en silicio fotoluminiscente obtenido por pulverización catódica para su aplicación en celdas solares de perovskita.	José Alberto Luna López
16178	Estudio de las energías renovables en México: desafíos, educación y sugerencias.	Aranxa Sánchez Bojórquez
16197	Síntesis verde de óxidos semiconductores modificados con extracto de plantas para fotodegradación solar de contaminantes en agua.	Misael Adolfo Castro Chavez
16226	Evaluación de propiedades ópticas de cerámicos para aplicaciones en receptores solares.	Laura Ceballos Mendívil
16221	Efecto del grupo azometina en el puente π de colorantes orgánicos basados en carbazol para DSSC.	Enoch Robles Díaz

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SÍNTESIS DE ÓXIDO RICO EN SILICIO FOTOLUMINISCENTE OBTENIDO POR PULVERIZACIÓN CATÓDICA PARA SU APLICACIÓN EN CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA

Ezequiel Paz Totolhua, José A. Luna López, Jesús Carrillo López, Karim Monfil Leyva
Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Prolongación de la 14 Sur. Edificio IC5. Jardines de San Manuel, Puebla, Puebla, C.P. 72570, México, **ezequiel.paz@alumno.buap.mx, jose.luna@correo.buap.mx, jesus.carrillolopez@viep.com.mx, karim.monfil@correo.buap.mx.**

Alfredo Morales Sánchez
Coordinación Electrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE, Tonantzintla, Puebla, C.P. 72840, México, **alfredom@inaoep.mx.**

Javier Flores Méndez
Tecnológico Nacional de México/I.T. Puebla, Av. Tecnológico No. 420, Maravillas, Puebla, C.P. 72220, México, **javier.flores@puebla.tecnm.mx**

RESUMEN

Las películas de óxido rico en silicio (SiO_x) fueron obtenidas mediante pulverización catódica o co-sputtering magnetron RF sobre sustratos de cuarzo. Para el depósito simultaneo se utilizaron dos blancos, uno de Si y otro de SiO_2. Se utilizaron parámetros que pudieran garantizar un exceso de silicio adecuado y así poder proporcionar una eficiente fotoluminiscencia en la región rojo-azul antes y después del tratamiento térmico. Todas las muestras se depositaron a una temperatura de 500 °C con un tiempo de depósito de 25 minutos. Posterior al depósito, las películas se recocieron térmicamente a una temperatura de 1100 °C en ambiente de Nitrógeno durante 2 horas en un horno tubular. Como resultado, las películas de óxido rico en silicio (SiO_x) mostraron espesores promedio de 90 nm, una alta transmitancia en la región visible del 90%, un alto coeficiente de absorción en la región ultravioleta (200 a 350 nm), anchos de banda de energía prohibida de 3.7 eV y 3.8 eV, una emisión de fotoluminiscencia (PL) en la región rojo-azul, tamaño de los diámetros de los nc-Si inferiores a 3 nm, un índice de refracción de 1.72 (en 800 nm) y una baja rugosidad media de 0.717 nm, después del tratamiento térmico. Tras el tratamiento térmico hubo una reestructuración de la red del SiO_x promoviendo la separación de fase Si-SiO_x y la formación de nc-Si, corroborado por el espectro Raman, transmitancia, índice de refracción y los tamaños de los nc-Si obtenidos del modelo de confinamiento cuántico. Finalmente, la máxima emisión de fotoluminiscencia se atribuyó principalmente a la presencia y a la activación de los defectos Si=O, relacionado con el tamaño de los nc-Si. Todas estas características del SiO_x determinaron su aplicabilidad como material down-conversion en celdas solares de perovskita con el objetivo de aumentar su eficiencia y mejorar su estabilidad.

ABSTRACT

Silicon-rich oxide (SiO_x) films were obtained by sputtering or magnetron RF co-sputtering on quartz substrates. Two targets, Si and SiO_2, were used for simultaneous deposition. The parameters used were an adequate silicon excess to provide efficient photoluminescence in the red-blue region before and after heat treatment. All the samples were deposited at a temperature of 500 °C with a deposition time of 25 min. After deposition, the films were thermally annealed at 1100 °C in a Nitrogen environment for 2 hours in a tube furnace. As a result, the silicon-rich oxide (SiO_x) films showed average thicknesses of 90 nm, high transmittance in the visible region of 90%, high absorption coefficient in the ultraviolet region (200 to 350 nm), forbidden energy bandwidths of 3. 7 eV and 3.8 eV, a PL emission in the red-blue region, nc-Si diameter sizes of less than 3 nm, a refractive index of 1.72 (at 800 nm) and low average roughness of 0.717 nm, after heat treatment. After heat treatment, there was lattice restructuring of the SiO_x promoting Si-SiO_x phase separation and nc-Si formation, corroborated by Raman spectra, transmittance, refractive index, and nc-Si sizes obtained from the quantum confinement model. Finally, the maximum PL emission was attributed to the presence and activation of Si=O bond defects, related to the nc-Si size. All these characteristics of SiO_x determined its applicability as a down-conversion material in perovskite solar cells to increase efficiency and improve stability.

Palabras claves: Óxido Rico en Silicio (SiO_x); Pulverización Catódica; Fotoluminiscencia; Material Down-Conversion; Celdas Solares de Perovskita.

ITRODUCCIÓN

El óxido rico en silicio (SiO_x) es un material semiconductor prometedor para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos debido a su emisión de luz, la fabricación de memorias no volátiles debido a su conmutación resistiva y a la fabricación de celdas solares debido al efecto down-conversion que puede producir (Simón et al., 2020). El SiO_x es un material multifase constituido por sílice (SiO_2), óxidos no estequiométricos (SiO_x, $x < 2$) y silicio elemental. En la estructura del SiO_x en su matriz podemos encontrar nanocristales de silicio (nc-Si). Además, sus propiedades varían con el exceso de silicio y el tratamiento térmico (Martínez-Hernández et al., 2019). Las películas de óxido rico en silicio (SiO_x) se pueden obtener mediante diferentes técnicas como depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD),

depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD), depósito por haz molecular (MBE), depósito químico en fase vapor con filamento caliente (HFCVD) y pulverización catódica o Sputtering (Martínez et al., 2021).

En consecuencia, el SiO_x es un material muy interesante para ser utilizado como un material down-conversion (que produce el efecto down-conversion) en celdas solares, esto es debido a su destacada intensidad de fotoluminiscencia cuando se ilumina con radiación ultravioleta (UV). El efecto down-conversion es un proceso en el que un fotón de alta energía se convierte en dos o más fotones con menor energía y estos fotones pueden ser aprovechados por una celda solar (Vivaldo et al., 2016). A través del efecto down-conversion es posible utilizar una porción más amplia del espectro solar aumentando la eficiencia en diferentes tipos de celdas solares. Por lo general, en implementaciones experimentales, se coloca el material down-conversion encima o en la parte externa de la celda solar para optimizar la longitud de onda de los fotones que inciden en la celda solar (De la Mora et al., 2017). En la Figura 1 se muestran un esquema del funcionamiento de un material down-conversion en una celda solar de perovskita.

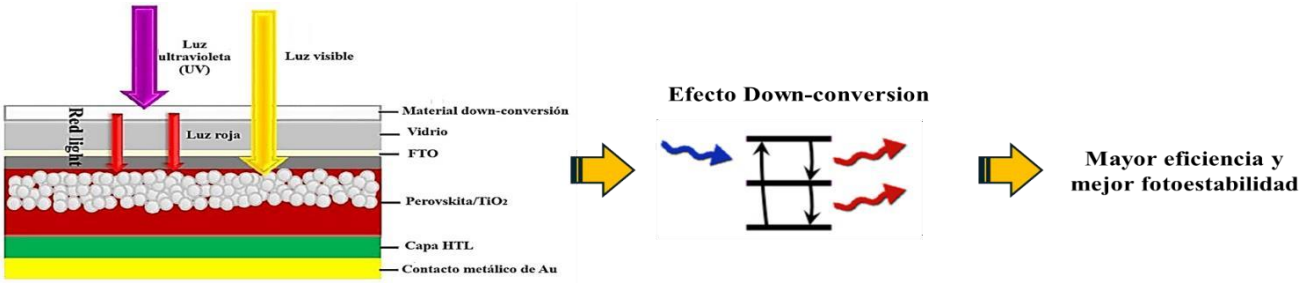


Figura 1. Esquema del funcionamiento de un material down-conversion en una celda solar de perovskita (Jiang et al., 2017).

Estudios previos han demostrado que el uso de una película de SiO_x como recubrimiento superior en celdas solares de silicio puede mejorar los valores de la curva densidad de corriente-voltaje (J-V) y los valores de eficiencia cuántica externa (EQE). Sin embargo, no se ha reportado este material como recubrimiento superior en celdas solares de perovskita. En dichos estudios, el SiO_x se ha obtenido mediante LPCVD y HFCVD (Ojeda-Durán et al., 2019; Vivaldo et al., 2016). En este trabajo hemos obtenido y caracterizado películas de óxido rico en silicio (SiO_x) obtenidas por la técnica de pulverización catódica para su consideración como material down-conversion en celdas solares de perovskita. Los resultados de los análisis de las caracterizaciones mostraron que el material cumple con los criterios de selección de un material down-conversion y puede aplicarse como capa frontal o recubrimiento superior en celdas solares de perovskita con el objetivo de mejorar el rendimiento y la estabilidad.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las películas de óxido rico en silicio (SiO_x) fueron depositadas mediante pulverización catódica o co-sputtering magnetrón RF sobre sustratos de cuarzo con dimensiones de 25.4 mm × 25.4 mm × 1 mm. El equipo utilizado fue un sistema de la marca Torr International (13.56 MHz), el cual tiene dos magnetrones donde van insertados los blancos, uno de Si y otro de SiO_2. Para obtener películas de SiO_x ($x<2$) se depositaron simultáneamente los blancos de Si y SiO_2. Las velocidades de depósito de los materiales se controlaron por medio de las potencias de radiofrecuencia RF aplicadas a los blancos durante el depósito. Para fines de este trabajo, las potencias aplicadas a los blancos de Si y SiO_2 fueron de 100 W y 35 W, respectivamente. Antes del depósito, los sustratos de cuarzo se sometieron a un proceso de limpieza usando xileno, acetona y agua desionizada con baño ultrasónico durante 10 minutos para cada proceso. Después de secarse con nitrógeno, los sustratos de cuarzo se cargaron inmediatamente en la cámara del equipo. Una vez alcanzada una presión inicial de 0.0001333 Pa (1×10^{-6} Torr), se introdujo un flujo de Argón de 60 sccm a una presión de trabajo de 0.3199 Pa (2.4 mTorr) en la cámara del equipo. Todas las muestras se depositaron a una temperatura de 500 °C con un tiempo de depósito de 25 minutos y a una velocidad de rotación de 20 rpm. Posterior a los depósitos, las películas se recocieron térmicamente a una temperatura de 1100 °C en ambiente de Nitrógeno durante 2 horas en un horno tubular. Estos parámetros considerados fueron los más cercanos para obtener un exceso de silicio medio de 5.2 at%. El procedimiento para la obtención de películas de SiO_x se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Procedimiento para el depósito de películas de SiO_x por pulverización catódica sobre sustratos de cuarzo.

RESULTADOS

De acuerdo con la literatura, los criterios de selección de materiales down-conversion ideales para su uso en celdas solares de perovskita deben cumplir con lo siguiente: (i) alta eficiencia cuántica de fotoluminiscencia, (ii) estabilidad fotoquímica y ambiental, (iii) absorción de banda ancha en la región donde el espectro de la respuesta de la celda solar es baja, (iv) alto coeficiente de absorción en la región de baja longitud de onda, (v) alta transmitancia y emisión de banda ancha, particularmente en la región donde la respuesta del dispositivo es alta, (vi) bajo costo, (vii) fácil de procesar y que pueda ser depositado mediante un método escalable, y finalmente (viii) baja rugosidad de la película (Datt et al., 2022). En esta sección se presentan y analizan los resultados de las caracterizaciones realizadas al óxido rico en silicio (SiO_x) obtenido por pulverización catódica para su aplicación como capa frontal o recubrimiento superior en celdas solares de perovskita.

Espesores de las películas de SiO_x

Los espesores de las películas de óxido rico en silicio (SiO_x) se obtuvieron por perfilometría con un equipo Vecco Dektak 150. Se obtuvieron espesores de 92 nm, 95 nm y 93 nm para tres muestras sin tratamiento térmico, mientras que después de aplicarles tratamiento térmico los espesores de las películas disminuyeron a 88.5 nm, 92.5 nm, y 90 nm, respectivamente.

Transmitancia de las películas de SiO_x

La Figura 3 muestra los espectros de transmitancia obtenidos de tres películas de SiO_x para antes y después del tratamiento térmico. Estos se obtuvieron por UV-Vis con un equipo Varian Cary 5000. Los espectros para antes del tratamiento térmico presentaron una transmitancia del 85% en el rango de 450 nm a 1000 nm (región del visible y cercano al infrarrojo), mientras que para longitudes por debajo de 450 nm (región ultravioleta) la transmitancia descendió a cero. Por otro lado, los espectros después del tratamiento térmico presentaron una transmitancia alta del 90% en el rango de 400 nm a 1000 nm, mientras que para longitudes por debajo de 400 nm la transmitancia descendió a cero. Entonces, las películas presentaron una transmitancia eficaz y un excelente ancho de banda de energía en la región donde la respuesta de la celda solar de perovskita es alta, permitiendo así también la entrada de luz visible en la capa de perovskita.

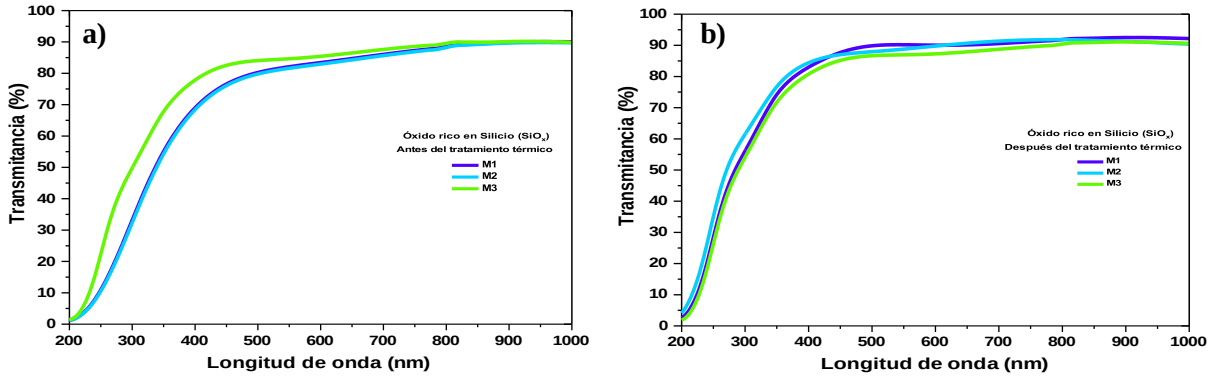


Figura 3. Espectros de transmitancia de las películas de SiO_x (a) antes y (b) después del tratamiento térmico.

Coeficiente de absorción y ancho de banda de energía de las películas de SiO_x

Los espectros de transmitancia anteriores nos permitieron obtener los coeficientes de absorción y los anchos de banda de energía prohibida (E_g) de las películas de SiO_x. Los coeficientes de absorción $\alpha(\lambda)$ se determinaron a partir de la ley de Beer-Lambert. La Figura 4 muestra que las películas para antes y después del tratamiento térmico presentaron una mayor absorción en la región ultravioleta (200 a 370 nm). Entonces las películas mostraron un alto coeficiente de absorción en la región de baja longitud de onda, donde la respuesta de la celda solar de perovskita es baja, y además pueden contribuir a mejorar la estabilidad debido a su absorción de luz UV.

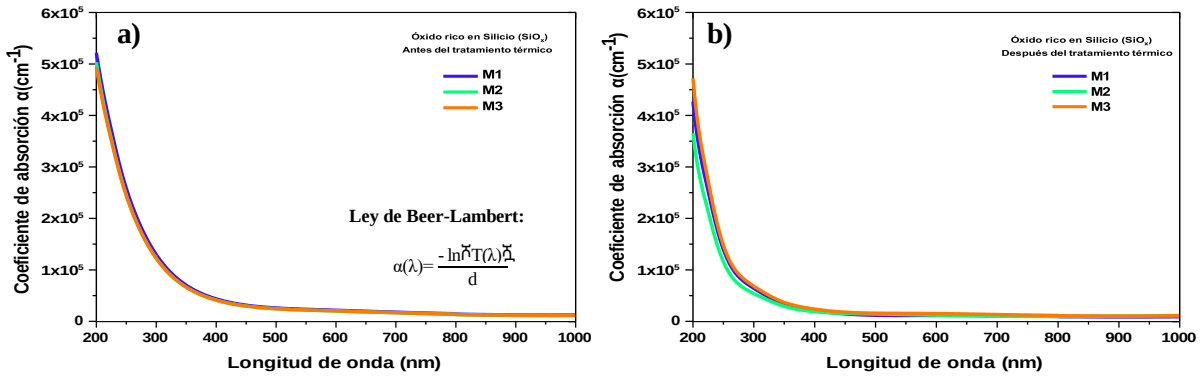


Figura 4. Coeficiente de absorción de las películas de SiO_x (a) antes y (b) después del tratamiento térmico.

La Figura 5 muestra el procedimiento utilizado para calcular los anchos de banda de energía prohibida (E_g) de las películas de SiO_x para antes y después del tratamiento térmico. Para determinar el E_g, se utilizó la ecuación de Tauc. A partir del gráfico $(\alpha hv)^n$ vs hv, el E_g se extrapoló desde una línea recta hasta $hv = 0$. Se utilizó $n = 1/2$, para una transición óptica indirecta permitida para este material. Los E_g de las películas de SiO_x sin tratamiento térmico fueron de 2.75 eV, 2.75 eV y 2.8 eV, respectivamente, mientras que para las películas de SiO_x con tratamiento térmico fueron de 3.7 eV, 3.8 eV y 3.8 eV, respectivamente.

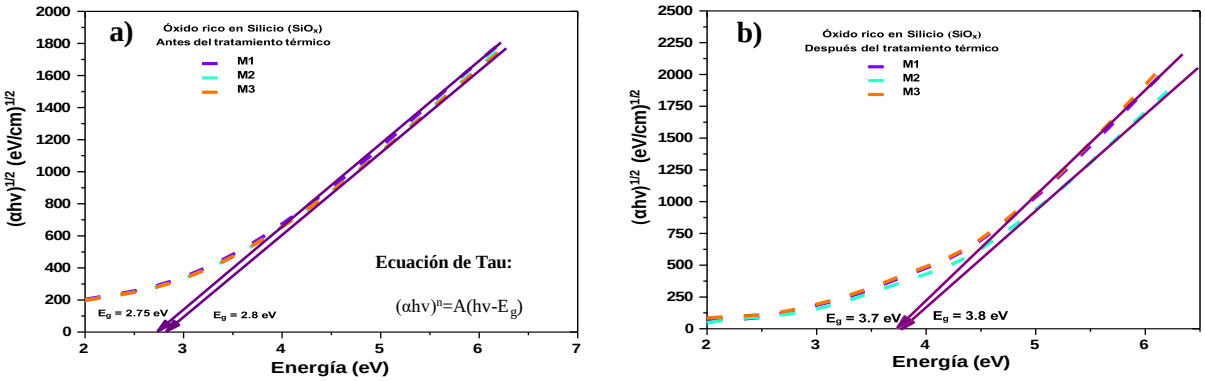


Figura 5. Anchos de banda de energía para las películas de SiO_x (a) antes y (b) después del tratamiento térmico.

Fotoluminiscencia (PL) de las películas de SiO_x

La Figura 6 muestra los espectros de Fotoluminiscencia (PL) obtenidos de tres películas de SiO_x para antes y después del tratamiento térmico. Los espectros se obtuvieron mediante un equipo FluoroMax-3 de Horiba Jobin Yvon. El barrido de emisión fue de 350 nm a 1000 nm con paso de 1 nm y con una longitud de excitación de 270 nm. Los espectros antes del tratamiento térmico mostraron una amplia banda de emisión en el azul en un rango de 375 nm a 575 nm con picos principales de emisión centrados en 423 nm, 428 nm y 442 nm para las muestras M1, M2 y M3, respectivamente. Además, también mostraron una menor intensidad de emisión en el rojo-infrarrojo, los cuales se centraron en 785 nm, 782 nm y 779 nm, respectivamente. En contraste, los espectros de PL después de aplicarles tratamiento térmico mostraron dos bandas de emisión: una gran banda de emisión en el rojo-infrarrojo en el rango de 625 nm a 875 nm con picos de emisión centrados en 761 nm, 761 nm y 771 nm para las muestras M1, M2 y M3, respectivamente y una segunda banda de emisión de menor intensidad en el azul en un rango de 375 nm a 525 nm con picos de emisión centrados en 430, 420 nm y 420 nm, respectivamente. Se puede observar que las bandas de emisión en el azul se redujeron en intensidad y las bandas de emisión en el rojo de baja intensidad se realzaron después del tratamiento térmico. Como resultado, tanto la muestra M2 sin tratamiento térmico como la muestra M3 con tratamiento térmico mostraron una alta fotoluminiscencia en la región rojo-azul por lo que estas películas pueden contribuir en el rendimiento en una celda solar de perovskita.

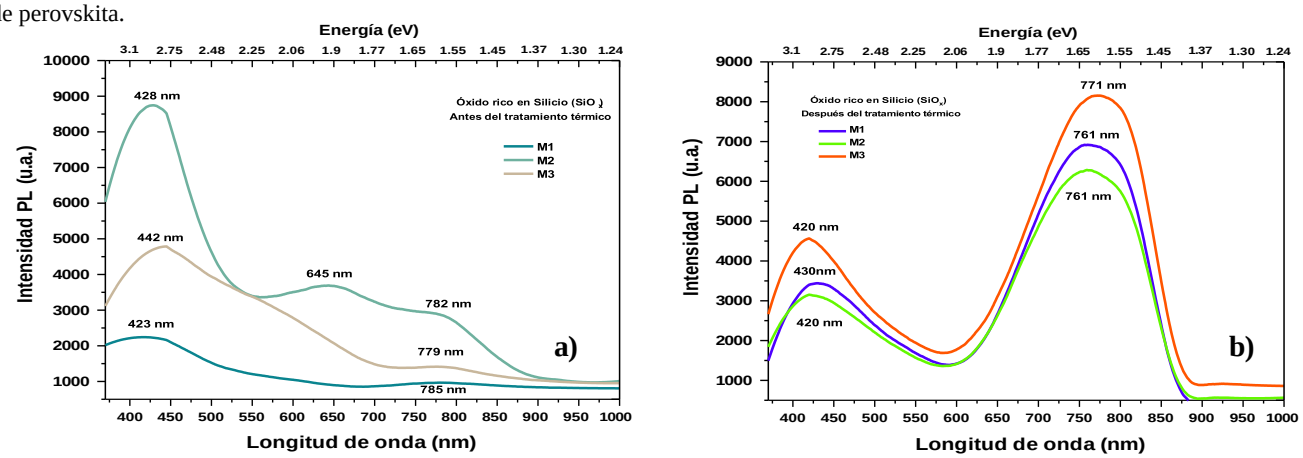


Figura 6. Espectros de Fotoluminiscencia (PL) obtenidos de las películas de SiO_x (a) antes y (b) después del tratamiento térmico.

Los dos mecanismos principales asociados a la emisión de fotoluminiscencia en películas de SiO_x corresponden a efectos de confinamiento cuántico en los nanocristales de silicio (nc-Si) incrustados en la matriz amorfa de SiO_x y a efectos relacionados con defectos. Los defectos corresponden a defectos en la interfase Si/SiO_x y defectos asociados a vacantes de oxígeno (Hernández et al., 2020). La elevada emisión de PL en la región roja de las películas indicó cambios estructurales (formación de nc-Si) y la creación de diferentes centros radiativos como resultado del tratamiento térmico y el exceso de silicio considerado (Bratus, 2011; Iacona et al., 2000).

Valores teóricos de los diámetros de los nc-Si formados en las películas de SiO_x

La Tabla 1 muestra los valores teóricos del tamaño de los nc-Si calculados a partir de una ecuación del modelo de confinamiento cuántico, la cual corresponde a una recombinación radiativa de pares electrón-hueco en los nc-Si (López et al., 2012). Como resultado, el tamaño de los nc-Si se redujo y el E_g aumentó después de aplicarles tratamiento térmico a las películas de SiO_x.

Tabla 1. Valores teóricos de los diámetros de los nc-Si obtenidos a partir del modelo de confinamiento cuántico.

	Antes del tratamiento térmico		*Después del tratamiento térmico*	
Muestras con SiO_x	***E_g(eV) de los nc-Si obtenidos por Tau***	***Diámetro de los nc-Si (nm)***	***E_g(eV) de los nc-Si obtenidos por Tau***	***Diámetro de los nc-Si (nm)***
M1	2.75	**1.81**	3.7	**1.30**
M2	2.75	**1.81**	3.8	**1.27**
M3	2.80	**1.77**	3.7	**1.30**

Índice de refracción y rugosidad de las películas de SiO_x

En la Figura 7a se muestra el índice de refracción de una película de SiO_x para antes y después del tratamiento térmico. La medición fue comprendida a una longitud de onda entre 400 nm y 1700 nm. Se puede observar que el índice de refracción disminuye primero y después tiende a volverse plano con el aumento de la longitud de onda.

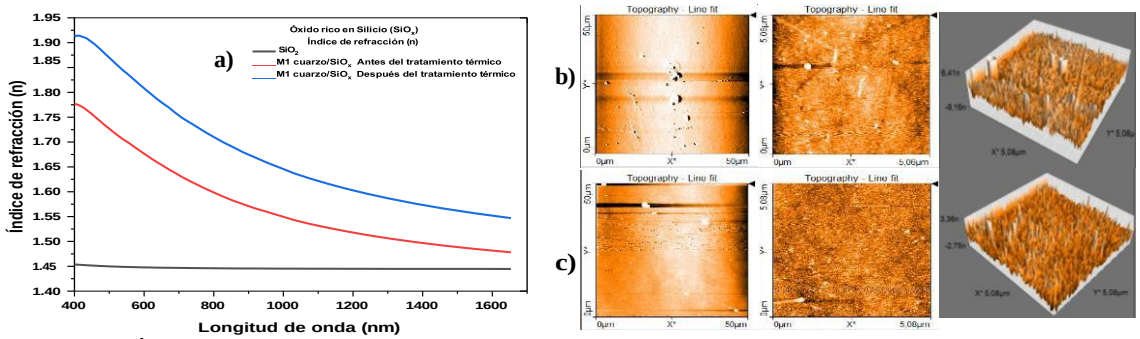


Figura 7. (a) Índice de refracción e (b,c) imágenes AFM de una película de SiO_x antes y después del tratamiento térmico.

El valor del índice de refracción aumentó cuando a la película se le sometió a tratamiento térmico y esto fue debido a la restructuración de la red del SiO_x y a la separación de fase Si-SiO_x (Chen et al., 2020). Sin embargo, las películas pueden usarse como películas ópticas con bajo índice de refracción. Posteriormente, en la Figura 7 b,c se muestra una imagen de AFM en 2D y 3D de la superficie de una película de SiO_x para antes y después del tratamiento térmico. Para ambas películas se observó una superficie lisa con una baja rugosidad. La película con tratamiento térmico fue más homogénea y presentó una disminución de la rugosidad, la cual fue inducida por el tratamiento térmico. Los valores de rugosidad RMS y rugosidad media para el SiO_x antes del tratamiento térmico fueron de 1.9 nm y 1.59 nm, respectivamente, mientras que, los valores de rugosidad RMS y rugosidad media para el SiO_x después del tratamiento térmico fueron de 0.941 nm y 0.717 nm, respectivamente.

Separación de fases en las películas de SiO_x

La Figura 8 muestra el espectro Raman de una película de SiO_x después del tratamiento térmico.

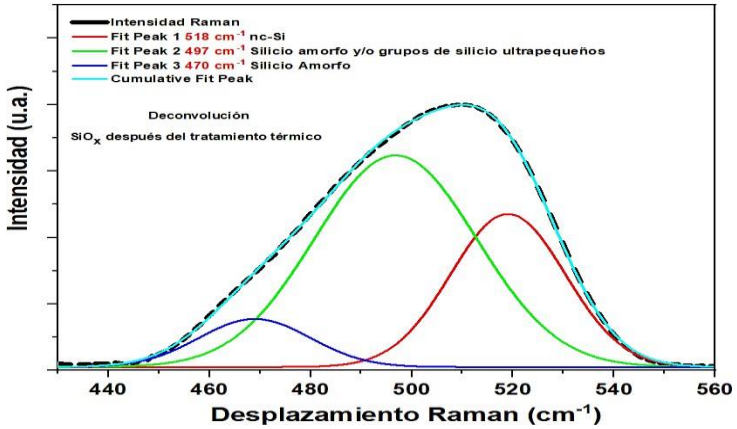


Figura 8. Espectro Raman de una película de SiO_x después del tratamiento térmico y su descomposición en tres curvas Gaussianas.

Como se puede observar, esta curva consta de tres bandas, la primera corresponde a nanocristales de silicio formados (desplazamiento a 518 cm^{-1}), la segunda corresponde a silicio amorfo y/o grupos de silicio ultrapequeños (desplazamiento a 497 cm^{-1}) y la tercera corresponde a silicio amorfo (desplazamiento a 470 cm^{-1}). Por lo tanto, el método de pulverización catódica nos permitió obtener películas de SiO_x que tras el tratamiento térmico se transformaron en películas nanocompuestas de SiO_2(Si) que contienen nc-Si en su matriz (Nesheva et al., 2021).

CONCLUSIONES

Los parámetros utilizados para el depósito por pulverización catódica de películas de óxido rico en silicio (SiO_x) proporcionaron espesores promedio de 90 nm, una alta transmitancia en la región visible del 90%, un alto coeficiente de absorción en la región ultravioleta (200 a 350 nm), anchos de banda de energía prohibida de 3.7 eV y 3.8 eV, una eficiente emisión de Fotoluminiscencia en la región rojo-azul, tamaño de los diámetros de los nc-Si formados inferiores a 3 nm, un índice de refracción de 1.72 (en 800 nm) y una baja rugosidad media de 0.717 nm, después de que se les aplicó tratamiento térmico a las películas. Tras el tratamiento térmico hubo una reestructuración de la red del SiO_x promoviendo la separación de fase Si-SiO_x y la formación de nc-Si, corroborado por el espectro Raman, transmitancia, índice de refracción y los tamaños de los nc-Si obtenidos del modelo de confinamiento cuántico. La máxima emisión de Fotoluminiscencia se atribuyó principalmente a la presencia y a la activación completa de los defectos Si=O, relacionado con el tamaño medio de los nc-Si.

Finalmente, todas estas características obtenidas de las películas de SiO_x con y sin tratamiento térmico cumplieron con los criterios de selección de materiales down-conversion para su aplicación como capa frontal o recubrimiento superior en celdas solares de perovskita y, por tanto, pueden contribuir a aumentar la eficiencia y mejorar la estabilidad de estas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los laboratorios de las instituciones: CIDS-BUAP, CIMAV-Monterrey, CIO e INAOE por su ayuda en la obtención y caracterización de las muestras. E.P.T. agradece el apoyo otorgado por el CONAHCyT para la realización de este proyecto mediante una beca doctoral #712701.

REFERENCIAS

Bratus, O. L. (2011). Structural properties of nanocomposite SiO2 (Si) films obtained by ion-plasma sputtering and thermal annealing. Semiconductor Physics Quantum Electronics and Optoelectronics, 14(2), 247–255.

Chen, Q. F., Li, Y. Y., Ying, P. Y., Wang, T. L., Zhang, P., Wu, J. B., Huang, M., Fang, Y. H., & Levchenko, V. (2020). Preparation and optical properties of siox thin films using different reactive magnetron sputtering technology. Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications, 14(9–10), 427–432.

Datt, R., Bishnoi, S., Lee, H. K. H., Arya, S., Gupta, S., Gupta, V., & Tsoi, W. C. (2022). Down-conversion materials for organic solar cells: Progress, challenges, and perspectives. Aggregate, 3(3), 1–21.

De la Mora, M. B., Amelines-Sarria, O., Monroy, B. M., Hernández-Pérez, C. D., & Lugo, J. E. (2017). Materials for downconversion in solar cells: Perspectives and challenges. Solar Energy Materials and Solar Cells, 165(October 2016), 59–71.

Hernández, H. P. M., López, J. A. L., de la Luz, J. Á. D. H., Flores, A. L., Leyva, K. M., Salgado, G. G., López, J. C., Flores, R. O., García, S. A. P., Simón, Z. J. H., Conde, G. O. M., & Amador, R. R. (2020). Spectroscopic and microscopic correlation of SRO-HFCVD films on quartz and silicon. Crystals, 10(2).

Iacona, F., Franzò, G., & Spinella, C. (2000). Correlation between luminescence and structural properties of Si nanocrystals. Journal of Applied Physics, 87(3), 1295–1303.

Jiang, L., Chen, W., Zheng, J., Zhu, L., Mo, L., Li, Z., Hu, L., Hayat, T., Alsaedi, A., Zhang, C., & Dai, S. (2017). Enhancing the Photovoltaic Performance of Perovskite Solar Cells with a Down-Conversion Eu-Complex. ACS Applied Materials and Interfaces, 9(32), 26958–26964.

López, J. A. L., López, J. C., Valerdi, D. E. V., Salgado, G. G., Pedraza, A. P., & Gracia, F. J. F. (2012). Morphological, compositional, structural, and optical properties of Si-nc embedded in SiOx films. Nanoscale Research Letters, 7(604), 1–10.

Martínez-Hernández, H. P., Luna López, J. A., Aceves Mijares, M., Monfil Leyva, K., García Salgado, G., Hernández-de-la-Luz, J. A. D., Luna Flores, A., Morales-Caporal, R., Ramírez Amador, R., & Hernández Simón, Z. J. (2019). Photoluminescence comparison of SRO-LPCVD films deposited on quartz, polysilicon and silicon substrates. Journal of Luminescence, 216(August), 116709.

Martínez, H. P., Luna, J. A., Morales, R., Casco, J. F., Hernández, J. A. D., Luna, A., Hernández, Z. J., Mendoza, G., Monfil, K., Ramírez, R., Carrillo, J., & Flores, J. (2021). Blue electroluminescence in sro-hfcvd films. Nanomaterials, 11(4).

Nesheva, D., Fogarassy, Z., Fabian, M., Hristova-Vasileva, T., Sulyok, A., Bineva, I., Valcheva, E., Antonova, K., & Petrik, P. (2021). Influence of fast neutron irradiation on the phase composition and optical properties of homogeneous SiOx and composite Si–SiOx thin films. Journal of Materials Science, 56(4), 3197–3209.

Ojeda-Durán, E., Monfil-Leyva, K., Carrillo-López, J., Benítez-Lara, A., García-Salgado, G., & Luna-López, J. A. (2019). Down-Conversion Effect Created by SiOx Films Obtained by HFCVD and Applied over Pn-Junctions. Silicon, 11(4), 2087–2093.

Simón, Z. J. H., López, J. A. L., de la Luz, A. D. H., García, S. A. P., Lara, A. B., Salgado, G. G., López, J. C., Conde, G. O. M., & Hernández, H. P. M. (2020). Spectroscopic properties of si-nc in siox films using hfcvd. Nanomaterials, 10(7), 1–21.

Vivaldo, I., Carrillo, J., López, O., Jiménez, S., Martínez, J., Murias, D., & López, J. A. (2016). Study of the photon down-conversion effect produced by thin silicon-rich oxide films on silicon solar cells. Int. J. Energy Res., 33(4), 23–40.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO: DESAFÍOS, EDUCACIÓN Y SUGERENCIAS

Aranxa Sánchez Bojórquez, David E. Márquez Ruiz, Laura G. Ceballos Mendivil
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Prolongación Ángel Flores S/N Fracc. Las Fuentes, Los Mochis, Sinaloa, C.P. 81223, México,
Tel. 668 246 5750, e-mail: **18000134.sanchez@ms.uas.edu.mx, davideduardomaquezruiz.24.uas@gmail.com, laura.ceballos@uas.edu.mx**

RESUMEN

El futuro de la humanidad y la preservación del planeta depende del desarrollo sustentable y sobre todo del modo en obtener energía. Anteriormente, las fuentes de energía eran poco amigables con el ambiente a pesar de su utilidad, cuestiones políticas y socioeconómicas habían frenado la búsqueda de nuevas opciones, pero tras acontecimientos históricos como el aumento del cambio climático y la pandemia COVID-19 por mencionar algunos, la motivación no pudo ser ignorada. Por otro lado, debido a las favorables condiciones geográficas en las que se encuentra México, las energías renovables adoptan un papel crucial en el desarrollo y avance de nuestro país hacia una vida más sustentable, lo cual ha sido foco de atención para la implementación de diversos programas académicos a nivel licenciatura, maestría y doctorado, relacionados con energías renovables y desarrollo ambiental, impulsados tanto por instituciones privadas como gubernamentales.

En este trabajo se mostrará el papel que juegan las fuentes energéticas renovables en el país, la viabilidad de adoptarlas en los próximos años, la promoción y avance de programas educativos en esta área y cómo se está contrarrestando la cultura de consumo energético sin regulación.

ABSTRACT

The future of humanity and the preservation of the planet depends on sustainable development and above all on the way in which energy is obtained. Previously, energy sources were environmentally unfriendly despite their usefulness, political and socio-economic issues had slowed down the search for new options, but after historical events such as the rise of climate change and the COVID-19 pandemic to mention a few, the motivation could not be ignored. On the other hand, due to the favourable geographical conditions in which Mexico is located, renewable energies play a crucial role in the development and progress of our country towards a more sustainable life, which has been the focus of attention for the implementation of several academic programmes at bachelor, master and doctoral level, related to renewable energies and environmental development, promoted by both private and governmental institutions. This paper will show the role of renewable energy sources in the country, the feasibility of adopting them in the coming years, the promotion and advancement of educational programmes in this area and how the culture of unregulated energy consumption is being counteracted.

Palabras claves: fuentes renovables, viabilidad, implementación, promoción, educación, consumo, sugerencias, México.

INTRODUCCIÓN

Dada la situación actual de México en el uso de combustibles fósiles y electricidad, la Reforma Energética [1] busca el acercamiento e implementación gradual de las energías renovables en la industria, con el fin de cumplir los puntos establecidos en el ámbito de accionamiento de disminución de GEI y contaminación. Al poseer grandes ventajas geográficas y una variedad de fuentes de energía, nuestro país cuenta con una gran ventaja para controlar costos y asegurar la viabilidad al adoptarlas a largo plazo.

La Ley de Transición Energética nos muestra propuestas estratégicas para realizar el proceso de transformación con el objetivo de permitir el incremento de energías renovables y cumplir los puntos establecidos, tales como alcanzar los niveles establecidos por la LGCC en la industria eléctrica, manejar las cuestiones políticas y socioeconómicas y otras metas de energías limpias y eficiencia energética.

Por su parte, en el ámbito académico observamos la promoción y desarrollo de carreras y posgrados, generando así profesionales e investigadores en el campo con criterios de análisis más amplios, con compromisos de realizar un cambio y principalmente con conciencia social y ecológica, una voz del porvenir del ambiente.

Es por esto que aplazar este cambio no es una opción, debemos analizar la rentabilidad de las energías renovables, su viabilidad al utilizarlas a largo plazo, el papel indispensable en el país y fomentar en múltiples áreas la cultura de consumo energético sustentables.

En este documento se presenta el compromiso de México con la adopción de energías renovables en materia de educación, de igual manera presentar el área de oportunidad de desarrollar las mismas y los obstáculos socioeconómicos presentes. Con la información recabada, se realiza un análisis de la situación actual del país para dar a conocer sugerencias prometedoras para ayudar y beneficiar el uso de energías renovables como una alternativa conveniente.

METODOLOGÍA

Tomando en cuenta la situación con el cambio climático, las emisiones de CO_2 y la desmedida explotación petrolera, las energías renovables son una alternativa amigable y propicia para nuestro planeta.

Con el propósito de reconocer la situación de México en el área de energías limpias, se realiza una indagación de datos textuales y porcentuales que llevan a conocer las condiciones de nuestro país, tanto en un enfoque educativo como la prometedora capacidad de adaptarlas en nuestras vidas en su totalidad. Por su parte, resaltar la relevancia de la concientización social y cultural, un punto clave para

esta transformación. De igual manera se proponen sugerencias para agilizar y apoyar dicho cambio.

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EL PAÍS

El sector de las energías renovables es muy próspero en México, puesto que contamos con grandes ventajas naturales y geográficas; esto no solo beneficiaría al ambiente, sino también a la economía de nuestro país. Sin embargo, existen ciertos desafíos en la aparición en el mercado como barreras regulatorias, financieras y de infraestructura. De acuerdo con ICEX España Exportación e Inversiones [2], se presentan cambios en tarifas anunciadas por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), procesos de tramitación lentos y tardados para la obtención de ciertos permisos como CEL (Certificados de Energías Limpias), la poca viabilidad de adoptarlas por la gran exigencia en requisitos al solicitar créditos, que conllevan un riesgo de mercado para inversionistas y las dificultades en el mantenimiento de la producción y almacenamiento de dichas.

No obstante, existe mucho campo aún no explorado en el área de las energías renovables en México, poseemos un gran potencial para convertirnos en un país líder en energías limpias; México se encuentra en el número 33 de los países más atractivos para invertir en ellas. Contamos con un gran potencial en desarrollo ecológico y sustentable [3].

Además, el mundo sigue con un aumento de la temperatura en la superficie de la Tierra, atmósfera y océanos, una evidencia preocupante. El cambio climático drástico genera retos en materia de adaptación de los sistemas productivos y proyectos sustentables. Debemos evitar la vulnerabilidad a desastres naturales y la dependencia a los combustibles fósiles y el petróleo.

‘’Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de las actividades humanas son responsables de un calentamiento de la temperatura media mundial de aproximadamente 1.1 °C desde 1850-1900 a 2020. Se prevé que la temperatura mundial promediada durante los próximos 20 años alcanzará o superará un calentamiento de 1.5 °C’’ [4].

La Figura 1 muestra los cambios de temperatura mundial de la superficie terrestre en los años de 1850-1900 [4], observando que las anomalías en la temperatura nos orientan a tomar acción invirtiendo en tecnologías limpias y promover proyectos informativos y prácticos en el consumo de energías. Este tipo de efectos alarmantes en el cambio climático encadenan sequías frecuentes y erosión de suelos, mayor intensidad en fenómenos meteorológicos, etcétera.

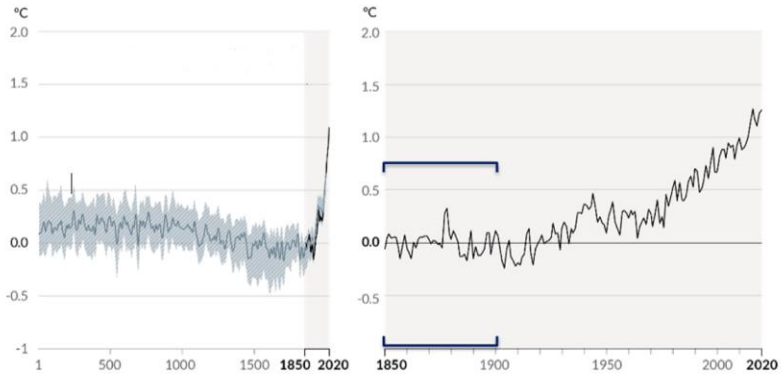


Figura 1. Cambios en la temperatura mundial de la superficie en relación con 1850-1900.

De acuerdo con un informe de Mordor intelligence [5], México promete en próximos años (2024-2029) potenciar su energía a 30 gigavatios (GW) de electricidad en los distintos tipos de energías clasificadas y registrar una CAGR superior al 10% y de igual manera, que nuestro suministro de energía sea 50% energías renovables durante el período previsto. La producción de la energía ha mejorado notablemente en la actualidad gracias a los múltiples órganos gubernamentales, leyes y acuerdos creados para el cumplimiento de objetivos determinados.

La Figura 2 muestra el Mercado de Energías Renovables en México referente a la capacidad instalada de energías renovables en GW durante los años de 2015-2021, donde observamos que nos encontramos bien posicionados como potencia y que, pese a ciertos retos por enfrentar, tendremos cambios prometedores en no sólo el ambiente y nuestra economía, sino también en nuestra educación y cultura ambiental [5].

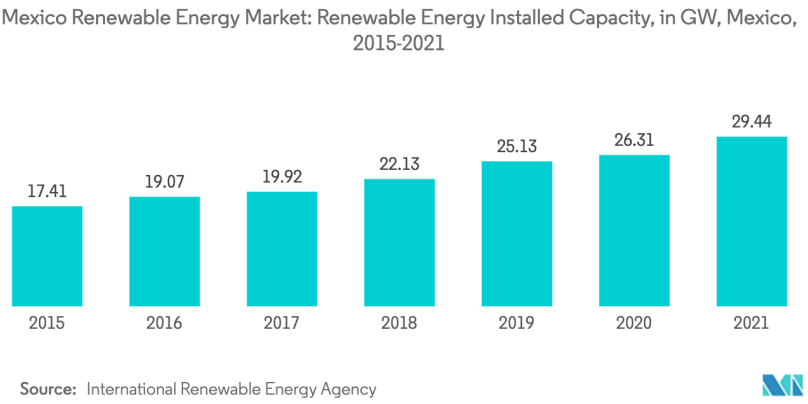


Figura 2. Mercado de Energías Renovables en México: Capacidad instalada de energías renovables en GW, 2015-2021.

‘’La planificación energética debe ser concebida como una estrategia de desarrollo. En este sentido, los planes energéticos deben ser coherentes con planes territoriales más integrales y deben partir de mecanismos de consulta que aseguren una activa participación ciudadana en las distintas etapas de su preparación y aprobación’’ [6]. En relación a esto, se opta por la investigación y desarrollo de tecnologías en ciencias aplicadas y emergentes (como lo es la nanotecnología) para contribuir en la preservación del planeta, la producción y el cuidado de recursos naturales por el bienestar del ecosistema y futuras generaciones.

Francesco La Camera, Director General de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) menciona lo siguiente: “Mi consejo a los Gobiernos de todo el mundo es que adopten políticas industriales encaminadas a fomentar la expansión de empleos dignos en el sector de las renovables en el ámbito nacional. El estímulo a la cadena de valor nacional no solo creará oportunidades de negocio y nuevos empleos para las personas y las comunidades locales, sino que refuerza la confiabilidad de la cadena de suministro y contribuye a una mayor seguridad energética en general” [7].

Educación y sector laboral

El interés por la sustentabilidad y las energías renovables ha sido un factor importante en la apertura de programas educativos y carreras con impacto significativo en nuestro planeta. Gracias a la fomentación de éstas podemos ver el compromiso y relevancia por parte de las instituciones para la creación de profesionales en el sector ambiental, capaces de enfrentar los retos y desafíos ambientales actuales a mediano y largo plazo.

Según UNITEC [8], el siguiente listado muestra los campos de trabajo con demanda relacionados con el medio ambiente con las áreas con alta demanda para profesionales del medio ambiente:

- *Gestión y consultoría ambiental.*
  Asesorar a empresas e instituciones en la implementación de prácticas sostenibles, cumplimiento de normativas ambientales y desarrollo de políticas de sostenibilidad.
- *Ingeniería y tecnología de energías renovables.*
  Diseñar, implementar y mantener sistemas de energía renovable, como solar, eólica y biomasa, contribuyendo a la transición energética hacia fuentes más limpias.
- *Conservación y manejo de recursos naturales.*
  Trabajar en parques nacionales, reservas naturales o en proyectos de restauración ambiental, enfocándose en la protección de ecosistemas y biodiversidad.
- *Desarrollo y planificación urbana sostenible.*
  Participar en la creación de ciudades más verdes y habitables, a través del diseño urbano sostenible, gestión de residuos y sistemas de transporte ecológicos.
- *Política y legislación ambiental.*
  Influenciar y desarrollar políticas públicas para la protección del medio ambiente, trabajando con gobiernos, organismos internacionales o en el ámbito de la diplomacia ambiental.

Como podemos apreciar, el campo laboral es amplio, las energías renovables apoyan un cambio notable en la economía en México, las oportunidades de trabajo crecen a medida que apoyamos a este sector energético.

Educación temprana en México. El conocimiento y aprendizaje es indispensable para formar ciudadanos responsables, con pensamiento crítico capaces de tomar decisiones y ser conscientes de las condiciones en las que se encuentra. Es por eso importante implementar talleres, pláticas y clases orientadas al medio ambiente con información vasta y clara de las medidas y hábitos que deben ponerse en práctica.

‘’Edificar sociedades sustentables, más justas e igualitarias, exige recurrir a energías amigables con el medioambiente…. Se comienza a enarbolar banderas y a reivindicar los criterios éticos basados en el respeto, solidaridad e igualdad para una distribución más justa de los recursos naturales’’. Es urgente fomentar valores enfocados en una formación ética ambiental en individuos, reteniendo así el colapso de

nuestro ecosistema. Asimismo, es clave construir campañas de energías limpias con ayuda de una perspectiva humanista [9].

De acuerdo con la Estrategia Nacional de Cambio Climático visión 10-20-40, presentó un estudio para conocer la preocupación por parte del país hacia el cambio climático, el cual mostró los siguientes resultados: ‘’En 2009, el 87% de la población encuestada dijo estar preocupada por el cambio climático; para 2012, casi 97% de los encuestados dijo estar mucho, algo o poco preocupado por el cambio climático y menos del 4% dijo no estar preocupado del todo’’ [10].

Como sociedad debemos manifestar interés por realizar un cambio y tomar acción, estar comprometidos con el ambiente y la huella ecológica que dejamos. Esto no es sólo una cuestión para científicos y personas profesionales en el área, sino para todos los habitantes del mundo. La conciencia social demanda una actitud alterna, requerimos fomentar valores entre las generaciones hacia la formación de una cultura libre de dependencia a combustibles fósiles.

Sugerencias. Como hemos comentado anteriormente, México posee una gran cantidad de ventajas para que, a largo plazo, seamos un país sujeto 100% a energías renovables, tales como instituciones gubernamentales, leyes, proyectos en sectores público y privado, así mismo interés por parte de otras potencias incluso condiciones geográficas muy favorables. Sin embargo, aparecen distintos percances que frenan este proceso.

De acuerdo con los datos presentados, se concluyen las siguientes sugerencias:

- Invertir en proyectos enfocados en la sustentabilidad y conciencia ecológica.
- Crear programas informativos para niños en nivel básico y preescolar, fomentando la importancia del uso de energías limpias.
- Dar más oportunidad a empresas social y ambientalmente responsables, generando mayor cantidad de empleos y oportunidades de trabajo.
- Otorgar becas a jóvenes con aspiraciones de estudiar una carrera, maestría o doctorado en licenciaturas relacionadas.
- Realizar convenios con países experimentados en el área, solicitar apoyo y asesoramientos profesionales.
- Apoyar a emprendedores e ingenieros mexicanos que busquen el uso y promoción de patentes y tecnologías que puedan tener un gran impacto.
- Respaldar doctores en investigaciones para potenciar la tecnología y/o materiales empleados, sus costos, viabilidad y eficiencia.

CONCLUSIONES

Se presentó una apreciación de las energías renovables introducidas en la vida de los mexicanos, concluyendo que México posee un gran potencial en el desarrollo y producción de plantas energéticas limpias exitosas, sin embargo, se requiere la adaptación de prácticas éticas y proyectos sustentables, así como inversionistas comprometidos con el medio ambiente y la elaboración de programas educativos de distintos niveles; cabe resaltar que el papel del Gobierno de la República es imprescindible en la innovación y futuro de un país verde. Asimismo, se espera el cumplimiento de leyes relacionadas con el cambio climático y el compromiso de todos para preservar nuestro ambiente.

REFERENCIAS

[1] SENER. (2015). Resumen de la explicación de la Reforma Energética. https://www.gob.mx/sener/documentos/resumen-de-la-explicacion-de-la-reforma-energetica
[2] ICEX España Exportación e Inversiones. (2020). Energías renovables en México. https://www.ivace.es/Internacional_Informes-Publicaciones/Países/México/México_energiasrenovicex2020.pdf
[3] Ordaz, Y. (2024, 31 julio). México, en el lugar 33 de países atractivos para invertir en energías renovables. https://www.milenio.com/negocios/mexico-ranking-33-paises-invertir-energias-renovables
[4] SINACC. (2021). Evidencias del cambio climático. https://cambioclimatico.gob.mx/evidencias-del-cambio-climatico/
[5] Análisis de participación y tamaño del mercado de energías renovables en México tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). (2024). Mordor Intelligence. https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/mexico-renewable-energy-market
[6] Las energías renovables como oportunidad y desafío para el desarrollo territorial (Valle de Lerma, Salta, Argentina). (2013). AUGM DOMUS, 5. https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/429
[7] Las energías renovables crean unos 700,000 puestos de trabajo en un año y ya dan empleo a 13 millones de personas. (2022, 23 septiembre). Noticias ONU. https://news.un.org/es/story/2022/09/1515061
[8] UNITEC. (2024, 17 abril). Qué puedo estudiar si tengo interés por el medio ambiente. Universidad UNITEC. https://blogs.unitec.mx/que-estudiar-si-me-interesa-el-medio-ambiente
[9] Perino, E. J., Duran, R. A. K., Silnik, A. A., Perelló, A. D., Perino, E. (2021). Energías renovables y sustentabilidad: una eficiente forma de gestionar los recursos naturales. Revista digital universitaria, 22(3).
[10] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40. Gobierno de la República. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41978/Estrategia-Nacional-Cambio-Climatico-2013.pdf

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SINTESIS VERDE DE ÓXIDOS SEMICONDUCTORES MODIFICADOS CON EXTRACTO DE PLANTAS PARA FOTODEGRADACIÓN SOLAR DE CONTAMINANTES EN AGUA

M.A. Castro-Chávez, C.G. Alvarado-Beltrán, A. Gaxiola-Hernández, J.A. Camez-Cota, A. Castro-Beltrán
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N. Fracc. Las Fuentes, Los Mochis, Sinaloa, C.P. 81223, México, Tel: +52 (668) 157 4736, Correo: misael.castro@uas.edu.mx.

RESUMEN

El uso de luz solar como fuente de energía, empleada para la degradación de contaminantes en el agua, mediante procesos fotoquímicos utilizando óxidos semiconductores modificados con extractos naturales, ha ganado bastante importancia en los últimos años. La fotocatálisis es la aceleración de una reacción fotoinducida, que convierte la energía solar en energía química en presencia de un fotocatalizador, generando reacciones tanto de oxidación como de reducción, depurando y desintoxicando el agua. El dióxido de titanio (TiO_2) es uno los óxidos semiconductores más utilizados en procesos fotocatalíticos, sin embargo, presenta algunas limitaciones como la rápida recombinación del par (e^-/ h^+) y su activación solo con luz ultravioleta, debido al valor de su band gap. Para maximizar sus propiedades fisicoquímicas la introducción de defectos en la red cristalina es una de las mejores estrategias, en especial las vacantes de oxígeno (Vo) que son defectos puntuales que modifican la estructura del TiO_2. La oxidación asistida por agentes reductores, empleando compuestos orgánicos, tales como extractos de plantas mediante síntesis verde, es una de las mejores estrategias para producir un TiO_2 modificado, debido a la gran cantidad de fitoquímicos que se obtienen de las diferentes partes de la planta. El acaí (*Euterpe oleracea*) es uno de los extractos naturales de mayor auge recientemente por su alto contenido de compuestos bioactivos y antioxidantes, considerado un potente agente reductor verde, capaz de generar defectos en la estructura cristalina del TiO_2, produciendo un fotocatalizador modificado eficaz para degradar contaminantes en agua empleando luz solar. En el presente estudio se sintetizaron NPs de TiO_2 con extracto de acaí para ser evaluadas mediante diferentes técnicas de caracterización tales como TGA, FTIR, DRX, Raman y UV-vis. Los resultados obtenidos de fotodegradación solar del colorante azul de metileno (% de degradación/tiempo), nos indica un aumento en las propiedades fotocatalíticas del TiO_2 -acaí.

ABSTRACT

The use of sunlight as an energy source for the degradation of water pollutants by photochemical processes using semiconductor oxides modified with natural extracts has gained considerable importance in recent years. Photocatalysis is the acceleration of a photoinduced reaction, which converts solar energy into chemical energy in the presence of a photocatalyst, generating both oxidation and reduction reactions, purifying and detoxifying water. Titanium dioxide (TiO_2) is one of the most widely used semiconducting oxides in photocatalytic processes, however, it presents some limitations such as fast pair recombination (e^-/ h^+) and its activation only with ultraviolet light, due to its band gap value. To maximize its physicochemical properties the introduction of defects in the crystal lattice is one of the best strategies, especially oxygen vacancies (Vo) which are point defects that modify the structure of TiO_2. Reducing agent assisted oxidation, using organic compounds, such as plant extracts through green synthesis, is one of the best strategies to produce a modified TiO2, due to the large amount of phytochemicals obtained from the different parts of the plant. Acai (Euterpe oleracea) is one of the most popular natural extracts in recent times due to its high content of bioactive compounds and antioxidants, considered a potent green reducing agent, capable of generating defects in the crystalline structure of TiO2, producing a modified photocatalyst effective for degrading pollutants in water using sunlight. In the present study, TiO2 NPs were synthesized with acai extract to be evaluated by different characterization techniques such as TGA, FTIR, XRD, Raman and UV-vis. The obtained results of solar photodegradation of methylene blue dye (% degradation/time) indicate an increase in the photocatalytic properties of TiO_2 -acai.

Palabras claves: Luz solar, Contaminación, Fotocatálisis, TiO_2, Acaí, Síntesis verde

INTRODUCCIÓN

La deficiencia energética y la contaminación ambiental son los principales problemas que enfrenta la humanidad hoy en día. La utilización de la energía solar como recurso energético sostenible y respetuoso con el medio ambiente es un enfoque sólido para reducir el impacto medioambiental. La degradación de contaminantes en medio acuoso aplicando procesos de oxidación avanzada (POA) ha ganado bastante relevancia científica en los últimos años [1], [2]. Uno de los procesos fotoquímicos más empleados actualmente es la fotocatálisis heterogénea; puesto que es un método que presenta propiedades reutilizables y autoregenerables, económico, de fácil manipulación y respetuoso con el medio ambiente. La fotocatálisis se puede definir como la aceleración de una reacción fotoinducida, que convierte la energía solar en energía química en presencia de un fotocatalizador [3], [4]. Los fotocatalizadores han atraído una gran atención por su potencial para aliviar los problemas de la contaminación ambiental global y la escasez de energía. La gama de aplicaciones de los óxidos semiconductores se ha ido ampliando desde la conservación y el almacenamiento de energía hasta los sistemas de purificación de aire y agua, así como la producción de

hidrógeno. Entre los materiales semiconductores más utilizados en procesos fotocatalíticos, se encuentran algunos óxidos metálicos también nombrados óxidos semiconductores, que se forman a partir de la combinación entre un elemento metálico y el oxígeno, generando un compuesto de enlace iónico [5], [6].

El dióxido de titanio (TiO_2) es uno los óxidos semiconductores más utilizados en procesos fotocatalíticos, debido a su bajo costo, buena estabilidad química y térmica, no toxicidad, fuertes capacidades oxidantes, fácil de producir, larga durabilidad, baja resistividad, elevada transparencia óptica y química, y biológicamente inerte. El TiO_2 también nombrado óxido de titanio (IV) o titania, es un óxido semiconductor tipo n de color blanco, naturalmente abundante en el planeta, que se presente en tres diferentes formas cristalinas: anatasa, rutilo y brookita. El TiO_2 presenta una actividad fotocatalítica considerable en diferentes aplicaciones ambientales, sin embargo, existen algunas limitantes como la rápida recombinación del par (e^-/ h^+), lo cual genera una pérdida importante de energía y que puede activarse solo con luz ultravioleta utilizando únicamente el 5% de la energía solar que incide sobre la tierra, debido al valor de su band gap (3.0-3.2 eV) [32], [33]. Para resolver esta problemática se han empleado diferentes procesos, tales como el dopaje con elementos metálicos y no metálicos, la fotosensibilización utilizando tintes orgánicos e inorgánicos, la introducción de defectos en la red cristalina, y la formación de materiales nanocompuestos, entre otros [7], [8], [9]. Una de las metodologías más utilizadas es la introducción de defectos en la red cristalográfica, entre los que destacan las vacantes de oxígeno (Vo), los cuales son defectos puntuales que generan estados intermedios entre la banda de valencia y la banda de conducción, disminuyendo el band gap del material, permitiendo ampliar el rango de absorción de luz y de igual manera reducen la velocidad de recombinación del par (e^-/ h^+), promoviendo la separación de carga [10], [11]. Entre las estrategias más utilizadas para sintetizar TiO_2 modificado, se encuentra la oxidación asistida por agentes reductores, empleando compuestos orgánicos, tales como extractos de plantas, por ser potentes agentes reductores y estabilizantes en la química verde, debido a que contienen una gran cantidad de fitoquímicos tales como flavonoides, polifenoles, proteínas, aminoácidos, ácidos orgánicos, entre otros; los cuales pueden obtenerse de diferentes partes de la planta como raíces, tallos, hojas, pétalos, flores o frutos [12], [13], [14].

El acaí (*Euterpe oleracea*) es uno de los extractos de fruta amazónica más utilizados, que ha ganado cada vez más atención en los últimos años debido a su reconocimiento como un "superalimento" o "superfruta". Esta reputación se debe al alto contenido de compuestos bioactivos y antioxidantes, principalmente antocianinas, proantocianidinas y otros flavonoides. Las distintas moléculas orgánicas que conforman este extracto lo colocan como un potente agente reductor "*in situ*", favorable para la síntesis verde de nanopartículas de óxidos metálicos modificados, capaces de degradar o mineralizar contaminantes utilizando luz solar como fuente de energía, adicionándole un valor ambiental significativo, económicamente viable para aplicaciones en cuerpos de agua a gran escala [15], [16].

METODOLOGIA

Materiales requeridos

Para la síntesis de nanopartículas (NPs) de TiO_2 con extracto de acaí, se utilizaron los siguientes materiales: polvos de acaí marca TGB para obtención del extracto, agua desionizada como solvente, hidróxido de amonio (NH_4OH) marca Jalmek con pureza del 28.0-30.0% como catalizador y tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) marca Sigma-Aldrich con pureza del 99.9% empleado como precursor metálico. Para evaluar las propiedades fotocatalíticas se utilizó colorante industrial azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$).

Obtención del extracto de acaí

Para obtener el extracto, primero se colocaron 50 ml de agua desionizada en un vaso precipitado y se agregaron 2.5 gr de polvo de acaí. Posteriormente se le dio agitación magnética en una parrilla durante 15 minutos. Por último, la solución fue centrifugada para separar los sólidos mediante un ciclo de centrifugación de 7 min a 6000 rpm. El extracto obtenido fue etiquetado y almacenado en refrigeración.

Síntesis de NPs de TiO_2 con el extracto de acaí

En un vaso de precipitado con 40 ml de agua desionizada se vertieron 1.5 ml de tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) bajo la campana de extracción, agitándose por 30 min. Después se agregaron 8.5 ml del extracto de acaí con agitación durante 30 min. Posteriormente, se adicionaron 4 ml de hidróxido de amonio (NH_4OH) con agitación por 30 min más. Luego en una parrilla de calentamiento se dejó reposar el vaso de precipitado dentro de un baño térmico utilizando aceite mineral, a una temperatura de 60 °C por 12 hrs. Una vez transcurrido el tiempo se trasladó la muestra a una cápsula de porcelana y se llevó a calcinación en mufla a una temperatura de 400 °C, tratando de subir de manera gradual la temperatura para proporcionar un calentamiento homogéneo. El tratamiento térmico se realizó por 1hr para después apagar el equipo y dejar enfriar la muestra. Por último, se empleó un mortero de ágata para triturar el material de manera manual, hasta obtener un polvo fino.

Actividad fotocatalítica

Para evaluar las propiedades fotocatalíticas se utilizó azul de metileno, con una concentración de 15 ppm, del cual se colocaron 50 ml en un vaso de precipitado y se agregaron 50 mg de nanopartículas de TiO_2-acaí aplicando agitación durante 30 min, en completa oscuridad. Después de transcurrir los 30 min se expuso a luz solar el día 22 de junio del 2022 en un periodo de tiempo de 11:00 a.m. a 12:00 p.m. en Los Mochis, Sinaloa, México. Durante este tiempo se tomaron 2 ml de muestra a cada 10 min durante 1 hr. Posteriormente se midieron todas las muestras tomadas por espectroscopía UV-vis para evaluar el porcentaje de fotodegradación del colorante.

RESULTADOS

En la figura 1 se observa el termograma de las NPs sintetizadas de TiO_2 con extracto de acaí, en el cual se observa una pequeña pérdida de aproximadamente un 2.5 % de peso alrededor de los 100 °C, la cual se atribuye a la presencia de agua adsorbida en la superficie de las NPs. Indicándonos que no existe perdida de material orgánico, el cual debería aparecer entre los 200 y 400 °C, considerando la ausencia del extracto de acaí en las NPs sintetizadas. Al aplicar tratamiento térmico durante la síntesis, el extracto natural se elimina y genera defectos en la estructura cristalina del TiO_2, afectando positivamente sus deficiencias [17].

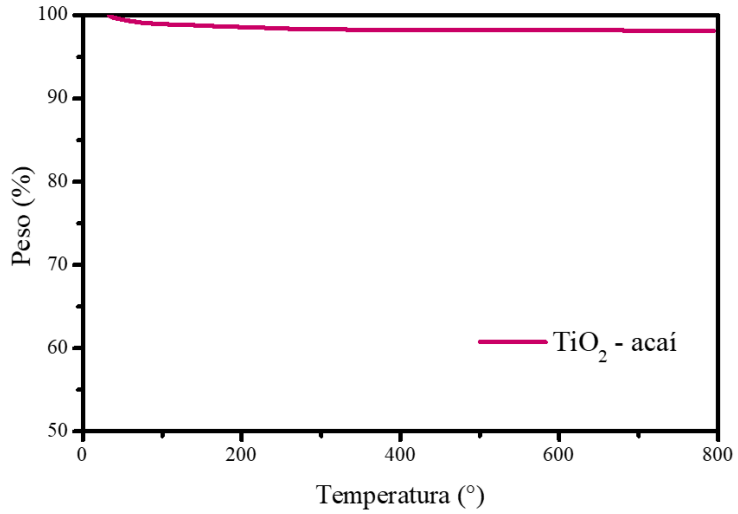


Figura 1.- Termograma de las NPs de TiO_2 sintetizadas con extracto de acaí.

En la figura 2 se muestra el espectro FTIR de las NPs sintetizadas de TiO_2 con el extracto natural, en el cual se observa una banda muy intensa a ~500 - 401 cm^{-1}, característica de las vibraciones de enlace Ti-O-Ti, lo cual confirma la formación de TiO_2. Además, se contempla una banda en torno a ~1625 cm^{-1} asignada a enlaces -OH de flexión, que se asocia con la flexión del modo -OH del agua en la superficie del TiO_2. La ausencia de las bandas atribuibles a las vibraciones de las moléculas orgánicas del extracto natural, nos indican la formación de un TiO_2 modificado estructuralmente, en el cual se generaron defectos a partir de la calcinación durante la síntesis [18].

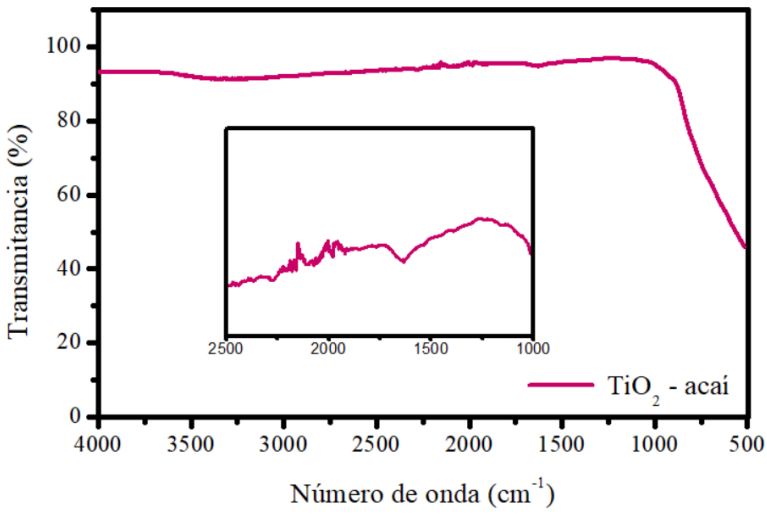


Figura 2.- Espectro FTIR de las NPs de TiO_2 sintetizadas con extracto de acaí.

En la figura 3 se muestra el difractograma de TiO_2 con el extracto de acaí, en el que se observa la presencia de picos bien definidos en 25.46º, 37.79º, 47.9º, 53.97º, 55.26º, y 62.7º, que se asocian con los planos (101), (004), (200), (105), (211) y (204) respectivamente, coincidiendo con la estructura del TiO_2 en la fase anatasa según la ficha JCPDS 41-1445. Además, se observan picos en 27.5°, 36.5°, 42.1°, 56.5°, 69.7° que se asocian a los planos (110), (101), (111), (220), (301) que coinciden con la estructura del TiO_2 en la fase rutilo según la ficha JCPDS 75-1537. Esto nos indica la formación de NPs cristalinas con una estructura bifásica del TiO_2 en fase anatasa-rutilo, muy similar a la estructura del TiO_2-P25 comercial, el cual es reconocido por su alta actividad fotocatalítica, lo que hace que sea el material más usado en aplicaciones fotocatalíticas ambientales [18], [19].

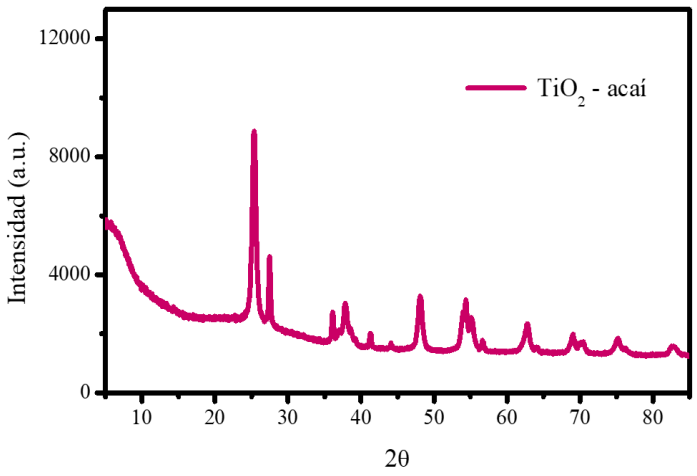


Figura 3.- Difractograma DRX de las NPs de TiO_2 sintetizadas con extracto de acaí.

En la figura 4 se muestra el espectro Raman de las NPs sintetizadas de TiO_2 con el extracto de acaí, el cual muestra cuatro bandas características en 148 cm^{-1}, 394^{-1} cm, 512^{-1} cm y 637^{-1} cm que son los principales modos de vibración del TiO_2 en su fase anatasa, lo que indica la formación de una estructura cristalina durante la síntesis [20], [21].

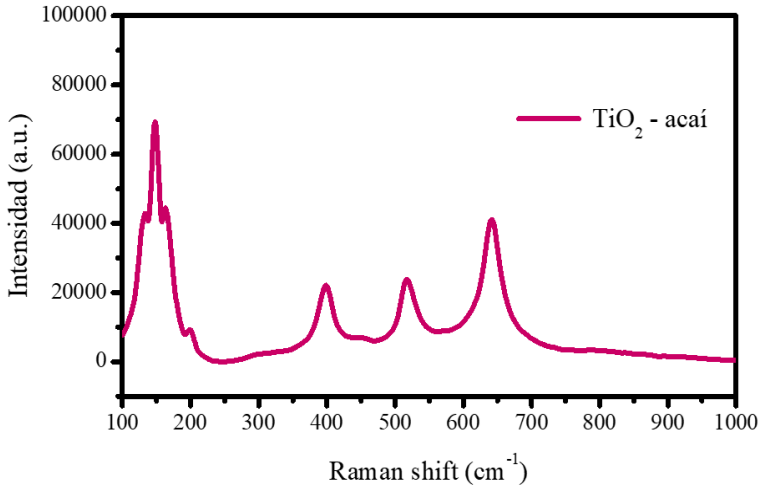


Figura 4.- Espectro Raman de las NPs de TiO_2 sintetizadas con extracto de acaí.

En la figura 5a se observa el espectro UV-vis de TiO_2 con el extracto natural, en el cual se observar una banda de absorción situada entre 250 y 400 nm, que es característica del TiO_2. Se muestra un desplazamiento batocrómico hacia longitudes de onda más largas por efecto del extracto, generando una reducción del band gap menor al TiO_2 puro. Estos resultados confirman la síntesis y funcionalización de TiO_2 utilizando el extracto de acaí. En la figura 5b se muestra el diagrama de Tauc, donde el valor del band gap calculado fue de 3.04 eV. Estos resultados muestran que el valor de band gap del TiO_2 por síntesis verde se reduce en comparación con las NPs de TiO_2, lo cual se atribuye a la presencia de defectos estructurales (vacancias de oxígeno), los cuales generan estados de energía intermedios. Un valor de band gap menor, permite aumentar el rango de absorción de luz solar [18].

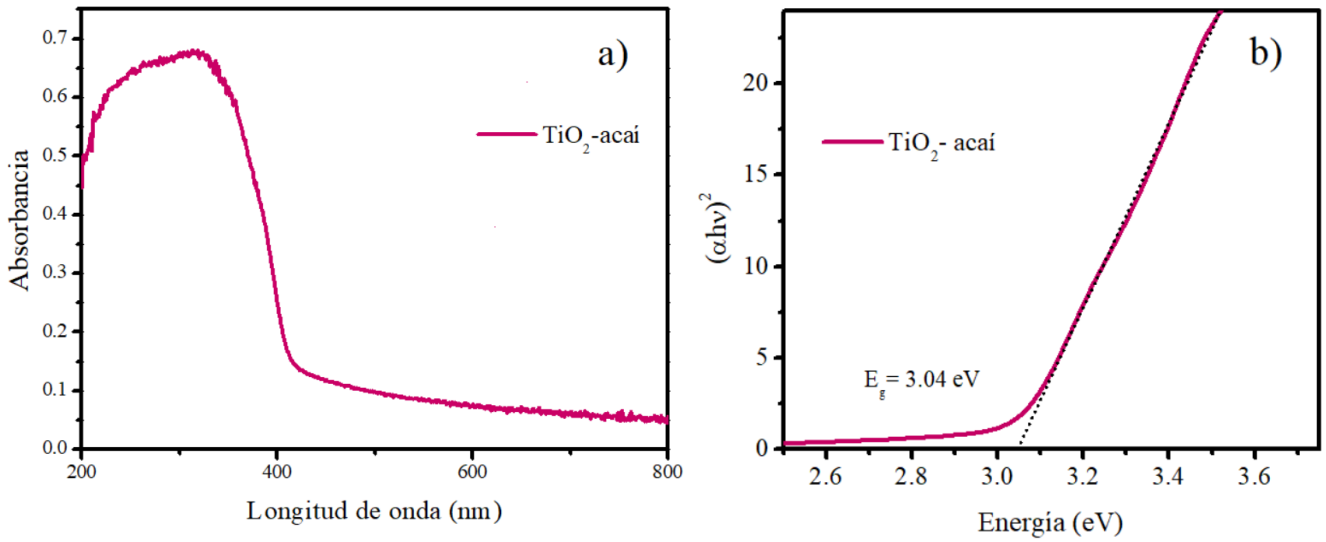


Figura 5.- Espectro UV-vis (a). Cálculo del band gap por el modelo de Tauc de las NPs de TiO_2 sintetizadas con extracto de acaí (b)].

En la figura 6 se estudió la fotodegradación del azul de metileno mediante espectroscopía UV-vis, donde se observan los resultados del tiempo de irradiación de luz solar contra la tasa de eliminación (%) del azul de metileno. El porcentaje de fotodegradación aumentó con respecto al tiempo. Se presentó una fotodegradación del colorante del 32% con TiO_2 en un tiempo de 1 hr, del 100% con TiO_2-P25 comercial en un tiempo de 1hr y un 100% con TiO_2-acaí en un intervalo de 40 min cuya eficiencia de degradación se atribuye a la modificación estructural de las NPs de TiO_2 sintetizadas con el extracto.

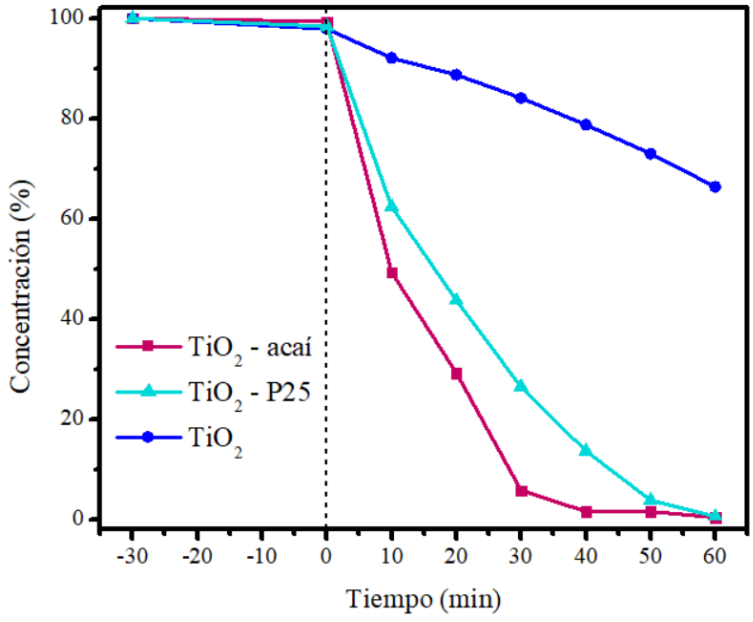


Figura 6.- Fotodegradación del colorante azul de metileno empleando luz solar.

CONCLUSIONES

Las NPs de TiO_2 se sintetizaron con éxito, utilizando el extracto de acaí, mediante síntesis verde. Las diferentes técnicas de caracterización confirmaron la síntesis y funcionalización de las NPs con el extracto, provocando un aumento en las propiedades fotocatalíticas del material. La presencia del extracto provocó modificaciones en la estructura cristalina del TiO_2, generando una disminución en el band gap de las NPs, en comparación con el TiO_2 puro, permitiendo su activación con luz solar. Los resultados de fotodegradación del azul de metileno, demostraron que el extracto natural utilizado durante la síntesis mejora significativamente la actividad fotocatalítica solar. En este sentido las NPs sintetizadas de TiO_2 con extracto de acaí degradaron el 100% del colorante azul de metileno después de 40 min de exposición a la irradiación solar. Los resultados obtenidos indican que, mediante extractos naturales con alto contenido de compuestos bioactivos, tales como polifenoles, flavonoides, antocianinas, entre otros, es posible generar modificaciones estructurales de diferentes óxidos semiconductores, capaces de eliminar contaminantes en agua empleando luz solar, como fuente de energía natural, aportando un valor ambiental significativo.

REFERENCIAS

[1] M. Sarafraz, R. Khaghani, M. Ebrahimi, and A. Khajeh-Amiri, “Visible light active Ti3+ self-doped mesoporous TiO2 photocatalyst with efficient photocatalytic performance for the degradation of chlorpyrifos,” Int J Environ Anal Chem, 2023.
[2] S. Mishra and B. Sundaram, “A review of the photocatalysis process used for wastewater treatment,” Mater Today Proc, Jul. 2023.
[3] U. G. Akpan and B. H. Hameed, “Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO2-based photocatalysts: A review,” Oct. 30, 2009.
[4] M. E. Borges, M. Sierra, E. Cuevas, R. D. García, and P. Esparza, “Photocatalysis with solar energy: Sunlight-responsive photocatalyst based on TiO2 loaded on a natural material for wastewater treatment,” Solar Energy, vol. 135, pp. 527–535, Oct. 2016.
[5] P. C. Nethravathi, Udayabhanu, G. Nagaraju, and D. Suresh, “TiO2 and Ag-TiO2 nanomaterials for enhanced photocatalytic and antioxidant activity: Green synthesis using Cucumis melo juice,” in Materials Today: Proceedings, Elsevier Ltd, 2021.
[6] P. A. K. Reddy, P. V. L. Reddy, E. Kwon, K. H. Kim, T. Akter, and S. Kalagara, “Recent advances in photocatalytic treatment of pollutants in aqueous media,” May 01, 2016, Elsevier Ltd.
[7] A. M. Amanulla and R. Sundaram, “ScienceDirect Green synthesis of TiO 2 nanoparticles using orange peel extract for antibacterial, cytotoxicity and humidity sensor applications,” 2019.
[8] Y. F. Rao and W. Chu, “Linuron decomposition in aqueous semiconductor suspension under visible light irradiation with and without H2O2,” Chemical Engineering Journal, vol. 158, no. 2, pp. 181–187, Apr. 2010.
[9] J. P. Jeon, D. H. Kweon, B. J. Jang, M. J. Ju, and J. B. Baek, “Enhancing the Photocatalytic Activity of TiO2 Catalysts,” Dec. 01, 2020, Wiley-VCH Verlag.
[10] S. Bai, N. Zhang, C. Gao, and Y. Xiong, “Defect engineering in photocatalytic materials,” Nov. 01, 2018, Elsevier Ltd.
[11] L. Wang, Y. Cai, B. Liu, and L. Dong, “A facile synthesis of brown anatase TiO2 rich in oxygen vacancies and its visible light photocatalytic property,” Solid State Ion, vol. 361, Mar. 2021.
[12] P. Gómez-López et al., “Nanomaterials and catalysis for green chemistry,” Aug. 01, 2020, Elsevier B.V.
[13] H. E. Garrafa-Galvez, O. Nava, C. A. Soto-Robles, A. R. Vilchis-Nestor, A. Castro-Beltrán, and P. A. Luque, “Green synthesis of SnO2 nanoparticle using Lycopersicon esculentum peel extract,” J Mol Struct, vol. 1197, pp. 354–360, Dec. 2019.
[14] G. Nabi et al., “A Review on Novel Eco-Friendly Green Approach to Synthesis TiO2 Nanoparticles Using Different Extracts,” Jul. 01, 2018, Springer New York LLC.
[15] M. Paz et al., “Brazilian fruit pulps as functional foods and additives: Evaluation of bioactive compounds,” Food Chem, vol. 172, pp. 462–468, Apr. 2015.
[16] J. T. da Silveira, A. P. C. da Rosa, M. G. de Morais, F. N. Victoria, and J. A. V. Costa, “An integrative review of Açaí (Euterpe oleracea and Euterpe precatoria): Traditional uses, phytochemical composition, market trends, and emerging applications,” Food Research International, vol. 173, p. 113304, Nov. 2023.
[17] G. Rao Kandregula et al., Green Synthesis of TiO 2 Nanoparticles Using Hibiscus Flower Extract. 2014.
[18] E. R. Silva-Osuna, A. R. Vilchis-Nestor, R. C. Villarreal-Sanchez, A. Castro-Beltran, and P. A. Luque, “Study of the optical properties of TiO2 semiconductor nanoparticles synthesized using Salvia rosmarinus and its effect on photocatalytic activity,” Opt Mater (Amst), vol. 124, Feb. 2022.
[19] M. A. Mohamed, W. N. W. Salleh, J. Jaafar, A. F. Ismail, and N. A. M. Nor, “Photodegradation of phenol by N-Doped TiO2 anatase/rutile nanorods assembled microsphere under UV and visible light irradiation,” Mater Chem Phys, vol. 162, pp. 113–123, Jul. 2015.
[20] F. D. Hardcastle, “Raman Spectroscopy of Titania (TiO2) Nanotubular Water-Splitting Catalysts,” J Ark Acad Sci, vol. 65, Jan. 2011.
[21] H. E. Garrafa-Gálvez et al., “Graphene role in improved solar photocatalytic performance of TiO2-RGO nanocomposite,” Chem Phys, vol. 521, pp. 35–43, May 2019.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES ÓPTICAS DE CERÁMICOS PARA APLICACIONES EN RECEPTORES SOLARES

Laura G. Ceballos-Mendivil, Rody A. Soto-Rojo
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Prol. Ángel Flores y Fuente de Poseidón S/N, Fracc. Las Fuentes, Los Mochis, Sinaloa, C.P. 81223, México, (668) 8127641,
laura.ceballos@uas.edu.mx, rody.soto@uas.edu.mx

Jonathan C. Luque-Ceballos
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, C.P. 80000, México, (662) 2893792.
jonathan.luque@unison.mx

Yannely Carvajal-Campos
Programa de Arquitectura, Universidad Autónoma de Occidente, Av. Universidad S/N Fracc. Villa Universidad, Guasave, Sinaloa, C.P. 81048, México, (687) 8729807.
yannely.carvajal@uadeo.mx

Carlos A. Pérez-Rábago
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N Temixco, Morelos, C.P. 62580, México, (777) 3620090
capr@ier.unam.mx

RESUMEN

Las plantas solares de torre central consisten en una serie de grandes espejos dispuestos en torno a la torre, denominados helióstatos, los cuales poseen un sistema de movimiento independiente que permiten orientarlos de forma que el rayo solar reflejado por todos ellos se concentre en un punto situado en lo alto de la torre en donde se encuentra el receptor. El material del receptor solar ideal para altas temperaturas debe tener buena estabilidad mecánica y química a las altas temperaturas, alta absortancia solar y baja emitancia térmica a las temperaturas de funcionamiento. Por lo tanto, el receptor debe absorber eficientemente la luz solar recolectada por todo el campo del espejo, así como mantener bajas pérdidas y transferir eficazmente la energía térmica a los medios de intercambio.

Se presenta un estudio sobre la evaluación de propiedades ópticas de algunos cerámicos: diboruro de zirconio (ZrB_2), carburo de tantalio (TaC) y carburo de hafnio (HfC), caracterizados por difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía UV-Vis-NIR, cuyos resultados presentaron una alta absortancia a la radiación solar en longitudes de onda del espectro solar (250-2500 nm), lo cual confirma que estos materiales pueden tener potencial aplicación como receptores solares de sistemas de torre central, siendo el HfC el que mayor absortancia presentó.

Palabras clave: *cerámicos, energía solar, receptor, propiedades ópticas, absortancia.*

ABSTRACT

Central tower solar plants consist of a series of large mirrors arranged around the tower called heliostats, which have an independent movement system that allows them to be oriented so that the solar ray reflected by all of them is concentrated at a point located at the top of the tower where the receiver is located. The ideal solar receiver material for high temperatures must have good mechanical and chemical stability at high temperatures, high solar absortance and low thermal emittance at operating temperatures. Therefore, the receiver must efficiently absorb the sunlight collected by the entire mirror field, as well as maintain low losses and effectively transfer thermal energy to the exchange media.

This study present the evaluation of optical properties of some ceramics: zirconium diboride (ZrB_2), tantalum carbide (TaC) and hafnium carbide (HfC), characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and UV-Vis-NIR spectroscopy; results showed a high solar absortance at wavelengths of the solar spectrum (250-2500 nm), which confirms that these materials can have a potential application as solar receivers for central tower systems, HfC was the one with the highest absortance.

Keywords: *ceramics, solar energy, receiver, optical properties, absorbance.*

INTRODUCCIÓN

La producción de electricidad es responsable de aproximadamente una cuarta parte de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel mundial, por lo que se busca desarrollar nuevos programas de energías renovables provenientes de recursos naturales, restituibles y ambientales, beneficiando para evitar el agotamiento de los recursos. Las energías renovables más utilizadas son: energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía hidroeléctrica, biomasa, entre otras [1]. Los sistemas de energía solar concentrada son una alternativa limpia y vital para los sistemas de producción de electricidad basados en combustibles fósiles, previendo que estos sistemas proporcionen

alrededor del 11% de la electricidad mundial para el año 2050 [2], cuyo componente clave es la superficie absorbente que intercepta la radiación solar, donde su eficiencia incrementa por la aplicación de un recubrimiento solar selectivo en la superficie del absorbedor [3]. Actualmente, los materiales cerámicos son los más utilizados como absorbedores solares.

Los materiales cerámicos son sólidos inorgánicos obtenidos por tratamiento térmico y tienen grandes ventajas: son duros, alta temperatura de fusión, no combustibles y no oxidables, gran resistencia a altas temperaturas, gran poder de aislamiento térmico y eléctrico, gran resistencia a la corrosión y a efectos de la erosión que causan los agentes atmosféricos, así como alta resistencia a casi todos los agentes químicos [4,5]: Las cerámicas se clasifican en tres grupos principales: tradicionales, refractarias y avanzadas. Las cerámicas avanzadas generalmente poseen baja densidad, alta resistencia, alto módulo elástico, alta dureza, buena capacidad para altas temperaturas, así como excelente estabilidad química y ambiental y dentro de esta clasificación se encuentran las cerámicas de ultra alta temperatura (UHTC's), siendo una clase emergente de materiales que tienen el potencial para ser utilizados en ambientes extremos ya que tienen puntos de fusión por encima de los 3000 °C [6,7]. La mayoría de las UHTC's son compuestos binarios en los que el boro, carbono o nitrógeno se combinan con metales de transición como Zr, Hf, Ti, Nb y Ta [8,9] donde los fuertes enlaces covalentes entre los metales de transición y el B, C, o N dan como resultado compuestos con alta dureza, rigidez y alta temperatura de fusión [10]. Esta combinación de propiedades metálicas y cerámicas permite a las UHTC's resistir temperaturas extremas, grandes flujos de calor, niveles altos de radiación, cargas mecánicas, reactividades químicas y otras condiciones que están más allá de las capacidades de los materiales existentes [7,11,12]. Las propiedades ópticas de estos materiales son diferentes a las propiedades de los metales puros debido a la contribución a la función dieléctrica de las transiciones entre bandas de los electrones ligados [2]. Los metales proporcionan en su alta reflectancia infrarroja, la eliminación requerida de la emitancia térmica, sin embargo, su absorción solar es insuficiente. Los datos ópticos sobre los compuestos de metales de transición indican que la variedad de propiedades que presentan es prometedora y mucho más amplia que la de los metales simples [3].

El diboruro de zirconio (ZrB_2) tiene propiedades únicas de combinación tales como ultra alto punto de fusión, alta conductividad eléctrica y térmica, alta dureza, alto módulo elástico, buena inercia química, alta resistencia al desgaste, menor densidad teórica, excelente resistencia al choque térmico y oxidación en comparación con otras cerámicas estructurales que no son óxidos, propiedades que lo hacen el candidato más prometedor para aplicaciones de ultra alta temperatura [13-15].

El carburo de tantalio (TaC) es un excelente candidato para el uso en alta temperatura, como sistemas de propulsión aeroespacial y en receptores solares, debido a su alto punto de fusión (3800 °C), alto módulo elástico, alta dureza, superioridad térmica y estabilidad química [16-18]. El creciente interés en esta cerámica, además de su combinación única de propiedades, se debe a que tiene la característica de ser un material espectralmente selectivo [19].

El carburo de hafnio (HfC) es gran potencial en aplicaciones de ultra-alta temperatura, ya que tiene propiedades únicas como un alto punto de fusión (3900°C), buenas propiedades termomecánicas y termoquímicas. Por lo tanto, el HfC es un material prometedor para herramientas, toberas de cohetes, naves espaciales/aire y emisores [20-22].

El presente trabajo presenta la evaluación de propiedades ópticas de UHTCs tales como ZrB_2, TaC y HfC, caracterizados por difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía UV-Vis-NIR, cuyos resultados presentaron una alta absortancia a la radiación solar en longitudes de onda del espectro solar, siendo el HfC el de mayor valor en absortancia y confirmando que estos materiales pueden tener una gran aplicación como receptores solares de sistemas de torre central.

RESULTADOS

De acuerdo con trabajos previos [23-25], se sintetizaros las UHTCs de ZrB_2, TaC y HfC por el método de reducción carbotérmica a partir de complejos obtenidos a bajas temperaturas (Zr/B/O/C, Ta/O/C y Hf/O/C, respectivamente) cuyos análisis por difracción de rayos X (DRX) confirmaron la formación de los materiales cerámicos y en los cuales se evaluaron las propiedades ópticas a partir de la medición de la reflectancia difusa por medio de análisis de espectroscopía UV-Vis-NIR en el intervalo de 250-2500 nm.

Para el caso del ZrB_2, se obtuvo primeramente el complejo Zr/B/O/C a partir de la mezcla de n-propóxido de zirconio, ácido bórico, ácido acético y sorbitol, mediante el proceso sol-gel a baja temperatura (120°C), al cual se le dio tratamiento térmico de 1500°C en atmósfera de argón por 1 hora. De acuerdo con análisis de DRX se confirmó la formación de única fase cristalina de ZrB_2, mientras que análisis SEM mostró la obtención de un material poroso, con un tamaño de partícula de 100-200 nm con una morfología casi esférica. Los resultados de propiedades ópticas mediante espectroscopía UV-Vis-NIR para el ZrB_2 fueron una absortancia del 92%.

El TaC se sintetizó a partir del complejo Ta/O/C a partir de pentacloruro de tantalio ($TaCl_5$), acetil acetona y resina fenólica mediante al proceso sol gel a baja temperatura (200°C), el cual se introdujo en un horno tubular a 1200°C en atmósfera de argón por 2 horas. Resultados DRX mostraron la presencia de la fase cristalina de TaC con un estructura cúbica y pequeños residuos de Ta_2O_5 (≈ 12 %), mientras que análisis SEM mostraron un TaC con morfología semi esférica y tamaño de partícula de 22 nm. Se obtuvo una absortancia de 84% en el rango del espectro solar mediante análisis de espectroscopía UV-Vis-NIR.

El HfC se sintetizó a una temperatura de 1500°C en atmósfera de argón por un tiempo de 2 horas, a partir del complejo Hf/O/C obtenido a partir de tetracloruro de hafnio ($HfCl_4$) y pectina mediante el proceso sol gel a una temperatura de 110°C. Análisis DRX confirmaron la formación de HfC con estructura cristalina cúbica con un pequeño residuo de hafnia monoclínica (m-HfO_2) menor del 2%; mediante SEM se obtuvo una morfología cúbica con un tamaño de partícula de 70 nm. Análisis de espectroscopía UV-Vis-NIR mostraron la obtención de un material con absorbancia de 97%.

La Figura 1 presenta los valores obtenidos de reflectancia difusa mediante espectroscopía UV-Vis-NIR en el intervalo de 250-2500 nm observando valores de absortancia solar (α) de 92, 84 y 97% para ZrB_2, TaC y HfC, respectivamente. Aun cuando el HfC presenta una mayor absortancia, las tres UHTCs tienen excelentes propiedades ópticas para ser utilizados como receptores solares de sistema de torre

central, mejorando la absortancia del carburo de silicio (SiC) reportada en la literatura [26] como uno de los mejores materiales para estas aplicaciones.

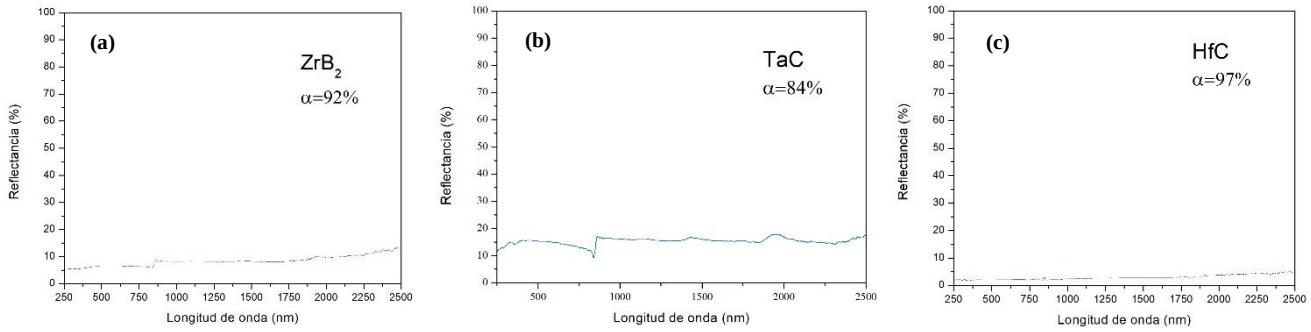


Figura 1. Espectros UV-Vis-NIR en el intervalo de 250-2500 nm de las UHTCs sintetizadas mostrando la absortancia (α) de: (a) ZrB_2, (b) TaC y, (c) HfC.

CONCLUSIONES

Se evaluaron las propiedades ópticas de tres UHTCs (ZrB_2, TaC y HfC) sintetizadas por el método de reducción carbotérmica y cuyos resultados de análisis de difracción de rayos X mostraron las fases cristalinas presentes en estas cerámicas, mientras que las imágenes SEM mostraron un tamaño promedio de partícula de 22-200 nm y una morfología esférica para el caso de ZrB_2 y TaC y morfología cúbica para el HfC. De acuerdo con los análisis de espectroscopía UV-Vis-NIR se obtuvieron los valores de reflectancia difusa teniendo valores de 92, 84 y 97% de absortancia solar para ZrB_2, TaC y HfC, respectivamente. El HfC es la cerámica que mayor absortancia presenta, posiblemente su morfología cúbica es la que favorece esta propiedad óptica, pero las tres UHTCs son excelentes materiales para potencial aplicación en receptores solares de sistema de torre central ya que tienen valores superiores que el SiC cuya absortancia está reportada aproximadamente en 80%. Además, el SiC a pesar de tener buena absortancia solar también tiene alta emitancia, por lo que las UHTCs se caracterizan por tener una menor emitancia con respecto al SiC.

REFERENCIAS

[1] H.K. Bang, A.E. Ellinger, J. Hadjimarcou, and P.A. Traichal. (2000). Consumer concern, knowledge, belief, and attitude toward renewable energy: An application of the reasoned action theory, *Psychol. Mark.*, Vol. 17, No. 6, p. 449–468.
[2] K. Hans, S. Latha, P. Bera, and H.C. Barshilia. (2018). Hafnium carbide based solar absorber coatings with high spectral selectivity, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 185, No. 3, p. 1–7.
[3] B O. Seraphin. (1979). Spectrally selective surfaces and their impact on photothermal solar energy conversion, p. 5–55.
[4] L.G. Ceballos-Mendivil, R.E. Cabanillas-López, J.C. Tánori-Córdova, R. Murrieta-Yescas, C.A. Pérez-Rábago, H.I. Villafán-Vidales, C.A. Arancibia-Bulnes and C.A. Estrada. (2015). Synthesis of silicon carbide using concentrated solar energy, *Sol. Energy*, Vol. 116, p. 238–246.
[5] X. Su, Y. Jia, J. Wang, J. Xu, X. He, C. Fu and S. Liu. (2013). Preparation and microwave absorption properties of Fe-doped SiC powder obtained by combustion synthesis, *Ceram. Int.*, Vol. 39, No. 4, p. 3651–3656.
[6] Z. Cheng, P. Foroughi, and A. Behrens. (2017). Synthesis of nanocrystalline TaC powders via single-step high temperature spray pyrolysis from solution precursors, *Ceram. Int.*, Vol. 43, No. 3, p. 3431–3434.
[7] W.G. Fahrenholtz and G.E. Hilmas. (2016). Ultra-high temperature ceramics: Materials for extreme environments, *Scr. Mater.*, Vol. 129, p. 94–99.
[8] M.M. Opeka, I.G. Talmy, E.J. Wuchina, J.A. Zaykoski, and S.J. Causey. (1999). Mechanical, Thermal, and Oxidation Properties of Refractory Hafnium and zirconium Compounds, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 19, No. 13–14, p. 2405–2414.
[9] M. Jalaly, F.J. Gotor, and M.J. Sayagués. (2018). Mechanochemical combustion synthesis of vanadium carbide (VC), niobium carbide (NbC) and tantalum carbide (TaC) nanoparticles, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, Vol. 79, No. 12, p. 177–184.
[10] X. Zhang, X. Luo, J. Han, J. Li, and W. Han. (2008). Electronic structure, elasticity and hardness of diborides of zirconium and hafnium: First principles calculations, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 44, No. 2, p. 411–421.
[11] E. Sani, L. Mercatelli, M. Meucci, A. Balbo, L. Silvestroni and D. Sciti. (2016). Compositional dependence of optical properties of zirconium, hafnium and tantalum carbides for solar absorber applications, *Sol. Energy*, Vol. 131, No. 5, p. 199–207.
[12] C. Musa, R. Licheri, S. Montinaro, R. Orrù and G. Cao. (2017). Tantalum carbide products from chemically activated combustion synthesis reactions, *Ceram. Int.*, Vol. 43, No. 15, p. 12844–12850.
[13] A. Rezaie, W.G. Fahrenholtz and G.E. Hilmas. (2007). Effect of hot-pressing time and temperature on the microstructure and mechanical properties of ZrB_2-SiC, *J. Mater. Sci.*, Vol. 42, p. 2735–2744.
[14] E. Sani, L. Mercatelli, P. Sansoni, L. Silvestroni and D. Sciti. (2012). Spectrally selective ultra-high temperature ceramic absorbers for high-temperature solar plants, *J. Renew. Sustain. Energy*, Vol. 4, No. 3, p. 033104.

[15] M.J. Thompson, W.G. Fahrenholtz, and G.E. Hilmas. (2012). Elevated Temperature Thermal Properties of ZrB_2 with Carbon Additions, *J. Am. Ceram. Soc*., Vol. 1085.
[16] E. Zapata-Solvas, D.D. Jayaseelan, H.T. Lin, P. Brown, and W.E. Lee. (2013). Mechanical properties of ZrB_2 and HfB_2-based ultra-high temperature ceramics fabricated by spark plasma sintering, *J. Eur. Ceram. Soc*., Vol. 33, No. 7, p. 1373–1386.
[17] J. Jiang, S. Wang, W. Li and Z. Chen. (2016). Low-temperature synthesis of tantalum carbide by facile one-pot reaction, *Ceram. Int*., Vol. 42, No. 6, p. 7118–7124.
[18] L. Wang, F. Zhang, W. Dai, Q. Cheng, L. Lu, K. Zhang, M. Lin, M. Shen and D. Wang. (2019), One step transformation of waste polyvinyl chloride to tantalum carbide@carbon nanocomposite at low temperature, *J. Am. Ceram. Soc*., Vol. 102, No. 11, p. 6455–6462.
[19] E. Sani, L. Mercatelli, D. Fontani, J.L. Sans and D. Sciti. (2011). Hafnium and tantalum carbides for high temperature solar receivers, *J. Renew. Sustain. Energy*, Vol. 3, No. 6, p. 063107.
[20] B. Matović, D. Bučevac, V. Maksimović, S. Nenadović, J. Pantić, D. Gautam and T. Yano (2014). Synthesis and characterization of hafnium carbide-based ceramics, *Key Eng. Mater*., Vol. 616, p. 1–7.
[21] S.H. Kim, C. MacCracken and J. Edmonds. (2000). Solar energy technologies and stabilizing atmospheric CO_2 concentrations, *Prog. Photovoltaics Res. Appl*., Vol. 8, No. 1, p. 3–15.
[22] H. Naito, Y. Kohsaka, D. Cooke and H. Arashi. (1996). Development of a solar receiver for a high-efficiency thermionic/thermoelectric conversion system, *Sol. Energy*, Vol. 58, No. 4–6, p. 191–195.
[23] Y. Carvajal-Campos. (2016). Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Sinaloa.
[24] Y. Carvajal-Campos. (2020). Tesis Doctorado. Universidad Autónoma de Sinaloa.
[25] E. Manzanarez-Salazar. (2017). Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Sinaloa.
[26] E. Sani, M. Meucci, L. Mercatelli, D. Jafrancesco, J.L. Sans, L. Silvestroni and D. Sciti. (2014). Optical properties of boride ultrahigh-temperature ceramics for solar thermal absorbers, *J. Photonics Energy*, Vol. 4, No. 1, p. 045599.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

EFECTO DEL GRUPO AZOMETINA EN EL PUENTE Π DE COLORANTES ORGÁNICOS BASADOS EN CARBAZOL PARA DSSC

Enoch Robles-Diaz, Jesús Baldenebro-López, Tomás Delgado-Montiel, Rody Soto-Rojo.
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Prol. Ángel Flores y Fuente de Poseidón, S/N, Los Mochis 81223, Sinaloa, México. Correspondencia: **enoch.robles.fim@uas.edu.mx**.

Daniel Glossman-Mitnik.
Departamento de Medio Ambiente y Energía, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua 31136, Chihuahua, México; Correspondencia: enoch.robles.fim@uas.edu.mx.

RESUMEN

Los sensibilizadores orgánicos libres de metal del tipo donador-puente π -aceptor (D-π-A), utilizados en celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC), reportan han alcanzado una eficiencia de conversión de hasta 14.8%. Estos presentan varias ventajas, como su bajo costo de fabricación, una síntesis relativamente fácil, grandes coeficientes de absorción y la posibilidad de realizar diseño molecular para ser estudiados teóricamente. En este trabajo, se estudia el comportamiento de la inclusión del grupo azometina en la estructura del puente-π en colorantes derivados de carbazol, el cual ya ha sido propuesto como potenciador de sensibilizadores basados en trifenilamina para DSSC. El ácido cianoacrílico es utilizado como la fracción aceptora debido a su gran capacidad de fungir como anclaje en la superficie del óxido de titanio comúnmente utilizado como semiconductor nanoestructurado. A través de la Teoría de Funcionales de la Densidad (DFT) se obtuvieron las estructuras moleculares de mínima energía, la densidad y niveles de energía de los orbitales moleculares que intervienen en las principales transiciones HOMO-LUMO. Además, se estudian los espectros de absorción Ultravioleta Visible (UV-Vis) y las transiciones electrónicas que intervienen. Por otro lado, se utilizó DFT conceptual para obtener los parámetros de reactividad química, tales como la dureza química, índice de electrofilicidad y poder electroaceptor, que han sido relacionados con la eficiencia de conversión.

ABSTRACT

Metal-free organic sensitizers of the donor-π-bridge-acceptor type (D-π-A), used in dye-sensitized solar cells (DSSC), report have achieved a conversion efficiency of up to 14.8%. These present several advantages, such as their low manufacturing cost, relatively easy synthesis, large absorption coefficients and the possibility of carrying out molecular design to be studied theoretically. In this work, the behavior of the inclusion of the azomethine group in the π-bridge structure in dyes derived from carbazole is studied. which has already been proposed as an enhancer of triphenylamine-based sensitizers for DSSC. Cyanoacrylic acid is used as the acceptor fraction due to its great ability to act as an anchor on the surface of titanium oxide commonly used as a nanostructured semiconductor. Through the Density Functional Theory (DFT), the minimum energy molecular structures were obtained, the density and energy levels of the molecular orbitals involved in the main HOMO-LUMO transitions. In addition, the Ultraviolet Visible (UV-Vis) absorption spectra and the electronic transitions involved are studied. On the other hand, conceptual DFT was used to obtain the chemical reactivity parameters, such as chemical hardness, electrophilicity index and electroaccepting power, which have been related to the conversion efficiency.

Palabras claves: Carbazol, Azometina, DSSC, Sensibilizador, M06.

INTRODUCCION:

En los últimos años la demanda de energía eléctrica es muy alta, en México el uso de combustibles fósiles para generar electricidad es de un 62%. La energía eléctrica requerida para 2021 fue de 128,000 GW/h, el 38% restante fue a través de energía limpias. Una de las fuentes de generación de energía limpia es a través de celdas solares. A pesar de que las celdas solares fueron introducidas desde mediados del siglo pasado, fue hasta en la década de los 90 donde se introducen una celda solar que es sensibilizada por colorantes (DSSC por sus siglas en ingles). Las DSSC presentan ventajas competitivas en comparación de las celdas tradicionales de silicio, principalmente por su costo de elaboración. Sin embargo, las primeras celdas presentadas por O´Regan y Grätzel [1], utilizan un colorante de rutenio (Ru), este permite al electrodo de trabajo, principalmente de dióxido de titanio mesoporoso, incrementar la eficiencia de conversión de luz solar a energía eléctrica. Desafortunadamente el rutenio es un material costoso y de difícil síntesis, dando oportunidad a investigar una gran variedad de colorantes, entre otros, los orgánicos libre de metal, como en el caso de los colorantes derivados de carbazol [2]. Una de las principales ventajas es que los colorantes orgánicos pueden ser analizados a través de la química computacional, buscando características como los parámetros de reactividad química y los valores energéticos de los orbitales moleculares de frontera, entre otros, para poder identificar a aquellos colorantes que pueden servir como sensibilizadores y mejorar la eficiencia de conversión de la celda [3].

La estructura química de un colorante orgánico libre de metal está conformada por una parte donadora (D), otra aceptora (A) y una sección que permite separar estas dos secciones denominado como puente-π. Estas tres partes que puede conformar a un colorante, permite el estudio y la modificación de cada área en forma independiente y valorar esta modificación para analizar su impacto en el incremento de la eficiencia de conversión de luz solar a energía eléctrica. El ácido cianoacrílico ha demostrado ser uno de los mejores grupos funcionales que puede anclarse muy bien al dióxido de titanio, por tal motivo, es utilizado comúnmente como la parte aceptora [4,5]. El carbazol es sin duda uno de los principales grupos funcionales estudiado ampliamente como la parte donadora por su gran capacidad de donar electrones, ya sea como grupo funcional simple o ramificado en su estructura. El espaciador denominado puente-π, puede estar conformado por un conjunto de grupos funcionales en donde su principal característica es la cantidad de dobles enlaces o enlaces-π, como los que presenta entre muchos grupos funcionales, el tiofeno, dioxitiofeno, indoles, incluso el mismo carbazol puede ser utilizado como parte el puente-π [6,7]. La azometina, es un pequeño grupo funcional conformado por carbono y nitrógeno en un doble enlace, lo que ayuda al movimiento intramolecular de los electrones, al promoverse el grupo funcional del colorante de un estado en reposo a un excitado gracias a la interacción de la luz solar. En este trabajo se realizó un comparativo entre dos estructuras moleculares de colorantes derivados de carbazol en la parte donadora, ácido cianoacrílico en la parte aceptora y una cadena de dos moléculas de dioxitiofeno y un tiofeno como estructura del puente-π, en donde a una de ella se insertó la azometina entre la parte aceptora y el tiofeno del puente-π y en la otra que se tomó como referencia no contiene azometina [8,9].

METODOLOGIA:

Análisis conformacional:

Se realizo un diseño de un colorante que contiene una molécula de carbazol en la parte donadora, una molécula de ácido cianoacrílico en la parte aceptora, y un conjunto conformado por dioxitiofeno-dioxitiofeno-tiofeno en la estructura del puente-π. A esta estructura se realizó un análisis conformacional con DFT, utilizando un nivel de cálculo M06/6-31G(d), para determinar sus distancias de enlaces y ángulos diedros. Posteriormente se realizó la inserción del grupo azometina entre la molécula de anclaje y el puente-π. Se calculó el valor energético de la estructura del colorante sin que presente valores imaginarios. Y se compararon los resultados del colorante sin azometina y con azometina.

Densidad electrónica de los orbitales moleculares de frontera y comparativo de valores HOMO-LUMO:

A través de DFT y el nivel de cálculo M06/6-31G(d), se obtiene la densidad electrónica de los orbitales moleculares de frontera. Se observa el comportamiento de la densidad electrónica del orbital molecular más alto ocupado (HOMO) y cuando es promovido al orbital molecular más bajo desocupado (LUMO). Se obtienen el valor energético para ambos estados, lo que permite un análisis gap; este análisis consiste en identificar y analizar los valores HOMO-LUMO contra el valor de oxido-reducción del electrolito empleado que típicamente se emplea ioduro-triyoduro. A su vez, se contrasta contra la banda de conducción y contra la banda de valencia del dióxido de titanio, esto permite identificar si los niveles de energía del colorante al pasar de un valor energético HOMO a LUMO, lo valúen como un sensibilizador para DSSC.

Espectros de absorción de ultravioleta-visibles:

Utilizando el nivel de cálculo M06-2X/6-31G(d) de la teoría de funcionales de la densidad, se calcularon las bandas de absorción en el espectro de ultravioleta-luz visible, utilizando un medio solventado con diclorometano, para ambas estructuras moleculares, la que contiene azometina y la que no contiene azometina que es utilizada como referencia. Se obtiene la grafica del espectro de absorción y las transiciones electrónicas.

Parámetros de reactividad química y eficiencia de conversión de luz:

Con la ayuda de DFT conceptual y el nivel de cálculo M06/6-31G(d), se obtuvieron los parámetros de reactividad química, como lo es la dureza química, que identifica una resistencia aparente al movimiento intramolecular de electrones al momento de existir la excitación de un estado HOMO a un estado LUMO, el índice de electrofilicidad que indica la estabilidad del colorante al estar inmerso dentro de un mar de electrones, proporcionado por un electrolito, lo que sucedería al momento de estar activo dentro de una DSSC, y finalmente los valores del poder electroaceptor y el poder electrodonador, representando la habilidad del colorante al aceptar o al donar electrones al medio.

ANALISIS Y RESULTADOS:

Análisis conformacional:

En la figura 1, se puede apreciar la estructura del colorante con carbazol en la parte donadora, ácido cianoacrílico en la parte aceptora y el puente-π conformado desde el donador al aceptor por dioxitiofeno-dioxitiofeno-tiofeno, este colorante propuesto se tomó como referencia y se compara contra una estructura similar, solo que entre el tiofeno y la parte aceptora se inserta un grupo azometina y se contrasta los resultados, así la figura 1A es el colorante base (c-base) y 1B el colorante con azometina (c-azo).

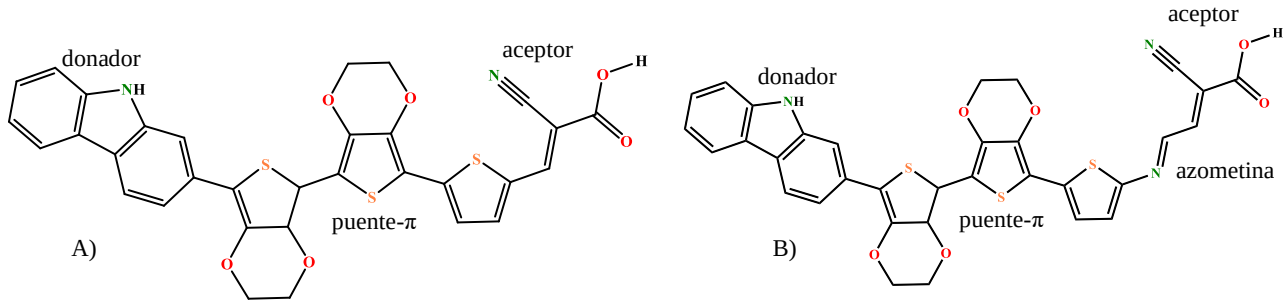


Figura 1. Colorante conformado por carbazol como donador, ácido cianoacrílico como aceptor y un bloque de dioxitiofeno-dioxitiofeno-tiofeno como puente-π. A) colorante tomado como base sin azometina, B) colorante con azometina entre la parte aceptora y el tiofeno.

En la tabla 1 se muestran los resultados del valor de energía para el colorante base (c-base) y el con azometina (c-azo), también su ángulo diedro entre la parte donadora y el puente-π (D-pπ), y entre el puente-π y la parte aceptora (pπ-A).

Tabla 1- valores de ángulo diedro en grados sexagesimal y distancias de enlace en angstrom.

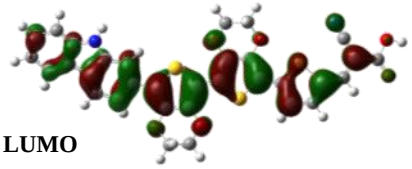
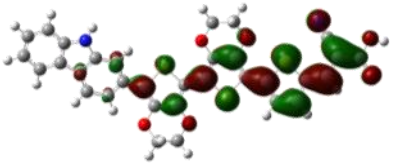
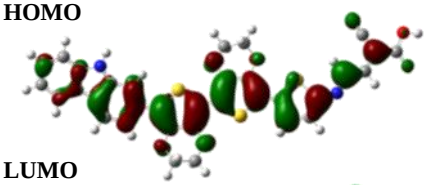
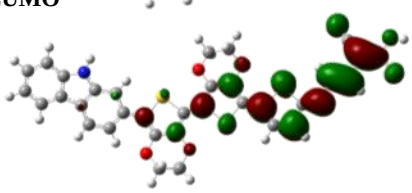
Colorante	Medida	D-pπ	pπ-A	Energía Hartree
c-base	Áng. Diedro Dis. Enlace	-24.00 1.46	0.00 1.47	-2985.5792
c-azo	Áng. Diedro Dis. Enlace	-24.59 1.46	0.00 1.48	-3978.9648

Se puede apreciar de que no existe una diferencia significativa entre los dos colorantes en el ángulo diedro, entre D-pπ, y las distancias de enlace tanto en D-pπ como en pπ-A son muy equivalentes. Sin embargo, la energía total del sistema expresada en Hartree si varia, dando un valor más negativo en el colorante con azometina indicando que sería una estructura más estable con un valor de -3978.9648 Hartree.

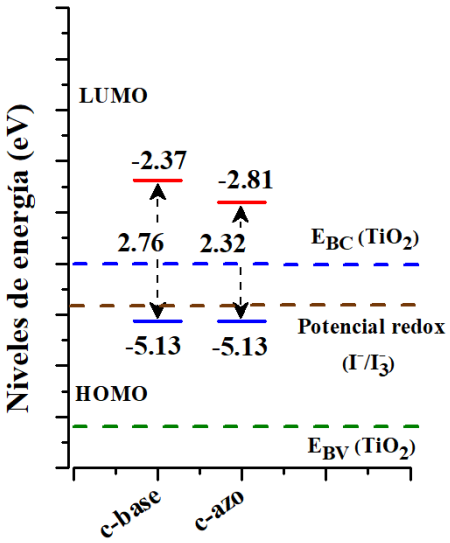
Densidad electrónica de los orbitales moleculares de frontera y comparativo de valores HOMO-LUMO:

En la Tabla 2 se pueden apreciar densidad electrónica de los orbitales moleculares de frontera, para sus niveles HOMO y LUMO de cada uno de los colorantes analizados c-base, colorante base, y c-azo, colorante con azometina. Se puede observar que existe un movimiento intramolecular de la densidad electrónica al momento de estar en estado HOMO y al realizar la promoción de la densidad electrónica a estado LUMO, en esta característica se observa que el c-azo presenta una mayor concentración de la densidad electrónica en estado LUMO en la parte aceptora, dejando casi sin ninguna densidad en la parte donadora, lo que ayuda a incrementar la probabilidad de inyección electrónica al estar trabajando como sensibilizador. En este sentido el colorante con azometina presenta esta ventaja.

Tabla 2- representación gráfica de la densidad electrónica de los orbitales moleculares de frontera en c-base y c-azo.

c-base	**c-azo**
HOMO  **LUMO** 	**HOMO**  **LUMO** 

En la gráfica 1, se muestra el gap HOMO-LUMO, entre los valores de c-base y c-azo, donde se puede apreciar que ambos colorantes pueden ser utilizados como sensibilizadores para DSSC, sin embargo, la diferencia de energía para la promoción de HOMO a LUMO en el colorante con azometina (c-azo) es menor, con una diferencia de 0.44 eV, lo que le da una ventaja debido a que puede hacer la promoción con una intensidad menor de luz solar en comparación con el colorante base (c-base).



Gráfica 1. Análisis gap de HOMO-LUMO para colorante base (c-base) y con azometina (c-azo)

Un colorante para poder ser factible como sensibilizador de celdas solares, debe tener un valor HOMO que sea superior a la banda de valencia del dióxido de titanio (-7.2 eV) e inferior del potencial redox del electrolito (-4.8 eV). Mientras que su valor LUMO debe ser superior al valor de la banda de conducción del dióxido de titanio (-4.0 eV), buscando siempre el que presente un menor valor como diferencia entre HOMO-LUMO. En este sentido el colorante con azometina presenta una disminución de la diferencia HOMO-LUMO en comparación con el base. Esto representa una ventaja entre ambos colorantes al requerir menor cantidad de energía para poder inyectar electrones a la banda de conducción del dióxido de titanio.

Espectros de absorción de ultravioleta-visibles:

En la gráfica 2, se muestra los espectros de absorción para ambos colorantes, en donde se puede observar que el colorante base tiene un pico de absorción en los 485 nm sin embargo el colorante con la azometina presenta un desplazamiento batocrómico y su transición más importante de HOMO a LUMO se encuentra en los 543 nm, estos resultados se pueden apreciar en la Tabla 3 se muestran los estados de excitación más relevantes de cada uno de los colorantes.

Tabla 3- Estados de excitación más relevantes para el colorante base y con azometina.

Espécimen	λ_{abs} (nm)	E(eV)	*f*	Transición H=HOMO, L=LUMO (%)
c-base	485.2	2.56	1.8509	H-0->L+0(+87%)
	346.5	3.58	0.2008	H-0->L+1(+56%); H-2->L+0(28%)
	321.2	3.86	0.1713	H-0->L+1(+32%), H-2->L+0(+26%)
	245.5	5.05	0.2175	H-0->L+3(+23%)
	254.9	4.86	0.2649	H-7->L+0(+18%)
c-azo	543.2	2.28	1.8665	H-0->L+0(+85%)
	368.5	3.36	0.2764	H-0->L+1(+51%); H-2->L+0(+32%)
	350.6	3.54	0.3121	H-0->L+1(+38%); H-2->L+0(33%)
	256.6	4.83	0.4322	H-3->L+1(+54%)

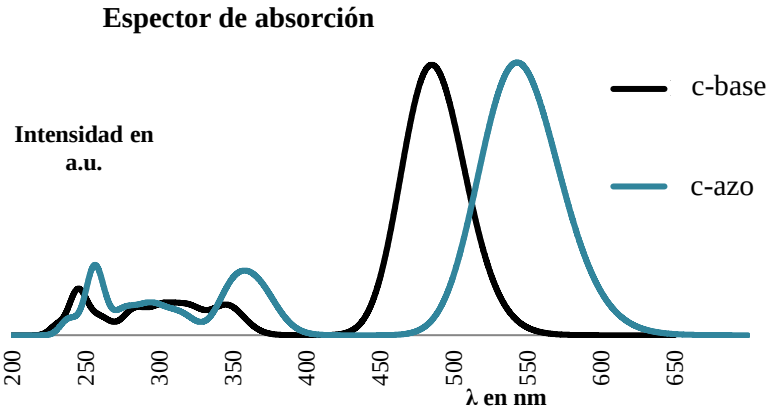


Figura 2. Espectro de absorción del espectro de ultravioleta-luz visible para el colorante base y con azometina.

Parámetros de reactividad química y eficiencia de conversión de luz:

Los parámetros de reactividad química se obtuvieron con DFT-conceptual, calculando los estados de mínima energía para cada uno de los colorantes en un ambiente libre de solventes, con características iónicas, tanto anión como catión y neutro. Esto permite bajo esta teoría obtener el potencial de ionización, como la diferencia entre los valores de energía neutro menos la energía en estado anión; y la obtención de la afinidad electrónica como la diferencia entre el valor de la energía en estado neutro y la catiónica. Finalmente se obtuvieron los valores de la dureza química, que es un valor relacionado a la dureza del material que impide el movimiento intramolecular de electrones, este valor es importante debido al movimiento que debe tener el colorante debido a la promoción electrónica desde una densidad en estado HOMO a LUMO, por consiguiente, entre mayor dureza mayor oposición al movimiento de la densidad electrónica y decrementa la eficiencia de conversión de luz solar a energía eléctrica. En la columna "Dureza" de la tabla 4, se puede apreciar que el colorante con azometina presenta menor dureza. En la segunda columna se encuentra el "Índice de electrofilicidad" que indica la estabilidad del colorante al estar inmerso en un mar de electrones, esta circunstancia es cuando está rodeado del electrolito, y entre mayor sea el valor, el colorante es más estable. Por consiguiente, el colorante con azometina presenta un mayor valor para este índice y por lo tanto es más estable. El poder electrodonador es la habilidad del colorante a donar electrones al medio, sin embargo, se busca que este valor sea el menor posible para poder generar un área donadora robusta para el anclaje con el dióxido de titanio. Se observa que, el colorante base tiene menor valor para este parámetro. Finalmente, el poder electroaceptor es la habilidad del colorante de aceptar electrones del medio, y para poder evitar la degradación del colorante al estar donando electrones, este debe ser obtenido del electrolito que genera un mar de electrones alrededor del colorante, por tal razón se busca que sea un valor alto y el colorante con azometina presenta un mayor valor que el que no contiene azometina.

Tabla 4. Valores de los parámetros de reactividad química.

Colorante	Dureza	Índice de Electrofilicidad	Poder electrodonador	Poder electroaceptor
c-base	4.6221	1.4781	5.0933	1.3969
c-azo	4.1152	1.8443	5.8937	1.9977

La Tabla 5 muestra un concentrado de la energía libre de inyección electrónica, representado como ΔGinj, dada como la diferencia entre la energía en estado HOMO más la energía del valor de frecuencia del estado de excitación más relevante en eV y el valor de la banda de conducción del semiconductor utilizado que es de -4.0 eV para el dióxido de titanio. La eficiencia de recolección de luz identificada como LHE es un cálculo realizado tomando como base el valor de fuerza de oscilación del pico predominante en cada colorante. Se puede apreciar que el colorante con azometina posee mayor eficiencia de recolección de luz con 0.9864.

Tabla 5. Valores de los parámetros de reactividad química.

Colorante	E_{bas}	ΔE	E_{exi}	ΔG_{inj}	λ (nm)	*f*	LHE
c-base	-5.13	2.56	-2.57	1.43	485.2	1.8509	0.9859
c-azo	-5.13	2.28	-2.85	1.15	543.2	1.8665	0.9864

CONCLUSIONES:

Los valores obtenidos demuestran que el colorante con azometina presenta ventajas en comparación con el colorante sin la azometina, no altera en forma significativa los valores geométricos de la estructura molecular como la distancia de enlace o la planaridad de la estructura molecular del colorante. Una de las características significativas es la reducción del gap HOMO-LUMO el cual disminuye 0.44 eV entre el colorante base y el que contiene azometina. El colorante con azometina presenta también el desplazamiento batocrómico que permite absorber luz visible a una distancia de onda de 543.2 nm, en comparación de los 485.2 nm de colorante base. En referencia a los parámetros de reactividad en 3 de ellos el colorante con azometina es mejor, debido a que tiene menor dureza química, mayor poder de electrofilicidad y mayor poder electroaceptor. Esto indicaría que tiene mayor estabilidad y recuperación de los electrones donados, y una menor oposición al movimiento intramolecular de electrones. Todo esto ayuda a incrementar la eficiencia de recolección de luz (LHE). Por consiguiente, la inclusión de azometina a un colorante orgánico libre de metal mejora las propiedades de reactividad química y la eficiencia de recolección de luz, presentando un desplazamiento de la banda de absorción hacia el color rojos y disminuyendo la cantidad de energía para el funcionamiento de la celda.

AGRADECIMIENTOS:

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el económico par el estudio de este proyecto, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. (CIMAV) principalmente por todo el apoyo al Dr. Daniel por el invaluable apoyo que ha brindado. En forma muy especial al gran equipo de doctores de la facultad de ingeniería Mochis de la Universidad Autónoma de Sinaloa, que conforman esta línea de investigación, colaborando y dando soporte hasta en horarios muy especiales, en un ambiente completamente fraternal. ¡¡¡A todos ustedes Muchas Gracias!!!

REFERENCIAS

[1] B. O'Regan and M. Grätzel. (1991). "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films.", Nature, vol. 353, no. 6346, pp. 737–740, doi: 10.1038/353737a0
[2] T. Delgado-Montiel, R. Soto-Rojo, J. Baldenebro-López, and D. Glossman-Mitnik. (2019). "Theoretical Study of the Effect of Different π Bridges Including an Azomethine Group in Triphenylamine-Based Dye for Dye-Sensitized Solar Cells," Molecules, vol. 24, no. 21, p. 3897, doi: 10.3390/molecules24213897.
[3] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, and H. Pettersson. (2010). "Dye-Sensitized Solar Cells," Chem. Rev., vol. 110, no. 11, pp. 6595–6663, doi: 10.1021/cr900356p.
[4] R. Govindarasu, M. K. Subramanian, T. Ahamad, and M. A. Majeed Khan. (2021). "First principle investigation of new metal-free organic dye molecular for DSSCs: effects of π-conjugated groups," Mol. Simul., vol. 47, no. 8, pp. 659–665, doi: 10.1080/08927022.2021.1898607.
[5] T. Delgado-Montiel, J. Baldenebro-López, R. Soto-Rojo, and D. Glossman-Mitnik. (2016). "Quantum chemical study of the effect of π-bridge on the optical and electronic properties of sensitizers for DSSCs incorporating dioxythiophene and thiophene units," Theor. Chem. Acc., vol. 135, no. 10, pp. 1–10, doi: 10.1007/s00214-016-1989-3.
[6] R. Govindarasu, M. K. Subramanian, A. Arunkumar, P. M. Anbarasan, and M. Shkir. (2022). "D–π–A manufactured organic dye molecules with different spacers for highly efficient reliable DSSCs via computational analysis," Mol. Simul., vol. 48, no. 7, pp. 584–593, doi: 10.1080/08927022.2022.2037585.
[7] R. Soto-Rojo, J. Baldenebro-López, and D. Glossman-Mitnik. (2015). "Study of chemical reactivity in relation to experimental parameters of efficiency in coumarin derivatives for dye sensitized solar cells using DFT," Phys. Chem. Chem. Phys., vol. 17, no. 21, pp. 14122–14129, doi: 10.1039/C5CP01387A.
[8] T. Delgado-Montiel, J. Baldenebro-López, R. Soto-Rojo, and D. Glossman-Mitnik. (2020). "Theoretical Study of the Effect of π-Bridge on Optical and Electronic Properties of Carbazole-Based Sensitizers for DSSCs," Molecules, vol. 25, no. 16, p. 3670, doi: 10.3390/molecules25163670.
[9] M. S. Abusaif et al. (2021). "New carbazole-based organic dyes with different acceptors for dye-sensitized solar cells: Synthesis, characterization, dssc fabrications and density functional theory studies," J. Mol. Struct., vol. 1225, p. 129297, doi: 10.1016/j.molstruc.2020.129297.

ID	TITULO	PONENTE
16223	Síntesis del compósito (Ta,Hf)C/SiC para aplicaciones en absorbedores solares.	Aimé Acosta Soto
16199	Propiedades estructurales y ópticas de películas delgadas base BiFeO3 depositadas por erosión catódica y su potencial uso en celdas fotovoltaicas.	Julio César Leal Zayas
16182	Hornos solares: una alternativa en la síntesis de nanomateriales.	Laura Ceballos
16073	Medición de propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos.	Ana Cecilia Borbón
16113	Construcción e implementación de un sistema de producción de biogás como combustible para parrilla de uso doméstico en la localidad de Las Cuevas, Lerdo, Durango.	Cinthia Andrea Juárez Ortiz
16128	Impresión 3D de receptor volumétrico tipo HONEYCOMB en carburo de silicio.	Daniela Zavala Moreno

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SÍNTESIS DE (TA,HF)C/SIC PARA APLICACIONES EN ABSORBEDORES SOLARES

Aimé L. Acosta-Soto, Jesús A. Baldenebro-López, Laura G. Ceballos-Mendívil
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Los Mochis, Sinaloa, México, 81223, (668) 8127641, **aime.acosta.fim@uas.edu.mx, jesus.baldenebro@uas.edu.mx, laura.ceballos@uas.edu.mx**

Ricardo A. Pérez-Enciso
Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Industrial, Hermosillo, Sonora, México, 83000, (662) 2592159, **ricardo.perez@unison.mx**

Carlos A. Pérez-Rábago
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, México, 625800, (777) 3620090, **capr@ier.unam.mx**

RESUMEN

En algunas aplicaciones se necesitan materiales estructurales avanzados que sean más más rígidos y resistentes a ambientes hostiles tales como son los compuestos de matriz cerámica (CMC). Los CMC están constituidos de dos o más materiales que se denominan constituyentes. El constituyente que es continuo y que es presente en mayor cantidad es llamado matriz, mientras que los demás constituyentes son llamados fases reforzantes ya que sus funciones son reforzar o mejorar a la matriz.

El presente trabajo es sobre la síntesis y evaluación de propiedades ópticas del compuesto binario con carburo de silicio (SiC) de (Ta,Hf)C/SiC para potencial aplicación en absorbedores solares. La síntesis del compuesto cerámico consta de dos etapas: la primera, se obtiene un complejo a baja temperatura a partir de los reactivos precursores, y la segunda, el complejo obtenido se introduce en un horno tubular de alúmina a una temperatura de 1500°C por una hora y en atmósfera de argón. El compuesto obtenido se analizó por las técnicas de caracterización de DRX, SEM y UV-Vis-NIR, cuyos resultados confirmaron la formación de (Ta,Hf)C/SiC presentando con una alta absorbancia de la radiación solar teniendo una potencial aplicación como absorbedor solar.

Palabras claves: receptor solar, compuesto, cerámicos, síntesis, caracterización, evaluación óptica.

ABSTRACT

In some applications, advanced structural materials are needed that are more rigid and resistant to harsh environments, such as ceramic matrix composites (CMC). CMCs are made up of two or more materials called constituents. The material that is continuous and present in greater quantity is called the matrix, while the other parts are called reinforcing phases since their functions are to reinforce or enhance the matrix.

This work is about the synthesis and evaluation of optical properties of the binary composite with silicon carbide (SiC) of (Ta,Hf)C/SiC for potential application in solar absorbers. The synthesis of the ceramic composite consists of two stages: the first, a complex is obtained at low temperature from the precursor reagents, and the second, the obtained complex is introduced into an alumina tubular furnace at a temperature of 1500°C for one hour and in an argon atmosphere. The obtained composite was analyzed by the characterization techniques of XRD, SEM and UV-Vis-NIR, whose results confirmed the formation of (Ta,Hf)C/SiC presenting a high absorbance of solar radiation having a potential application as a solar absorber.

Keywords: solar receiver, composite, ceramics, synthesis, characterization, optical evaluation.

INTRODUCCIÓN

Las cerámicas se producen a partir de sustancias esencialmente inorgánicas, no metálicas y se forman de una masa fundida que solidifica al enfriarse o se forman posteriormente madurada por la acción del calor. Las cerámicas se clasifican en cerámicas tradicionales y cerámicas avanzadas; entre las cerámicas avanzadas se encuentran los óxidos cerámicos, cerámicas de ultra alta temperatura (UHTCs, por sus siglas en inglés) y los compuestos de matriz cerámica. Los compuestos de matriz cerámica (CMC) se combinan reforzando fases dentro de una matriz cerámica para crear materiales con propiedades mejoradas. Las características deseables de los CMC incluyen estabilidad a altas temperaturas, alta resistencia al choque térmico, alta dureza, alta resistencia a la corrosión, entre otras [1]. Las UHTCs se definen como compuestos con alto punto de fusión sobrepasando los 3000 °C y tienen un gran potencial de aplicación en ambientes extremos, lo cual hace especial distinción de las cerámicas convencionales. Las UHTCs se componen principalmente de boruros, carburos y nitruros de hafnio, zirconio, tantalio y titanio (ZrB_2, HfB_2, ZrC, HfC, TaC, HfN, etc.) [2].

Los carburos de metales de transición (TMC) pertenecen a un subconjunto de las UHTCs, entre los que destacan el carburo de tantalio (TaC) y carburo de hafnio (HfC) por su punto de fusión extremadamente alto (cerca de 4000 °C), que los convierte en materiales con potenciales aplicaciones [3]. Los carburos TaC y HfC son de gran interés debido a sus propiedades ópticas de absortancia y emisividad [4].

La energía solar es la fuente renovable más abundante y solo el 0.1 % de la energía solar que llega a la superficie de la tierra sería suficiente para cubrir las necesidades mundiales. Existen dos formas para producir energía eléctrica a partir de la energía solar: fotovoltaica y fototérmica, donde la energía solar fototérmica se divide en: canal parabólico, disco parabólico, lineal Fresnel y torre central. La torre central está configurada por un campo de helióstatos que reflejan la radiación solar hacia un receptor solar ubicado en lo más alto de la torre; estos helióstatos siguen al sol con dos ejes también llamados colectores de foco puntual [5].

El receptor solar también actúa como absorbedor solar y es el componente clave que vincula el campo de helióstatos con el ciclo de conversión de la energía; en el receptor el calor solar entra dentro de la estructura o volumen, donde es absorbido por un material poroso y la mayoría de los materiales empleados son cerámicas y metales estables a altas temperaturas. Estos materiales deben ser capaces de absorber una cantidad abundante de radiación solar y emitir una radiación térmica muy baja dentro del rango infrarrojo. La absortancia se define como la relación entre la radiación absorbida y la radiación incidente, mientras que la emitancia se define como la relación entre la radiación emitida por el material y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura [6].

METODOLOGÍA

Materiales

Los materiales marca Sigma-Aldrich utilizados para la síntesis del compuesto cerámico (Ta,Hf)C/SiC son: $HfCl_4$ (pureza de 98%), $TaCl_5$ (pureza de 99%) y pectina ($C_6H_{10}O_7$) (pureza de 74%), así como agua destilada como disolvente

Experimento

La metodología general para la experimentación de la síntesis del compuesto cerámico (Ta,Hf)C/SiC para su posterior evaluación de propiedades microestructurales y ópticas consistió en tres etapas:

1. Obtención de complejo precursor Ta/Hf/O/C mediante el proceso sol-gel a baja temperatura (110 °C).
2. Síntesis del compuesto cerámico (Ta,Hf)C/SiC a partir de los complejos obtenidos en la etapa 1, lo cual se realiza en el horno tubular a alta temperatura (1500 °C).
3. Evaluación microestructural y óptica del compuesto sintetizado de (Ta,Hf)C/SiC para potencial aplicación en receptores solares.

La primera etapa consistió en la obtención de los polvos precursores con la formación del complejo Ta/Hf/O/C a baja temperatura mediante el método sol-gel con una relación molar Ta/Hf/C=0.9/1/8. Primeramente, en una parrilla de calentamiento (40 °C) se mezcla la pectina con agua destilada en un vaso precipitado agitando continuamente hasta lograr disolver completamente, agregando posteriormente el $HfCl_4$ y el $TaCl_5$ a la mezcla. Una vez esto, la muestra se lleva a secado en un horno convencional a una temperatura de 110 °C durante 24 horas para retirar el exceso de humedad por evaporación. Finalmente, el material obtenido se triturará con ayuda de un mortero de ágata logrando así obtener el polvo deseado del complejo Ta/Hf/O/C.

Una vez obtenido el complejo Ta/Hf/O/C se pasará a la segunda etapa mediante el método de reducción carbotérmica, la cual se llevó a cabo en un horno tubular de alúmina en atmósfera de argón, donde el complejo se coloca en un crisol de zirconia y se introduce en el horno por un tiempo de 2 horas después de alcanzada la temperatura de 1500 °C. Finalmente, se obtiene la formación del compuesto cerámico (Ta,Hf)C/SiC.

La última etapa consiste en realizar la evaluación microestructural y óptica del compuesto sintetizado de (Ta,Hf)C/SiC para potencial aplicación en receptores solares mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) para confirmar las fases cristalinas presentes en el compuesto cerámico, microscopía electrónica de barrido (SEM) para conocer la morfología del compuesto y por espectroscopía UV-Vis-NIR para conocer la absorbancia en el espectro solar del compuesto.

RESULTADOS

Difracción de Rayos X (DRX)

La Figura 1 muestra el difractograma del compuesto de (Ta,Hf)C/SiC sintetizado a partir del complejo Ta/Hf/O/C a una temperatura de 1500 °C por un tiempo de 2 horas en atmósfera de argón, el cual muestra las fases cristalinas esperadas del carburo binario (Ta,Hf)C [7], ambas con estructura cúbica tipo FCC así como las fases de SiC en su forma hexagonal (PDF#49-1428, PDF#29-1131). Además, se observa una pequeña cantidad residual de impureza de óxido de hafnio (PDF #34-0104) con estructura monoclínica (m-HfO_2) y óxido binario de $Hf_6Ta_2O_{17}$ (PDF#44-0998) atribuido a la formación del carburo de binario de estos dos metales.

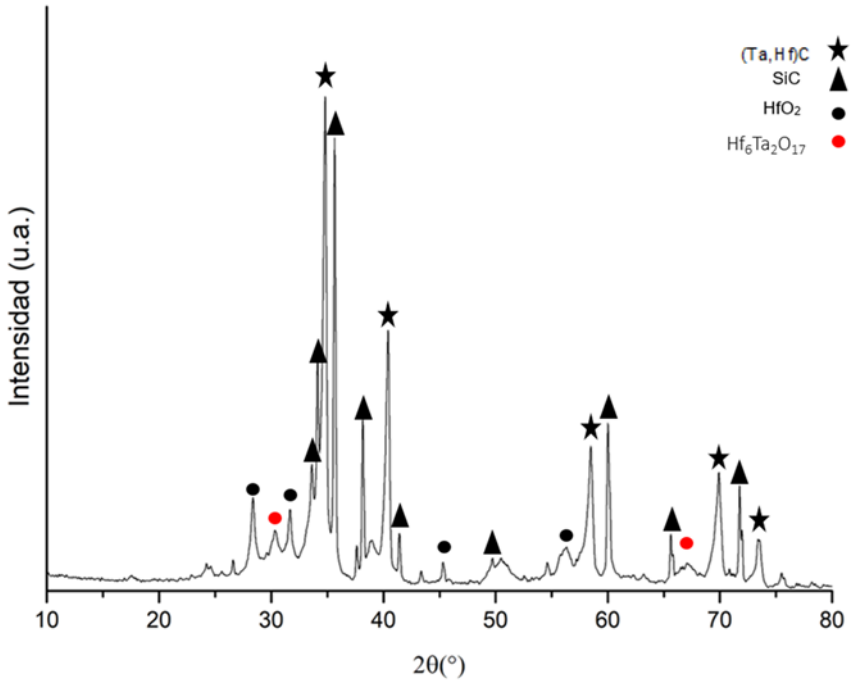


Fig. 1. Difractograma del compuesto (Ta,Hf)C/SiC sintetizado a 1500 °C en atmósfera de argón por 2 horas.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La Figura 2 muestra la micrografía de SEM del compuesto (Ta,Hf)C/SiC observando un material con morfología irregular con un tamaño promedio de partícula de ≈ 200-300 nm para el Ta_4HfC_5 y ≈ 15 µm para el SiC. Se presentan partículas más pequeñas con forma esférica y cúbica atribuidas a los óxidos HfO_2 y $Hf_6Ta_2O_{17}$ con tamaño promedio de partícula de ≈30 nm.

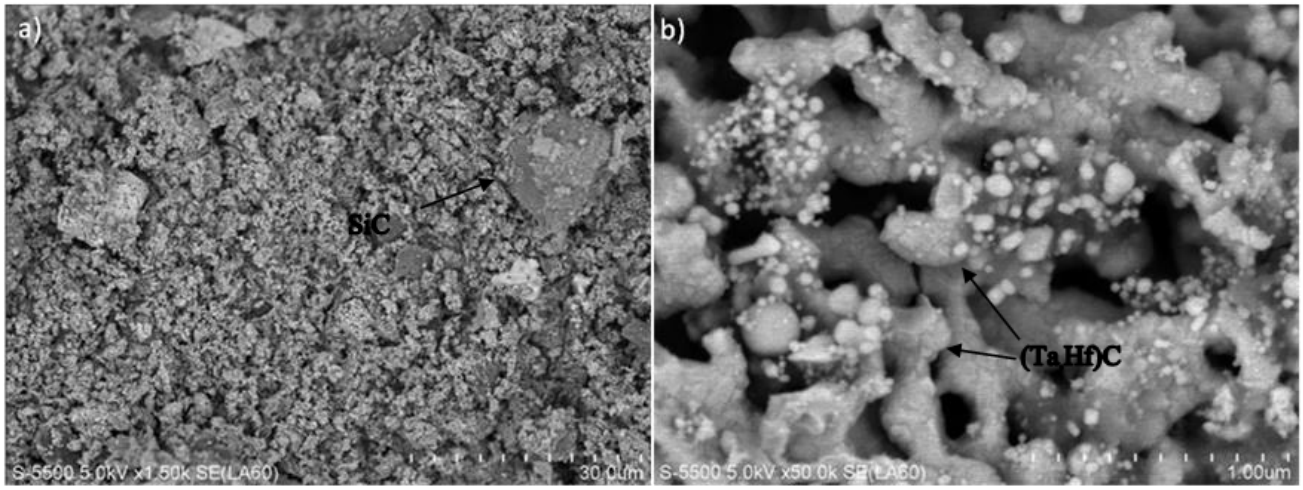


Fig. 2. Micrografía SEM del compuesto (Ta,Hf)C/SiC sintetizado a 1500 °C en atmósfera de argón en 2 horas.

Espectroscopía ultravioleta-visible-infrarrojo cercano (UV-VIS-NIR)

La Figura 3 muestra el espectro con los resultados obtenidos de reflectancia difusa para el compuesto cerámico (Ta,Hf)C/SiC (2% SiC) y el carburo binario (Ta,Hf)C, observando que se obtuvo una reflectancia promedio de 0.07 para el compuesto, es decir, este material absorbe 93% de radiación solar.

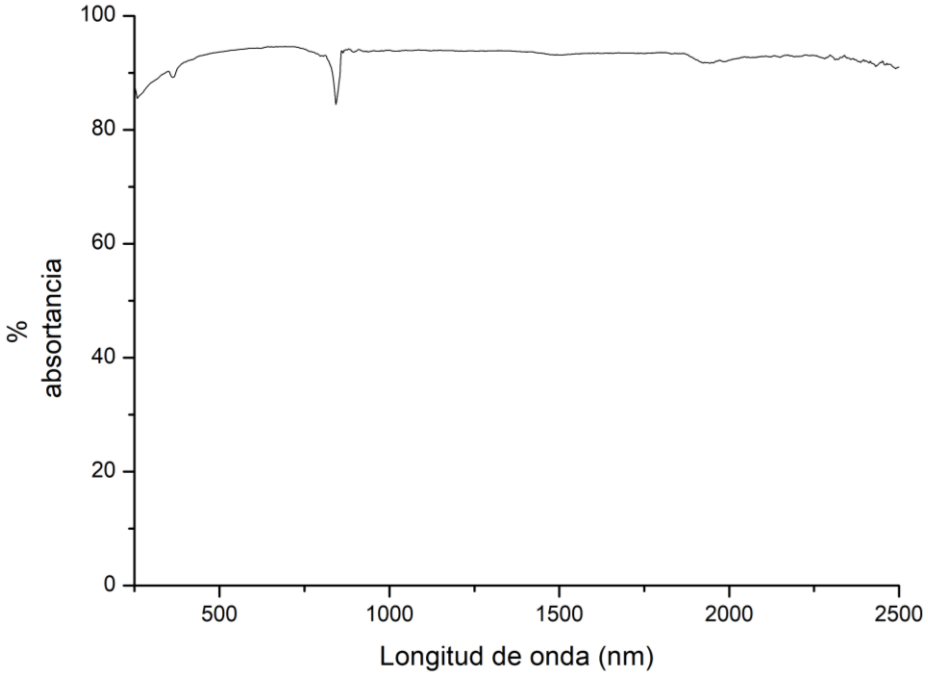


Fig. 3. Espectro UV-Vis-NIR del compósito (Ta,Hf)C/SiC.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la síntesis del compuesto (Ta,Hf)C/SiC a partir del complejo Ta/Hf/O/C mostraron las fases cristalinas del carburo binario (Ta,Hf)C y el SiC, así como una pequeña cantidad de impureza con hafnia con estructura monoclínica (m-HfO_2). El carburo binario mostró una morfología cúbica con un tamaño de partícula de 200-300 nm.

(Ta,Hf)C/SiC es un excelente compuesto cerámico con buenas propiedades para aplicaciones en absorbedores solares. Varios estudios reportados evalúan las propiedades de estos cerámicos por separado donde cada uno de ellos tiene sus ventajas y sus desventajas, pero es poca o casi nula la información que se tiene de estos materiales como un compuesto cerámico, actuando todo en conjunto en un solo sistema para la mejora de propiedades. Mientras que el carburo de silicio presenta una alta absortancia, pero también una alta emitancia, el carburo de hafnio y carburo de tantalio presentan una baja emitancia, propiedades que se pueden optimizar en la formación de un compuesto.

Los resultados corroboraron que se obtuvo una alta absortancia del 93% lo que indica que es un excelente candidato como absorbedor solar ya que muestra resultados aún más favorables que los reportados en la literatura gracias a la combinación de materiales y a la ruta de síntesis realizadas en esta investigación.

REFERENCIAS

[1] A. Sommers, Q. Wang, X. Han, C. T'Joen, Y. Park, and A. Jacobi, "Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems-A review", Applied Thermal Engineering, 30(11–12) 1–15, 2010.

[2] K. Cui et al., "Microstructure, mechanical properties, and reinforcement mechanism of carbide toughened ZrC-based ultra-high temperature ceramics: A review", Composite Interfaces, 29(7) 1–21, 2022.

[3] H. Liu, K. Tong, X. Feng, S. Liu, and B. Wen, "Temperature-dependent mechanical properties of TaC and HfC". J. Mater. Sci. 58(1) 1–13, 2023.

[4] P. Kondaiah, K. Niranjan, S. John, and H. C. Barshilia, "Tantalum carbide based spectrally selective coatings for solar thermal absorber applications". Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 198(1) 26–34, 2019.

[5] C. Prieto, F. J. Ruiz-Cabañas, V. Madina, A. I. Fernández, and L. F. Cabeza, "Corrosion performance of alloy 800H and alloy 625 for potential use as molten salts solar receiver materials in concentrating solar power tower plants". J. Energy Storage. 55(1) 1–13, 2022.

[6] R. K. Poobalan, H. C. Barshilia, and B. Basu, "Recent trends and challenges in developing boride and carbide-based solar absorbers for concentrated solar power". Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 245(1) 1–16, 2022

[7] J. Jiang et al. "Preparation and Characterization of UltraHigh-Temperature Ternary Ceramics Ta4HfC5". J. Am. Ceram. Soc. 99(10) 3198–3201, 2016.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y ÓPTICAS DE PELÍCULAS DELGADAS BASE $BiFeO_3$ DEPOSITADAS POR EROSIÓN CATÓDICA Y SU POTENCIAL USO EN CELDAS FOTOVOLTAICAS

Julio C. Leal-Zayas[1], Jorge L. Almaral-Sánchez[1], Joaquín Flores-Valenzuela[1], Francisca G. Cabrera-Covarrubias[1], Ramón A. Vargas-Ortiz[1]

[1]Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N., Los Mochis, Sinaloa C.P. 81223, México.

RESUMEN

La creciente demanda energética en la sociedad moderna evidenció la poca viabilidad de los combustibles fósiles y otras fuentes de energía no renovables a largo plazo, esto debido no solo a que eventualmente están destinadas a agotarse, sino que emiten una gran cantidad de contaminantes al medio ambiente, como la atmosfera. Dichas limitantes han motivado en gran medida la búsqueda de fuentes de energía renovables y amigables con el medio ambiente. En la actualidad existen una gran variedad de dispositivos diseñados a generar energía a partir de fenómenos naturales que antes no se aprovechaban con este fin, como lo son los generadores hidráulicos, eólicos y solares, entre otros. Los materiales ferroeléctricos han atraído la atención en las últimas décadas debido a su gran repertorio de propiedades, como las piroeléctricas, piezoeléctricas y, en algunos casos, fotovoltaicas. La ferrita de bismuto ($BiFeO_3$ o BFO) es un material ferroeléctrico que, además de presentar las características mencionadas, posee un band gap dentro del rango de luz visible del espectro electromagnético, por lo que este es un candidato prometedor para ser utilizado en celdas fotovoltaicas ferroeléctricas. En este estudio se crecieron películas delgadas por erosión catódica de la solución solida $BiFeO_3$ – $BaFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$ y se caracterizó el efecto en sus propiedades estructurales y ópticas. Se observaron distorsiones estructurales, las cuales tuvieron un impacto directo en el octaedro de Fe-O dentro de la celda unitaria, promoviendo distorsiones Jahn-Teller, modificando la brecha energética de este material. Lo que permite el diseño de dispositivos optoelectrónicos con un band gap dentro del rango de luz visible.

ABSTRACT

The growing demand for energy in modern society shows the low viability of fossil fuels and other non-renewable energy sources in the long term, not only because they are eventually destined to run out, but also because they emit a large amount of pollutants to the environment, such as the atmosphere. These limitations have largely motivated the search for renewable and environmentally friendly energy sources. Currently, there is a wide variety of devices designed to generate energy from natural phenomena that were not previously used for this purpose, such as hydraulic, wind and solar generators, among others. Ferroelectric materials have attracted attention in recent decades due to their wide repertoire of properties, such as pyroelectric, piezoelectric and, in some cases, photovoltaic. Bismuth ferrite ($BiFeO_3$ or BFO) is a ferroelectric material that, in addition to presenting the mentioned characteristics, has a band gap within the visible light range of the electromagnetic spectrum, making it a promising candidate for use in ferroelectric photovoltaic cells. In this study, thin films were grown by sputtering of the $BiFeO_3$ – $BaFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$ solid solution and the effect on their properties and structure was characterized. Structural distortions were observed, which had a direct impact on the Fe-O octahedron within the unit cell, promoting Jahn-Teller distortions, modifying the energy gap of this material. This allows the design of optoelectronic devices with a band gap within the visible light range.

PALABRAS CLAVE: Solución sólida, Ferroeléctrico, $BiFeO_3$, $BaFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$, Propiedades estructurales, Propiedades ópticas
Keywords: Solid solution, Ferroelectric, $BiFeO_3$, $BaFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$, Structural properties, Optical properties

INTRODUCCIÓN

La ferrita de bismuto ($BiFeO_3$ o BFO) es un material ferroeléctrico con estructura tipo perovskita ABO_3 que ha atraído mucha atención en las últimas décadas debido a sus propiedades antiferromagnéticas y ferroeléctricas a temperatura ambiente, una constante dieléctrica alta y su banda prohibida está dentro del rango de la luz visible [1]. La estructura cristalina de este material está fuertemente relacionada con sus propiedades piezoeléctricas, piroeléctricas, ferroeléctricas y ópticas. Además, el BFO es amigable con el medio ambiente porque no contiene plomo (Pb), convirtiéndolo en un candidato potencial para reemplazar materiales a base de plomo en dispositivos electrónicos, como sensores, actuadores, fotodetectores y dispositivos fotovoltaicos. Se ha explorado el efecto que tiene la sustitución parcial en los sitios A y B en el BFO con diferentes iones de metales de transición y elementos del grupo de los lantanos [2], [3]. De igual manera, se ha estudiado el efecto que tiene la formación de soluciones solidas de perovskitas base BFO. Al sintetizar cerámicas de BFO con $BaTiO_3$ se observo un impacto directo en los parámetros de red debido a la inclusión de iones de mayor tamaño a la red cristalina, lo que promovió un aumento en los parámetros de red observado en el desplazamiento del pico principal hacia ángulos menores en los patrones de difracción de rayos X [4]. De igual manera, se ha observado que en películas delgadas de la solución solida de BFO y $SrTiO_3$ dicha distorsión estructural tiene un fuerte impacto en el band gap del material, esto debido a un aumento de la distorsión del octaedro Jahn-Teller de los enlaces Fe-O provocada por el aumento de la distancia interplanar observada en los DRX [5]. Sin embargo, no existen reportes de las propiedades estructurales y ópticas de películas delgadas depositadas por erosión catódica del sistema $BiFeO_3$-$BaFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$. Por lo que en este estudio se depositaron películas delgadas de $(1–x)BiFeO_3–xBa(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ (BFO-BFNx) con valores de x = 0.0 y 0.10 para el estudio de la relación entre las distorsiones estructurales en las propiedades ópticas debido a la inclusión de BFN en el BFO.

METODOLOGÍA

Para la fabricación de blancos cerámicos se utilizaron polvos de óxidos precursores marca Sigma Aldrich, los cuales consisten en bismuto (Bi_2O_3), hierro (Fe_2O_3), bario ($BaCO_3$) y niobio (Nb_2O_5) con grados de pureza superiores al 99%, vial de Nylamid, esferas de zirconia de 10 mm de diámetro, dado de acero inoxidable de 2.5 pulgadas de diámetro interior. Para el depósito de películas delgadas por erosión catódica se utilizaron los blancos cerámicos de la solución sólida $(1–x)BiFeO_3–xBa(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ (BFO-BFNx) con valores de x = 0.0 y 0.10 con etiquetado con BFO–BFN0 y BFO–BFN10, respectivamente. Lijas para el desbaste de blancos cerámicos. Portaobjetos de vidrio pulidos de 2.65 x 7.62 cm con espesor de 1 mm fueron utilizados como sustratos. La estructura cristalina se determinó mediante difracción de rayos X utilizando un difractómetro RIGAKU Dmax 2100 con una fuente de CuKα (λ = 1.5406 Å). El rango de medición se realizó a 22° – 70° en 2θ con un paso de 0.02° y 0.4 s por paso. Los espectros de reflexión y transmisión para el análisis de las propiedades ópticas se obtuvieron en un espectrómetro Film Tek 3000 UV-Vis en un rango de 300 a 850 nm.

RESULTADOS

La figura 1.1a muestra los patrones de difracción de rayos X de películas delgadas del sistema BFO-BFN en un rango 2θ 22° – 70° medidos a temperatura ambiente. En estos se observa que todos los picos coinciden con los de la carta cristalográfica 86-1518, correspondiente a $BiFeO_3$ con estructura perovskita y fase romboédrica [6]. Adicionalmente, algunos picos de difracción correspondientes a una fase secundaria rica en bismuto ($Bi_{25}FeO_{39}$) son observados, la presencia de fases secundarias en común en la síntesis de este material [5], [7]. Sin embargo, en la película BFO-BFN10 se observa una disminución en la intensidad de picos pertenecientes a esta fase secundaria, por lo que la adición de BFN en la solución sólida suprime la formación de fases parasíticas a partir de un 10% de BFN. Formar soluciones sólidas base $BiFeO_3$ con otras perovskitas ABO_3 previene la formación de fases secundarias [8]. La figura 1.1b muestra una ampliación en 2θ de 35° a 40° de los patrones de difracción. En la misma se observa que el pico principal en la películas BFO-BFN0 correspondiente a los planos (104) y (110) de la carta cristalográfica coincide muy bien, por lo tanto, es posible deducir que esta muestra posee una fase romboédrica. Sin embargo, para la muestra BFO-BFN10 ocurren 2 fenómenos. El primero es un desplazamiento del pico principal hacia ángulos menores, lo cual indica un aumento en la distancia interplanar en la red de perovskitas [9], indicando la formación exitosa de una solución sólida entre el $BiFeO_3$ y el $Ba(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O_3$. El segundo es el cambio de forma del pico principal, el cual evoluciona de un pico doble a uno sencillo. Lo anterior es evidencia de la coexistencia de fases cristalinas, este fenómeno es común en sistemas binarios de soluciones sólidas o dopajes de la combinación de sistemas tipo ABO_3 [10]. En ocasiones, la coexistencia de fases promueve un mejor comportamiento ferroeléctrico en varios sistemas tipo perovskita, como lo es el PZT [11] y la solución sólida $BiFeO_3$ – $BaTiO_3$ [4].

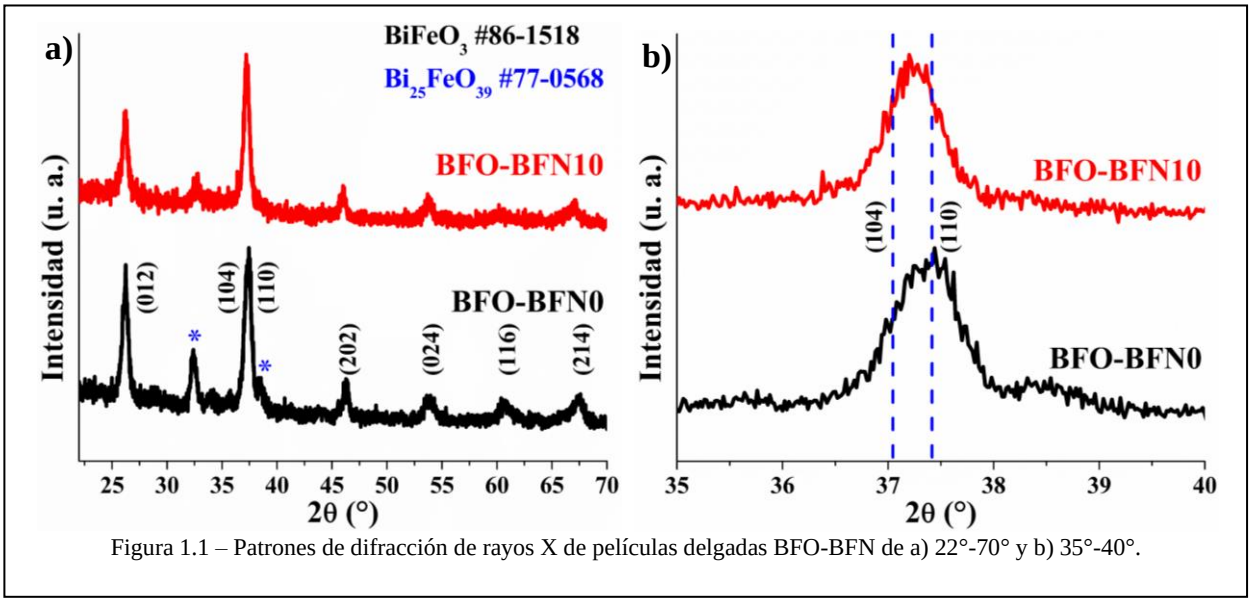


Figura 1.1 – Patrones de difracción de rayos X de películas delgadas BFO-BFN de a) 22°-70° y b) 35°-40°.

La figura 1.2 muestra las gráficas de Tauc correspondientes a las películas delgadas de BFO-BFN obtenidas a partir de los espectros de reflexión – transmisión medidos a temperatura ambiente. El band gap de cada película delgada es obtenido a través de la prolongación de la sección lineal de estas gráficas. Se observa que para todas las muestras se obtuvieron valores de band gap dentro del rango de luz visible del espectro electromagnético. Para BFO-BFN0 posee una brecha energética de 2.61 eV y esta aumenta con la incorporación de BFN en la solución sólida, hasta llegar a 2.80 eV para BFO-BFN10. Esto puede ser explicado con el aumento en los parámetros de red observados en los resultados anteriores, ya que al aumentar estas propiedades el octaedro del sitio B de la perovskita se distorsiona y esto a su vez, provoca un ensanchamiento de la brecha energética debido a distorsiones estructurales tipo Jahn-Teller [12].

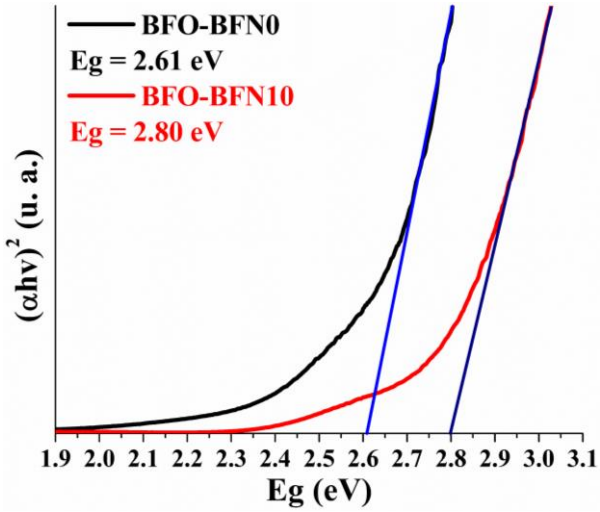


Figura 1.2 – Graficas de Tauc de películas delgadas BFO-BFN obtenidas a partir de espectros de reflexión-transmisión.

CONCLUSIONES

Películas delgadas de la solución solida BFO-BFN fueron depositadas por erosión catódica a partir de blancos cerámicos fabricados en laboratorio a partir de óxidos precursores. Todas las muestras poseen una estructura de tipo perovskita con fase romboédrica y una fase secundaria rica en bismuto. La inclusión de BFN en el BFO aumento la distancia interplanar en la celda unitaria como se observo en el desplazamiento del pico principal hacia ángulos menores. Este aumento de distancia interplanar produjo una distorsión del octaedro Jahn-Teller de los enlaces Fe-O, aumentando el band gap del material de 2.61 eV a 2.80 eV. Todo esto es evidencia de que este material puede ser modificado para ser utilizado en dispositivos optoelectrónico como sensores de luz o celdas solares.

REFERENCIAS

[1] C. Gumiel and D. G. Calatayud, "Thin film processing of multiferroic $BiFeO_3$: From sophistication to simplicity. A review", *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 61, no. 6, pp. 708–732, 2021, doi: 10.1016/j.bsecv.2021.08.002.

[2] S. Yang, F. Zhang, X. Xie, H. Sun, L. Zhang, and S. Fan, "Enhanced leakage and ferroelectric properties of Zn-doped $BiFeO_3$ thin films grown by sol-gel method", *J. Alloys Compd.*, vol. 734, pp. 243–249, 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.11.014.

[3] J. P. Liu *et al.*, "Substantial reduction of leakage currents in La/Er/Zn/Ti multielement-doped $BiFeO_3$ multiferroic thin films", *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 12, pp. 17328–17334, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.295.

[4] H. Zhang, W. Jo, K. Wang, and K. G. Webber, "Compositional dependence of dielectric and ferroelectric properties in $BiFeO_3$-$BaTiO_3$ solid solutions", *Ceram. Int.*, vol. 40, no. 3, pp. 4759–4765, 2014, doi: 10.1016/j.ceramint.2013.09.020.

[5] X. Wu, L. Yao, S. Yang, and Y. Zhang, "Enhanced ferroelectricity and band gap engineering of (1-x)$BiFeO_3$-x$SrTiO_3$ thin films", *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 83, no. 3, pp. 653–659, 2017, doi: 10.1007/s10971-017-4441-9.

[6] H. Liu *et al.*, "Crystalline Phases and Ferroelectric Properties of Sputtered $BiFeO_3$ Thin Films Cooled in Pure O_2 and Mixed Ar/O_2 Atmospheres", *J. Electron. Mater.*, vol. 51, no. 1, pp. 295–303, 2022, doi: 10.1007/s11664-021-09288-7.

[7] R. R. Awasthi, K. Asokan, and B. Das, "Effect of molar concentration on structural, magnetic domain and optical properties of $BiFeO_3$ thin films", *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 125, no. 5, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1007/s00339-019-2560-6.

[8] J. H. Cho *et al.*, "Structural, dielectric and leakage current behaviors of Ti-substituted $BiFeO_3$ ceramics", *Ferroelectrics*, vol. 410, no. 1, pp. 16–21, 2011, doi: 10.1080/00150193.2010.492028.

[9] J. H. Zhu, J. Q. Dai, J. W. Xu, and X. Y. Li, "Effect of Zn and Ti Co-doping on structure and electrical properties of $BiFeO_3$ ceramics", *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 8, pp. 9215–9220, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.02.131.

[10] X. L. Liang, J. Q. Dai, and G. dong Zhang, "Great ferroelectric properties and narrow bandgaps of $BiFeO_3$ thin films by (Mg, Mn) modifying", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 586, no. January, p. 152751, 2022, doi: 10.1016/j.apsusc.2022.152751.

[11] S. E. Park and T. R. Shrout, "Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals", *J. Appl. Phys.*, vol. 82, no. 4, pp. 1804–1811, 1997, doi: 10.1063/1.365983.

[12] A. R. West, *Solid State Chemistry*, 2nd ed. Wiley, 2014.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

HORNOS SOLARES: UNA ALTERNATIVA EN LA SÍNTESIS DE NANOMATERIALES

Laura G. Ceballos-Mendívil, Francisco J. Baldenebro-López
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Prol. Ángel Flores y Fuente de Poseidón S/N, Los Mochis, Sinaloa, C.P. 81223, México, (668) 8127641,
laura.ceballos@uas.edu.mx, francisco.baldenebro@uas.edu.mx

Jonathan C. Luque-Ceballos
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, C.P. 80000, México, (662) 2893792.
jonathan.luque@unison.mx

Carlos A. Pérez-Rábago, Claudio A. Estrada-Gasca
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N Temixco, Morelos, C.P. 62580, México, (777) 3620090
capr@ier.unam.mx, cestrada@ier.unam.mx

RESUMEN

El horno solar es una herramienta que utiliza radiación solar altamente concentrada, ideal para el estudio de propiedades de materiales a alta temperatura: ópticas, químicas, eléctricas y termodinámicas, mediante estudios de fase y vaporización, fundido, crecimiento de cristales, calor específico y conductancia térmica. Los hornos solares son sistemas ópticos que concentran la radiación solar en un área pequeña en la que se alcanzan altas temperaturas y flujos térmicos mediante un sistema óptico compuesto por un helióstato con seguimiento automático del sol que refleja la radiación solar a un espejo concentrador con una estructura óptica y mecánica con sistemas controlados automáticamente que concentran la luz en un punto focal en el que la temperatura puede alcanzar valores de 3500°C. Actualmente, los hornos solares han centrado la atención en el impulso de su uso en la síntesis de nanomateriales.

Se presentan resultados experimentales realizados en el horno solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM localizado en Temixco, Morelos, como una alternativa en la síntesis de nanomateriales mediante el uso de energías limpias y con un menor tiempo de síntesis con respecto al uso de hornos eléctricos. Los nanomateriales cerámicos sintetizados mediante el método de reducción carbotérmica son carburo de silicio (SiC), carburo de tantalio (TaC), óxido de zirconio (ZrO_2) y óxido de hafnio (HfO_2), analizados por diferentes técnicas de caracterización para la confirmación de la obtención de nanoestructuras cristalinas con diversa morfología y tamaño del orden nanométrico.

Palabras claves: *Energía solar, horno solar, síntesis, nanomaterial, caracterización*.

ABSTRACT

The solar furnace uses highly concentrated solar radiation, ideal for the study of high temperature material properties: optical, chemical, electrical and thermodynamic, through phase and vaporization studies, melting, crystal growth, specific heat and thermal conductance. Solar furnaces are optical systems that concentrate solar radiation in a small area where high temperatures and thermal flows are reached by optical systems composed of a heliostat with automatic tracking of the sun that reflects solar radiation to a concentrating mirror with a structure. optical and mechanical with automatically controlled systems that concentrate light at a focal point where the temperature can reach values of 3500 °C. Currently, solar furnaces have focused attention on the use in the nanomaterials synthesis. Experimental results are presented, carried out in the solar furnace of the Instituto de Energías Renovables of the UNAM located in Temixco, Morelos, as an alternative in the nanomaterials synthesis through the use of clean energy and with a shorter synthesis time with respect to the use of electric ovens. The ceramic nanomaterials obtained are silicon carbide (SiC), tantalum carbide (TaC), zirconium oxide (ZrO_2) and hafnium oxide (HfO_2), analyzed by different characterization techniques to confirm crystalline nanostructures with diverse morphology and size of the nanometric order.

Keywords: *Solar energy, solar furnace, synthesis, nanomaterial, characterization*.

INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales han surgido como una clase sorprendente de materiales de una dimensión en el rango de 1 a 100 nm, pudiendo lograr áreas de superficie excepcionalmente altas a través del diseño racional de éstos. Las propiedades de los nanomateriales se ajustan como se desee mediante el control preciso del tamaño, forma, condiciones de síntesis y funcionalización apropiada [1]. La nanoquímica y los nanomateriales abren nuevas oportunidades para lograr mayores eficiencias de conversión de energía solar a menores costos de fabricación, ya que permiten el uso de materiales y tecnologías de procesamiento económicos para captar la luz solar [2]. Cada vez aumenta más la síntesis de nuevos nanomateriales, donde los de composiciones mixtas también se están obteniendo para su aplicación en diferentes campos. Los métodos de síntesis simples producirán nanopartículas de tamaño, forma y propiedades deseadas que pueden soportar condiciones

externas, pero aún necesitan algunas mejoras. La síntesis de nanopartículas se realiza mediante tres métodos diferentes: biológicos, físicos y químicos [3]. Los nanomateriales se clasifican en: basados en carbón, orgánicos, inorgánicos y compósitos; dentro de los nanomateriales inorgánicos están los metálicos, cerámicos, lípidos y semiconductores [4]. Los materiales cerámicos han formado parte de la vida humana desde hace mucho tiempo, sin embargo, en los últimos 50 años han madurado mediante una base científica; son materiales sólidos inorgánicos producidos mediante tratamiento térmico y poseen grandes ventajas: son duros, tienen alta temperatura de fusión, no combustibles y no oxidables, gran resistencia a altas temperaturas, con gran poder de aislamiento térmico y eléctrico, gran resistencia a la corrosión y a los efectos de la erosión que causan los agentes atmosféricos, así como alta resistencia a casi todos los agentes químicos. Algunas aplicaciones de estos materiales son: componentes electrónicos, sensores ambientales, encendedores de gas, alarmas de intrusión, altavoces, productos de limpieza por ultrasonidos y equipos de diagnóstico médico, entre otros. Además, poseen excelentes propiedades como alta dureza, aislamiento térmico y eléctrico, estabilidad química y alto punto de fusión [5]. Los óxidos cerámicos presentan baja reactividad y no toxicidad, como alúmina o hafnia, presentando altos puntos de fusión (1500-2800°C) y buenas propiedades mecánicas con aplicaciones en sensores. Las cerámicas de ultra alta temperatura (UHTC's) son una familia de materiales, que incluyen carburos, boruros y nitruros de hafnio, circonio y tantalio, cuyas temperaturas de fusión son superiores a 3000°C y tienen aplicaciones en recubrimientos, vehículos aeroespaciales, se caracterizan por tener los puntos de fusión más altos de los materiales existentes y poseen las propiedades físicas de la cerámica y las electrónicas de los metales, es decir, alta dureza y altas conductividades térmicas y eléctricas [6,7].

El uso de energía solar concentrada proporcionada por hornos solares tiene varias aplicaciones en el procesamiento de materiales, debido a que con este tipo de sistemas es posible alcanzar altas temperaturas (alrededor de 3000°C) en pocos segundos. Los principales componentes del horno solar son: un concentrador, un helióstato y una cortina la cual se encuentra entre el heliostato y el concentrador. Esta cortina regula la cantidad de energía radiativa que alcanza la zona focal, y por lo tanto usada para controlar la temperatura de la muestra El HoSIER es un horno solar ubicado en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), en la ciudad de Temixco, Morelos, el cual tiene numerosos componentes que necesitan ser controlados donde el control del sistema, lo cual es fundamental para el correcto funcionamiento de este; las principales aplicaciones de esta infraestructura se encuentran en las áreas de química solar y procesamiento de materiales solares. El horno solar fue diseñado para un helióstato con área de 81 m^2, un atenuador de 42.2 m^2 y un concentrador óptico que consta de 409 espejos de vidrio pulido de superficie hexagonal [8]. Los hornos solares además de llevar a cabo síntesis de materiales, son utilizados para termogravimetría solar, metalurgia solar, pruebas de materiales avanzados, entre otros [9].

Este trabajo presenta el uso del horno solar del IER-UNAM como una alternativa en la síntesis de nanomateriales cerámicos. Se obtuvieron nanomateriales cerámicos mediante el método de reducción carbotérmica: SiC, TaC, ZrO_2 y HfO_2, los cuales fueron analizados por diferentes técnicas de caracterización tales como: difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis termogravimétricos (TGA/DSC) para la confirmación de la obtención de nanoestructuras cristalinas con diversa morfología y tamaño del orden nanométrico.

METODOLOGÍA

La metodología general de la síntesis de nanomateriales cerámicos usando el horno solar del IER-UNAM consiste en dos etapas, las cuales se resumen en la Figura 1.

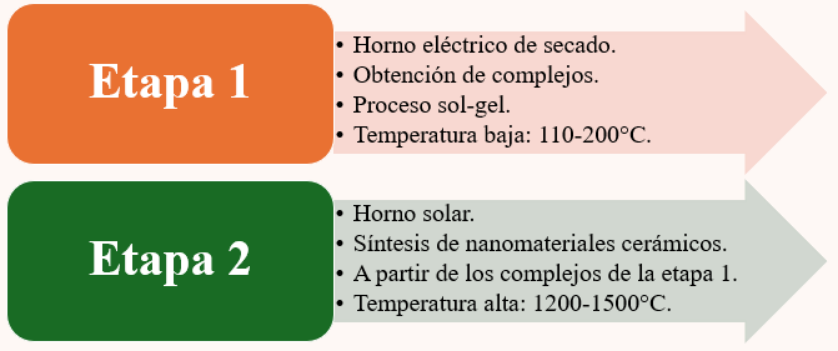


Figura 1. Etapas en la síntesis de nanomateriales cerámicos en el horno solar.

La primera etapa se realiza a baja temperatura (110-200°C) mediante el proceso sol-gel en un horno eléctrico de secado y consiste en la obtención de complejos M/C/O (metal/carbono/oxígeno) a partir de los reactivos precursores a utilizar. Esto se realiza en una parrilla de calentamiento con agitación continua con el mezclado de reactivos para posteriormente ser secados en un horno eléctrico, obteniendo los complejos en polvo que serán utilizados en la segunda etapa.

La segunda etapa se realiza a altas temperaturas (1200-1500°C) en el horno solar del IER-UNAM y consiste en colocar los complejos M/C/O obtenidos en la etapa anterior en un crisol, el cual es introducido en un reactor solar en atmósfera inerte de argón para el caso de los carburos (SiC y TaC) y en aire para el caso de los óxidos (ZrO_2 y HfO_2). El tiempo de síntesis es de 25-60 minutos de acuerdo con el nanomaterial cerámico a sintetizar. Los polvos obtenidos se analizan mediante diversas técnicas de caracterización tales como DRX para

confirmar las fases cristalinas de las cerámicas, SEM para conocer la morfología y tamaño de partícula y TGA/DSC para analizar la degradación de los complejos y resistencia a la oxidación. La figura 2 muestra el horno solar del IER-UNAM en operación como una alternativa en la síntesis de nanomateriales cerámicos.



Figura 2. Horno solar del IER-UNAM en operación como alternativa en la síntesis de nanomateriales cerámicos.

RESULTADOS

El horno solar del IER UNAM ha sido una alternativa para la síntesis de nanomateriales cerámicos ya que se han obtenido carburos y óxidos mediante el uso de energía solar concentrada a través de diferentes reactores solares diseñados para ello. A continuación, se detallarán los resultados obtenidos por diversas técnicas de caracterización para SiC, TaC, ZrO_2 y HfO_2 sintetizados en el horno solar por el método de reducción carbotérmica a partir de complejos precursores.

El SiC se sintetizó a partir del nanocompósito SiO_2/C obtenido a una temperatura 700°C, el cual fue usado como precursor para una segunda etapa y obtener el SiC a 1500°C en atmósfera de argón por una hora. Los resultados de caracterización mostraron un SiC con estructura cristalina cúbica (β-SiC) con mínima cantidad de fase hexagonal (α-SiC) y residuos de SiO_2, con resistencia a la oxidación mayor a la obtenida en horno eléctrico; las partículas de SiC fueron polidispersas con un tamaño del orden nanométrico [10].

El TaC fue obtenido a partir del complejo Ta/O/C a una temperatura de 1200°C por 30 min en atmósfera de argón. Resultados DRX mostraron un carburo de tantalio cristalino con estructura cúbica y residuos de Ta_2O_5, tamaño de cristalito promedio de 21 y 30 nm respectivamente donde las nanopartículas de TaC mostraron una morfología casi esférica [11].

Nanopartículas de ZrO_2 se sintetizaron a partir del complejo Zr/O/C a una temperatura de 1200°C por una hora en atmósfera de aire, obteniendo una zirconia con una única estructura cristalina: zirconia monoclínica (m-ZrO_2) cuya morfología fue esférica y rectangular con un tamaño de 100-200 nm de espesor y 0.3-2 μm de longitud, con una alta estabilidad térmica [12].

Por último, se sintetizó HfO_2 a una temperatura 1200°C por 30 minutos en atmósfera de aíre a partir del complejo Hf/O/C obtenido a una temperatura de 110°; los resultados mostraron dos fases cristalinas: principalmente hafnia monoclínica (m-HfO_2) y en menos proporción hafnia ortorrómbica (o-HfO_2) con una morfología esférica y un tamaño del orden nanométrico.

La tabla 1 resume los parámetros y principales resultados de los cuatro nanomateriales cerámicos obtenidos mediante el uso de horno solar como una alternativa de síntesis.

Tabla 1. Parámetros y principales resultados de nanomateriales sintetizados en horno solar.

NANOMATERIAL	PARÁMETROS			RESULTADOS	
	Temp. de síntesis	Atmósfera	Tiempo (horas)	Estructura cristalina	Morfología
SiC	1500°C	Argón	1	β-SiC	Porosa
TaC	1200°C	Argón	0.5	c-TaC	Esférica
ZrO_2	1200°C	Oxígeno	1	m-ZrO_2	Esférica, rectangular
HfO_2	1200°C	Oxígeno	0.5	m-HfO_2	Esférica

CONCLUSIONES

El horno solar del IER-UNAM ha demostrado ser una alternativa en la síntesis de nanomateriales ya que se han obtenido nanoestructuras de cerámicos tales como carburos y óxidos (SiC, TaC, ZrO_2 y HfO_2) obtenidos mediante el método de reducción carbotérmica y los cuales han sido analizados por diferentes técnicas de caracterización tales como: difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis termogravimétricos (TGA/DSC) para la confirmación de la obtención de nanoestructuras cristalinas con diversa morfología y tamaño del orden nanométrico. Los resultados obtenidos con el aprovechamiento de la energía solar concentrada mediante el

uso de hornos solares mostraron la factibilidad de la síntesis de cerámicos nanoestructurados con bajas emisiones de CO_2 con respecto a los métodos convencionales, lo cual presenta grandes ventajas, siendo las principales: el uso de energías limpias alcanza altas temperaturas en pocos segundos y cambios en la estructura cristalina de las cerámicas obtenidas, debido al rápido aumento de temperatura.

REFERENCIAS

[1] N. Baig, I. Kammakakam, W. Falath, and I. Kammakakam. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges, *Mater. Adv*., Vol. 2, No. 6, p. 1821–1871.
[2] G. Chen, J. Seo, C. Yang and P. N. Prasad (2013). Nanochemistry and nanomaterials for photovoltaics, *Chem. Soc. Rev*., Vol. 42, No. 21, p. 8304–8338.
[3] L.A. Kolahalam, I.V. Kasi Viswanath, B.S. Diwakar, B. Govindh, V. Reddy, and Y.L.N. Murthy. (2019). Review on nanomaterials: Synthesis and applications, *Mater. Today Proc*., Vol. 18, No. 8, p. 2182–2190.
[4] B. Mekuye and B. Abera. (2023). Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications, *Nano Sel*., Vol. 4, No. 8, p. 486–501.
[5] X. Su, Y. Jia, J. Wang, J. Xu, X. He, C. Fu and S. Liu. (2013). Preparation and microwave absorption properties of Fe-doped SiC powder obtained by combustion synthesis, *Ceram. Int*., Vol. 39, No. 4, p. 3651–3656.
[6] E. Sani, L. Mercatelli, F. Francini, J.-L. Sans and D. Sciti. (2011). Ultra-refractory ceramics for high-temperature solar absorbers, *Scr. Mater*., Vol. 65, No. 9, p. 775–778.
[7] D. Sciti, L. Silvestroni, L. Mercatelli, J.L. Sans and E. Sani (2013). Suitability of ultra-refractory diboride ceramics as absorbers for solar energy applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 109, p. 8–16.
[8] C.A Pérez-Rábago, R. Guzmán-Galán, N. Flores-Guzmán, E. Brito, D. Marroqui-García, R. Pérez-Enciso, D. Rivero-Rosas, C.A. Arancibia-Bulnes and C.A. Estrada-Gasca. (2011). Control system for the high-flux solar furnace of CIE-UNAM in Temixco, México. First stage. *Proceeding of the 17th SolarPACES Conference*, Granada, Spain, paper 40149.
[9] R. Bader, G. Levêque, S. Haussener and W. Lipinski. (2018). High-flux solar simulator technology, *Opt. InfoBase Conf. Pap*., No. 1.
[10] L.G. Ceballos-Mendivil, R.E. Cabanillas-López, J.C. Tánori-Córdova, R. Murrieta-Yescas, C.A. Pérez-Rábago, H.I. Villafán-Vidales, C.A. Arancibia-Bulnes and C.A. Estrada. (2015). Synthesis of silicon carbide using concentrated solar energy, *Sol. Energy*, Vol. 116, p. 238–246.
[11] Y. Carvajal-Campos, L. Ceballos-Mendivil, F. Baldenebro-López, C. Pérez-Rábago, and C. A. Estrada. (2019). Synthesis and characterization of tantalum carbide nanoparticles using concentrated solar energy, *Adv. Powder Technol*., Vol. 30, No. 11, p. 2574–2579.
[12] L. G. Ceballos-Mendivil, Y. Carvajal-Campos, J. Tánori-Córdova, J. C. Luque-Ceballos, H. Villafán-Vidales and C. A. Estrada. (2020). Solar synthesis of nanostructured zirconia: microstructural and thermal characterization, *Mater. Res. Express*, Vol. 7, No. 11, p. 115014.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

MEDICIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Ana C.Borbón Almada, Juan P. Ayala Moreno, Gema K. Ibarra Torúa, Nicolás Sau Soto, Mariarenee Ibarra Duarte
Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Luis Encinas y Rosales. CP 83000,
Hermosillo Sonora México, ana.borbon@unison.mx.

Cecilia M. Galindo Borbón
Departamento de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Luis Encinas y Rosales. CP 83000,
Hermosillo Sonora México;cecilia.galindo@unison.mx.

RESUMEN

Determinar las propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos, sigue siendo una asignatura pendiente en México, en el área de aplicación de materiales en los edificios con mejores propiedades de aislamiento y ligereza en sus pesos volumétricos. Es importante considerar estas propiedades en la evaluación de la respuesta energética de los edificios en aspectos de optimización en el uso y eficiencia de la energía eléctrica. Comúnmente se obtienen estas propiedades de listados en referencias bibliográficas que pueden tener poca cercanía con los valores reales que varían de acuerdo a la naturaleza y el origen de los materiales, dependiendo de cada región del país, sobre todo los que provienen de bancos de agregados y cementantes. En este trabajo se muestran algunas metodologías de medición y resultados de propiedades térmicas de materiales de construcción, cuyo objetivo es determinar la conductividad térmica, ya sea por métodos directos o indirectos de medición. En este trabajo se muestran cinco tipos de método de medición; el primero es con equipo adquirido especializado fijo, el segundo es con equipo adquirido portátil, el tercero es con equipo semiautomático de creación propia con registro de patente con muestra a escala real; el cuarto con equipo de creación propia tipo manual que acepta muestras a escala real y el quinto es con equipo de creación propia manual con muestras a mediana escala.

Se muestran los resultados de medición de la conductividad térmica de materiales de construcción tanto aislantes como no aislantes, haciendo comparaciones con valores obtenidos de referencias bibliográficas, de valores comerciales, así como los que aparecen en normativas mexicanas. Los resultados muestran poca variación para los materiales aislantes con fichas técnicas comerciales, mientras que, para los materiales a base de morteros, mezclas, y mamposterías se muestran variaciones de hasta el 30%.

Palabras claves: Materiales, construcción, conductividad térmica, métodos de medición, conductivímetros, aparatos.

ABSTRACT

Determining the thermal properties of materials and construction systems is still a pending subject in Mexico, in the area of application of materials in buildings with better insulation properties and lightness in their volumetric weights. It is important to consider these properties in the evaluation of the energy response of buildings in aspects of optimization in the use and efficiency of electrical energy. These properties are commonly obtained from lists in bibliographical references that may have little proximity to the real values that vary according to the nature and origin of the materials depending on each region of the country, especially those from aggregate and cement banks. This work shows some measurement methodologies and results of thermal properties of construction materials, whose objective is to determine thermal conductivity, either by direct or indirect measurement methods. This work addresses five types of measurement methods; the first is with specialized fixed purchased equipment, the second is with portable purchased equipment, the third is with self-created semi-automatic equipment with patent registration with a full-scale sample; the fourth with self-created manual equipment that accepts full-scale samples and the fifth is with self-created manual equipment with medium-scale samples.

The results of thermal conductivity measurements of both insulating and non-insulating construction materials are shown, making comparisons with values obtained from bibliographical references, commercial values, as well as those appearing in Mexican regulations. The results show little variation for insulating materials with commercial technical data sheets, while for materials based on mortars, mixtures, and masonry, variations of up to 30%.

Keywords: Materials, construction, thermal conductivity, measurement métodos, conductivity meter, divises.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades térmicas de los materiales de construcción juegan un papel importante en la determinación de la capacidad que tienen de detener los flujos de calor a través de las envolventes constructivas de las edificaciones, ya sea en situación de ganancia o pérdida de calor.

Existe una práctica generalizada de quienes diseñan o calculan parámetros térmicos en los edificios, sobre todo cuando se utilizan métodos de simulación para determinar las demandas energéticas, y es que se toman valores de manera directa de referencias consultadas para ese efecto, cuya información no es exacta y en ocasiones poco aproximada o alejada de las propiedades de materiales locales.

Lo anterior se basa en el precepto de que las propiedades térmicas de los materiales y específicamente la conductividad térmica es una propiedad de cada material en particular; tratar de generalizar estos valores por tipología de materiales o de componentes e incluso sistemas constructivos sin una metodología ordenada para lograr la representatividad de ese material, lleva a cometer imprecisiones y no darle el valor real que estos materiales tienen y en ocasiones los cálculos pueden verse afectados a favor o en contra.

Realizar mediciones de propiedades térmicas se antoja una actividad difícil, no por su naturaleza en sí, sino a causa de la escasez de laboratorios

equipados para dicho objetivo, distinguiendo entre estos los que se encuentran en universidades y/o centros de investigación y los laboratorios profesionales, que no abundan en México.

El objetivo del presente trabajo es mostrar 5 equipos de medición de conductividad térmica en materiales de construcción, entre ellos, los que son especializados y adquiridos en el mercado internacional, así como los de creación propia y presentar resultados de medición de conductividad térmica para compararlos con valores referenciados de otras fuentes.

Antecedentes

La conductividad térmica es una medida de la capacidad que tiene un material de conducir calor (Cengel, 2007); esta propiedad es específica de cada material y sus aplicaciones en la industria de la construcción se han generalizado en los últimos años, ante la necesidad de establecer las capacidades que tienen los sistemas de construcción de edificios de todo tipo, de oponerse al flujo de calor en diferentes condiciones de operación y relacionado con el desempeño térmico-energético de un edificio tanto de tipo residencial como no residencial.

En época de invierno el aislamiento térmico contribuye a disminuir pérdidas de calor en los edificios, y en verano disminuye las ganancias de calor a su interior. Esta situación suele aumentar de importancia cuando el clima es de tipo extremoso para ambos casos.

Existen varias formas de conocer los valores de conductividad térmica de los materiales; una es, consultar bibliografía diversa donde estas propiedades pueden informarse en forma de listado, a lo cual se puede dar crédito dependiendo de la fuente consultada. Otra fuente de información son los apéndices informativos que vienen en algunas normas como en la NOM-020-ENER-2011, relativa a limitar la ganancia de calor en edificios de uso residencial, la NOM-008-ENER 2001, con el mismo objetivo anterior solo que para edificios no residenciales y la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009 que establece los valores de resistencia térmica para sistemas constructivos opacos, diferenciando las zonas climáticas donde se encuentra cada estado de la República Mexicana. Sin duda, la información más exacta consiste en consultar la ficha técnica de cada material, que haya tenido un proceso de certificación, sin embargo y esto justifica la importancia del tema, en el sentido de que no todos los materiales cuentan con ficha técnica que informe de los valores de propiedades térmicas de los materiales. La otra manera de obtener estos valores es mucho menos común y consiste en medir en laboratorio etas propiedades. En la Universidad de Sonora, se ha desarrollado un espacio de trabajo de investigación, dentro del Laboratorio Experimental de Ingeniería Civil, denominado Laboratorio de Análisis Térmico de Materiales, cuya línea principal es la medición de propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos tanto homogéneos como no homogéneos.

Se han encontrado referencias de trabajos relacionados con la medición de propiedades térmicas de bloque como (Anderson, B.R., 1981). (A. Piña, et al 2007), quién diseñó y construyó un sistema experimental para la determinación de la resistencia térmica de bloque de concreto. Otros trabajos relacionados, tanto teóricos como experimentales, muestran algunos resultados referentes a este tipo de estudios (Borbón A. 2010 a), (Borbón A. (2010 b). También se presentan algunos estudios experimentales para medir propiedades térmicas en bloques huecos como (Ossama A. Et al, 1994), así como (Pérez M. T al 2002).

Materiales y métodos. Se describen los equipos de medición de propiedades térmicas para materiales de construcción existentes en este laboratorio. Dos de ellos son equipos adquiridos en el mercado internacional y otros tres son equipos de creación propia, diseñados y construidos en este laboratorio.

Se describen las partes de los equipos, así como su funcionamiento general, y las variables que mide cada uno de ellos. Se presentan también resultados de mediciones de conductividad térmica de un listado de materiales más comunes para construcción, así como otros materiales experimentales que han sido diseñados en el mismo lugar, finalmente se realiza una comparativa con los valores que se reportan en bibliografía consultada, normatividad y fichas técnicas.

Descripción y funcionamiento de los equipos y variables de medición.

A continuación, se describe para cada uno de los equipos el funcionamiento y las variables de medición, así como la obtención de resultados expresados en los valores de las variables medidas.

KD2-Pro- (Manual KD2-Pro, 2011). Es un equipo comercial tipo portátil que mide conductividad térmica, capacidad calorífica y difusividad; consta de sensores tipo aguja que se insertan en el material, estos sensores son diferentes de acuerdo al tipo de material que se desea medir, diferenciando entre materiales aislantes como los poliestirenos y no aislantes como el concreto; es un equipo muy práctico, obtiene el resultado en minutos y no tiene un tamaño de muestra definido. Conformidad de acuerdo a los estándares: EN55022- 1987 EN500082-1-1991.

Este equipo es apto para su uso en laboratorio, campo o en el lugar de la edificación. Su funcionamiento consiste en perforar el material que se va a medir utilizando cuatro tipos de sensores cuyas recomendaciones se presentan a continuación. El sensor TR-1 para concreto y roca, RK-1 para concreto y roca, KS-1 para materiales aislantes y SH-1 para concreto. El entorno de operación es de 0 a 50°C para el controlador y de -50 a 150 °C para los sensores. La precisión de los sensores varia de ± 5 a ±10%, dependiendo de los rangos de medición.

Se puede obtener la conductividad térmica, calor especifico, difusividad y resistencia térmica de cualquier material sólido que se pueda perforar con los sensores de aguja que se han descrito.

EP500e. (Manual Ep500c,) Es un equipo adquirido en el mercado internacional, utiliza el sistema de placa caliente de acuerdo a los estándares ISO 8302, EN-823 y EN 1946-2, el cual mide conductividad térmica, resistencia térmica y el coeficiente de transferencia de calor en materiales aislantes y no aislantes de construcción. Las dimensiones de la muestra de medición son de 15x15x4 cm para materiales no aislantes y de 50 x 50

cm para materiales aislantes las cuales colocan dentro de un gabinete para realizar la prueba.

Este equipo es altamente especializado, y permanece fijo en laboratorio. Su funcionamiento consiste en introducir la muestra en el gabinete de pruebas sujetado con sistema de elevación electroneumático automático a una presión determinada con modo de rastreo al contacto con la muestra. Mide conductividad térmica sometiendo a las muestras a una, dos, o tres diferenciales de temperatura a elegir. Opera con una temperatura ambiente de 25°C. La exactitud de las mediciones es de 0.7% a 1% con reproducibilidad de 0.2% a 0.5 %. Se puede obtener la conductividad térmica, las dimensiones y la densidad de la muestra de cualquier material que se adapte al tamaño de la muestra y que se encuentre en estado sólido, o suelto; siempre deberá estar seco.

TR-00. Es un equipo de creación propia, para medir propiedades térmicas de sistemas constructivos. Inspirado en la técnica de placa caliente ASTM-C-177; consta de un gabinete de pruebas para colocar un muro a escala real de 1.20 m de base por 2.00 m de altura; la muestra puede ser cualquier sistema constructivo homogéneo o no homogéneo. Este equipo mide las temperaturas de superficie de la muestra, y registra la energía suministrada por un calefactor, con lo que se puede calcular los flujos de calor, la conductividad y resistencia térmica dependiendo de la geometría de la muestra.

Este equipo consiste en un módulo de pruebas donde se coloca la muestra. Consta de dos unidades, una de enfriamiento y otra de calentamiento; la parte fría se logra mediante intercambiadores de calor, manteniendo la temperatura del agua fría con un recirculador tipo chiller. La parte caliente consiste al igual que el anterior, en un intercambiador de calor con flujo de agua caliente, logrado mediante un recirculador-calefactor. El gabinete se aísla completamente asegurando la mayor parte del flujo de calor en una sola dirección a través del muro. Es de operación Manual. Se pueden obtener las temperaturas de superficie del muro y la energía que fluye a través del muro con la información de los flujos de agua y sus propiedades. Con esta información se puede calcular los flujos de calor, la resistencia térmica y la conductividad térmica del sistema constructivo.

TR-01. Es un equipo semiautomático de creación propia con registro de patente 344800 en el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), diseñado para medir propiedades térmicas de sistemas constructivos. Consiste en un gabinete de pruebas donde se coloca una muestra de muro a escala real, 1.20 de base por 2.00 m de altura. Está inspirado en el funcionamiento del equipo TR-00 anterior y la diferencia entre ellos es que este es tipo semiautomático y el anterior es completamente manual, además de que los sistemas para suministro y retiro de calor son diferentes.

Consiste en un módulo de pruebas donde se coloca una muestra de un sistema constructivo tipo muro ya sea de tipo homogéneo o no homogéneo a escala real. Consta de dos unidades, una de enfriamiento y otra de calentamiento; la parte fría se controla mediante láminas de Template que funcionan como intercambiadores de calor, controlando la temperatura del agua con un chiller. La parte caliente consiste en suministrar calor mediante resistencias eléctricas flexibles, alimentadas por una fuente de poder. El gabinete se aísla completamente asegurando la mayor parte del flujo de calor en una sola dirección a través del muro. La diferencia de este equipo y el anterior es que la fuente de calor con resistencias eléctricas flexibles y es de funcionamiento semiautomático con un sistema de cierre y apertura de puertas del gabinete electroneumático para conseguir el mejor cierre posible y evitar pérdidas del sistema. Se puede obtener las temperaturas de superficie y la energía proporcionada por la fuente de calor, conociendo las dimensiones de la muestra, para calcular flujos de calor, resistencia térmica y conductividad de la muestra medida.

TR-02. Es un equipo de creación propia para medir propiedades térmicas de sistemas constructivos a mediana escala, que consiste en un gabinete de pruebas que contiene doble muestra de mediana escala, para muros de 60 x 60 cm. Es un equipo de operación manual basado también en el funcionamiento de placa caliente como los que ya se han descrito, la diferencia de este equipo es el tamaño de la muestra.

Consiste en un módulo de pruebas donde se colocan dos muestras de un sistema constructivo tipo muro ya sea de tipo homogéneo o no homogéneo. Consta de dos unidades, una de enfriamiento y otra de calentamiento; la parte fría se controla mediante láminas de Template que funcionan como intercambiadores de calor, controlando la temperatura del agua con un chiller. La parte caliente consiste en suministrar calor mediante resistencias eléctricas flexibles, alimentadas por una fuente de poder. El gabinete se aísla completamente asegurando la mayor parte del flujo de calor en una sola dirección a través de las muestras. La diferencia de este equipo y el anterior es que este equipo es para muros de mediana escala. Se puede obtener las temperaturas de superficie y la energía proporcionada por la fuente de calor, conociendo las dimensiones de las muestras, se pude calcular resistencia y conductividad térmica.

Para la medición se escogió una muestra al azar de cada uno de los materiales más comunes en la construcción, considerando mamposterías, algunos morteros y productos de madera, así como materiales aislantes; se muestran también algunos materiales experimentales como morteros aligerados y productos con paja.

Resultados. La tabla 1 muestra los resultados de valores de conductividad térmica de los materiales medidos.

Tabla 1.- Resultados de medición.

Material	**Equipo de medición**	**Conductividad térmica (W/m K)**	**Comparativa/Referencia**
Ladrillo común	KD2-Pro	0.33	0.72 (Cengel,2007) 0.87 NMX-C-460-ONNCCE-2009
Poliestireno extruido	KD2-Pro Ep500 TR-01 TR-02	0.026 0.025 0.025 0.026	0.025 Marca comercial- ficha técnica- Certificado
Tabicón de adobe	KD2-Pro	0.63	0.93 NOM-020-ENER-2011
Panel de triplay	TR-01 TR-02	0.134 0.130	0.115 NOM-020-ENER-2011
Mortero seco de yeso	KD2-Pro	0.32	0.37 NMX-C-460-ONNCCE-2009
Concreto celular baja densidad	EP500c	0.134	0.12 NOM-020-ENER-2011
Bloque de concreto hueco (parte sólida)	KD2-Pro	0.66	Se encontró una conductividad de 1.1, para el elemento completo. NMX-C-460-ONNCCE-2009
Tablaroca	Ep500	0.137	Sin referencia
Paja procesada	Ep500	0.040	Sin referencia
Mortero aligerado perlita mineral	KD2-Pro	0.13	Sin referencia

Mortero aligerado perlita sintética	KD2-Pro	0.14	Sin referencia
Mortero con polvos de reciclaje	KD2-Pro	0.32	Sin referencia
Mortero cemento arena	EP500 Kd2-Pro	0.63 0.63	0.63 NOM-020-ENER-2011

Discusión. Se observa en los resultados**,** para el caso de la mampostería de barro y concreto diferencias considerables en los valores de conductividad térmica. Este tipo de materiales muestran la gran variedad de resultados que puede existir entre ellos, los cuales no están estandarizados y mucho menos certificados en estas propiedades, y además tienen la particularidad de que se fabrican en obra, lo cual puede generar aún más variación. Estas diferencias se deben a varios factores como el origen de las materias primas que provienen de elementos naturales o transformados como la tierra, los agregados y los cementantes y su fabricación artesanal. Es de esperarse como lo muestran los resultados que los materiales aislantes industrializados guardan una similitud muy cercana en los valores obtenidos en relación a lo reportado en fichas técnicas y listados como anexos en las normas, considerando que están fabricados con procesos controlados y manejan rangos de valores. Los elementos a base de madera son consistentes también con los resultados, ya que la naturaleza del material tiene menos variaciones que los elementos de mampostería o las mezclas que son los materiales con más diferencias en su composición.

Los materiales que no tienen referencia son los que se han diseñado como materiales alternativos aligerados algunos con mezclas de perlitas minerales y sintéticas, así como mezclas de material bituminosos. Estos materiales a pesar de tener variaciones con muchas posibilidades de proporcionamiento y tipo de material para aligerar, suelen presentarse en algunos listados, cuyos valores son de una incertidumbre asombrosa.

A continuación, se presentan imágenes de los equipos descritos.



Fig. 1 Medidor KD2-Pro



Figura 2.- Medidor EP500c



Fig 3 TR-00-Medidor de propiedades térmicas manual



Fig. 4 TR-01Medidor de propiedades térmicas semiautomático



Fig. 5 TR-02- Medidor de propiedades térmicas mediana escala

Conclusiones. Creemos en la importancia de desarrollar este tipo de instrumentos de medición, tanto para aplicaciones prácticas como para ser utilizados en los centros de estudio como ejemplos didácticos y desarrollo de investigación para los estudiantes. Se sabe que el desarrollo de la tecnología en cuanto a la existencia de equipos altamente especializados está presente en otros países y se pueden adquirir estos instrumentos con altos costos, sin embargo, estos equipos casi siempre son diseñados para medir materiales simples, de tipo homogéneo y de tamaños de muestras pequeñas como los equipos comerciales que se mostraron aquí. Los equipos de creación propia, como se puede observar, tienen la intención de considerar tamaños de muestra a mayor escala, que puedan aceptar especímenes de tipo no homogéneos, como por ejemplo los que contiene elementos huecos o materiales diversos en sus diferentes capas, geometrías y configuraciones complejas.

Los resultados obtenidos muestran poca consistencia con los valores reportados de materiales de mamposterías y mezclas, mieras que los que son a base de madera y aislantes suelen tener más similitud a lo reportado ya que se considera no tienen variación en sus características.

Se concluye que los materiales que requieren as atención para determinar valores más estandarizados son las mezclas y las mamposterías hechos de materiales con variaciones en su composición que modifican tanto los valores de conductividad térmica como la densidad.

Referencias bibliográficas.

Anderson, B.R., On the Calculation of the U –value of Walls Containing Slotted Bricks of Blocks, Building and Environment: 16 (1), 41-50 (1981).

Armando Piña Ortiz, 2007. Diseño y construcción de un sistema experimental para la determinación de la resistencia térmica de bloque de concreto. Universidad de Sonora, División de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia.

ASTM C177 -Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-

Hot-Plate Apparatus.2000.

Borbón A. Ana, Cabanillas L. Rafael, Pérez V. Jesús, (2010). Determinación experimental y contraste numérico de la resistencia térmica de un muro de bloques de concreto hueco, Información Tecnológica, 3 Vol. 21 (2010).

Borbón A. Ana, Cabanillas L. Rafael, Pérez V. Jesús, Modelación y Simulación de la Transferencia de Calor en Muros de Bloque de Concreto Hueco, Información Tecnológica, 6 Vol. 21 (2010).

Cengel, Y. A. (2016). "Transferencia de calor y masa" McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. 3ra. Edición. México.

EN1946-2, Thermal performance of building products and building componentes - Specific criteria for the assessment of laboratories measuring heat transfer properties - Part 2: Measurements by guarded hot plate method.2004.

EN12664, Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products with medium and low thermal resistance; English version of DIN EN 12664.

EN 12939, Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Thick products of high and medium thermal resistance;

ISO 8302: 1991. Thermal insulation- Determination of steady-state thermal resistance and related properties Guarded hot plate apparatus.

Ossama A. Abdou, Kris

Lambda-Messtechnik GmbH Dresden EP-500e, 2013, Manual.

KD2-Pro, Manual 2011.

NMX-C-460-ONNCCE, Norma mexicana, Industria de la Construcción. Aislamiento Térmico-Valor R para la envolvente de Vivienda por Zona Térmica para la República Mexicana.2009

NOM-008 - ENER-2000, Norma Oficial Mexicana, Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios no residenciales, 25 de abril, Segunda Edición, México (2001).

NOM-020-ENER-2009, Norma Oficial Mexicana, Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios para Uso Habitacional, México (2011).

Pérez M., Centeno R., Lascano F., (2002). Desarrollo de un prototipo para la caracterización térmica de los materiales de construcción regionales. Ingeniería 6-2 (2002) 13-22.

S. Murali., The Efect of Air Cells and Mortar Joints on the Thermal Resistance of Concrete Masonry Walls, Energy and Buildings: 21,111-119 (1994).

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE PARA PARRILLA DE USO DOMÉSTICO EN LA LOCALIDAD DE LAS CUEVAS, LERDO, DURANGO

Cinthia A. Juárez Ortiz, Fernando Meraz Becerra, Gabriel A. Flores Ávila y José M. Enríquez Aguirre
Departamento de Energías Renovables, Universidad Tecnológica de La Laguna Durango,
Carretera Federal Torreón - Ciudad Juárez, Ejido Las Cuevas, Durango, C.P. 35185, México,
8712140782, andrea.juarez@utlaguna.edu.mx

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo la construcción e implementación de un biodigestor para áreas rurales del estado de Durango, México, específicamente en la comunidad de Las Cuevas del municipio de Lerdo. Se eligió esta localidad debido a que presenta las necesidades y carencias comunes de cualquier zona rural, así como el fácil acceso a la materia prima necesaria para alimentar al biodigestor; además, la zona geográfica aporta una temperatura que maximiza la producción del biogás.

El prototipo está diseñado para proveer combustible a una cocina típica de una vivienda común, considerando que el uso de una parrilla para cocinar tres comidas al día para una familia de cuatro integrantes exige un total de 1.2 m^3 de biogás diariamente. El biodigestor consta de un contenedor hermético de 1.96 m de largo, 1.5 m de ancho y 1.83 m de alto, lo que proporciona un volumen de 5.3802 m^3, y un volumen de trabajo de 2.9591 m^3. El prototipo cuenta con sistemas de alimentación de agua, de recirculación, de purificación, de monitoreo y aprovechamiento de biogás.

El sistema de digestión anaerobia será alimentado con excremento de ganado vacuno, ya que es un recurso accesible en ese contexto. Se utilizó una mezcla estiércol: agua (1:3), lo que se puede interpretar como 443.84 kg de estiércol y 1,972.7 L de agua; por un tiempo de retención hidráulica de 18 días, con una temperatura promedio de 24ºC. En las pruebas llevadas a cabo, en las que se cocinaron diversas comidas a lo largo de una semana, obteniendo una producción suficiente para satisfacer la demanda especificada.

ABSTRACT

The objective of this project is the construction and implementation of a biodigester for rural areas of the state of Durango, Mexico, specifically in the community of Las Cuevas in the municipality of Lerdo. This location was chosen because it presents the common needs and shortcomings of any rural area, as well as easy access to the raw material necessary to feed the biodigester; Furthermore, the geographical zone provides a temperature that maximizes biogas production.

The prototype is designed to provide fuel for a typical kitchen in a common home, considering that the use of a grill to cook three meals a day for a family of four requires a total of 1.2 m3 of biogas daily. The biodigester consists of an airtight container with 1.96 m length, 1.5 m wide and 1.83 m height, which provides a volume of 5.3802 m^3, and a working volume of 2.9591 m^3. The prototype has different systems for water supply, recirculation, purification, monitoring and biogas use.

The anaerobic digestion system will be fed with cattle excrement, since it is an accessible resource in that context. A manure: water mixture (1:3) was used, which can be interpreted as 443.84 kg of manure and 1,972.7 L of water; for an hydraulic retention time of 18 days, with an average temperature of 24ºC. Different meals were cooked for a week in the tests carried out, where sufficient production for the specified demand was obtained.

Palabras clave
Entorno rural, estiércol vacuno, energía, biodigestor, biogás, biomasa

INTRODUCCIÓN

La situación actual respecto a la contaminación nos ha llevado a buscar alternativas para realizar las actividades que ya llevábamos a cabo, pero de manera que se utilicen menos recursos para minimizar la cantidad de contaminantes ambientales. Esto ha impulsado el uso de energías renovables: solar, hidráulica, de biomasa, entre otras, ya que estas energías tienen diversos beneficios ambientales, económicos y sociales. Sin embargo, es crucial destacar que el impacto de las energías renovables radica en su capacidad para mitigar el calentamiento global. El calentamiento global, exacerbado por las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de combustibles fósiles, es una amenaza crítica, las energías renovables son fundamentales en la lucha contra este problema, ya que reducen significativamente las emisiones de gases nocivos. Hablando de estas energías renivables, la biomasa es uno de los recursos que se genera en México debido a la cantidad de zonas rurales que hay en el país, por lo que se puede aprovechar de manera significativa por medio de la biodigestión.

La biodigestión es un proceso anaeróbico, por lo que se debe llevar a cabo en un sistema hermético (conocido como biodigestor), donde un consorcio de bacterias degrada la materia orgánica. El proceso se desarrolla en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, donde el agua es responsable del crecimiento de la población microbiana y también funciona como un agente de taponamiento para todo el sustrato y los reactivos (Kothari et al., 2014).

El producto principal, el biogás, es una mezcla de metano (60-70 %), dióxido de carbono (40-30 %), y otros gases como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco, nitrógeno, hidrógeno y compuestos orgánicos (Magaña et al., 2011). Además de biogás, la digestión anaeróbica genera un digestato -un producto que puede ser utilizado como fertilizante agrícola porque los nutrientes presentes en el material de entrada quedan en él y son accesibles para los cultivos después del proceso de digestión(Kuusik et al., 2015). Este material de entrada es conocido

como biomasa que abarca toda materia orgánica que deriva de plantas, animales y/o microorganismos que pueda ser utilizada como fuente de energía o materia prima; considerando esto, cabe resaltar que existen diferentes tipos de biomasa, la elegida para este proyecto es residual agrícola.

La producción de gas metano por el ganado vacuno, están estimadas en 58 millones de toneladas/año; estos son los responsables de aproximadamente el 15% de la producción de metano global (Gutiérrez & Rojas, 2016). Por lo que aprovechar el gas metano disponible proveniente de excretas del ganado vacuno es una opción viable.

De acuerdo con los objetivos planteados en la Agenda para el Desarrollo Sostenible, firmada por México en 2015, el acceso a la energía es uno de los principales factores para alcanzar el desarrollo (Mejía et al., 2023). El acceso a la energía además de ser sustancial para cubrir necesidades básicas también es la forma de contribuir al desarrollo social y económico; pero el 1.3% de las viviendas aún no cuentan con el acceso a la energía eléctrica y la mayoría se encuentran en zonas rurales (INEGI, 2015).

En las comunidades rurales el acceso a las fuentes de energías tradicionales es difícil y puede llegar a tener altos costos que los habitantes no siempre pueden permitirse; las alternativas que se han utilizado hasta el momento para solventar sus necesidades, como el uso de leña, llegan a ser perjudiciales para el medio ambiente e incluso para su salud. En la localidad de Las Cuevas, municipio perteneciente a la ciudad de Lerdo, Durango, se ha observado esta práctica para poder realizar actividades cotidianas como lo es la preparación de alimentos y la regulación de temperatura, por lo que es necesaria la aplicación de una opción más sostenible para proveer de energía. Por estos motivos es que en esta zona se podría llevar a cabo la instalación de un biodigestor dado que, aunado a los beneficios ya mencionados, se tiene fácil acceso a los insumos necesarios, para comprobar lo dicho en párrafos anteriores se decide instalar un prototipo de biodigestor.

Considerando lo mencionado y que resulta muy práctico implementar biodigestores para generar biogás, esto debido a su sencillo manejo, su relativa facilidad de instalación y, al menos en el área rural, la accesibilidad a los insumos necesarios para su alimentación se opta por crear un prototipo de generación de biogás. Este proyecto tiene como objetivo construir e implementar un prototipo de biodigestor por lotes específicamente adaptado a condiciones y necesidades de una comunidad rural, para producir biogás como combustible para una parrilla de uso doméstico en la localidad de Las Cuevas, Lerdo, Durango. Así que en este artículo se presenta el diseño y construcción de un biodigestor por lotes alimentado con excreta vacuna, donde el biogás resultante es el insumo para una parrilla de uso doméstico.

DESARROLLO

El biodigestor se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Tecnológica de la Laguna (25.5008835” N - 103.5520297” W), es de tipo flexible y la membrana, junto con el filtro para purificar el biogás, fueron donados por la Alianza del Pacífico por lo que las dimensiones de la membrana ya estaban determinadas previamente. Dentro del mes de abril se realizó la alimentación del biodigestor, se utilizó la biomasa residual de excreta de ganado vacuno proveniente del establo “El Potrero” en Las Cuevas (25.5051909" N -103.5367060" W).

Aunado a esto, se utilizará una entrada de material compuesta por una mezcla de estiércol: agua (1:3) debido a la densidad mostrada por el estiércol obtenido en la región (la cuál fue de 0.45 g/cm3), además de que se buscó utilizar una cantidad moderada de agua pues, al ser una zona desértica, el acceso a esta es limitado.

Una vez determinado esto, se calcula la cantidad de estiércol necesaria según la proporción, por lo que se obtiene un resultado de 986.3 L de estiércol, equivalente a 443.84 kg, y 1972.7 L de agua.

Metodología del diseño del biodigestor

De manera que se pueda definir la estructura final del biodigestor se tomaron en cuenta las dimensiones necesarias para albergar la membrana cuyas medidas son 1.83 m de largo, 1,5 m de ancho y 1.96 m de alto, lo que proporciona un volumen total de 5.3802 m³, la membrana es de polietileno de alta densidad (PDA) y tiene un grosor de 1.2 mm, este material y grosor proporciona resistencia a los rayos ultravioleta y al ataque químico que se presenta cuando se producen ácidos. Dado que la forma del biodigestor es un prisma rectangular, el cálculo de su volumen se da por la fórmula:

$$\text{Volumen} = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Alto}$$

Lo que genera un resultado para el volumen total del biodigestor de 5.3802 m3. De este volumen, un 55% se asignará al volumen de carga/trabajo, lo que corresponde a 2.9591 m3. Tal volumen se determinó, siguiendo las recomendaciones de la FAO (FAO, 2019), para tener una buena cantidad de materia prima y a la vez asegurar una cantidad suficiente de biogás producido.

Estructura del biodigestor

La estructura principal del biodigestor fue construida utilizando Perfil Tubular Rectangular (PTR) fabricado con acero A36, con un ancho de 1.25 pulgadas y un grosor de 0.12 pulgadas. Esta estructura fue reforzada en todos sus lados mediante soleras del mismo material, también con un ancho de 1.25 pulgadas y un grosor de 0.12 pulgadas. Las dimensiones finales de la estructura construida fueron de 202 cm de largo, 156 cm de ancho, y una altura que variaba entre 183 cm en el punto más alto y 145 cm en los puntos más bajos. La diferencia en la altura se debió a la construcción de un techo en forma de cúpula, diseñado para contener la membrana al estar completamente inflada y reducir los esfuerzos en las esquinas de 90°.



Figura 01. Estructura construida y pintada con esmalte de metal anticorrosivo.

En la Figura 01 se muestra la entrada de alimentación manual, la cual se fija a la membrana de PDA mediante un sistema de bridas y empaques. Para asegurar un sello hermético, se diseñó una tapa de acero complementada con un empaque de caucho de 5 mm. En la Figura 02 se presenta el bus hidráulico, construido principalmente con tubería de PVC de 2 pulgadas y cédula 40. Este sistema se utiliza para la alimentación de agua, la recirculación de biomasa y la llave de desfogue. En el futuro, esta llave servirá para la conexión de un sistema de distribución automático del digestato, que se empleará como abono orgánico en jardines, huertas y terrenos de cultivo.



Figura 02. Vista lateral del biodigestor terminado.

Alimentación de agua

Para garantizar un suministro continuo de agua al prototipo, se instaló una pequeña cisterna a nivel del suelo, utilizando un tinaco de 450 litros. Este tinaco fue conectado directamente a una noria ubicada aproximadamente a 3000 metros de la universidad, lo que proporciona una presión de agua suficiente para llenar el tanque. No obstante, dado que la noria no es propiedad de la universidad y suministra grandes volúmenes de agua a establos cercanos, se implementó un sistema de llenado de respaldo. Este sistema está compuesto por una hidro bomba periférica de 1/3 Hp, que extrae agua de la cisterna subterránea de la universidad (Figura 03).



Figura 03. Cisterna para uso exclusivo del biodigestor.

Dado que la toma de alimentación de agua del biodigestor se encuentra a una altura de 1.5 metros, fue necesario instalar una segunda bomba periférica de 1/3 HP para asegurar el transporte del agua desde la cisterna hasta el biodigestor (Figura 04). Cabe destacar que en todo el sistema de suministro de agua se empleó tubería de PVC cédula 40 con un diámetro de 1 pulgada.



Figura 04. Bomba periférica para transporte de agua.

Recirculación

Para garantizar una mezcla homogénea entre el agua y la excreta, se instaló un sistema de recirculación en el biodigestor. Este sistema extrae el contenido desde la parte inferior de la membrana y lo reintroduce a través de una entrada alterna a la de alimentación manual. Todo el proceso es impulsado por una bomba periférica de 0.5 HP (Figura 5). El sistema está compuesto por tubería de PVC cédula 40, junto con diversas reducciones y adaptaciones que permiten la interconexión entre las terminales de salida y entrada. Estas terminales fueron fabricadas en acero inoxidable de 0.12 pulgadas de grosor y son de origen chino. Aunque fueron adquiridas en México, sus diámetros no coinciden con medidas comerciales estándar.



Figura 05. Sistema de recirculación.



Figura 06. Purificación y monitoreo del biogás.



Figura 07. Aprovechamiento del biogás.

RESULTADOS

En el presente estudio, se utilizó un biodigestor con medidas de 1.83 m de alto, 1.5 m de ancho y 1.96 de largo, lo que da un volumen total de 5.3802 m3, el volumen de biogás producido fue de 2.49 m3, equivalente al 45% del biodigestor, mientras que el volumen de trabajo fue de 2.9591 m3, lo que equivale al 55% del volumen total. La preparación de la mezcla que se usa dentro del volumen de trabajo fue de estiércol: agua en relación 1:3 y se emplearon 986.3 litros de estiércol equivalente a 443.84 kg, y de agua fueron 1972.7 litros.

A los 18 días de haber sido alimentado el biodigestor se apreció completamente llena la membrana, por lo que los 18 días, son el tiempo de retención hidráulica (TRH). Se puede considerar que este tiempo es corto comparado los resultados de Barrena (2014), que el TRH promedio es de 32 días, sin embargo, existen 3 distintos procesos variables entre sí: psicrofílicos con rangos de 50 a 120 días de TRH, mesofílicos con rangos de 25 a 50 días de TRH y termofílicos con rangos de 15 a 25 días de TRH (FAO, 2019), lo que nos muestra que el biodigestor tiene un proceso termofílico. Por las condiciones climáticas de la zona se obtuvieron temperaturas elevadas, durante los 18 días del TRH se tuvo un promedio de 24ºC, sin embargo, se presentaron picos de temperatura de hasta 32ºC, lo que fungió para acelerar el proceso de producción del biogás. No obstante, si bien el promedio calculado fue de 24°C, hay que considerar que en la región se alcanzaron temperaturas de hasta 32°C en ese período, por lo que el cálculo del TRH se ajusta a 15 días.

El biodigestor, con un volumen total de 5.38 m3 produjo biogás en 2.49 m3 lo que representa el 45% del volumen total, este resultado indica una producción de biogás eficiente, además de ser suficiente para satisfacer la demanda, según lo dicho por Barrena (2019), sugiriendo que el biodigestor está bien dimensionado, respecto a su alimentación, para maximizar la conversión de la biomasa en biogás. Con la carga en proporción de 1:3 se sienta un precedente de que se puede utilizar menor cantidad de agua sin perjudicar la producción de biogás bajo ciertas condiciones, por lo que sería importante a futuro realizar más estudios donde se utilice una menor cantidad de agua sin afectar la efectividad del proceso. Todos los resultados se presentan en la Tabla 01 para su mejor apreciación.

Tabla 01. Resultados.

Resultados	
Volumen Total	5.3802 m3
Volumen de biogás producido	2.4900 m3
Volumen de Trabajo	2.9591 m3
Cantidad de estiércol utilizado	986.30 L
Cantidad de agua utilizada	1972.7 L
TRH	18 días
TRH ajustado	15 días

CONCLUSIÓN

Para dimensionar la importancia de los resultados de este proyecto, se decidió realizar una comparación con un trabajo de índole similar, realizado previamente por Barrena (2014). Tal relación se refleja en la siguiente tabla:

Tabla 02. Comparativa entre el proyecto actual y otro proyecto similar.

Comparación	**UTLD**	**Barrena**
TRH	18 días	32 días
Volumen de trabajo	2.9591 m3	6.37 m3
Volumen total	5.3802 m3	8.49 m3
Proporción	1:3	1:5
Biogás producido	2.49 m3	2.53 m3
Producción / TRH	0.1383	0.0791

Cabe mencionar, a manera de comparación, que se tuvo una producción significativamente igual a la del proyecto similar. Sin embargo, es notorio que tal resultado se llevó a cabo con un volumen total (y de trabajo) menor, a la vez que se da con un TRH menor, lo cuál habla de la mayor eficiencia que tuvo el trabajo aquí documentado.

Con ayuda de este proyecto se espera contribuir al conocimiento sobre el empleo de biodigestores como fuente de energía en zonas rurales, también se espera facilitar un modelo replicable para comunidades que presenten desafíos semejantes. Este prototipo será el comienzo de futuros proyectos de mejora del mismo biodigestor que se espera ya no sea por lotes sino un biodigestor continuo, esto ya que el uso de biogás sería diario para las familias de estas comunidades.

REFERENCIAS

Barrena M, Cubas F, Gosgot W, Ordinola C & Rascón J. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. Arnaldoa.

Bernal, L. E., & Suárez, L. S. (2018). Diseño conceptual de un biodigestor partiendo de estiércol vacuno produciendo en la finca el guarumal, para la obtención de biogás.

FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires. 104 pp.

Gutiérrez-Arce, F., & Rojas-Vásquez, Z. (2016). Gas metano en la producción ganadera y su contribución al calentamiento global methane gas in animal production and their contribution to global warming. En ECO SCIENTIA (Vol. 2, Número 2). Recuperado de www.planccperu.org

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). Datos: hogares y vivienda. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/temas/vivienda/
International Renewable Energy Agency. (2023). World Energy Transitions Outlook2023. Recuperado de https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Global Renewables Outlook 2023*. Recuperado de https://www.irena.org/publications/2023/Apr/Global-Renewables-Outlook-2023.

Kothari, R.; Pandey, A. K.; Kumar, S.; Tyagi, V. V.; Tyagi, S. K. 2014. Different aspectsof dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39: 174-195.

Kuusik, A.; Pachel, K.; Kuusik, A.; Loigu, E. 2015. Possible agricultural use of digestate. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 64: 64-74.

Magaña-Ramírez, J. L., Rubio-Núñez, R., Jiménez-Islas, H. y Martínez-García, M. T. (2011). Tratamiento anaerobio de desechos lácticos y estiércol de cabra. Ingeniería e investigación, 31(1), 93-98. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64321170011

Mejía P, Román E, Juantorena A, García A. (2023). Contribución de las energías renovables en el desarrollo rural de México. Acta Agrícola y Pecuaria.

Montufar, O. (2014). Acciones de la SAGARPA con energía renovable en el campo mexicano. Programa Productividad agroalimentaria. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/47854/Guia_de_programas_de_fomento.pd
Wu, B. 2010. CFD simulation of gas and non-Newtonian fluid two-phase flow in anaerobic digesters. Water Research, 44(13), 3861-3874.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

IMPRESIÓN 3D DE RECEPTOR VOLUMETRICO TIPO HONEYCOMB EN CARBURO DE SILICIO

Carmen D. Zavala Moreno y Ricardo A. Pérez Enciso
Facultad de Ingeniería, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N,Col. Centro, Hermosillo, Sonora, 83000, México, 662 259 2100, **a215201214@unison.mx**

Carlos A. Pérez Rábago
Instituto de Energías Renovables, Universidad Autónoma de México, Xochicalco s/n, Azteca, Temixco, Morelos, 62588, México, 7773620090, **capr@ier.unam.mx**

Edgar A. Torres Barahona
Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Avenida Central del Norte 39-115, Tunja, Boyacá, 150003, Colombia, +576087405626, **edgar.torres@uptc.edu.com.**

RESUMEN

Los receptores volumétricos (RV) son dispositivos clave en sistemas de energía solar térmica, diseñados para convertir la radiación solar concentrada en energía térmica. Ubicados en la zona focal de la radiación solar concentrada (RSC), estos receptores permiten que la energía solar penetre y se absorba a lo largo de un volumen de material, lo que mejora la eficiencia de conversión. Utilizan materiales cerámicos resistentes a altas temperaturas y oxidación, como la alúmina (Al_2O_3), la sílice (SiO_2) y el carburo de silicio (SiC). Este calor generado puede transferirse a un fluido de trabajo y utilizarse para generar electricidad o en procesos industriales que requieran calor.

La importancia de los receptores solares volumétricos radica en varios aspectos clave: mayor eficiencia en la conversión de energía, mejor transferencia de calor, versatilidad en el diseño, y optimización de recursos junto con reducción de costos. Este último punto justifica el presente proyecto: diseñar un receptor volumétrico tipo honeycomb. El diseño de un receptor volumétrico permite explorar el uso de diversos materiales, como la estructura resistente de Al_2O_3, combinada con SiC en puntos estratégicos para mejorar la conversión energética. Esta combinación no solo maximiza la eficiencia térmica, sino que también ofrece flexibilidad en la implementación y operación del sistema.

Este trabajo tiene como fin el diseño de un RV tipo honeycomb, iniciando con un análisis de potencia para dos receptores volumétricos con canales cuadrados de 2.5 x 2.5 mm y 4.5 x 4.5 mm, y una dimensión total de 5 x 5 x 5 cm.

De los resultados obtenidos se propone fabricar un RV de alúmina con una mayor concentración de SiC en los primeros 2 cm y utilizando canales de 2.5 mm, ya que estos han demostrado una captación térmica total, optimizando así el uso de material y reduciendo la complejidad del diseño sin comprometer el rendimiento. La impresión 3D se realizó en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

ABSTRACT

Volumetric receivers (VR) are key devices in thermal solar energy systems, designed to convert concentrated solar radiation into thermal energy. Located at the focal zone of concentrated solar radiation (CSR), these receivers allow solar energy to penetrate and be absorbed throughout a volume of material, enhancing conversion efficiency. They use ceramic materials resistant to high temperatures and oxidation, such as alumina (Al_2O_3), silica (SiO_2), and silicon carbide (SiC). The heat generated can be transferred to a working fluid and used to generate electricity or for industrial processes that require heat.

The importance of volumetric solar receivers lies in several key aspects: higher energy conversion efficiency, better heat transfer, versatility in design, and resource optimization along with cost reduction. This last point justifies the present project: to design a honeycomb-type volumetric receiver. The design of a volumetric receiver allows for the exploration of various materials, such as the strong structure of Al_2O_3, combined with SiC at strategic points to improve energy conversion. This combination not only maximizes thermal efficiency but also offers flexibility in the implementation and operation of the system.

The aim of this work is to design a honeycomb-type VR, starting with a power analysis for two volumetric receivers with square channels of 2.5 x 2.5 mm and 4.5 x 4.5 mm, and a total dimension of 5 x 5 x 5 cm.

Based on the results obtained, it is proposed to manufacture an alumina RV with a higher concentration of SiC in the first 2 cm and using 2.5 mm channels, since these have demonstrated almost total thermal capture, thus optimized the use of material and reduced the complexity of the design without compromising performance. The 3D printing was carried out at the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Palabras claves: Receptor Volumétrico, Honeycomb, Impresión 3D, Trazado de rayos.

INTRODUCCION

Los concentradores solares son dispositivos diseñados para captar y enfocar la energía del sol en una pequeña área, aumentando la densidad de la radiación solar para aplicaciones como la generación de electricidad y calor. Utilizan espejos o lentes para concentrar la luz

solar y son una tecnología clave en sistemas de energía solar térmica y fotovoltaica concentrada (CPV). Los concentradores solares permiten aprovechar mejor la energía solar, mejorando la eficiencia de los sistemas solares y reduciendo los costos asociados a la generación de energía (Goswami, Kreith, & Kreider, 2023).

Algunos concentradores solares son:

- Concentradores Cilíndrico-Parabólicos

Estos concentradores utilizan espejos en forma de parábola que enfocan la luz solar en un tubo receptor ubicado a lo largo del foco de la parábola. El fluido dentro del tubo se calienta y puede ser utilizado para generar vapor y accionar una turbina para producir electricidad. Tienen alta eficiencia, pero requieren un seguimiento solar y son menos eficientes en días nublados por la poca radiación solar directa (Lovegrove & Stein, 2020).

- Concentradores de Fresnel Lineal

Utilizan una serie de espejos planos o ligeramente curvados que concentran la luz solar en un tubo receptor elevado. Estos sistemas son más simples y menos costosos que los concentradores parabólicos cilíndricos. Requieren menos seguimiento por ello tienen menor eficiencia en la concentración y captura de energía solar (Chirchir, Rono, & Ogari, 2022).

- Concentradores de Torre Solar (Heliostatos)

En este tipo de sistema, una serie de espejos, conocidos como heliostatos, se orientan hacia un receptor central ubicado en la parte superior de una torre. La luz solar se concentra en el receptor, donde se calienta un fluido que se utiliza para generar electricidad. Tiene alta eficiencia en la captación y conversión de energía solar, una capacidad de almacenamiento térmico eficiente, pero requieren mucho más espacio para su instalación (Goswami, Kreith, & Kreider, 2023).

- Concentradores de Lente de Fresnel

Utilizan lentes en lugar de espejos para concentrar la luz solar. La lente de Fresnel está formada por una serie de anillos concéntricos que permiten una alta concentración de la luz solar con menos material y peso que una lente convencional (Lovegrove & Stein, 2020).

Dentro los concentradores solares se necesitan de una tecnología llamada receptores solares, los cuales permiten captar y transformar la energía solar. Los receptores solares volumétricos son componentes críticos en las tecnologías de energía solar de concentración (CSP) que están diseñados para absorber y convertir la radiación solar en energía térmica de manera eficiente. A diferencia de los receptores superficiales, los receptores volumétricos permiten la absorción de la radiación solar a lo largo de un volumen en lugar de solo en la superficie, lo que mejora significativamente la eficiencia y capacidad de almacenamiento de calor. Los receptores volumétricos pueden alcanzar temperaturas más altas con menores pérdidas de energía debido a su diseño, lo que los hace altamente eficientes. Al permitir que la radiación solar penetre en un material absorbente en lugar de ser capturada en una superficie, se reduce la pérdida de calor por radiación y convección (Avila, 2011; Barreto, Canhoto & Collares, 2020).

Estos receptores suelen estar hechos de materiales cerámicos, metálicos o combinación cermet que son capaces de soportar altas temperaturas. Los materiales cerámicos, en particular, son populares debido a su alta resistencia térmica y capacidad para retener el calor. Los receptores solares volumétricos son particularmente útiles en plantas de energía solar de torre central, donde los helióstatos concentran la luz solar en un receptor colocado en la parte superior de una torre (Ceballos, 2015).

A pesar de sus ventajas, los receptores volumétricos enfrentan desafíos, como el desarrollo de materiales que puedan soportar ciclos térmicos extremos y la optimización del diseño para maximizar la absorción y minimizar las pérdidas de calor. La investigación continúa para mejorar la durabilidad y eficiencia de estos receptores.

Metodología

Se desarrollaron dos diseños de receptores volumétricos tipo “honeycomb” en el software SolidWorks (Figura *1*), con canales cuadrados de 2.5x2.5 mm y 4.5x4.5 mm, y dimensiones totales de 5x5x5 cm.

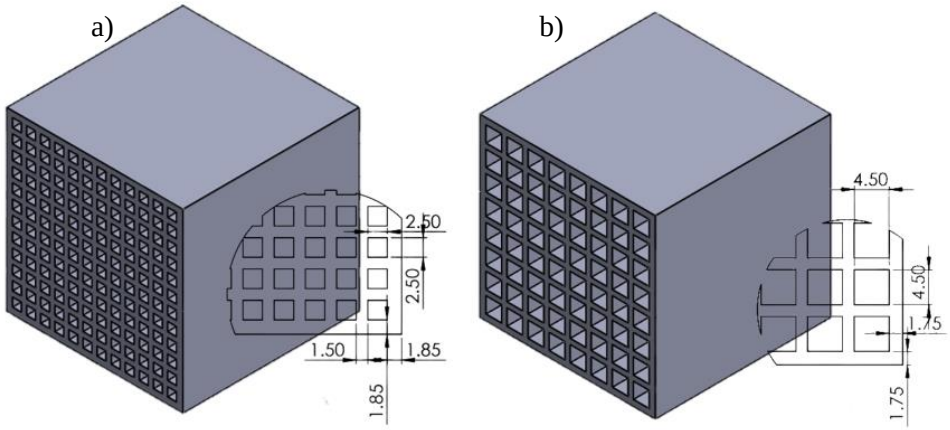


Figura 1. Diseño de RV tipo honeycomb para a) 2.5x2.5mm y b) 4.5x4.5mm

Para analizar el comportamiento de los receptores, se utilizó el software de código abierto Tonatiuh v2.2.4, especializado en la simulación óptico-energética de sistemas solares de concentración. Tonatiuh, emplea trazado de rayos junto con el método Monte Carlo, fue desarrollado por el departamento de Energía Solar Térmica del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) en colaboración con la Universidad de Texas en Brownsville.

En la simulación, se modeló parcialmente el volumen de los canales, asumiendo una distribución radial uniforme de la radiación solar concentrada, como se muestra en la *Figura 2* donde los canales sombreados son los simulados en el programa. Esta aproximación permitió calcular la potencia recibida en las paredes internas de los canales.

Los parámetros de simulación incluyeron: Cantidad de rayos: 1 x 10^7 rayos; Irradiancia directa normal (DNI): 1000 W/m²; Forma de sol: Estándar; Relación circunsolar: 0.02; y un Concentrador Parabólico de 1.65x1.65m con zona focal a 1.5m. Estos valores fueron elegidos para reflejar condiciones operativas típicas de sistemas solares de concentración (*Figura 3*).

Para evaluar la distribución de potencia en el receptor volumétrico (RV), se llevó a cabo un balance de potencia utilizando el software Tonatiuh. Se emplearon las mismas propiedades físicas y de materiales del sistema para garantizar la consistencia en los resultados. En esta simulación, se modeló una placa a lo largo del RV, lo que permitió calcular la potencia recibida en distintas profundidades del receptor. Este enfoque facilitó la comprensión de cómo varía la potencia a medida que se avanza en el interior del RV, proporcionando datos clave para optimizar su diseño y funcionamiento.

Con esta metodología, se busca optimizar el diseño de receptores volumétricos y evaluar su desempeño en condiciones reales de operación.

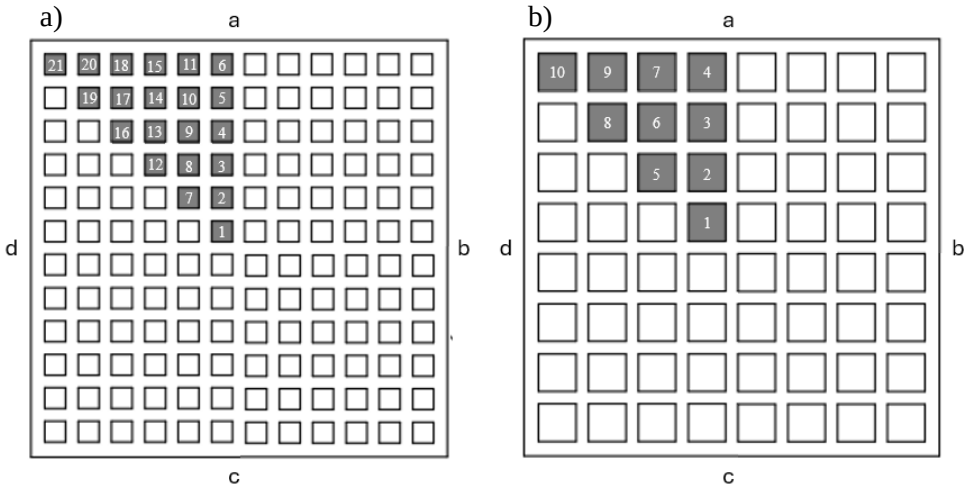


Figura 2. Parte frontal de los RV simulados en el programa Tonatiuh v.2.2.4; a) se simula un total de 21 canales; b) se simulan 10 canales.

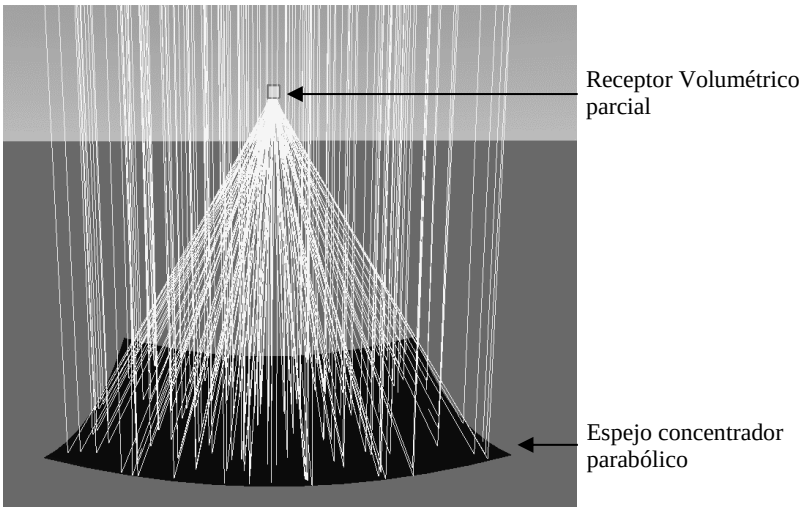


Figura 3. Simulación en el programa Tonatiuh v2.2.4.

RESULTADOS

En la zona focal del sistema, se recibe una potencia de 2.35 KW. Los resultados obtenidos muestran que la potencia térmica es recibida principalmente dentro del primer centímetro del canal, con una absorción del 91% en el RV de 4.5 mm y el 100% en el RV de 2.5 mm, como se observa en la figura 4. Las figuras 5 y 6 ilustran la distribución del flujo solar en el canal 1 para los RV de 4.5 mm y 2.5 mm, respectivamente.

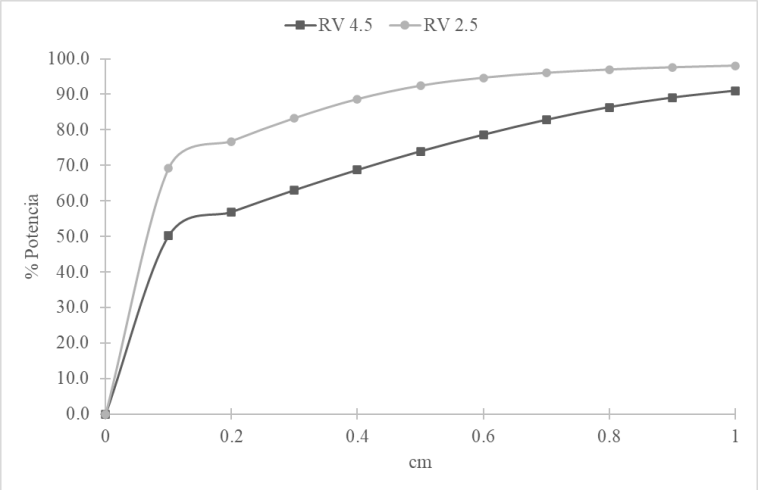


Figura 4. Porcentaje de la potencia recibida en la cara del RV, a lo largo del primer centímetro cada milímetro

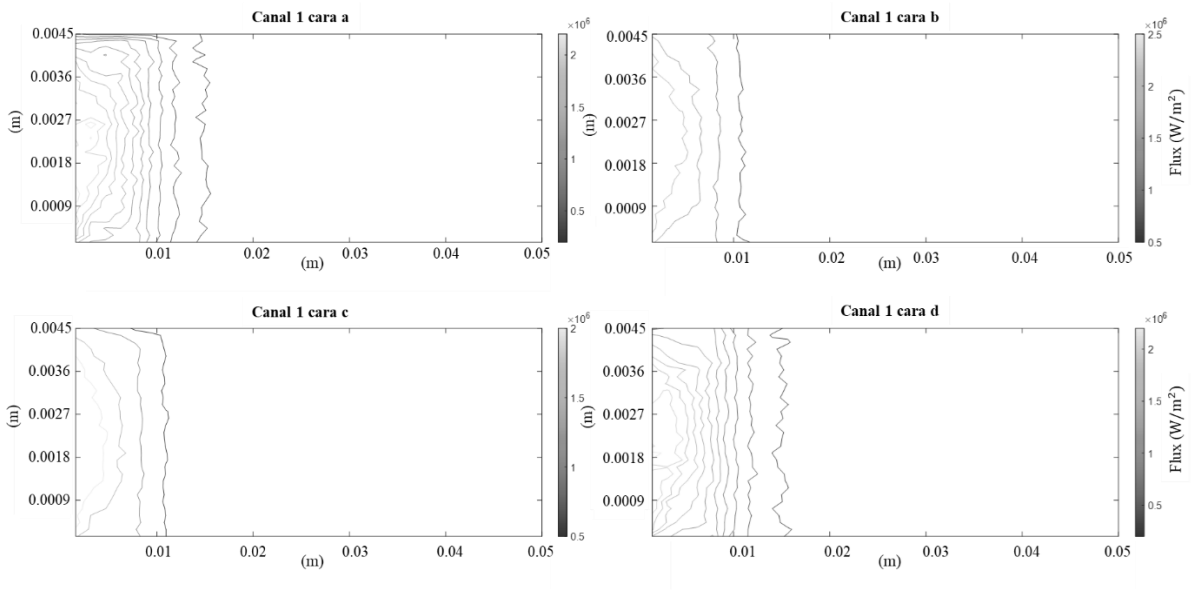


Figura 5. Distribución de la potencia térmica en el canal 1 del RV de 4.5mm

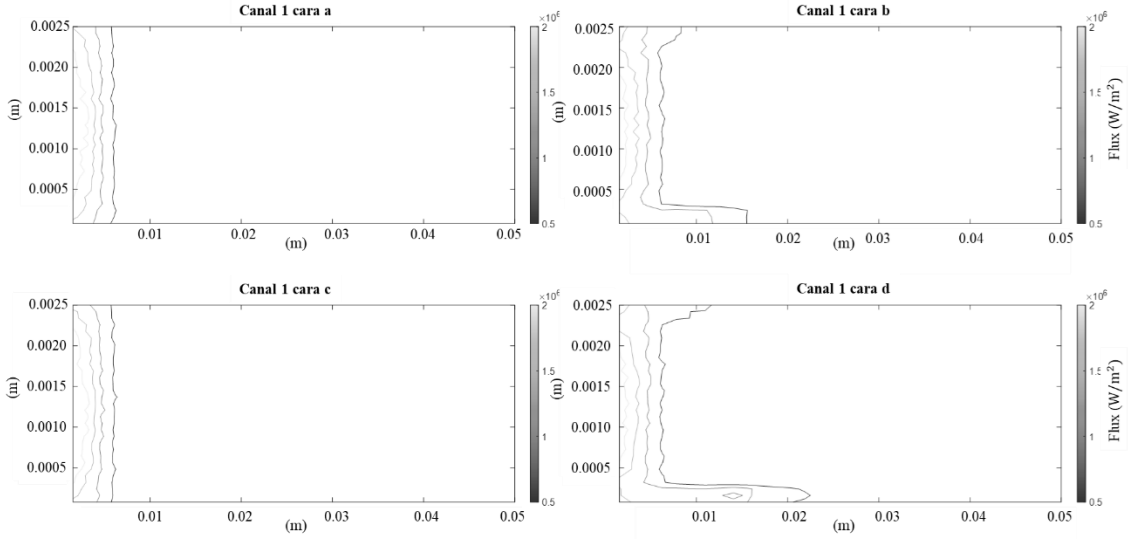


Figura 6. Distribución de la potencia térmica en el canal 1 de RV 2.5mm

CONCLUSIONES

A partir de estos resultados, se puede concluir que no es necesario diseñar un RV con una profundidad superior a 2 cm, ya que el diseño con canales de 2.5 mm capta el 100% de la potencia térmica, en comparación con el diseño de 4.5 mm, que requiere mayor profundidad para lograr una captación similar. Este diseño permite optimizar el uso de material, teniendo un aumento de material al aumentar las dimensiones del canal.

En este estudio, se sugiere fabricar un RV de alúmina con una mayor concentración de SiC en los primeros 2 cm y utilizando canales de 2.5 mm, ya que este diseño garantiza una captación térmica prácticamente total en la zona crítica de recepción.

REFERENCIAS

Ávila-Marín, A. L. (2011). Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review. Solar Energy, 85(5), 891–910. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2011.02.002

Barreto, G., Canhoto, P., & Collares-Pereira, M. (2020). Parametric analysis and optimisation of porous volumetric solar receivers made of open-cell SiC ceramic foam. Energy, 200, 117476. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117476

Ceballos M, L. G. (2015). Síntesis y Evaluación de Carburo de Silicio para Aplicaciones en Receptores Solares Volumétricos. Universidad de Sonora.

Chirchir, D. K., Rono, M. K., & Ogari, G. (2022). "Recent Advances in Solar Concentrators for Solar Power Applications." Journal of Renewable Energy Research.

Cisneros C., A. N., Cabanillas L., R. E., & Pérez E., R. A. (2021). Optical Analysis for a Honeycomb Solar Receiver Using a Point-Focus Concentrator. *International Conference on Innovations in Energy Engineering & Cleaner Production IEE CP*, *21*, 1. https://sci-index.com/DAl/2021.99101/IEECP/14727252

Goswami, D. Y., Kreith, F., & Kreider, J. F. (2023). Principles of Solar Engineering. CRC Press.

Lovegrove, K., & Stein, W. (2020). Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications. Woodhead Publishing.

Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2021). "A Review on Solar Energy Use in Industries." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4), 1777-1790.

ID	TITULO	PONENTE
16132	Metodología participativas hacia la construcción de indicadores para la sustentabilidad co-creada por la comunidad de Sisal.	Montserrat Ocampo Jiménez
16224	Estudio teórico de las propiedades fotofísicas de complejos de Cu(I), basado en piridina y fenantrolina para su uso como sensibilizadores en celdas DSSC.	Alan Tirado Lizárraga
16134	Prospectiva energética del sector agropecuario en México al 2050: oportunidades de mitigación de emisiones de GEI.	Esperanza Ordoñez Reyes
16136	Síntesis y caracterización de películas de GaN codopadas con Mg y Zn	Ana María Herrera
16179	Evaluación de propuestas de políticas públicas para la instalación de Sistemas Fotovoltaicos Distribuidos en la Prospectiva energética del sector residencial nacional de 2019-2050	Alberto Ávila Núñez
16203	Estudio Teórico de una Óptica Reconcentradora para el Campo Experimental de Torre Central de la Plataforma Solar de Hermosillo.	Carlos Eduardo Borjas Castillo

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

METODOLOGÍA PARTICIPATIVA HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES PARA LA SUSTENTABILIDAD CO-CREADA POR LA COMUNIDAD DE SISAL

Karla Graciela Cedano Villavicencio, Manuel Martínez Fernández, Montserrat Ocampo Jiménez
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62584 México.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivos diseñar una metodología participativa para la construcción de indicadores hacia la sustentabilidad de proyectos comunitarios y aplicar la metodología en la comunidad de Sisal Yucatán para sentar las bases que generen un conjunto de indicadores para evaluar resultados e impactos del proyecto "Ciudad Inteligente". Dicho estudio se enfoca en las actividades iniciales para lograr la co-creación comunitaria de indicadores sustentables en Sisal Yucatán. Indicadores, que permitirán evaluar los resultados e impactos del proyecto´ ciudades sustentables´ de manera participativa, incluyente y sustentable. En este proyecto se realizaron dos talleres: Diagnóstico e Integración, haciendo uso de metodologías dinámicas y participativas donde la comunidad identificó actividades comunitarias prioritarias y las relacionó con los cuatro pilares de la sustentabilidad. Esto permitió resaltar aquellos temas y cuestiones con incidencia positiva y negativa en materia de sustentabilidad, expresando de qué manera se puede cuantificar el grado de cada eje sustentable y así, dar los primeros pasos hacia la construcción de indicadores en materia de sustentabilidad. Los resultados obtenidos en los talleres de Integración fueron: la selección por consenso de 20 actividades comunitarias prioritarias como "Empleo con salarios para sisaleños que sean congruentes con el incremento de pueblo mágico". La comunidad propuso tres programas: Cuantificación de Duna y Manglar; Policía Ecológica y Talleres de Educación Ambiental. Finalmente, la comunidad expresó siete razones sobre la importancia de tener indicadores en la comunidad. Estos talleres lograron que la comunidad de Sisal haya participado en la identificación de actividades comunitarias prioritarias, la comunidad expresó programas comunitarios y reflexionó sobre el valor de construir indicadores. Además, la comunidad compartió su preocupación sobre el Ambiente y la Sustentabilidad.

ABSTRACT

This research focuses on the initial activities to achieve the community cogeneration of sustainable indicators in Sisal Yucatán. Indicators that will allow the evaluation of the results and impacts of the project "sustainable cities" in a participatory, inclusive and sustainable way. In this project, two workshops were held: Diagnosis and Integration, using dynamic and participatory methodologies where the community identified priority community activities and related them to the four pillars of sustainability. This allowed to highlight those topics and issues with positive and negative impact on sustainability, expressing how the degree of each sustainable axis can be quantified and thus, take the first steps towards the construction of indicators in terms of sustainability. The results obtained in the Integration workshops were: the selection by consensus of 20 priority community activities such as "Employment with salaries for Sisaleños that are consistent with the increase of the magical town." The community proposed three programs: Quantification of Dunes and Mangroves; Ecological Police and Environmental Education Workshops. Finally, the community expressed seven reasons for the importance of having indicators in the community. These workshops enabled the Sisal community to participate in the identification of priority community activities, the community expressed community programs and reflected on the value of building indicators. In addition, the community shared its concerns about the Environment and Sustainability.

Palabras claves: community co-creation, sustainable indicators, sustainable cities, priority community activities, construction of indicators, community programs

INTRODUCCIÓN

La medición de los indicadores ambientales es esencial para entender el efecto que las actividades humanas tienen sobre nuestro entorno. Estos indicadores proporcionan una herramienta valiosa para evaluar los posibles riesgos ambientales y determinar el estado actual de nuestro medio ambiente (Lyons, 2023), no obstante, tiene su lado negativo, ya que muchos de los indicadores creados no toman en cuenta la opinión y la experiencia a nivel local por la falta de consideración contextual a un nivel local (Tuğçe, Şensurat & Genç, 2023). Estas acciones han sido criticadas por su enfoque tradicionalmente liderado por el gobierno y basado en expertos, que a menudo descuidan las perspectivas locales y las preferencias de las comunidades afectadas (Turcu, 2013; Scerri y James, 2010).

Las comunidades locales aún no han sido completamente reconocidas como parte integral de la toma de decisiones, lo que subraya la necesidad de una mayor inclusión y participación en iniciativas ambientales y de desarrollo (Borrini-Feyerabend et al., 2004). La participación ciudadana en la generación de indicadores de sostenibilidad es fundamental para garantizar una evaluación completa y holística de la sostenibilidad, así como para promover un desarrollo más equitativo y sostenible a nivel local y global. Por lo anterior, este estudio se enfoca en la co-creación de indicadores sustentables, de tal forma que sean con los niveles de participación más altos según los niveles de participación de (Geilfus et al., 1997), con el fin que la misma comunidad elige en base a su conocimiento y forma de cooperar.

El presente estudio fue conducido en la comunidad de Sisal ubicada en el municipio de Hunucmá. Sisal es una ciudad costera pequeña de alrededor de 2000 habitantes en el noreste de la Península de Yucatán donde en su pasado era el principal puerto marítimo de la

península yucateca. Sisal tiene una vocación pesquera (GII-IIUNAM, 2022). Y como la temporada alta de pesca coincide con la migración de hasta 35.000 flamencos ha generado que actividades referentes al ecoturismo hayan incrementado en la última década, posibilitando, en algunos casos, un tránsito completo de la ocupación pesquera a la dedicación al turismo. Esto se potenció en el 2020 debido a la otorgación de Pueblo Mágico, título que ha preocupado a individuos de distintos sectores por deficitaria infraestructura con la que cuenta Sisal, cancelación de contribución económica a Pueblos Mágicos y el incremento de turismo desde las primeras semanas del nombramiento "Pueblo Mágico"(GII-IIUNAM, 2022).

Gracias a la llegada del establecimiento de la UNAM en Sisal en el 2003, diversos estudios se han realizado en la localidad, siendo el área más investigada y que goza con el número más amplio de literatura la resiliencia ambiental/ecológica de sistemas de turismo, sin embargo, hay pocos estudios que aborden la resiliencia de las organizaciones del sector turístico. (GII-IIUNAM, 2022). A nivel ambiental, las ciudades, de cualquier dimensión, incluyendo ciudades pequeñas o comunidades, no han sido abordadas de manera integral, sino mediante la evaluación de problemas y situaciones particulares, las cuales han dado el origen a evaluaciones ambientales parciales y hasta incompletas, esencialmente por tres razones fundamentales que menciona La Propuesta en 2022: "1) evalúan por separado las problemáticas de los sectores que forman parte de la comunidad sin reconocer sus interdependencias (GII-IIUNAM, 2022).; 2) se limitan al análisis de impactos locales y no consideran impactos indirectos que se generan fuera de los límites urbanos (GII-IIUNAM, 2022); 3) porque en la mayoría de los casos se basan en un solo problema ambiental como es el caso de Cambio Climático (Albertí et al., 2019; Beloin-Saint-Pierre et al., 2017)". Por lo tanto, una Comunidad o Ciudad Inteligente, tiene que iniciar una evaluación integrada de sus impactos ambientales y sociales. En eso parte la importancia de cuantificar los impactos ambientales y sociales en la comunidad de Sisal con enfoque en un Análisis de Ciclo de Vida: hacia una comunidad costera inteligente (GII-IIUNAM, 2022).

En septiembre de 2022 se realizó el primer taller en el que participó el gobierno, sociedad civil, proveedores de servicios, academia y profesionales independientes. El objetivo principal era tener una idea de lo que Sisal necesita y lo que piensan los diferentes actores al respecto. Los primeros resultados del trabajo de todos mostraron que hay tres cosas principales en las que pensar: a) Educación, b) Gobernanza y, c) Capacidad de carga, la cual está definida como "cantidad de actividades socio-económicas que el sistema ambiental puede sostener bajo un contexto de riesgo costero para garantizar el bienestar de la comunidad y sus usuarios". De la misma manera, se identificaron dentro del taller cuatro temas repetitivos en donde se podía visualizar gran parte de las problemáticas de Sisal, los cuales son: 1) Calidad del ambiente, 2) Riesgo, 3) Actividades económicas y 4) Bienestar. Es en el margen de esos ejes y temas donde nace la presente propuesta, que está integrada por 22 subproyectos vinculados en espacio y/o tiempo (GII-IIUNAM, 2022).

A partir de este diagnóstico, el grupo de Investigación de la Doctora Karla Graciela Cedano Villavicencio del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México decidió crear este subproyecto llamado Evaluación participativa y consensuada de impacto y sustentabilidad (EPICS). Por esa razón, el presente estudio promueve la gestión de conocimiento comunitario para la generación de indicadores para la sustentabilidad de Sisal. Teniendo como objetivo principal el diseño de una metodología participativa para la construcción de indicadores hacia la sustentabilidad de proyectos comunitarios. Y como objetivo particular el aplicar la metodología en la comunidad de Sisal para sentar las bases que generen un conjunto de indicadores para evaluar resultados e impactos del proyecto "Ciudad Inteligente Sisal".

Objetivo

Objetivo General: Diseñar una metodología participativa para la construcción de indicadores hacia la sustentabilidad de proyectos comunitarios.

Objetivo Particular: Aplicar la metodología en la comunidad de Sisal para sentar las bases que generen un conjunto de indicadores para evaluar resultados e impactos del proyecto "Ciudad Inteligente Sisal".

METODOLOGÍA

En esta metodología la moderación fue autogestionada por las mesas de trabajo, ya que había un alto nivel de confianza entre las personas participantes.

El primer paso es la invitación a la comunidad, aquí se identifica la comunidad con la que se trabajará siendo de gran importancia que tenga a alguien como contacto que reside en Sisal y que tenga confianza en la comunidad para poder hacer las actividades de manera conjunta. En segundo lugar, es la invitación a la comunidad, dicho proceso es fundamental porque dependiendo de una invitación amplia para diferentes actores de la comunidad es posible tener resultados positivos para los talleres.

Una vez que se tiene la comunidad seleccionada e invitada comienza el segundo paso el cual es el comienzo del taller comunitario de diagnóstico. Este taller es el primer taller que tiene el objetivo de identificar qué es el bienestar para las familias y que actividades los habitantes consideran que son importantes, pudiendo realizar mediante la herramienta de Ketso(c). Al comenzar el taller de diagnóstico la

primera actividad es presentar el taller y la firma de consentimiento. En esta etapa se presentan los miembros del taller y se presenta la comunidad y el material con el que trabajará. Primeramente, en esta etapa se lee la hoja de consentimiento y se insiste en que las personas que no estén de acuerdo en firmar no pueden permanecer dentro del taller. El segundo paso de la realización del taller es la Evaluación participativa; En esta etapa se le pide a la comunidad que diga cuáles son los elementos importantes a evaluar. Volviéndose a repetir al final de cada taller por si la comunidad quiere modificar sus criterios. La tercera parte es la presentación de conceptos básicos; Aquí se presentan los conceptos básicos del taller de diagnóstico, siendo "sustentabilidad" y "Bienestar". Posteriormente en el cuarto paso el cual es generación de conocimiento colaborativo, donde se trabaja con las mesas de la comunidad poniéndose dinámicas mediante la metodología Ketso(c) guiadas por diapositivas presentadas en el taller.

Una vez que se ha terminado de realizar el taller comunitario de diagnóstico, se lleva a cabo el taller para integración de resultados. La integración de resultados requiere que se haya analizado la información del taller comunitario de diagnóstico. Después se presenta la etapa de evaluación participativa. En esta etapa se le pide a la comunidad que diga cuáles son los elementos importantes a evaluar. Volviéndose a repetir al final de cada taller por si la comunidad quiere modificar sus criterios. Más tarde, se sigue con la generación de conocimiento colaborativo. Aquí se trabaja con las mesas de la comunidad poniéndose dinámicas mediante la metodología Ketso(c) guiadas por diapositivas presentadas en el taller. Posteriormente se realiza la etapa de integración de resultados para la comunidad de investigación. En esta etapa los miembros del taller incorporan y enlazan los resultados de la comunidad para poder tener claridad.

RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados obtenidos a través del proceso de generación de indicadores sostenibles llevado a cabo en Sisal, Yucatán. Estos resultados reflejan la participación activa del equipo de investigación y de los miembros de la comunidad en una serie de talleres participativos diseñados para identificar y priorizar actividades relacionadas con el bienestar individual y comunitario, así como para desarrollar indicadores de sostenibilidad. Se tratan los hallazgos del taller de integración, en el que se consolidaron los indicadores elegidos sobre la base del consenso de la comunidad. Estos resultados dan cuenta del conjunto de valores, preocupaciones y deseos de la comunidad de Sisal en lo que se refiere al desarrollo sostenible, y facilitan el fundamento necesario para futuras decisiones y actuaciones relativas a la sostenibilidad local.

Tabla 1. 20 actividades prioritarias elegidas de forma intercalada por mesa A y mesa B. (IER, 2024)

(1)	***Empleos con salarios para los sisaleños que sean congruentes con el incremento de pueblo mágico***
(2)	***Educación de calidad***
(3)	***Economía circular***
(4)	***Acceso a servicios de salud de calidad***
(5)	***Alimentación y nutrición***
(6)	***Gestión sustentable de residuos***
(7)	***Acceso a servicios de salud de calidad***
(8)	***Cursos de empoderamiento para las mujeres de sisal***
(9)	***Educación de calidad***
(10)	***Energía eléctrica eficiente***
(11)	***Conservación de la biodiversidad (cuidar manglares y dunas)***
(12)	***Que haya turismo sostenible donde la gente local se pueda beneficiar***
(13)	***Restauración de la biodiversidad***
(14)	***Cuidar el recurso terrestre, costero y marino respetando vedas***

(15) Vivienda respetuosa con la naturaleza

(16) Servicio de transporte público de calidad

(17) Tolerancia, respeto, no exclusión,no racismo ni fascismo

(18) Actividades culturales y educativas para toda la comunidad

(19) Resolver conflictos

(20) Organización social

Tabla 2. Propuestas de la comunidad elegidas en taller de integración junto con propuestas de medición. (IER, 2024).

Propuestas de la comunidad en los talleres (óvalos naranja)	*Propuestas de medición (métrica e indicador - óvalos y hoja café)*
(1) Programa de Cuantificación de Duna y Manglar	***Salinidad y PH del agua de manglar***
	Kg de basura x mes
	Tamaño de la población de especies
	Área del ecosistema conservadas
	Número de aves migratorias / especie / temporada
	Número de personas por equipo de seguridad
	Número de limpiadores de duna
(2) Programa de Policía Ecológica	***Número de reportes atendidos de tala ilegal, pesca ilegal y/o caza ilegal***
	Número de anidaciones de tortugas en la Dina / anuales
	Número de especies vegetales en dunas y manglares
	Número de plantas sembradas
	Calidad del agua y aire
(3) Programa de Talleres de Educación Ambiental	***Número de talleres de manejo y cuidado de vegetación y manglares***

CONCLUSIONES

El taller comunitario de diagnóstico y el taller para integración de resultados nos permitió encontrar elementos que a las personas sisaleñas les interesa que tomen en cuenta, siendo la co-creación de programas sociales potenciales mostrados en la tabla 2, como, la cuantificación de dunas y manglares, la elaboración de talleres de educación ambiental, y la propuesta de una policía ecológica. Las propuestas van encaminadas a realizar la medición y al seguimiento de los distintos parámetros ecológicos y de conservación. Por lo anterior, es prioritario insistir en la importancia de que todos los subproyectos de GII Ciudad Inteligente tomen en cuenta lo expresado por la comunidad de Sisal para dar pertinencia y relevancia a sus actividades e impactos

La colaboración en los talleres permitió que quedaran reflejados los valores, las inquietudes y los deseos de los vecinos de la comunidad de Sisal, pudiéndose identificar 38 indicadores de sostenibilidad, donde se priorizaron 20 actividades comunitarias correlacionadas con la importancia asignada por las mesas A y B., tal y como se muestra en la tabla 1 . Estas actividades incluyen: puestos de trabajo con salarios decentes, una educación de calidad, la economía circular, el acceso a servicios de salud, la gestión sostenible de los residuos, la conservación de la biodiversidad, entre otras.

Al igual que el estudio de Participatory Action Research for the assessment of Community-Based Rural Tourism: a case study of co-construction of tourism sustainability indicators in Mexico por Nadia Merkel Arias & Maxime Kieffer en el 2023, queda claro que la investigación refuerza el supuesto de que la adopción de procesos participativos permitirá a los grupos y comunidades locales pasar de tener un papel pasivo a desempeñar un papel crítico en la transformación de su propia realidad social en sus propios términos.

Una de las finalidades era tener indicadores para proyectos, mientras que otra fue concientizar a la comunidad sobre la importancia de la sustentabilidad, el bienestar, y más importante aún, sobre dónde se debe de poner atención para medir y poder alcanzar la sustentabilidad. Por lo anterior, se puede finalizar que se ha obtenido un progreso considerable hacia el objetivo de tener indicadores sustentables en Sisal establecidos en la Propuesta de (IIG, 2023). Gracias a la integración, el consenso de la comunidad y el conocimiento regional fueron esenciales para encaminar a la creación de los indicadores, lo que refleja un estilo de toma de decisiones que tiene que ver con la participación aplicada a las políticas de desarrollo sostenible local.

REFERENCIAS

Albertí, J., Brodhag, C., & Fullana-i-Palmer, P. (2019). Primeros pasos en las evaluaciones del ciclo de vida de las ciudades con una perspectiva de sostenibilidad: Una propuesta de meta, función, unidad funcional y flujo de referencia. Science of the Total Environment, 646, 1516–1527. Español: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.377

Beloin-Saint-Pierre, D., Rugani, B., Lasvaux, S., Mailhac, A., Popovici, E., Sibiude, G., Benetto, E., & Schiopu, N. (2017). Una revisión de los estudios de metabolismo urbano para identificar opciones metodológicas clave para la armonización e implementación futuras. Journal of Cleaner Production, 163, S223– S240.

Borrini-Feyerabend, G., Pimbert, M., Farvar, M., Kothari, A., Renard, Y., 2004. Compartiendo el poder: aprendiendo haciendo en la cogestión de los recursos naturales en todo el mundo. IIED, UICN, CEESP, CMWG, Teherán.

Geilfus, F., 1997. 80 herramientas para el desarrollo rural participativo: diagnóstico, planificación, monitoreo, evaluación. IICA, SAGAR, México.

GII-IIUNAM. (2022). Propuesta: Sisal, Yucatán: hacia una ciudad sustentable y resiliente.

Merkel Arias, N., & Kieffer, M. (2023). Participatory Action Research for the assessment of Community-Based Rural Tourism: a case study of co-construction of tourism sustainability indicators in Mexico. Current Issues in Tourism, 26(13), 2083-2100.

Terrence, Lyons. (2023). Indicadores ambientales. 202-203. doi: 10.4337/9781788974912.e.126.

Turcu, C. (2013). Replanteando los indicadores de sostenibilidad: perspectivas locales de sostenibilidad urbana. Journal of Environmental Planning and Management, 56(5), 695-719.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO TEÓRICO DE LAS PROPIEDADES FOTOFÍSICAS DE COMPLEJOS DE Cu(I) BASADO EN PIRIDINA Y FENANTROLINA, PARA SU USO COMO SENSIBILIZADORES EN CELDAS DSSC

M.C. Alan J. Tirado-Lizárraga, Dr. Jesús Baldenebro-López, Dr. Rody Soto-Rojo, Dr. Tomás Delgado-Montiel, Dr. Samuel Soto-Acosta
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Ángel Flores S/N, Los Mochis, Sinaloa, 81223, México, +52 6688127641, +52 6688127641,
joshemartirado.fim@uas.edu.mx@uas.edu.mx

Dr. Daniel Glossman-Mitnik
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua 31190, México, Miguel de Cervantes 120, Chihuahua, Chihuahua, 31190, México, +52 614 439 1191, +52 614 439 1191.

RESUMEN
Los dispositivos solares sensibilizados por colorantes (DSSC) son una opción clave en la generación de energía renovable debido a su alta eficiencia y versatilidad. En el desarrollo de sensibilizadores para DSSC, los complejos homolépticos de Cu(I) han surgido como una alternativa significativa ya que exhiben propiedades ópticas favorables para la captura de luz solar en un amplio espectro de longitudes de onda. Por tal motivo, esta investigación se centra en la evaluación de las propiedades fotofísicas de dichos complejos a través de la Teoría de Funcionales de la Densidad (DFT, por sus siglas en inglés) para determinar su potencial uso como sensibilizadores en DSSC. Para ello, se toman en cuenta ligandos basados en bipiridina y fenantrolina, los cuales desempeñan un papel crucial al estabilizar estos complejos, facilitando la transferencia eficiente de carga y la separación del par electrón-hueco en la interfaz óxido de titanio-electrolito. Además, su flexibilidad química permite ajustar las propiedades de los complejos, optimizando así su desempeño en DSSC. Aunado a esto, se considera la inclusión de grupos de ácido carboxílico, acrílico o benzoico en las posiciones 4, 4'- o 5, 5'-, además de sustituyentes metil o fenil en las posiciones 6, 6'-, con el objetivo de minimizar la distorsión de la geometría tetraédrica del Cu(I) durante el proceso de fotoexcitación. El cálculo de la optimización de la geometría molecular y las propiedades optoelectrónicas de los mismos se hace a con el funcional de la densidad M06, y los conjuntos base 6-31G(d) y DZVP.

ABSTRACT
Dye-sensitized solar devices (DSSCs) are a crucial option in renewable energy generation due to their high efficiency and versatility. In developing sensitizers for DSSC, homoleptic Cu(I) complexes have emerged as a significant alternative as they exhibit favorable optical properties for capturing sunlight over a broad spectrum of wavelengths. For this reason, this research focuses on evaluating the photophysical properties of these complexes through the Density Functional Theory (DFT) to determine their potential use as sensitizers in DSSC. Ligands based on bipyridine and phenanthroline are considered, which play a crucial role in stabilizing these complexes, facilitating the efficient transfer of charge and the separation of electron-hole pairs at the titanium oxide-electrolyte interface. In addition, its chemical flexibility allows the properties of the complexes to be adjusted, thus optimizing their performance in DSSC. In addition to this, the introduction of carboxylic, acrylic, or benzoic acid groups in the 4, 4'- or 5, 5'-, as well as methyl or phenyl substituents in the 6, 6'-, positions are considered to minimize the distortion of the tetrahedral geometry of Cu(I) during the photoexcitation process. The calculation of the optimization of the molecular geometry and the optoelectronic properties of the same is done through the theory of density functionals with the M06 functional, and the basis sets 6-31G(d) and DZVP.

Palabras claves: DSSC, Solar, Sensibilizador, Celdas, Energía.

INTRODUCCIÓN
Debido a la problemática medioambiental actual surge la necesidad de desarrollar tecnologías y dispositivos de conversión de energía cada vez más eficientes, que permitan diversificar la matriz energética y a su vez, alcanzar los objetivos que promueve el desarrollo sustentable, siendo una de las alternativas más interesantes la energía solar fotovoltaica debido a características como su flexibilidad para implementarse en distintos sectores y el requerir una superficie específica menor que otras fuentes de energía renovables.[1–3] A pesar de los beneficios y el desarrollo alcanzado, sigue siendo un tema bastante atractivas para estudiar, ya que las tecnologías de conversión actualmente comercializadas (de primera generación) no ofrecen una gran eficiencia, limitando la generación de energía eléctrica. Ante esta problemática, se trabaja en el desarrollo de nuevos dispositivos denominados celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC, por sus siglas en inglés), las cuales tienen como objetivo dos puntos importantes: mantener/mejorar los coeficientes de absorción de luz y los niveles de eficiencia de las celdas de primera generación y a su vez, asegurar costos de fabricación relativamente bajos, tal y como sucede con las celdas de segunda generación.[4]

Las primeras DSSC se desarrollaron en 1988 por O' Regan y Grätzel en la Universidad de Berkeley usando complejos de Ru(II) como sensibilizador, la cual era capaz de operar dentro de un amplio rango de longitudes de onda del espectro visible, incluso en bajas condiciones

de luz, llegando a alcanzar una eficiencia de ≈12%.[5–7] A pesar de sus notables beneficios, encontrar alternativas al uso de complejos de Ru(II) como sensibilizador se volvió una necesidad debido a sus inconvenientes (metal altamente costoso y escaso). Fue entonces que Sauvage y colaboradores introdujeron por primera vez los sensibilizadores basados en cobre en el año de 1994, mostrando longitudes de onda de máxima absorción en 440 nm.[8] Esto fue confirmado años más tarde por N. Armaroli y colaboradores, al encontrar propiedades fotofísicas similares en complejos de Cu(I) y Ru(II).[9,10] El hecho de que el cobre sea uno de los metales más abundantes en el planeta, ha motivado aún más la realización de diversos estudios tanto teóricos como experimentales.[2,11]

Las DSSC se componen esencialmente de 5 materiales distintos: un material mesoporoso que se encarga de transportar los electrones y servir como trampa para estos (MTE); un material transparente conductor (TCM) que se deposita en un sustrato (puede tratarse de vidrio o algún tipo de polímero flexible), el cual forma lo que se conoce como sustrato conductor transparente (SCT); un pigmento que actúa como fotosensibilizador; un electrolito que actúa como transporte de huecos (MTA) y finalmente, un material conductor que se deposita sobre un segundo sustrato conductor (SCT), lo cual permite cerrar el circuito. Dicho material se denomina como contra electrodo (CE). [2,12]

El funcionamiento de las DSSC se aprecia en la Figura 1. En términos generales, se lleva a cabo primeramente la incidencia de luz sobre el vidrio cubierto de SCT, llegando al material mesoporoso y al colorante ligado a este. Posteriormente, los electrones comenzarán a desplazarse desde el orbital molecular más altos ocupado (HOMO) hacia el orbital molecular más bajo desocupado (LUMO) del colorante (sensibilizador). En este punto, los átomos del semiconductor (que posee estados energéticos que se encuentran en la banda de conducción del material) posibilitan la transferencia desde el LUMO hacia la banda de conducción del material mesoporoso, y desde éste al SCT, donde serán conducidos por una carga externa.

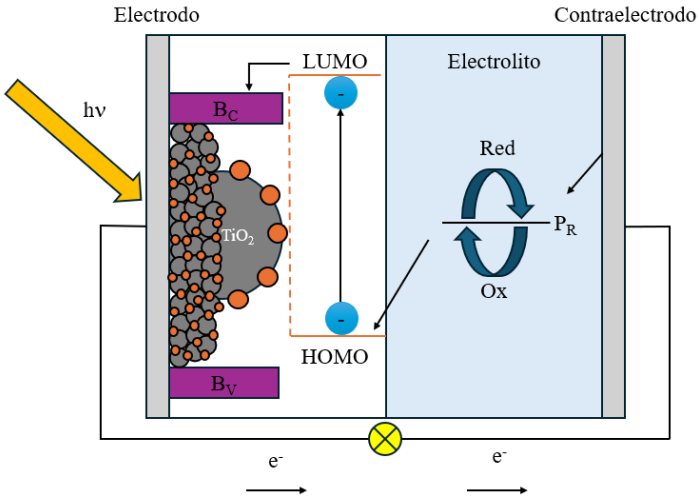


Figura 1. Funcionamiento de una DSSC

Posteriormente, el colorante es regenerado mediante un electrolito (cuyos iones poseen energías superiores al HOMO del colorante), permitiendo que los iones cedan un electrón por medio de una reacción redox (denominada como reacción de regeneración). Finalmente, los iones del electrolito que cedieron un electrón se mueven hacia el electrodo opuesto para reaccionar con este, para así poder recuperar el electrón previamente cedido, teniendo de nuevo su estado base para así continuar con el proceso de regeneración. [12]

El estudio de estos materiales requiere de conocimientos y herramientas proporcionadas por la química computacional, la cual surge como una evolución de la química teórica con el objetivo de investigar el comportamiento de la materia a nivel molecular por medio de ordenadores, pudiendo cuantificar propiedades como la geometría molecular de los sistemas estudiados, su energía, reactividad, entre otras. [13]

En este trabajo de investigación se calcularon de forma teórica las propiedades que determinan, en primera instancia, la posibilidad de que los sistemas propuestos puedan ser utilizados como sensibilizadores en DSSC.

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una primera aproximación en la optimización de las geometrías de los 8 complejos desarrollados a partir de ligandos basados en moléculas de bipiridina y fenantrolina (Figura 2), dado que exhiben propiedades bastante interesantes en cuanto a su posible utilización como sensibilizadores para celdas DSSC, además de ventajas en el diseño molecular de nuevas propuestas. En base a estos y a los grupos

de anclaje (R) se formaron los ligandos: (2E, 2'E) – 3, 3' – (6, 6' – dimetil – [2, 2' – bipiridina] – 4, 4' – diil) – ácido diacrílico (LB1R1); 6, 6' – difenil – [2, 2' – bipiridina] – 4, 4' – ácido dicarboxílico (LB2R2); dimetil – [2, 2' - biquinolina] – 4, 4' dicarboxilato (LB3R3); (2E, 2'E) – 3, 3' – (6, 6' – difenil – [2, 2' - bipiridina] – 4, 4' – diil) – ácido diacrílico (LB4R1); 4, 4' – (6, 6' – difenil – [2, 2' – bipiridina] – 4, 4' – diil) – ácido dibenzoico (LB2R3); 4, 4' – di(furano – 2 – il) – 6, 6' – dimetil – 2, 2' – bipiridina (LB6); 6, 6' – dimetil – [2, 2' – bipiridina] – 5, 5' – ácido dicarboxílico (LB5R2) y 4, 4' – (6, 6' – dimetil – [2, 2' bipiridina] – 4, 4' – diil) – ácido dibenzoico (LB7R2).

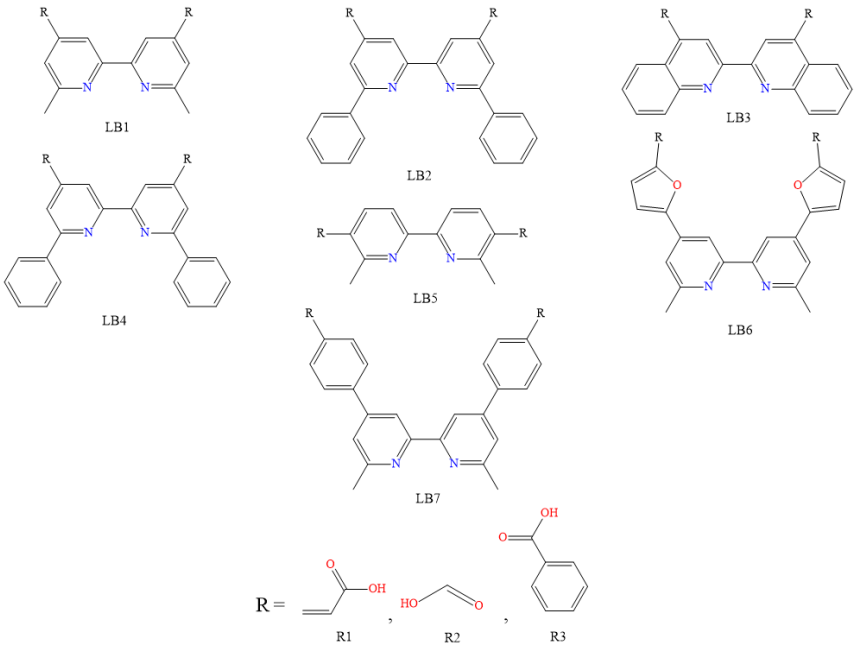


Figura 2. Ligandos utilizados para la formación de complejos de Cu(I) con uso potencial como sensibilizadores en DSSC

En una primera instancia, se llevó a cabo el diseño molecular de los ligandos (y posteriormente de los complejos) con ayuda del software Avogadro 1.2.0.[14] Una vez finalizada esta etapa, se procedió a realizar una primera fase de optimización tanto de los ligandos como de los complejos por medio del método UFF (Universal Force Field), el cual es capaz de reproducir la mayoría de las características estructurales de prácticamente todos los elementos de la tabla periódica, ofreciendo buenos resultados tanto para compuestos inorgánicos como para metal-orgánicos. Posteriormente, se realizó una segunda fase de optimización por medio del método semiempírico PM6, con el objetivo de aumentar la precisión de los resultados obtenidos previamente.

Finalmente, como se observa en la Figura 3, se procedió a realizar una última fase de optimización y cálculos de los niveles de energía en los orbitales de frontera (HOMO y LUMO) para cada una de las estructuras de los complejos propuestos, utilizando el funcional M06 con los conjuntos base 6-31G(d) para los átomos de C, O, H y N, así como DZVP para el centro metálico de Cu, a través del código computacional Gaussian 16.[15]

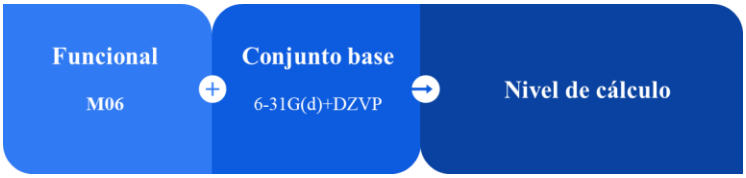
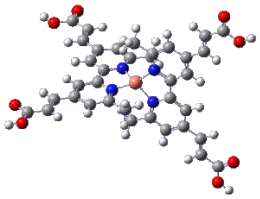
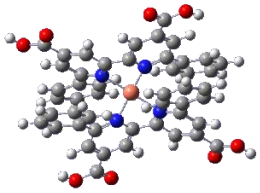
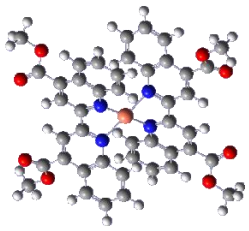
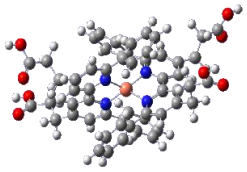
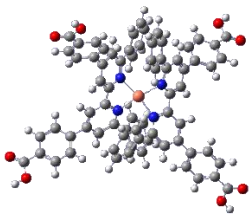


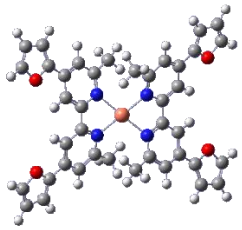
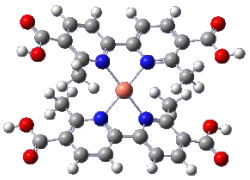
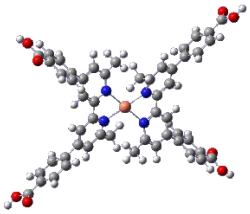
Figura 3. Funcional y conjuntos base utilizados.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A través de una serie de aproximaciones utilizando los métodos UFF, PM6 y posteriormente M06/6-31G(d)+DZVP se obtuvieron las estructuras de mínima energía de este grupo de complejos homolépticos de Cu(I) propuestos, mediante la optimización de sus geometrías (Tabla 1).

Tabla 1. Geometrías optimizadas de los complejos de Cu(I) propuestos.

Estructura molecular	*Etiqueta del complejo*	*N. de átomos*	*Ligando base*
	C1	81	(2E, 2'E) – 3, 3' – (6, 6' – dimetil – [2, 2' – bipiridina] – 4, 4' – diil) – ácido diacrílico
	C2	93	6, 6' – difenil – [2, 2' – bipiridina] – 4, 4' – ácido dicarboxílico
	C3	89	dimetil – [2, 2' - biquinolina] – 4, 4' dicarboxilato
	C4	117	(2E, 2'E) – 3, 3' – (6, 6' – difenil – [2, 2' - bipiridina] – 4, 4' – diil) – ácido dicarboxílico
	C5	133	4, 4' – (6, 6' – difenil – [2, 2' – bipiridina] – 4, 4' – diil) – ácido dibenzoico

	C6	81	4, 4’ – di(furano – 2 – il) – 6, 6’ – dimetil – 2, 2’ – bipiridina
	C7	65	6, 6’ – dimetil – [2, 2’ – bipiridina] – 5, 5’ – ácido dicarboxílico
	C8	105	4, 4’ – (6, 6’ – dimetil – [2, 2’ bipiridina] – 4, 4’ – diil) – ácido dibenzoico

Una vez obtenidas las estructuras de mínima energía de dichos complejos, se procedió con el cálculo de la densidad electrónica de los orbitales de frontera HOMO-LUMO, con el fin de comprobar si hay una contribución significativa del HOMO en el centro metálico (indicando que, tras la excitación, hay una regeneración del electrolito al sensibilizador, permitiendo la transferencia de electrones hacia este) y que el LUMO este localizado principalmente en los ligandos (lo que conlleva a una transferencia de electrones al TiO_2, permitiendo la generación de corriente eléctrica).

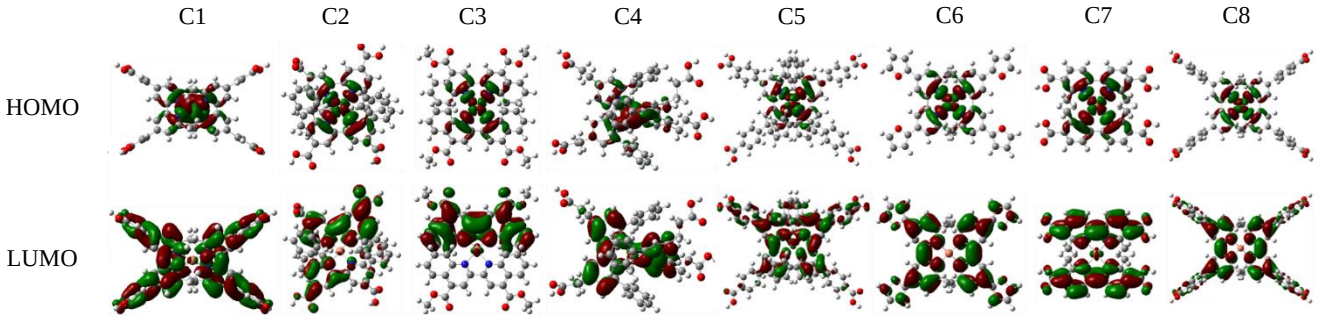


Figura 4. Densidad electrónica de los orbitales moleculares de frontera (HOMO-LUMO)

Otro aspecto importante para considerar es la predicción de los niveles de energía de los orbitales HOMO y LUMO, los cuales son mostrados en la Figura 5. Los valores de energía del LUMO se encuentren por encima de la banda de conducción del TiO_2, propiciando una correcta transferencia electrónica. Además, los niveles de energía del HOMO se encuentran por debajo del potencial redox del electrolito, de tal forma que se facilita la regeneración del sensibilizador por parte de este último, por medio de reacciones de óxido-reducción.

En base a la información obtenida y las propiedades cuantificadas, se infiere (en una primera instancia) que los complejos homolépticos propuestos son buenos candidatos a ser utilizados como sensibilizadores en DSSC, ya que cumplen con los criterios esenciales para operar de forma efectiva en este tipo de dispositivos al permitir la transferencia de electrones desde el LUMO hacia la banda de conducción del TiO_2, así como la regeneración del mismo durante el proceso de fotoexcitación por medio del electrolito (a través de procesos de óxido – reducción). Finalmente, se contempla el cálculo y análisis de los espectros de absorción bajo los cuales operan cada uno de los complejos homolépticos propuestos, pudiendo así evaluar su desempeño como sensibilizador y determinar que estos son opciones más que factibles para su utilización en este tipo de tecnologías fotovoltaicas.

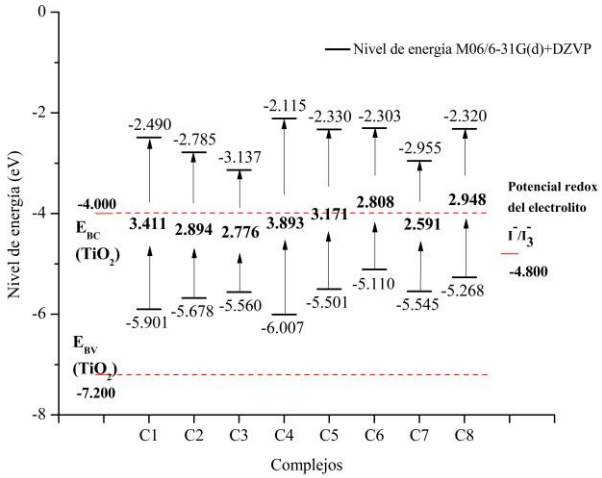


Figura 5. Niveles de energía HOMO – LUMO

REFERENCIAS

1. Mehmood, A., Ren, J. & Zhang, L. Achieving energy sustainability by using solar PV: System modelling and comprehensive techno-economic-environmental analysis. Energy Strategy Reviews 49, 101126 (2023).
2. Baldenebro-Lopez, J., Flores-Holguin, N., Castorena-Gonzalez, J. & Glossman-Mitnik, D. Molecular design of copper complexes as sensitizers for efficient dye-sensitized solar cells. J Photochem Photobiol A Chem 267, 1–5 (2013).
3. Yoro, K. O. & Daramola, M. O. CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. in Advances in Carbon Capture 3–28 (Elsevier, 2020). doi:10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3.
4. Tiwari, G. N., Tiwari, A. & Shyam. Handbook of Solar Energy. (Springer Singapore, Singapore, 2016). doi:10.1007/978-981-10-0807-8.
5. Conradie, J. Polypyridyl copper complexes as dye sensitizer and redox mediator for dye-sensitized solar cells. Electrochem commun 134, 107182 (2022).
6. Gerischer, H., Michel-Beyerle, M. E., Rebentrost, F. & Tributsch, H. Sensitization of charge injection into semiconductors with large band gap. Electrochim Acta 13, 1509–1515 (1968).
7. O'Regan, B. & Grätzel, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films. Nature 353, 737–740 (1991).
8. Alonso-Vante, N., Nierengarten, J.-F. & Sauvage, J.-P. Spectral sensitization of large-band-gap semiconductors (thin films and ceramics) by a carboxylated bis(1,10-phenanthroline)copper(I) complex. Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions 1649 (1994) doi:10.1039/dt9940001649.
9. Armaroli, N. Photoactive mono- and polynuclear Cu(i)–phenanthrolines. A viable alternative to Ru(ii)–polypyridines? Chem Soc Rev 30, 113–124 (2001).
10. Armaroli, N., Accorsi, G., Cardinali, F. & Listorti, A. Photochemistry and Photophysics of Coordination Compounds: Copper. in Photochemistry and Photophysics of Coordination Compounds I 69–115 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg). doi:10.1007/128_2007_128.
11. Robertson, N. Cu(I) versus Ru (II): Dye-Sensitized Solar Cells and Beyond. ChemSusChem 1, 977–979 (2008).
12. Wills, K. A. et al. Investigation of a copper(i) biquinoline complex for application in dye-sensitized solar cells. RSC Adv 3, 23361 (2013).
13. Jensen, F. Introduction to Computational Chemistry.
14. Marcus D Hanwell, Donald E Curtis, David C Lonie, Tim Vandermeersch, Eva Zurek and Geoffrey R Hutchison; "Avogadro: An advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform" Journal of Cheminformatics 2012, 4:17.
15. Gaussian 16, Revision C.01, Frisch, M. J.; Trucks, G. W.; Schlegel, H. B.; Scuseria, G. E.; Robb, M. A.; Cheeseman, J. R.; Scalmani, G.; Barone, V.; Petersson, G. A.; Nakatsuji, H.; Li, X.; Caricato, M.; Marenich, A. V.; Bloino, J.; Janesko, B. G.; Gomperts, R.; Mennucci, B.; Hratchian, H. P.; Ortiz, J. V.; Izmaylov, A. F.; Sonnenberg, J. L.; Williams-Young, D.; Ding, F.; Lipparini, F.; Egidi, F.; Goings, J.; Peng, B.; Petrone, A.; Henderson, T.; Ranasinghe, D.; Zakrzewski, V. G.; Gao, J.; Rega, N.; Zheng, G.; Liang, W.; Hada, M.; Ehara, M.; Toyota, K.; Fukuda, R.; Hasegawa, J.; Ishida, M.; Nakajima, T.; Honda, Y.; Kitao, O.; Nakai, H.; Vreven, T.; Throssell, K.; Montgomery, J. A., Jr.; Peralta, J. E.; Ogliaro, F.; Bearpark, M. J.; Heyd, J. J.; Brothers, E. N.; Kudin, K. N.; Staroverov, V. N.; Keith, T. A.; Kobayashi, R.; Normand, J.; Raghavachari, K.; Rendell, A. P.; Burant, J. C.; Iyengar, S. S.; Tomasi, J.; Cossi, M.; Millam, J. M.; Klene, M.; Adamo, C.; Cammi, R.; Ochterski, J. W.; Martin, R. L.; Morokuma, K.; Farkas, O.; Foresman, J. B.; Fox, D. J. Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2016.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

PROSPECTIVA ENERGÉTICA DEL SECTOR AGROPECUARIO EN MÉXICO A 2050: OPORTUNIDADES DE MITIGACIÓN EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR PARA 2050

Esperanza Ordoñez Reyes, **Ariana Cruz Olayo**
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec S/N,
Toluca, Estado de México, 50110, México,7222880937, **ordonezreyesesperanza@gmail.com.**

Alberto Avila Nuñez, Juan C. Castro Domínguez,
Karla G. Cedano Villavicencio, Manuel Martínez Fernádez
Laboratorio de Innovación y Futuros, Instituto de Energías Renovables
Universidad Nacional Autónoma de México
Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.

RESUMEN

El sector agropecuario representó el 4.6% del consumo energético en México en 2020, y al igual que la matriz energética total, es altamente dependiente de los combustibles fósiles. Además, contribuyó con el 19% de las emisiones de CO_2e cuantificadas en el país en 2019, por lo que las acciones de mitigación que se propongan son ampliamente relevantes.

En las medidas propuestas para este sector en la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de México para el combate a la crisis climática, se propone el aprovechamiento de los residuos agrícolas y ganaderos para la obtención de biocombustibles. Entre las alternativas existentes, el aprovechamiento de las heces del ganado bovino y porcino en biodigestores anaerobios es una tecnología madura en el mercado. La cual permite la mitigación del metano que sería emitido por estos residuos al estar expuestos a la atmósfera, y su aprovechamiento para la producción de energía mediante la transformación a biogás.

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de incorporar este biogás a la oferta de energía. Se realizó un ejercicio prospectivo empleando un modelo del Sistema Energético Nacional (SEN) desarrollado en el software LEAP, en el que se incorporaron procesos de generación de biogás descentralizados a partir del procesamiento de excretas del ganado. En dicho análisis fue posible modelar la incorporación de este biocombustible en el mix energético, tanto en la demanda como en la oferta de energía.

En los escenarios modelados esta tecnología fue capaz de mitigar en 2030 el 28.12% de las emisiones de GEI relacionadas al tratamiento de estiércol respecto a la línea base de la NDC, es decir, sin que se traten las heces. Además de solventar hasta el 1.09% de la demanda energética nacional en 2050, sustituyendo completamente la demanda de Gas LP en el sector agropecuario y de la leña para el sector residencial.

ABSTRACT

The agricultural sector accounted for 4.6% of Mexico's energy consumption in 2020, and as the whole energy matrix, it is highly dependent on fossil fuels. In addition, the sector contributed 19% of the country's quantified CO2e emissions in 2019, so the next mitigation actions are highly relevant.

In the measures proposed for this sector in Mexico's Nationally Determined Contribution (NDC) to combat the climate crisis, the use of agricultural and livestock manure to obtain biofuels is proposed. Among the existing alternatives, the use of cattle and swine feces in anaerobic digesters is a mature technology in the market. This allows the mitigation of the methane that would be emitted by this waste when exposed to the atmosphere, and its use for energy production through the transformation to biogas.

The objective of this paper is to evaluate the feasibility of incorporating this biogas into the national energy supply. A prospective study was carried out using a model of the National Energy System (SEN) developed in the LEAP software; in which decentralized biogas generation processes were incorporated from the processing of livestock excreta. It was possible to model the incorporation of this biofuel into the energy mix, both in terms of energy demand and supply.

In the modeled scenarios, the technology was able to mitigate 28.12% of the GHG emissions related to manure treatment in 2030 compared to the NDC baseline (without treating the feces). In addition it covers up to 1.09% of the national energy demand in 2050, completely replacing the demand for LPG in the agricultural sector and firewood for the residential sector.

Palabras claves: Agropecuario; mitigación; renovables; biogás; aprovechamiento de residuos animales; prospectiva energética; leña;

INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario es considerado la base de la economía del país ya que es la que satisface la alimentación y se relaciona directamente con la explotación de recursos naturales vitales: el agua, los suelos, los bosques, las especies animales y vegetales. Este sector incluye a las actividades primarias: la agricultura, ganadería y explotación animal, pesca-caza y captura, forestería y servicios relacionados. En México, este sector ocupa el tercer puesto dentro de los medidos en cuanto a emisiones de GEI (INECC, 2022), eso se debe al uso de combustibles en su maquinaria (tractores, cosechadoras, equipos de mantenimiento), la fermentación entérica de la comida

del ganado, la demanda de fertilizantes y el bombeo de agua. Este sector económico aportó en su conjunto el 3.384% del Producto Interno Bruto (PIB) en 2019 (INEGI, 2023) del país. Sin embargo, la actividad del sector primario ha generado problemáticas socio ambientales significativas, ya que este mismo sector contribuyó con el 13.82% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se produjeron en el país en 2013. De las cuales el 21% se le atribuye a la gestión del estiércol, en la que se genera metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x y material volátil VOC, que son GEI de alto potencial de cambio climático (INECC, 2022).

En la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de 2022 (INECC, 2022) se establece un aumento en el objetivo de disminución de la cantidad de GEI del 22% al 35% para 2030, respecto a las emisiones nacionales totales proyectadas en su línea base. Y dentro de este documento específicamente para el sector primario o agropecuario, se establecen acciones prioritarias para modificar la cantidad de GEI emitidos, como el impulso a biofertilizantes y biocombustibles producidos a partir de residuos del propio sector, los cuales están ligados con su consumo de energía.

Para comprobar la viabilidad e impacto de estas acciones propuestas en documentos de la política pública, la comunidad científica recurre a técnicas de prospectiva y evaluación de la planeación energética. Entre las herramientas más usadas se encuentra el software Low Emissions Analysis Platform (LEAP) desarrollado en el Stockholm Environment Institute (Heaps, 2022), que es una herramienta open-access para la planeación energética. En un modelo de Colombia en el que utilizan LEAP se ha mostrado que es posible modelar compromisos internacionales y las repercusiones que estos tienen en el sector agropecuario. Así como las emisiones de GEI mitigadas al implementar dichas acciones en cada sub-sector de la economía. En el caso de agricultura, se visualizaron especialmente en el cambio de patrones de consumo de leña y emisiones no energéticas de la Agricultura y otros usos de suelo, derivados de la ganadería y forestería (AFOLU por sus siglas en inglés) (Correa-Laguna et al, 2021).

En trabajos previos del equipo del LIyF de la UNAM, se ha usado el software LEAP para estudiar el comportamiento tendencial del Sector Energético Mexicano (Castro et al, 2023), en el que se muestra que, de seguir con las condiciones actuales, el país superará la línea propuesta en la Estrategnia Nacional de Cambio Climático (ENCC) para 2024 y las mismas tendrían un crecimiento hasta los 920.2 $MMTCO_2e$ en el 2050. El sector agropecuario aportará el 4.8% del total de las emisiones producidas por la demanda energética del país para 2030 y demandaría un total de 433.2 PJ de petrolíferos. En especial, este trabajo analizará la prospectiva energética del sub-sector Agricultura, así como los impactos que tres escenarios prospectivos podrían generar respecto a GEI, cambios en la oferta de energía y la evaluación de las acciones propuestas en la ENCC.

ENERGÍA Y AGRICULTURA

El sector agropecuario representó el 4.6% de la demanda energética del país en 2019, del cual el 70.36% del consumo de energía pertenece al diésel, 27.21% a la electricidad y al restante al gas LP, no obstante, desde 2014 se observa un crecimiento del consumo de electricidad y una reducción en el empleo de Gas LP como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje del mix energético para el sector agropecuario de 2014-2019 (SENER, 2021)

Energético	**2014 [%]**	**2015 [%]**	**2016 [%]**	**2017 [%]**	**2018 [%]**	**2019 [%]**
Electricidad	22.7	20.2	22.6	22.9	23.5	24.6
Gas LP	3.8	3.4	2.8	2.7	2.5	1.8
Queroseno* (reportado en años anteriores)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Diesel	73.5	76.4	74.5	74.4	73.9	73.5

Sin embargo, acceder a siguientes niveles de desagregación para este sector es complicado dado que no existen fuentes o estudios que ya hayan recolectado, por ejemplo, la cantidad de energía que se requiere en la pesca o un inventario sobre la tecnología de bombeo de agua para la agricultura. Esto se debe principalmente a la precarización en general del sector, y que también se ha visto relegado en las acciones de la política pública y que acarrean las mismas metas de implementación para el rubro de energía desde la Ley de Transición Energética (LTE, 2013), hasta las más recientes propuestas de los Acuerdos promovidos por la SENER para el impulso de energía renovable (SENER, 2024).

Algunas bases de datos como el Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) (SIAP, 2023) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) o el Censo Agropecuario 2022 del INEGI, se centran en recolectar información sobre la producción económica, factores socioeconómicos de quienes ahí laboran y volumen o cantidad de producción y dedican menos preguntas a conocer las condiciones de la energía que usan. Por lo que datos sobre los sectores menos reportados como el pesquero y los servicios agropecuarios relacionados hacen difícil su modelación.

No obstante, Cruz-Delgado (2013) evalúa la relación del sector agropecuario y la energía en el periodo de 1990-2010, muestra que en términos generales este sector ha tenido un crecimiento de producción en términos del PIB del 19.81% pero su eficiencia energética ha

ido a la baja, aumentado un 57.08% el consumo de energía, 66.88% respecto al uso de diesel y 27.51% el crecimiento del uso de la electricidad. Además, en sus conclusiones replica la necesidad de incorporar otras fuentes de energía para disminuir las emisiones de GEI causadas por este aumento en la intensidad energética del sector, además de proponer una sustitución tecnológica acompañada por programas sociales y de financiamiento.

Entre las alternativas existentes para el aprovechamiento de fuentes renovables de energía en el sector agropecuario, el aprovechamiento del estiércol mediante biodigestores anaerobios que lo transforme en biogás, es propuesto en la actualización de la NDC como una medida de mitigación para este sector (INECC, 2022). No obstante, esta tecnología madura tiene la capacidad de sustituir al gas LP, gas natural o la leña usada para la cocina en las viviendas que tienen actividades agropecuarias, además de generar el suficiente biogás para sustituir al mismo gas LP en los procesos de calefacción o secado que se realizan en las actividades relacionadas al sector primario.

METODOLOGÍA

En este trabajo se realizó un análisis tendencial de las emisiones asociadas a bovinos y porcinos, que son los dos grupos animales cuya gestión de estiércol contribuye en mayor medida a las emisiones del sub-sector ganadero (INECC, 2024), así como las medidas de mitigación para éstas y el impacto que tendría el aprovechamiento máximo de este biocombustible dentro del modelo del Sistema Energético Mexicano al 2050 desarrollado por el LIyF (Castro et al, 2023), empleando la plataforma *Low Emissions Analysis Platform* (LEAP) (Heaps, 2022).

El modelo considera un periodo retrospectivo de seis años, entre 2014-2019, y una etapa prospectiva a 2050. Para dicha etapa, el crecimiento en la demanda y generación de energía están impulsados por el crecimiento económico y demográfico del país, al igual que el modelo del que se heredan estas condiciones (Castro et al, 2023). Además, la cantidad de cabezas de ganado de cada especie se obtuvo de las cifras reportadas por el Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) (SIAP, 2023), y para el escenario prospectivo, la población de estos animales crece al mismo ritmo que la población humana. En cuanto a las emisiones asociadas a la gestión del estiércol se obtuvieron de la sección relacionada a las emisiones asociadas al tratamiento de excretas animales de bovinos y porcinos del Inventario Nacional Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) (INECC, 2024), como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Población de animales bovinos y porcinos, así como las emisiones de CO_2e asociadas a cada especie (INECC, 2024; SIAP, 2023).

Año	Bovinos		Porcinos	
	Población total	Emisiones Totales [Gg de CO_2e]	Población total	Emisiones Totales [Gg de CO_2e]
2014	32,939,529.00	17,645.692	16,098,680.00	25,536.90
2015	33,502,623.00	17,988.918	16,364,459.00	25,128.49
2016	33,779,290.00	18,457.146	16,688,228.00	26,398.73
2017	34,277,868.00	18,631.186	17,210,269.00	26,807.83
2018	34,820,271.00	18,712.639	17,838,900.00	27,324.54
2019	35,224,960.00	19,142.547	18,365,289.00	27,984.89

Módulo de Transformación de Biodigestores Anaerobios

Un biodigestor anaerobio es un dispositivo que sirve como tratamiento de las excretas animales, y que como subproductos del proceso de digestión se obtiene biogás (biometano) y un lixiviado rico en nutrientes que puede ser considerado como biofertilizante. Además, como se observa en la Figura 1, esta instalación únicamente es alimentada con agua y excretas de la especie animal seleccionada (no se combinan heces de diferentes especies).

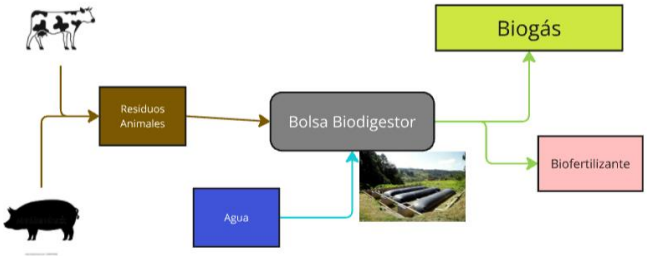


Figura 1. Diagrama que muestra el funcionamiento de un biodigestor anaerobio. Elaboración propia.

Para modelar la instalación de los biodigestores y la energía generada por los mismos se consideró una tecnología comercial denominada Sistema 30 con características de producción energética diferentes para cada especie de la cual se aprovechan los desechos (SistemaBio, 2022) y son mostradas en la tabla 2.

Tabla 2. Características del módulo de transformación del biodigestor modelado en LEAP.

Característica	Valor para Bovinos	Valor para Porcinos
Costo de Inversión Inicial [MXN/GJ/día]	46.51	42.39
Capacidad Instalada de Generación [GJ/día]	0.162	0.17775
Cantidad de animales necesarios para el funcionamiento de la instalación [cabezas]	20	81
Producción de Gas LP equivalente [kg/mes]	93	102

En cuanto a los precios de Operación y Mantenimiento se modelaron con el valor de 0.00004 MXN/GJ/día que corresponden a la sustitución mensual del filtro metálico para prevenir malos olores y disminuir la cantidad de azufre en el biogás (SistemaBio, 2021). El factor de Planta de este tipo de sistemas se definió como 98.33%, ya que en esta cifra se contemplan los 3 meses posteriores a la instalación que requiere el sistema para su arranque, dentro del tiempo de vida de la tecnología, que es de 20 años.

Escenarios Prospectivos

Los escenarios propuestos para este estudio modifican la capacidad instalada de la tecnología, es decir, el número de biodigestores instalados, además de la participación del biogás en la demanda energética tanto del sector agropecuario como del sector residencial, en el subsector rural. En cada escenario se midió la cantidad de emisiones de CO_2e mitigadas del sector agropecuario, tanto las correspondientes al consumo de energía como al tratamiento de estiércol, empleando la metodología de mitigación española para biogás de uso directo en calor de Biogás (2022) de 80 g de CO_2e/MJ, además de la proporción de la demanda de energía que es cubierta con biogás. Las condiciones de los escenarios son descritas a continuación.

Referencia (R), se mantiene la composición de la demanda energética del sector agropecuario y la tasa de instalación de biodigestores no se integra a la oferta de energía.

Descarbonizado (D), se implementan cambios sustanciales en el consumo del gas LP para el sector agropecuario y para cumplir con las metas de emisiones en 2030 se sustituye por completo por biogás. Además, para 2050 la leña del sector residencial se sustituye por completo también por el mismo biogás. Mientras que la tasa de instalación de la tecnología mantiene la cantidad de instalaciones anuales reportadas por la empresa SistemaBio (2023).

Máxima Instalación Posible (M), para este escenario se propuso que el total de las heces producidas por los animales sea procesado por instalaciones de biodigestor, con el objetivo de explorar la máxima capacidad de producción posible de biogás. En este escenario, la proporción de la demanda de diésel en el sector agropecuario baja hasta el 68% en 2030, como una de las acciones para la mitigación del sector, y cuya viabilidad se explora en la Ruta Tecnológica para el Biogás en México, como un combustible capaz de sustituir al diésel en las maquinarias agrícolas pesadas (SENER, 2017).

Tabla 3. Cantidad de Biodigestores instalados en cada escenario

Escenario	2020	2030	2040	2050
D	305,000	505,400	837,500	1,387,800
M	2,007,400	2,17,.300	2,283,500	2,338,000
R	290,000	290,000	290,000	290,000

RESULTADOS

Al correr el modelo LEAP se encontró que el sector con mayor impacto en términos de mitigación de emisiones fue el de las generadas por el tratamiento del estiércol, ya que de mantener el ritmo de instalación del escenario D será posible mitigar 19.3% de las emisiones de GEI en 2030 respecto a la línea base propuesta por la ENCC para este rubro y 17.68% más en comparación que las del escenario de Referencia. Para el año 2050, estos porcentajes se incrementan a 61.76% y 54.25% respectivamente, cómo se puede ver en la Figura 2. En lo que respecta al escenario M, los ahorros en emisiones de GEI respecto a la línea base serían de 28.12% en 2030 y 75.93% para 2050, y en comparación con el escenario de referencia serían de 26.67% en 2030 y 71.20% en 2050.

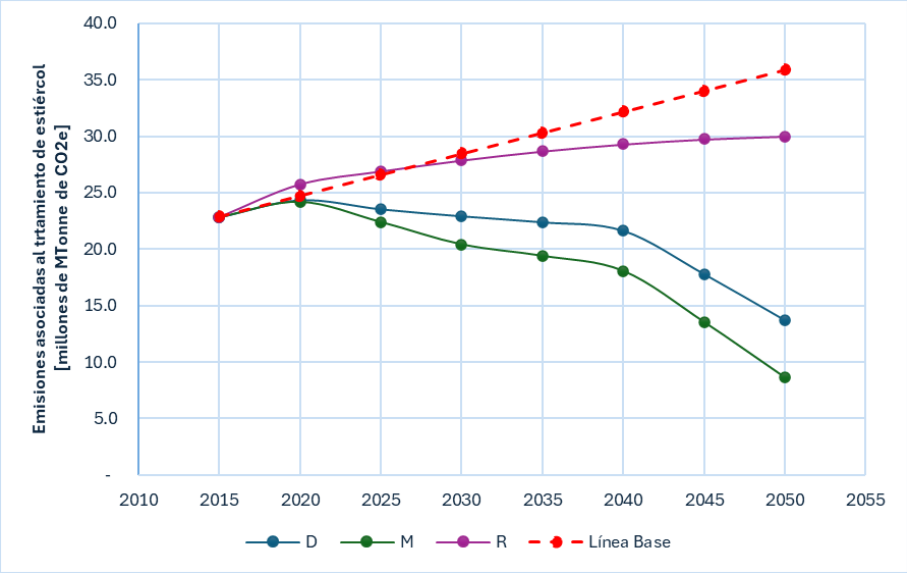


Figura 2. Proyección de las emisiones mitigadas por la instalación de biodigestores para el tratamiento de estiércol.

Las emisiones de CO_2e relacionadas con la energía del sector agropecuario en el escenario de referencia se encuentra por encima de los 10.9 millones de MTonne de CO_2e desde 2020 y supera los 31.5 millones en 2050. En comparación con este escenario, las emisiones del escenario D son 2.5% menores cada año, alcanzando los 30.8 millones en 2050. En el caso del escenario M esta proporción es de 9.8% después de 2025, y en el último año de la simulación se coloca por debajo de los 28.5 millones de MTonne de CO_2e.

En cuanto al porcentaje con el que el biogás aparta para cubrir la demanda del sector energético, se observa la evolución en la Tabla 4. Donde es notorio que los porcentajes mayores apenas superan el 1% del mix energético.

Tabla 4. Proyección del porcentaje del mix energético total cubierto por biogás.

Escenario	2020[%]	2025[%]	2030[%]	2035[%]	2040[%]	2045[%]	2050[%]
D	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8
M	0.22	0.54	0.75	0.79	0.81	0.98	1.09

CONCLUSIONES

Como se ha observado en este estudio, la introducción de biodigestores anaerobios como una alternativa de producción de biogás de manera descentralizada es una alternativa que permitiría también tratar las heces del ganado bovino y porcino semiestabulado. Mediante esta tecnología, se podría alcanzar una contribución del 0.75% para el año de 2030 en la matriz energética y se mitigaría un 28.12% de CO_2e, con lo cual estaríamos cerca de cumplir las metas aceptadas por México en el NDC para este subsector. No obstante, la aportación de este escenario al total de los GEI mitigados en el sector agropecuario (primario) nacional sería de un 6.55% para 2030.

Aunque en términos energéticos la contribución del biogás no alcanza a sustituir en gran medida a los combustibles fósiles, esta alternativa descentralizada puede generar un gran impacto socioeconómico positivo para quienes instalen esta tecnología. Ya que tiene el potencial de sustituir completamente al gas LP dentro del sector agropecuario y por completo a la demanda de leña del sector residencial, donde el uso de la misma se centraliza en comunidades rurales y periurbanas que tienen actividades campesinas, con implicaciones en la salud y en el ambiente.

Si bien en este texto no se analizan las formas, políticas públicas o mecanismos financieros para alcanzar la cantidad de instalaciones que se esperan alcanzar con cada escenario, es importante destacar que estos factores serán clave para lograr los objetivos de mitigación propuestos para estos escenarios. Desafortunadamente las propuestas que el gobierno ha impulsado desde la LTE y hasta la fecha no han permitido diagnosticar el sector en términos de consumo de energía, y tampoco se han generado mecanismos que financien esta transición tecnológica.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la UNAM, proyecto PAPIIT IN111623 “Validación de metodología para integración y actualización de escenarios energéticos para México al 2050”, por los recursos otorgados para el desarrollo de este trabajo.

Al Stockholm Environment Institute por las licencias académicas brindadas para acceder al software Low Emissions Analysis Platform (LEAP).

REFERENCIAS

Biogas. (2022). Guía para la Justificación de la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. https://sede.idae.gob.es/sites/default/files/documentos/2022/BIOGAS/8._Guia_calculo_de_reduccion_de_GEI_(Actualizado_a_fecha_21.09.202).pdf

Castro, J. C., Flores-Palafox, V., Avila-Nuñez, A., de la Rosa-Albino, A. J., Cedano-Villavicencio, K. G. & Martínez-Fernández, M. (2023, octubre 2-6) Estudio Tendencial del Sector Energético Mexicano de 2019 a 2050. [Conference presentation]. XLVII Semana Nacional de Energía Solar, Chetumal, Quintana Roo, México. https://drive.google.com/file/d/1o2ra23xKQ9tl7zKEpsuQwvFV11dsAbOu/view

Correa-Laguna, J. D., Pelgrims, M., Espinosa Valderrama, M., & Morales, R. (2021). Colombia’s GHG Emissions Reduction Scenario: Complete Representation of the energy and non-energy sectors in leap. Energies, 14(21), Article 7078. https://doi.org/10.3390/en14217078

Cruz-Delgado, J. D. (2013) Energía y Agricultura en México. [Master Thessis, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000691154/3/0691154.pdf

Heaps, C.G., 2022. LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.105] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. https://leap.sei.org

INECC. (2024). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) [Base de Datos]. https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei

INECC (2022) Contribución Determinada a nivel Nacional Actualización 2022 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf

INEGI. (2019). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Fuentes y metodologías. Año base 2013. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/pibact/2013/metodologias/METODOLOGIA_CBYSB2013.pdf

Ley de Transición Energética [LTE]. 24 de diciembre de 2015. México. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf

Secretaría de Gobernación. (2024). Acuerdo por el que se aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios. . https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5714865&fecha=23/01/2024#gsc.tab=0

SENER (2017). Mapa de Ruta Tecnológico de Biogás. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329895/Mapa_Ruta_Tecnologica_BIOGAS_Final-Red.pdf

SENER (2022) Balance Nacional de Energía 2021. Secretaría de Energía (SENER): Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf

SIAP (2023). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). [Base de Datos]. https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430

SistemaBio (2021) Manual de Usuario. https://sistema.bio/wp-content/uploads/ESP_Manual_2021.pdf

SistemaBio (2023). Narrativo: 2022 Reporte Anual. https://sistema.bio/wp-content/uploads/23.03_REPORTE-ANUAL_ESP_web.pdf

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DE GaN CODOPADAS CON Mg y Zn

Erick Gastellóu, Rafael García, Ana M. Herrera, Antonio Ramos
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, C.P. 83190, México; erick.gastellou@unison.mx (E.G.); rgarcia@cifus.uson.mx :(R.G.), ana.herrera@unison.mx (A.H.); antonio.ramos@unison.mx (A.R.);
Erick Gastellóu, Jorge A. Rodríguez, Mario Robles
División de Sistemas Automotrices, Universidad Tecnológica de Puebla (UTP), Puebla, Puebla, C.P. 72300, México; tel: 2224699594; erick_gastellou@utpuebla.edu.mx; (E.G); jorge.rodriguez@utpuebla.edu.mx; (J.R.); mario.robles@utpuebla.edu.mx; (M.R.)
Gustavo A. Hirata
Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ensenada, Baja California, C.P. 22800, México; hirata@cnyn.unam.mx ;(G.H.)
Yani D. Ramírez
Departamento de Investigación y Desarrollo, Universidad Tecnológica de Puebla (UTP), Puebla, Puebla, C.P. 72300, México; yani.ramirez@utpuebla.edu.mx ;(Y.R.)

RESUMEN

Se depositaron películas de GaN co-dopado con Mg-Zn mediante sputtering en un ambiente de N_2 y Ar_2 a temperatura ambiente, utilizando un objetivo preparado con polvos de GaN co-dopado con Mg-Zn. Los patrones de difracción de rayos X mostraron picos amplios con un tamaño de cristal promedio de 13.6585 nm y constantes de red para la estructura hexagonal con a = 3.1890 Å y c = 5.1855 Å. Las micrografías de microscopía electrónica de barrido y las imágenes de microscopía de fuerza atómica demostraron homogeneidad en el depósito de las películas y buena morfología superficial con una rugosidad promedio de 1.052 nm. Las caracterizaciones mediante espectroscopia de dispersión de energía y espectroscopia fotoelectrónica de rayos X mostraron la presencia de galio y nitrógeno como contribuciones elementales, así como zinc y magnesio como elementos codopantes. La perfilometría mostró un valor de 260.26 nm de espesor en las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn. Finalmente, la fotoluminiscencia demostró una emisión de energía fundamental ubicada a 2.88 eV (430.55 nm), que podría estar relacionada con la incorporación de átomos de magnesio y zinc.

ABSTRACT

Mg-Zn co-doped GaN films were deposited by radio-frequency magnetron sputtering in N_2-Ar_2 environment at room temperature, using a target prepared with Mg-Zn co-doped GaN powders. X-ray diffraction patterns showed broad peaks with an average crystal size of 13.6585 nm, and lattice constants for the hexagonal structure with a = 3.1890 Å, and c = 5.1855 Å. Scanning electron microscopy micrographs and atomic force microscopy images demonstrated homogeneity in the deposit of the films and good surface morphology with a roughness average of 1.052 nm. Energy-dispersive spectroscopy and x-ray photoelectron spectroscopy characterizations showed the presence of gallium, and nitrogen as elemental contributions, as well as zinc and magnesium as codoping elements. Profilometry showed a value of 260.26 nm of thickness in the Mg-Zn co-doped GaN films. Finally, photoluminescence demonstrated an energy fundamental emission located at 2.88 eV (430.55 nm), which might be related to the incorporation of magnesium and zinc atoms.

Palabras Clave: Polvo; GaN; Red Cristalina; Sputtering; Película

1. Introducción

Hoy en día, la escasez global de semiconductores ha impactado a diferentes industrias como la electrotecnología, la automotriz y la biomedicina [1]. Uno de los principales semiconductores actualmente es el GaN, el cual pertenece a la familia III-Nitruro. Este semiconductor es muy utilizado debido a su amplia banda prohibida de 3.4 eV para la estructura wurzita o 3.2 eV para la estructura cristalina zincblenda. El GaN tiene sus principales aplicaciones en celdas solares, pantallas LED, tecnología LED, transistores de alta movilidad de electrones (HEMT), dispositivos de microondas, fotocatálisis y diodos láser [2 - 7]. Sin embargo, el dopaje y co-dopaje de GaN ha despertado el interés de los investigadores debido a que estas técnicas pueden variar sus propiedades estructurales, ópticas y eléctricas. Algunos trabajos han investigado la obtención de GaN co-dopado con diferentes elementos dopantes.

Liu et al., presentan la obtención de películas de GaN co-dopado con Si-Ti mediante sputtering con una capa de amortiguamiento de óxido de zinc (ZnO) sobre sustratos de vidrio amorfo, donde las películas tipo n tenían una resistividad de $2{,}6\times10^{-1}$. Ω-cm [8]. Sun et al., fabricaron películas de GaN co-dopadas con Sm-Eu mediante co-implantación de iones en un plano c, luego de realizar un proceso de recocido. Estudiaron las características estructurales, morfológicas y magnéticas [9]. Jeong et al., crecieron películas co-dopadas con Mg-Mn con bajas concentraciones de Mg y Mn mediante epitaxia de haz molecular mejorada con plasma (PEMBE), donde las muestras mostraron una conductividad tipo n y ferromagnetismo a temperatura ambiente [10]. Kim et al., obtuvieron películas de GaN co-dopadas con Mg-Si mediante deposición química de vapor metalorgánico (MOCVD), donde se obtuvo una alta conductividad tipo p, además de la adsorción competitiva entre Mg y Si durante el crecimiento [11].

En otro trabajo, Kim et al. mostraron las características de dopaje de películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn crecidas mediante deposición química de vapor metalorgánico (MOCVD), donde se obtuvo una conductividad tipo p con una concentración de huecos de $8{,}5\times10^{17}$ cm^{-3}. Es importante mencionar que en este último trabajo solo se estudiaron las características eléctricas [12]. Naito et al. presentan el crecimiento

epitaxial mediante deposición por sputtering pulsado (PSD) de GaN co-dopado con In-Mg con una concentración de huecos de $6,2 \times 10^{18}$ cm^{-3} sin degradación estructural [13].

Este trabajo presenta la obtención y el análisis estructural de películas de GaN co-dopado con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2, utilizando targets preparados con polvos de GaN codopados con Mg-Zn. Se espera que el entorno de crecimiento en el plasma de N_2-Ar_2 mejore la calidad cristalina de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn, donde estas películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn podrían tener aplicación en biosensores ó celdas solares eficientes [14]. Las propiedades estructurales de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn se caracterizaron mediante patrones de difracción de rayos X (XRD), además la morfología y topografía de la superficie se midieron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM). Por otro lado, las contribuciones elementales se caracterizaron mediante espectroscopia de dispersión de energía (EDS) y espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS). Para medir el espesor de las películas se utilizó perfilometría y para medir la emisión de energía de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn se utilizó la técnica de fotoluminiscencia (PL).

2. Experimental

Las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn se depositaron mediante sputtering en un ambientede N_2-Ar_2 sobre sustratos de silicio (100) a temperatura ambiente, utilizando targets preparados con polvos de GaN codopados con Mg-Zn, los cuales se sintetizaron como menciona un trabajo anterior Gastellóu et al., [15]. Por lo tanto, utilizando el proceso de referencia [15] se sintetizaron 11,1652 g de polvos de GaN codopados con Mg-Zn con un porcentaje de 0.4 % de magnesio y 0.6 % de zinc. Una vez sintetizados los polvos de GaN codopados con Mg-Zn, se prepararon los targets de GaN co-dopados con Mg-Zn siguiendo el proceso presentado en otro de nuestros trabajos anteriores, Gastellou et al., [16]. Es importante mencionar que el target tuvo 50.8 mm de diámetro, mientras que el de espesor fue de 5 mm. Obtenido el target de GaN co-dopado con Mg-Zn, los sustratos de silicio (100) se limpiaron con un proceso convencional de solventes y soluciones para eliminar residuos orgánicos, y luego se colocaron dentro de un vaso de precipitado con metanol para preparar su introducción en la cámara de sputtering. Las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn se depositaron utilizando un equipo de Intercovamex Sputtering System V1 con las siguientes condiciones; una distancia de separación entre el sustrato y el target de 40 mm, el vacío de la cámara alcanzó una presión de 2×10^{-6} Torr antes del crecimiento de la película. Durante el proceso de pulverización se utilizaron flujos de N_2-Ar_2 (50 % - 50 %), además de una potencia de RF de 60W, se mantuvo una presión de gas de 15×10^{-3} Torr durante el depósito de la película, donde se generó un plasma violeta durante el crecimiento, con un tiempo de depósito de 3 h. La Figura 1 muestra el plasma violeta generado, que se produce por la mezcla de nitrógeno y argón, durante el depósito de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn.

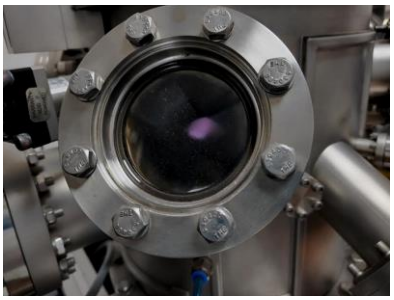


Figura 1. Plasma violeta generado durante el depósito de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn.

2.1. Caracterizaciones

Las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2 se caracterizaron mediante patrones de difracción de rayos X (XRD) utilizando un equipo Bruker AXS D8 Discover con una longitud de onda (Cu Kα) de 1.5406 Å. en un rango de 20 a 60 grados, con difracción de rayos X de incidencia rasante (GIXRD). La perfilometría para medir el espesor de las películas se realizó utilizando un perfilometro Dektak 150. La morfología de la superficie y las contribuciones elementales (SEM-EDS) se midieron utilizando un equipo de emisión de campo Schottky JEOL JSM-7800F. El análisis de la topografía de la superficie de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn se realizó utilizando un microscopio de fuerza atómica (AFM) Veeco Nanoscope IIIa. Las mediciones de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) se realizaron utilizando un equipo Escalab 250Xi Brochure con un rango de energía de 0 a 12 KeV. Finalmente, los espectros de fotoluminiscencia (PL) se realizaron a temperatura ambiente con una longitud de onda de excitación de 312 nm Hitachi F-7000 FL con lámpara de xenón de 150 W.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis Estructural

Se depositaron películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2. La Figura 2 muestra los patrones de difracción de rayos X de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn (Figura 2a)), que se indexaron en la tarjeta PDF ICDD No. 00-050-0792 (Figura 2b)). En la Figura 2a), el pico **a** pertenece al plano (100), el pico **b** está ubicado en el plano (002), el pico **c** pertenece al plano (101), el pico **d** está ubicado en el plano (102) , y el pico **e** pertenece al plano (110). Las constantes de la red para las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn se calcularon utilizando la tarjeta PDF ICDD No. 00-050-0792 para la estructura hexagonal con a = 3,1890 Å,

y c = 5,1855 Å para el grupo espacial P63mc, con una relación c/a de 1.62. Los patrones de difracción de rayos X de la Figura 2a), mostraron para el pico **a** un FWHM de 0.5418°, con un tamaño de cristal de 15.9338 nm y un espaciado interplanar de 2.7847 Å. La medida FWHM para el pico **b** tuvo un valor de 0.9560°, con un tamaño de cristal de 9.0839 nm y un espaciamiento interplanar de 2,6083 Å. El pico **c** tuvo un FWHM de 0,6772°, con un tamaño de cristal de 12.9042 nm, y un espaciamiento interplanar de 2.4517 Å, mientras que el pico **d** tuvo un FWHM de 0,7143°, con un tamaño de cristal de 12.7069 nm, y un espaciamiento interplanar de 1.9001 Å. Finalmente, el pico **e** tuvo un FWHM de 0.5350°, con un tamaño de cristal de 17.6637 nm y un espaciamiento interplanar de 1,6086 Å. Utilizando el software ICCD PDF-4+2022 y la ecuación de Debye-Scherrer se calculó el tamaño promedio de los cristales encontrando un valor de 13.6585 nm, lo que podría indicar que el ensanchamiento de los picos en la Figura 2a) podría estar asociado con la presencia de nanocristales, como lo demuestran García et al. [17]. Los picos de XRD más definidos que se muestran en este trabajo estarían relacionados con el ambiente de nitrógeno con argón (50% - 50%) para las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn, lo que contrasta con los picos de XRD presentados en nuestro trabajo anterior en ambiente de nitrógeno (100%) [16].

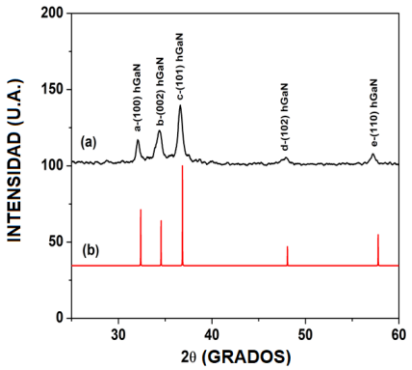


Figura 2. Patrones de difracción de rayos X: (a) películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2, (b) tarjeta PDF ICDD No. 00-050-0792.

3.2 Microscopía Electrónica

La Figura 3 muestra las micrografías SEM de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2. Figura 3a), demostró una morfología de superficie donde el depósito mediante sputtering generó una buena cohesión entre el sustrato de silicio y la película con un aumento de 5000X. Además, en la Figura 3a se puede observar una buena morfología uniforme. Figura 3b), también mostró una buena homogeneidad en el depósito de las películas de GaN codopadas con Mg-Zn con un aumento de 50000X, sin embargo, se pudieron observar pequeños aglomerados en la superficie, lo que podría estar relacionado con defectos estructurales como el oxígeno intersticial. Este intersticial de oxígeno podría formarse durante el efecto de histéresis debido al crecimiento mediante sputtering

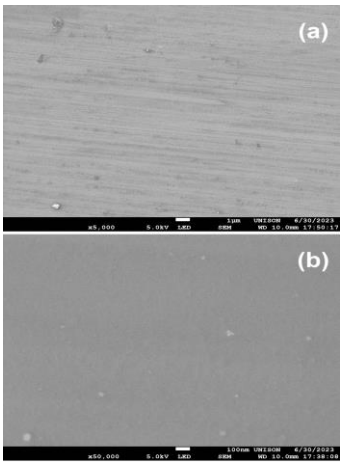


Figura 3. Micrografías SEM de películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn con aumentos de: (a) 5000X y (b) 50000X.

La Figura 4 muestra el espectro EDS del análisis elemental para las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2, donde se encontraron las contribuciones elementales de galio Lα-1.098 eV y Kα-9.241 eV. Además,

el aporte elemental de nitrógeno se encontró en Kα-0.392 eV, también el aporte elemental de magnesio se encontró en Kα-1.253 eV. Finalmente, el aporte elemental del zinc se encontró en Lα-1.012 eV. Los porcentajes atómicos para el análisis EDS fueron galio (49,66 %), nitrógeno (31,81 %), zinc (0,60 %) y magnesio (0,32 %). Para encontrar el espesor de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2 se utilizó la técnica de perfilometría, la cual tuvo un valor de 260.26 nm.

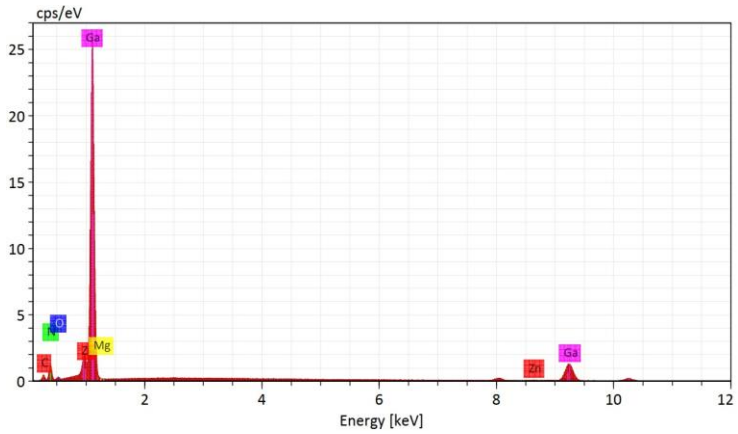


Figura 4. Análisis EDS de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2 .

La Figura 5, muestra el análisis de la topografía de la superficie utilizando la técnica de microscopía de fuerza atómica (AFM). La Figura 5, ilustra las imágenes topográficas AFM 2D (Figura 5a)) y 3D (Figura 5b)) para las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2. Las imágenes AFM se midieron en un área de 9 × 9 μm^2. En la Figura 5, utilizando el software Gwyddion se calculó la rugosidad promedio de 1.052 nm, mientras que la rugosidad cuadrática media tuvo un valor de 1.466 nm y la profundidad máxima del valle de rugosidad fue de 5.744 nm. Estas imágenes AFM demostraron una buena morfología de la superficie, además de una buena homogeneidad, lo que concuerda con las micrografías SEM para el depósito de películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn [9].

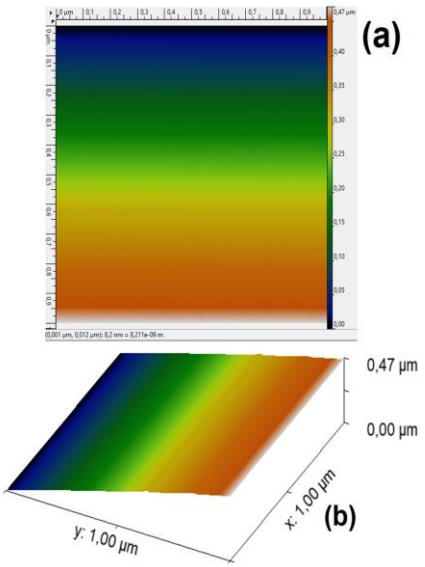


Figura 5. (a) AFM 2D, (b) Imágenes AFM 3D de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2.

3.3. Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X

La Figura 6 muestra los espectros XPS para las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un entorno de N_2-Ar_2. La Figura 6a) presenta los picos para altas energías de Ga $2P_{1/2}$ y Ga $2P_{3/2}$, con valores de 1146.3697 eV y 1119.7489 eV

respectivamente. La Figura 6b) presenta el pico N 1s con un valor energético de 399.2179 eV. La Figura 6c) presenta el pico de Zn $2P_{3/2}$ con un valor de energía de 1019.4901 eV, mientras que la Figura 6d) muestra el pico de Mg $2P_{3/2}$ con una energía de enlace de 49.7896 eV. Estos resultados concuerdan con los encontrados en el análisis EDS, debido a la presencia de los aportes elementales de galio, nitrógeno, magnesio y zinc.

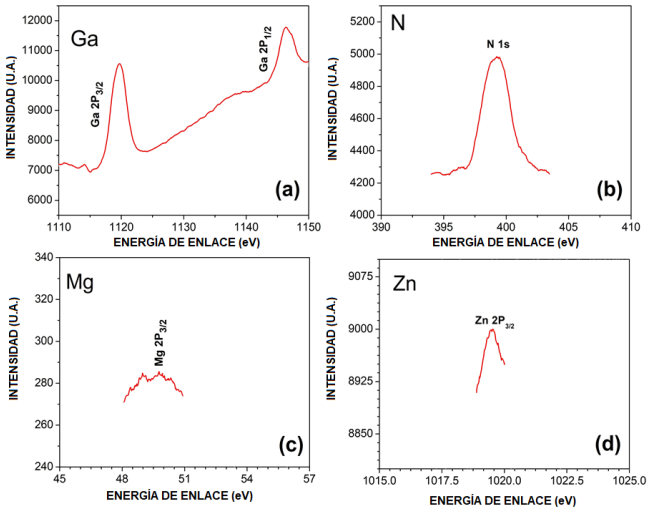


Figura 6. Espectros XPS para películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2: a) Ga $2P_{3/2}$ y Ga $2P_{1/2}$, b) N 1s, c) Mg $2P_{3/2}$, d) Zn $2P_{3/2}$.

3.4 Fotoluminiscencia

La Figura 7 muestra el espectro de fotoluminiscencia de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2. La Figura 7 muestra cuatro emisiones de energía. La emisión de energía ***a*** corresponde a 2.88 eV (430.55 nm) y podría estar relacionada con la incorporación de átomos de magnesio y zinc. La luminiscencia azul (BL) para la incorporación de átomos de zinc a GaN tiene un valor de 2.88 eV, mientras que la luminiscencia azul (BL) para la incorporación de átomos de magnesio a GaN tiene un valor de 2.7 a 3.0 eV [18]. Por lo tanto, este valor de emisión de energía concuerda con la incorporación de zinc y magnesio al GaN para la obtención del codopado, además, concuerda con los análisis EDS y XPS. La emisión de energía ***b*** se ubicó en 2.27 eV (546.25 nm), lo que podría estar relacionado con impurezas no intencionales de carbono en la luminiscencia amarilla (YL). Estas impurezas de carbono podrían deberse a un pequeño aporte elemental que aparece en el análisis EDS. La energía de emisión ***c*** ubicada en 2.13 eV (582.15 nm) también está relacionada con impurezas no intencionales de carbono, mientras que la energía de emisión ***d*** se ubicó en 2.00 eV (620 nm), y pertenece a la luminiscencia roja (RL) de GaN.

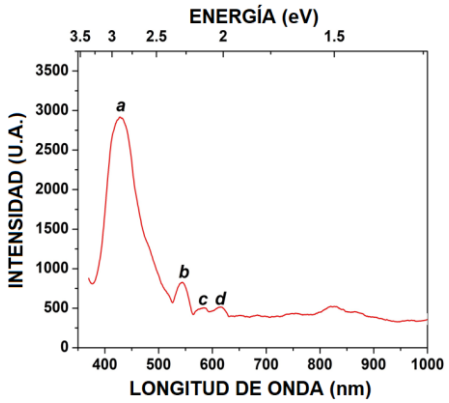


Figura 7. Espectro de fotoluminiscencia de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn depositadas mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2.

4. Conclusiones

Se depositaron películas de GaN co-dopado con Mg-Zn mediante sputtering en un ambiente de N_2-Ar_2 a temperatura ambiente, utilizando un objetivo preparado con polvos de GaN co-dopado con Mg-Zn. Los patrones de difracción de rayos X (DRX) mostraron un pico de mayor intensidad con un FWHM de 0.6772°, un tamaño de cristal de 12.9042 nm, un espaciado interplanar de 2.4517 Å y un tamaño de cristal promedio de 13.6585 nm. Las micrografías SEM mostraron una buena homogeneidad en el depósito, lo que concuerda con las imágenes AFM con una rugosidad promedio de 1.052 nm. La perfilometría tuvo un valor de 260.26 nm de espesor de las películas de GaN co-dopadas con Mg-Zn. El espectro EDS y el análisis XPS demostraron la presencia de galio y nitrógeno como aportes elementales, además del codopado con zinc y magnesio. Finalmente, el espectro PL mostró que la energía de emisión fundamental corresponde a 2.88 eV (430.55 nm) y podría estar relacionada con la incorporación de átomos de magnesio y zinc en la luminiscencia azul (BL).

Referencias

1. Wassen Mohammad, Adel Elomri, Laoucine Kerbache, The Global Semiconductor Chip Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedies, IFAC-PapersOnLine, Volume 55, Issue 10, 2022, pp. 476-483, DOI:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439.
2. W. Kwon et al., "Reverse Leakage Mechanism of Dislocation-Free GaN Vertical p-n Diodes," in IEEE Electron Device Letters, vol. 44, no. 7, pp. 1172-1175, July 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3274306.
3. M. Fanciulli et al., Conduction-electron spin resonance in zinc-blende GaN thin films, Physical Review B 20(48) 1993 pp. 15-144 – 15-147 DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.15144.
4. Sami Bolat, Burak Tekcan, Cagla Ozgit-Akgun, Necmi Biyikli, Ali Kemal Okyay, Electronic and optical device applications of hollow cathode plasma assisted atomic layer deposition based GaN thin films, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films 33, 01A143 (2015); DOI:10.1116/1.4903365.
5. Dae-Sik Lee et al., GaN thin films as gas sensors, Sensors and Actuators B 6989 (2003) 1–6, DOI: 10.1016/S0925-4005(03)00008-X.
6. Shanjin Huang et al., Mechanical Properties of Nanoporous GaN and Its Application for Separation and Transfer of GaN Thin Films, ACS Appl. Mater. Interfaces 2013, 5, 21, 11074–11079, DOI:https://doi.org/10.1021/am4032345.
7. Hye Seong Jung et al., Photocatalysis Using GaN Nanowires, ACS Nano 2008, 2, 4, 637–642, DOI:https://doi.org/10.1021/nn700320y.
8. Liu, W.-S.; Chang, Y.-L.; Tan, C.-Y.; Tsai, C.-T.; Kuo, H.-C. Properties of N-Type GaN Thin Film with Si-Ti Codoping on a Glass Substrate. Crystals 2020, 10, 582. https://doi.org/10.3390/cryst10070582.
9. Lili Sun, Chao Liu, Jianming Li, Junxi Wang, Fawang Yan, Yiping Zeng, Jinmin Li, Structural and magnetic properties of GaN:Sm:Eu films fabricated by co-implantation method, Materials Letters, Volume 64, Issue 9, 2010, Pages 1031-1033, DOI:https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.01.087.
10. Min-Chang Jeong, Moon-Ho Ham, Jae-Min Myoung, Sam Kyu Noh, Room-temperature ferromagnetism of Mg and Mn co-doped GaN films grown by PEMBE, Applied Surface Science, Volume 222, Issues 1–4, 2004, Pages 322-326, DOI:https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.09.001.
11. Ki Soo Kim, Gye Mo Yang, Hyung Jae Lee, The study on the growth and properties of Mg doped and Mg–Si codoped p-type GaN, Solid-State Electronics, Volume 43, Issue 9, 1999, pp. 1807-1812, DOI:https://doi.org/10.1016/S0038-1101(99)00125-2.
12. Kim, K. S., Codoping characteristics of Zn with Mg in GaN, Applied Physics Letters, vol. 77, no. 8, AIP, 2000. DOI:doi:10.1063/1.1289494.
13. Aiko Naito, Kohei Ueno, Atsushi Kobayashi, Hiroshi Fujioka, Hole Conduction Mechanism in In–Mg-Codoped GaN Prepared via Pulsed Sputtering Deposition, Phys. Status Solidi A 2024, 2300806 pp. 1-4, DOI:10.1002/pssa.202300806.
14. S.A. Jewett et al., Gallium nitride is biocompatible and non-toxic before and after functionalization with peptides. Acta Biomaterialia 8(2012) 728 – 733. DOI:10.1016/j.actbio.2011.09.038.
15. Gastellóu, E.; García, R.; Herrera, A.M.; Ramos, A.; García, G.; Hirata, G.A.; Luna, J.A.; Carrillo, R.C.; Rodríguez, J.A.; Robles, M.; et al. Obtaining of Mg-Zn Co-Doped GaN Powders via Nitridation of the Ga-Mg-Zn Metallic Solution and Their Structural and Optical Properties. Materials 2023, 16, 3272. DOI:https://doi.org/10.3390/ma1608327.
16. Gastellóu, E.; García, G.; Herrera, A.M.; Morales, C.; García, R.; Hirata, G.A.; Rosendo, E.; Luna, J.A.; Robles, M.; Rodríguez, J.A.; et al. Effects in the Optical and Structural Properties Caused by Mg or Zn Doping of GaN Films Grown via Radio-Frequency Magnetron Sputtering Using Laboratory-Prepared Targets. Appl. Sci. 2021, 11, 6990. DOI:https://doi.org/10.3390/app11156990.
17. Rafael Garcia, Gustavo A. Hirata, Alan C. Thomas, Fernando A. Ponce, Structure and luminescence of nanocrystalline gallium nitride synthesized by a novel polymer pyrolysis route, Opt. Mater. 29 (2006) 19–23, DOI:https://doi.org/10.1016/j.optmat.2006.03.004.
18. Michael A. Reshchikov, Hadis Morkoç, Luminescence properties of defects in GaN, J. Appl. Phys. 97 (2005), 061301-1 - 061301-95. DOI:https://doi.org/10.1063/1.1868059.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

Evaluación de propuestas de políticas públicas para la instalación de Sistemas Fotovoltaicos Distribuidos en la Prospectiva energética del sector residencial nacional de 2019-2050

Alberto Avila Nuñez, Alejandro Rodríguez Guerra, Juan Carlos Castro Domínguez, Alan Juan de la Rosa Albino, Karla G. Cedano Villavicencio & Manuel Martínez Fernández
Laboratorio de Innovación y Futuros, Instituto de Energías Renovables de la UNAM, Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México, Tel. 777 362 0096, aavnu@ier.unam.mx.

RESUMEN

La transición energética se centra usualmente en cambios a la matriz energética de los más importantes sectores económicos. Sin embargo, el sector residencial mexicano, que aportó el 2.74% de los GEI inventariados en 2021, tiene un amplio potencial de descarbonización e implementación de acciones de eficiencia energética, como la generación distribuida.

En México, este sector representó el 14.83% de la demanda de energía nacional en 2022, mientras que la requerida por los servicios públicos, que sirven principalmente al sector residencial, requirieron el 0.28% de la demanda. Ambos sectores tienen la particularidad de que su demanda energética está acoplada al crecimiento de la población, por lo que los impulsores de futuro seleccionados para la modelación en el software LEAP de este fenómeno fueron la cantidad de personas y viviendas.

En este artículo se proponen 3 escenarios que reflejan las propuestas de diferentes políticas públicas para que México amplíe el potencial instalado de minicentrales de generación solar fotovoltaica (SFV) distribuida para 2050: Referencia (R), que toma la tasa de crecimiento de los datos históricos de instalación entre 2020-2024; Proméxico (PM), cuyo objetivo era la instalación de 4 millones de SFV que suman una capacidad instalada de 4,000 MWp para 2030; y el escenario SENER (S), cuya meta es alcanzar los 12,400 MWp de SFV instalados para el 2030. En cada uno de los escenarios se propone que la tasa de crecimiento de la capacidad instalada de SFV se mantenga al ritmo que marca cada caso hasta llegar a 2050.

Por medio de LEAP, se obtuvo que el escenario S en 2050 puede generar ahorros en el sector residencial de 140 millones de GWh/año y aporta el 16% de la demanda energética del sector residencial, mientras que el escenario PM ahorra 60 millones de GWh/año y cubre el 7% de la demanda.

ABSTRACT

The energy transition is usually focused on changes to the most important economic sectors of the energy matrix, however the Mexican residential sector, which contributed 2.74% of the GHGs inventoried in 2021, has ample potential for decarbonization and implementation of energy efficiency actions, such as distributed generation.

In Mexico, this sector accounted for 14.83% of national energy demand in 2022, while that required by public services, which mainly serve the residential sector, was responsible for 0.28% of demand. Both sectors have the particularity that their energy demand is coupled to population growth, so the future drivers selected for modeling in LEAP software of this phenomenon were the number of people and households.

This article proposes 3 scenarios that reflect the proposals of different public policies for Mexico to expand the installed potential of distributed solar photovoltaic (PV) mini-plants by 2050: Reference (R), which takes the growth rate of historical installation data between 2020-2024; Proméxico (PM), whose target is the installation of 4 million SFVs totaling an installed capacity of 4,000 MWp by 2030; and the SENER scenario (S), whose goal is to reach 12,400 MWp of installed SFV by 2030. In each of the scenarios, it is proposed that the growth rate of installed SFV capacity be maintained at the rate set in each case until 2050.

By using LEAP, it was found that the S scenario in 2050 can generate savings in the residential sector of 140 million GWh/year and contributes 16% of the energy demand of the residential sector, while the PM scenario saves 60 million GWh/year and covers 7% of the demand.

Palabras claves: prospectiva energética, energía solar fotovoltaica, evaluación de políticas públicas, generación distribuida, residencial, servicios públicos.

INTRODUCCIÓN

El sector residencial actualmente representa el 14.83% de la energía consumida en el país, además se le puede atribuir la demanda de servicios públicos, que se refiere al alumbrado público, bombeo de agua para consumo y tratamiento, y que contribuye con el 0.28% del mix de demanda energética nacional (SENER, 2022). En términos de su contribución a las emisiones anuales totales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), el sector representa actualmente cerca del 4% de los GEI reportados en la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) actualizada en 2020 (INECC, 2021). Y para contrarrestar estas emisiones y cumplir con las metas internacionales como las propuestas en el Objetivo 7 de los ODS (ONU, 2024), se han propuesto mecanismos para la implementación de medidas de eficiencia energética tales como una sustitución gradual de tecnologías, sustitución de energéticos legados como la leña o el queroseno, y propuestas para el fomento de la generación distribuida.

El Gobierno Federal ha generado políticas públicas que buscan integrar estas metas y tecnologías de energía renovable en el sector energético nacional, lo cual ha permitido que cerca del 3.2% de la electricidad generada en el país en 2020 fuese producida con tecnología fotovoltaica (SENER, 2022). No obstante, el alto potencial solar que tiene el país permite que prácticamente sea factible instalar un sistema de generación fotovoltaica en cada tejado de las viviendas existentes. Para aprovechar dicho potencial, algunos programas públicos como el Programa de

Apoyo a la Generación Distribuida del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) han financiado cerca 227 millones de pesos para la instalación de 6.74 MWp instalados en el sector residencial (FIDE, 2024). Sin embargo, la capacidad instalada de este tipo de sistemas aún tiene un gran margen de crecimiento, para lo cual debe recibir impulso desde la administración pública para la democratización al acceso de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV), y que se potencien alianzas con el sector privado relacionado a esta área para multiplicar las instalaciones en el sector residencial. Por lo cual en este estudio se pretenden analizar dos documentos de propuestas por diferentes instancias como metas de las políticas públicas a implementarse en el país, para la promoción de la industria solar fotovoltaica, los cuales son detallados más adelante en la sección de Escenarios Prospectivos.

Para el fin de evaluar políticas públicas es comúnmente empleada la plataforma Low *Emissions Analysis Platform* (LEAP) en la cual es posible modelar por completo las dinámicas de oferta, transformación y demanda de un Sistema Energético (Heaps, 2022). Por mencionar un par de ejemplos, Acosta-Pazmiño et al (2021) analizaron el potencial de ahorro de emisiones en el sector mexicano de Industria de Bebidas y Alimentos al incorporar sistemas interconectados fotovoltaicos; por otra parte, Fontalvo et al (2018) analizaron el potencial energético solar total para Ecuador que puede instalarse en el sector residencial, industrial y comercial. Además, usualmente los estudios realizados con esta herramienta utilizan dentro de sus escenarios a la energía solar, pero no se enfocan solamente en analizar escenarios de capacidad instalada para dicha tecnología.

Se ha modelado completamente al Sector Energético Nacional (SEN) en cuanto a los procesos de transformación de energía del país, la demanda energética de todos los subsectores y los recursos energéticos disponibles (Castro et al, 2022), y cuenta con datos históricos sobre el consumo de energía del sector entre 2014-2019. En este caso, se hace un análisis prospectivo hacia 2050 acerca de la incorporación de SFV distribuidos con énfasis en la mitigación de las emisiones y el ahorro de energía del sector residencial en tres escenarios distintos empleando el software LEAP lo cual se explica más a fondo en la sección de Metodología y en los Resultados.

ENERGÍA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Para el periodo de retrospectivo, este sector tuvo el siguiente comportamiento según datos de los reportes del Balance Nacional de Energía publicados para el periodo de 2014 a 2019, los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición porcentual de la demanda energética por combustible del sector residencial [%].

Combustible	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Solar	0.601	0.700	0.806	0.854	0.935	1.052
Leña	33.697	33.477	33.238	33.303	32.748	33.103
Gas licuado	34.093	33.550	32.707	32.790	32.402	30.849
Querosenos	0.253	0.340	0.254	0.000	0.000	0.000
Gas natural	5.285	4.956	4.948	4.721	3.965	3.998
Energía eléctrica	26.072	26.977	28.048	28.333	29.950	30.997

En este periodo en general se observa una fuerte presencia de petrolíferos (gas licuado o LP y querosenos) que se utilizan principalmente para la cocina, calentamiento de agua y espacios, y biomasa en el sector, los cuales representan al menos el 60% de la demanda anual. Sin embargo, se observa una tendencia de crecimiento de la energía solar, que para 2019 ya representaba el 1.052% del consumo final de energía, principalmente aprovechada para el calentamiento de agua y secado de alimentos. En cuanto a la electricidad, Martínez-Montejo & Sheinbaum-Pardo (2016) reportan que durante la primer década del siglo XXI, el 91% del consumo eléctrico promedio en las viviendas mexicanas era para satisfacer las necesidades de: Iluminación (22%), Televisión (14%), Refrigeradores (30%), Lavadora (6%) y Aire Acondicionado (19%). La leña es aún el combustible más utilizado en el país abarcando cerca de un tercio de la demanda residencial, sobre todo en la fracción rural y peri-urbana del país, en donde se han estimado que cerca de 31.3 millones de personas utilizan el combustible actualmente, del cual al menos 30% de éstas solamente usan este energético dentro de su hogar (Pérez et al, 2022). Por otra parte, el sector de servicios públicos abarca las actividades de alumbrado público, bombeo de agua potable y de aguas residuales, según el Balance Nacional de Energía. Por su naturaleza, este sector reporta únicamente como energético consumido a la electricidad. Históricamente este sector no ha superado el 1% de la demanda energética nacional y la intensidad energética por vivienda del mismo ha ido en declive, alcanzando un mínimo de 242.69 kWh/vivienda/año en 2017 como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Intensidad Energética del sector de Servicios Públicos (SENER, 2020).

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Intensidad Energética [kWh/vivienda]	290.390	283.745	267.701	242.690	254.137	265.197

Las centrales de SFV de generación distribuida de menor tamaño que requieren un contrato de interconexión son aquellas que cuentan con menos de 500 kWp instalados y dado su tamaño, costos y facilidad de instalación, además de que son capaces de satisfacer las necesidades energéticas de una vivienda promedio en México, son de los sistemas con mayor número de instalaciones actualmente. Para 20222 la capacidad instalada de este tipo de SFV ya supera los 2,629 MWp instalados como se observa a continuación en la Tabla 3 (CRE, 2023).

Tabla 3. Evolución de la capacidad instalada de SFV menores a 0.5 MWp (CRE, 2023).

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Capacidad añadida anual [MW]	32.73	55.66	130.07	211.65	233.56	390.58	467.71	480.15	589.54
Capacidad acumulada [MW]	61.87	117.53	247.59	459.25	692.8	1,083.39	1,551.09	2,031.24	2,629.78

METODOLOGÍA

El modelo considera un periodo retrospectivo de seis años, entre 2014-2019, y una etapa prospectiva de 2020-2050, para esta última, el crecimiento en la demanda y generación de energía están impulsados por el crecimiento económico y demográfico del país, y al igual que el modelo del que se heredan estas condiciones (Castro et al, 2023). A su vez, los patrones de consumo de la demanda energética no sufrieron ningún cambio respecto a los reportados en el estudio mencionado y que para el sector residencial mantienen la proporción observada en la tabla 1.

Supuestos Clave de los Escenarios

En especial el crecimiento de la demanda del sector residencial depende del crecimiento demográfico, por lo que se utilizaron la cantidad de viviendas y del promedio de habitantes por vivienda nacional como impulsores del crecimiento de la demanda energética en la etapa prospectiva. Según datos del INEGI, en el censo del 2020 se registraron 126,014,024 personas en el territorio nacional, así como 35,219,141 viviendas. Pero debido a que los censos de población se realizan cada 5 años, y durante el periodo retrospectivo del estudio (2014-2019) solo se tienen datos para 2015, se utilizó la proyección de población del Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2018) y el promedio de habitantes por vivienda [personas/vivienda] para obtener la cantidad de viviendas totales en el modelo. Arrojando los siguientes datos mostrados en la Tabla 3. Igualmente se muestra la proyección de viviendas existentes en el país para 2030 y 2050, las cuales corresponden a una población mayor a 137 millones de habitantes y mayor a 148 millones respectivamente para los años mencionados.

Tabla 3. Cantidad de viviendas proyectadas por año en México, elaboración propia con datos de CONAPO (2018).

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2030	2050
Viviendas [millones]	30.983	31.689	32.395	33.101	33.807	34.513	43.012	46.292
Personas por vivienda	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.5	3.2	3.2

Escenarios Prospectivos

En este texto se propone la evaluación de 3 escenarios que contemplan diferentes ritmos de instalación de SFV distribuidos, los cuales reflejan las propuestas de diferentes políticas públicas para que México amplié el potencial instalado hacia el año 2050. Los cuales son:

- **Referencia (R)**, que toma la tasa de crecimiento de los datos históricos de instalación entre 2020-2024, obtenidos del PRODESEN (SENER, 2023)

- **Proméxico (PM)**, propuesto por una iniciativa del mismo nombre coordinada por la Secretaría de Economía de México, Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) y el IER. Este escenario tiene como objetivo la instalación de 4 millones de SFV, que en conjunto suman una capacidad instalada de 4 000 MW para 2030 (Proméxico, 2017).

- **SENER (S)**, propuesto por la Secretaría de Energía de México en colaboración con la GIZ (2021a) cuya meta es alcanzar los 12 400 MW de SFV instalados para el 2030.

En cada uno de los escenarios se propone que la tasa de crecimiento de la capacidad instalada de SFV distribuidos se mantenga al ritmo de los años anteriores hasta llegar a 2050, como se observa en la Tabla 4. En donde se observa que, de mantener el ritmo prometido, el escenario S superaría los 25,000 MWp en 2050, mientras que de seguir el ritmo de instalación actual se superarán apenas los 11 MWp para el mismo año, lo cual es un poco más que el ritmo planteado en el escenario Proméxico que supera apenas los 10.5 MWp. De la misma manera en todos los escenarios se propuso que el 100% de la demanda energética del sector de servicios públicos fuese cubierto por SFV para el año 2050 basándose en SFV aislados de la red como lo ha promovido la CONUEE en el alumbrado público en el Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal (CONUEE, 2019).

Tabla 4. Capacidad instalada de SFV distribuidos en cada escenario

Capacidad Instalada [MWp]					
Escenario	**2015**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Referencia	117.53	1,551.09	4,834.84	8,042.16	11,249.47
ProMéxico	117.53	1,520	4,000	7,281.30	10,562.60
SENER	117.53	1,200	6,400	12,400	25,200

Módulo de Transformación de SFV

Para modelar la instalación de los SFV y la energía generada por los mismos se consideró una tecnología tipo equivalente a un SFV de 1 kWp, que cuenta con las siguientes características detalladas en la Tabla 5. En donde se observa que el factor de planta corresponde a las horas solar pico promedio del país respecto a las horas totales del día. Los costes de inversión y operación fueron tomados del Monitor de información comercial e Índice de Precios de Generación Solar Distribuida en México 2021 (GIZ, 2021b).

Tabla 5. Características del módulo de transformación del SFV introducido a LEAP.

Característica	**Valor**
Costo de Inversión Inicial [USD/MWp]	1.48
Costo de Operación y Mantenimiento Fijo [USD/MWp]	0.05
Factor de Planta [%]	18.00

RESULTADOS

Al correr en el software LEAP los escenarios propuestos para este estudio, se encontró que en términos generales el escenario S (en azul en la figura 1 y 2) tuvo un mejor desempeño en cuanto a la generación de energía, ya que para 2040 cubre más del 10% de la demanda del sector residencial, a la vez que permite el ahorro de más de 140 millones de GWh/año de electricidad importada desde la red. Por otra parte, el escenario PM (de color verde en las figuras) alcanza a cubrir el 7% de la demanda residencial hasta 2050, por lo que el máximo ahorro anual que logra está cercano a los 60 millones de GWh/año. Por último, el escenario de Referencia (de color morado en las figuras 1 y 2) no llega a superar el 5% de la cobertura para 2050 y el potencial de ahorro energético en el sector residencial es de un poco más de 40 GWh/año.

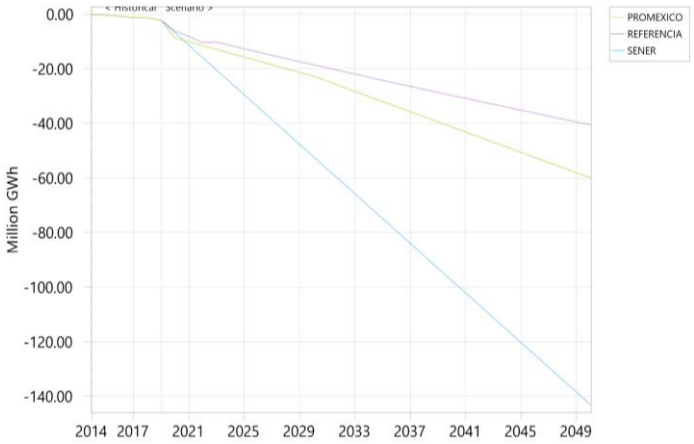


Figura 1. Ahorro de energía debido a la incorporación de SFV en el sector residencial.

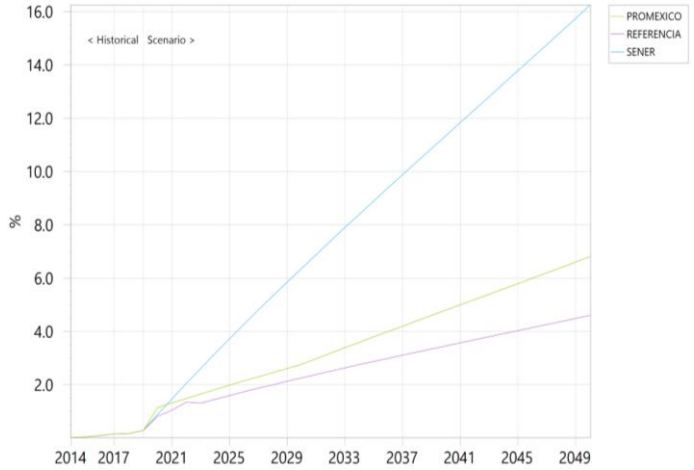


Figura 2. Porcentaje de cobertura de la energía generada mediante SFV del total de la demanda energética residencial.

En lo referente a las emisiones de CO_2e del sector residencial, ninguno de los escenarios supera una mitigación del 1% de GEI respecto al escenario de referencia para 2030, mientras que para 2050 el escenario S si alcanza una disminución del 1.69% respecto a las emisiones del escenario de referencia, por otra parte, el escenario PM roza el 0.32% de disminución. Como se observa en la Figura 3, la tendencia de estos escenarios es la misma. Mientras que las emisiones causadas por los servicios públicos se anulan para 2050, pasando de 11.729 millones de toneladas métricas de CO_2e en 2015 a un poco más de 5.2 en 2030.

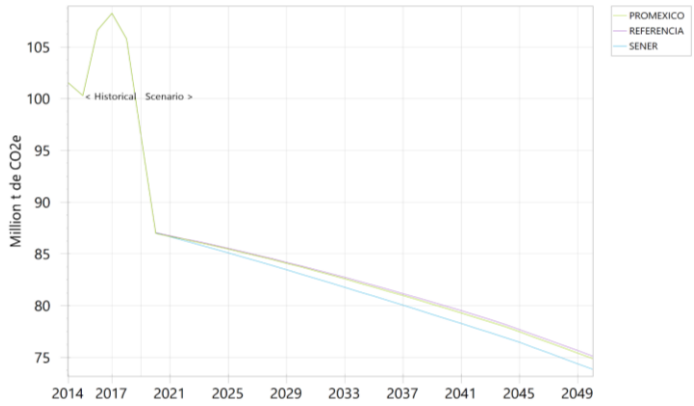


Figura 3: Emisiones residenciales calculadas por el modelo.

CONCLUSIONES

Se evaluó el potencial de ahorro de tres diferentes escenarios que se han propuesto en la política pública, en las que en términos de ahorro de energía se encontraron resultados considerables importantes pero insuficientes en términos de reducción de emisiones. Si bien las instalaciones propuestas en el escenario S, que suman 25,000 MWp, son capaces de cubrir el 16% de la demanda energética residencial con SFV, es aún insuficiente comparado con el potencial energético solar existente en el país.

Estrategias más ambiciosas de financiamiento y de democratización son requeridas si se pretende que los SFV sirvan como un remedio para la transición energética justa para el sector residencial, no obstante, el impacto económico y social de este despliegue de instalaciones incluso al ritmo actual de instalación debería ser cuantificado y considerado para determinar el verdadero impacto de esta solarización del sector.

Por último, cabe destacar que este ejercicio servirá como base para análisis futuros en el que sí se modifique la estructura de la demanda energética a nivel residencial, en los cuales se podrán apreciar cambios más significativos en el sector que posiblemente tengan una mayor disminución de GEI y una mayor proporción de solarización de la demanda.

AGRADECIMIENTOS

Las personas autoras desean expresar su agradecimiento a la UNAM, proyecto PAPIIT IN111623 “Validación de metodología para integración y actualización de escenarios energéticos para México al 2050”, por los recursos otorgados para el desarrollo de este trabajo. Y al Stockholm Environment Institute por las licencias académicas brindadas para acceder al software Low Emissions Analysis Platform (LEAP).

REFERENCIAS

Acosta-Pazmiño, I. P., Rivera-Solorio, I. C. & Gijón-Rivera, M. (2021). Scaling-up the installation of hybrid solar collectors to reduce CO2 emissions in a Mexican industrial sector from now to 2030. Applied Energy 298, Article 117202 https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117202

Castro, J. C., Flores-Palafox, V., Avila-Nuñez, A., de la Rosa-Albino, A. J., Cedano-Villavicencio, K. G. & Martínez-Fernández, M. (2023, octubre 2-6) Estudio Tendencial del Sector Energético Mexicano de 2019 a 2050. [Conference presentation]. XLVII Semana Nacional de Energía Solar, Chetumal, Quintana Roo, México. https://drive.google.com/file/d/1o2ra23xKQ9tl7zKEpsuQwvFV11dsAbOu/view

CONAPO (2018). Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050. Consejo Nacional de Población. https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050

Contreras, M., Serrano-Medrano, M. & Masera, O. (2022). Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales. https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_tematicos/Cuaderno_Tematico_I_Pronaces_ECC_ISBN_final.pdf

CONUEE. (2019). Alumbrado Público, Eficiencia Energética y la Ciudad Inteligente: Hacia el Proyecto Nacional 2.0. https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno4nvociclocorreJLTOdB_1.pdf

CRE (2023). Solicitudes De Interconexión De Centrales Eléctricas Con Capacidad Menor A 0.5 MW: Contratos De Interconexión De Pequeña Y Mediana Escala, Y Generación Distribuida. Estadísticas Al Primer Semestre De 2023. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/850976/Estad_sticas_GD_2023_Primer_Semestre_2023.pdf

FIDE (2024). Programa de Apoyo a la Generación Distribuida. https://www.fide.org.mx/?page_id=26060

Fontalvo, J., Ramírez, P. & Constante, J. (2018). Prospectiva de Autogeneración en el Ecuador mediante uso de Modelo LEAP. Revista Técnica energía 15(1), 51-61. https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v15.n1.2018.323

GIZ. (2021a) Financiamiento de Generación Distribuida en modalidad de portafolio de proyectos: Experiencias Internacionales y diagnóstico en México. https://amif.mx/wp-content/uploads/2024/04/FInanciamiento-de-GD-en-modalidad-de-portafolio-de-proyectos.pdf

GIZ (2021b). Monitor de información comercial e Índice de Precios de Generación Solar Distribuida en México: Segunda edición.

Heaps, C.G., 2022. LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.105] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. https://leap.sei.org

https://asolmex.org/intranet/Micrositio_GSD/Monitor-Indice-de-Precios/Monitor_precios_GSD_reporte2aedicion_oct2021.pdf

INECC (2022) Contribución Determinada a nivel Nacional Actualización 2022 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf

INEGI. (2019). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Fuentes y metodologías. Año base 2013. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/piact/2013/metodologias/METODOLOGIA_CBYSB2013.pdf

Martínez-Montejo, S. A., & Sheinbaum-Pardo, C. (2016) The impact of energy efficiency standards on residential electricity consumption in Mexico. Energy for Sustainable Development, 32, 50–61. https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.02.010

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO TEÓRICO DE UNA ÓPTICA RECONCENTRADORA PARA EL CAMPO EXPERIMENTAL DE TORRE CENTRAL DE LA PLATAFORMA SOLAR DE HERMOSILLO

Carlos E. Borjas Castillo[1], Ernesto Anguera Romero[2], Juan Pablo González López[2], Claudio A. Estrada Gasca[2]

[1] Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83260, México.
[2] Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, 62580, México.
Correspondencia a Carlos E. Borjas Castillo (a218204685@unison.mx)

RESUMEN

Este proyecto forma parte de la conversión óptica del Campo Experimental de Torre Central de la Plataforma Solar de Hermosillo, que tiene como objetivo desarrollar las condiciones ópticas y radiativas para la caracterización de reactores termoquímicos de alta temperatura para la producción de combustibles solares. Los reactores termoquímicos operan a una concentración de 1000 soles; el campo en las condiciones actuales con 8 heliostatos concentradores y 1 heliostato de facetas planas alcanza 200 soles. Para alcanzar los niveles de concentración que requieren estos reactores, sería necesario adicionar 36 heliostatos concentradores al campo.

En este trabajo se analizan 2 alternativas para alcanzar la intensidad de flujo radiativo necesaria para las reacciones termoquímicas por medio de una óptica secundaria de reconcentración. El análisis y diseño óptico se realiza mediante la simulación teórica por trazados de rayos utilizando el software Tonatiuh y el software de diseño asistido por computadora AutoCAD; con los resultados obtenidos mediante la simulación por trazados de rayos se comparan los 2 reconcentradores ubicados en la zona focal que se encuentra en lo alto de la torre, arriba del blanco lambertiano. Los reconcentradores tienen geometría de tipo cono y Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), los cuales colectan e intensifican la radiación solar del campo a la entrada de un reactor pirolítico.

Con el fin de seleccionar la óptica secundaria óptima para la configuración actual del campo, en este estudio se presenta el análisis de las simulaciones por trazados de rayos de la eficiencia óptica de ambos reconcentradores en fechas y horas estratégicas de la trayectoria solar en Hermosillo, Sonora.

Palabras claves: Torre central, Tonatiuh, Heliostato, Reconcentradores, Cono, CPC.

ABSTRACT

This project is part of the optical conversion of the Central Tower Experimental Field of the Hermosillo Solar Platform, which aims to develop the optical and radiative conditions for the characterization of high-temperature thermochemical reactors for the production of solar fuels. The thermochemical reactors operate at a concentration of 1000 soles; The field in current conditions with 8 concentrator heliostats and 1 flat facet heliostat reaches 200 soles. To reach the concentration levels required by these reactors, it would be necessary to add 36 concentrator heliostats to the field.

In this work, 2 alternatives are analyzed to achieve the radiative flux intensity necessary for thermochemical reactions through secondary reconcentration optics. The optical analysis and design is carried out through theoretical simulation by ray tracing using Tonatiuh software and AutoCAD computer-aided design software; The 2 reconcentrators located in the focal zone at the top of the tower, above the Lambertian target, are compared with the results obtained through ray tracing simulation. The reconcentrators have a cone-type geometry and a Composite Parabolic Concentrator (CPC), which collect and intensify solar radiation from the field at the entrance to a pyrolytic reactor.

In order to select the optimal secondary optics for the current configuration of the field, this study presents the analysis of ray tracing simulations of the optical efficiency of both reconcentrators on strategic dates and times of the solar path in Hermosillo, Sonora.

Keywords: Central tower, Tonatiuh, Heliostat, Reconcentrators, Cone, CPC.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las clasificaciones de las energías renovables se encuentra la energía solar térmica con sistemas de concentración solar. Este trabajo se relaciona con la tecnología de torre central, la cual se caracteriza por estar constituida por cientos de espejos con seguimiento en 2 ejes (Heliostatos) que reflejan la radiación solar sobre una zona focal en lo alto de la torre, donde se ubica el receptor, que se encuentra a una altura suficiente elevada para evitar sombreamiento entre los mismos heliostatos. Estos sistemas pueden llegar a concentrar hasta 600 soles y alcanzar temperaturas entre los 250°-1000°C [1].

El sistema de torre central ubicado en la plataforma solar de Hermosillo (PSH) de la Universidad de Sonora y de la UNAM, que se conoce como Campo Experimental de Torre Central (CEToC) (ver Figura 1), del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS), fue originalmente concebido como un campo de pruebas para helióstatos. El campo se construyó inicialmente con 15 helióstatos de 36 m² con 25 facetas planas cada uno que se cantean y que producen un spot solar de aproximadamente 6 m² en el blanco

lambertiano en lo alto de la Torre, es decir, se tiene una concentración solar por heliostato de 6 soles. Actualmente, se está trabajando en la reconversión de los heliostatos para tener un sistema de mayor concentración para hacer investigación en termoquímica solar. El aumento de la concentración solar de los heliostatos se puede lograr mediante la modificación de las actuales facetas planas por facetas curvas concentradoras utilizando la misma estructura que tienen los heliostatos.



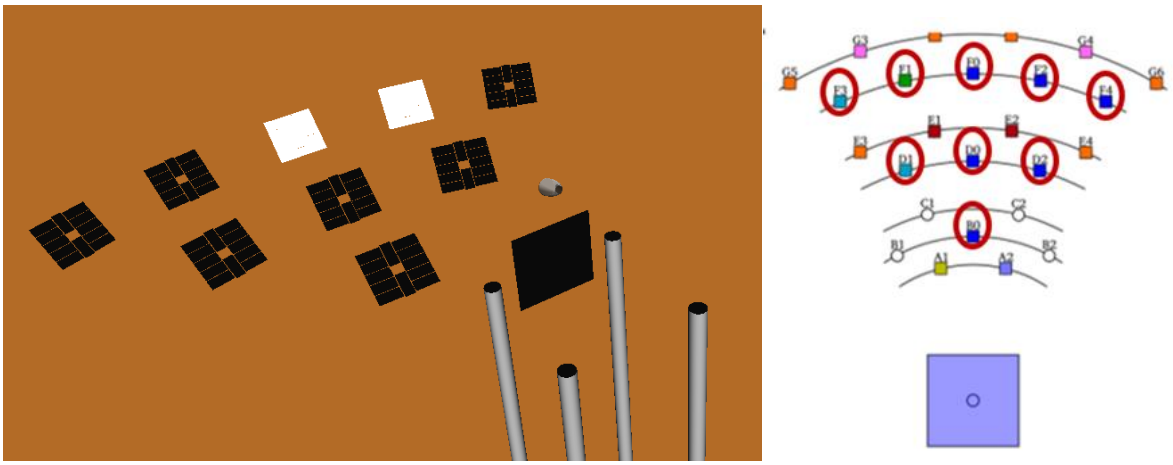
Figura 1. Fotografía del CEToC con 8 heliostatos en operación.

El objetivo de este trabajo es presentar una comparación de la simulación matemática, mediante trazado de rayos, de dos tipos de reconcentradores ópticos (Cono y CPC) ubicados teóricamente en la parte superior de la torre del CEToC. Para ello, se utilizará el software gratuito de código abierto TONATIUH [2], que permite modificar parámetros de entrada e incorporar nuevas superficies que no están configuradas de manera predeterminada. TONATIUH simula el trazado de rayos utilizando el método probabilístico de Montecarlo.

El sistema se divide en dos partes principales. La primera incluye el conjunto de heliostatos concentradores, que conforman la primera óptica. En la parte superior de la torre se encuentra la segunda óptica la cual es conformada por un reconcentrador, que recibe la radiación solar de los heliostatos y la concentra aún más en el receptor del reactor. Los resultados obtenidos de esta simulación serán utilizados para comparar el nivel de concentración de estas ópticas, que buscan triplicar los niveles de concentración alcanzados por la primera óptica, para ser entregados al reactor de pirólisis/gasificación que se construirá próximamente en el CEToC.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PRIMER ÓPTICA

La primera óptica (ver Figura 2) del sistema consta de 9 heliostatos caracterizados por 2 tipos de secciones de las facetas y 3 tipos de superficies reflejantes en cada faceta. Las secciones de las facetas pueden ser cuadradas o rectangulares, y las superficies de las facetas pueden ser planas, esféricas o deformadas. La Figura 3 muestra el arreglo de facetas por sección en los heliostatos: la Figura 3(a) muestra un heliostato con 12 facetas rectangulares deformadas. La Figura 3(b) muestra un heliostato con 25 facetas cuadradas que pueden ser esféricas o planas. Así, el sistema a analizar está constituido por 7 heliostatos con 12 facetas rectangulares deformadas, 1 heliostato con 25 facetas planas cuadradas y 1 heliostato con 25 facetas esféricas cuadradas. Todas las facetas se cantean.



(a) (b)

Figura 2. Distribución de la primera óptica (a) Diagrama de la simulación de trazado de rayos de los 9 heliostatos generado por el código Tonatiuh, (b) Ubicación de los heliostatos que conforman la primera óptica.

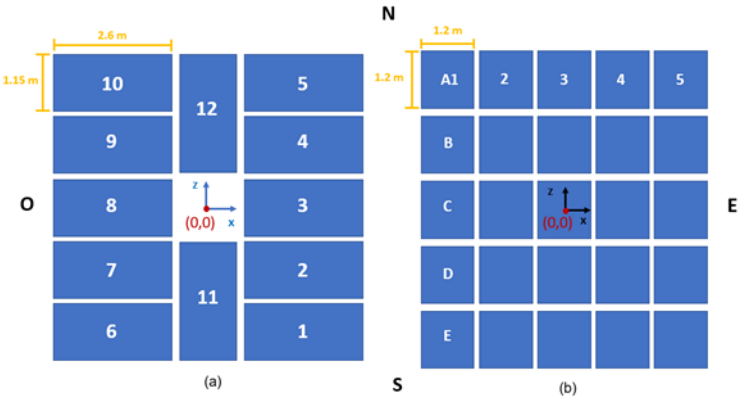


Figura 3. Bosquejo ilustrativo de: (a) facetas rectangulares (deformadas) y (b) facetas cuadradas (esféricas y planas).

Los heliostatos B0, D0, D1, D2, F1, F3 y F4 disponen de facetas rectangulares deformadas (1.15m x 2.6m); el heliostato F0 tiene facetas esféricas se sección cuadrada, y heliostato F2 tiene facetas planas de sección cuadrada (1.2m x 1.2m para ambos casos). El área total de cada uno de los heliostatos es de 36m², los cuales presentan una imagen solar (ver Figura 4) con una potencia total de 231.2 kW en un radio de 2m.

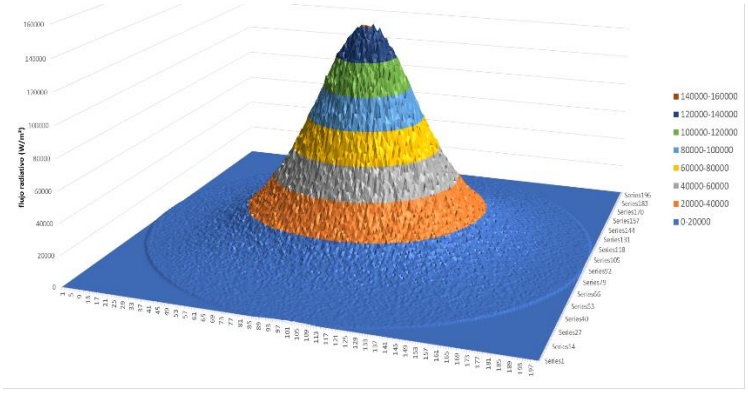
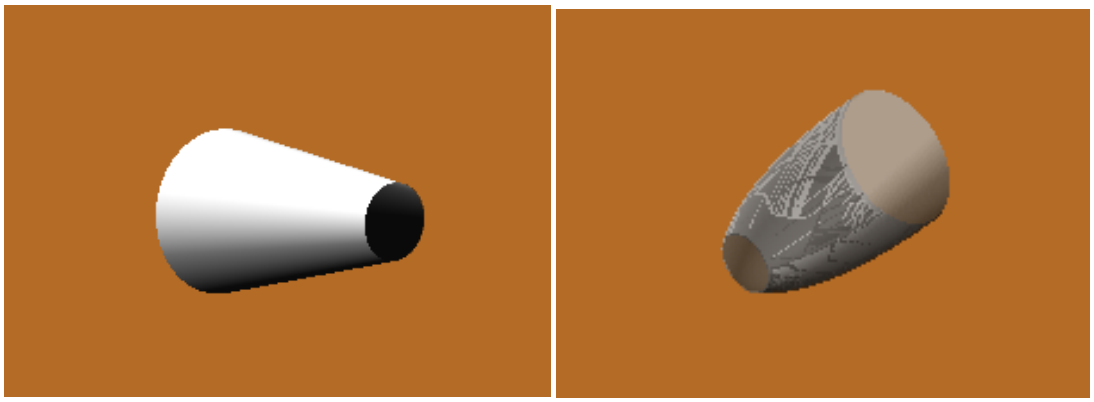


Figura 4. Flujo radiativo del CEToC a medio día solar durante el equinoccio.

3. DESCRIPCIÓN DE LA SEGUNDA ÓPTICA

La segunda óptica está compuesta por dos sistemas ópticos (ver Figura 5), los cuales se simulan de manera independiente en el mismo punto, ubicado a 27 metros de altura en la parte superior de la torre. Ambos sistemas comparten las mismas características: radio de apertura, longitud del reconcentrador y radio de recepción, así como idénticas condiciones de inclinación, horarios y fechas de simulación. Los dos sistemas ópticos que se comparan son de tipo Cono y tipo CPC.



(a) (b)

Figura 5. Render de los reconcentradores, (a) Tipo Cono, (b) Tipo CPC

El diseño del reconcentrador tipo CPC se basó en la Figura 6 y en la Ecuación 1 por otra parte se consideró el radio de apertura del reactor termodinámico, a partir de las cuales se determinaron los parámetros que definieron sus características. Para el caso del reconcentrador tipo Cono, al tratarse de una geometría menos compleja y más fácil de fabricar, se decidió asignarle las mismas dimensiones que al CPC. Esto permite realizar una comparación óptica entre ambas geometrías y, posteriormente, evaluar su viabilidad económica en función de los resultados obtenidos.

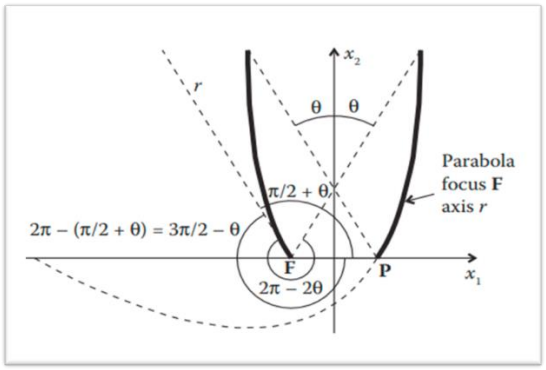


Figura 6. Diagrama de la geometría del CPC.

$$\left(a\frac{1-\cos(\phi+2\theta)+2\sin(\phi+\theta)}{\cos\phi-1}, a\frac{\cos(\phi+\theta)}{\sin^2(\phi/2)}(1+\sin\theta)\right)$$

Ecuación 1. Ecuación matemática para determinar los parámetros del CPC

Debido a las características del CPC, los resultados obtenidos indican que no es posible aprovechar la totalidad del flujo radiativo entregado por la primera óptica (ver Figura 7).

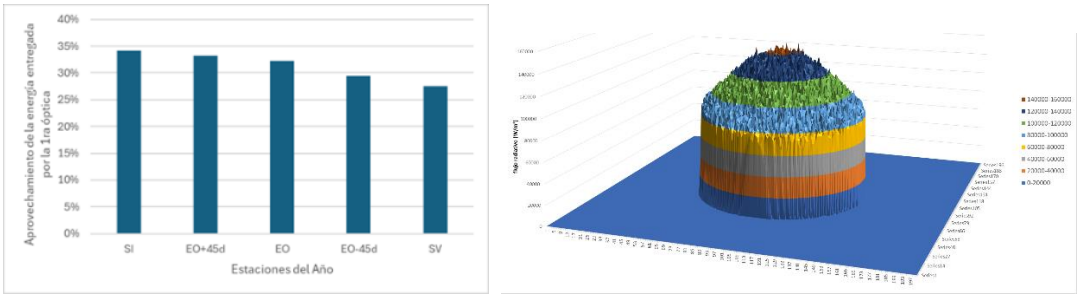


Figura 7. Flujo radiativo captado por la segunda óptica.

4. SIMULACIÓN MATEMÁTICA

En la simulación matemática del conjunto de 9 heliostatos utilizando el código Tonatiuh, se consideraron los siguientes parámetros: una irradiancia de 1000 W/m², una distribución solar tipo Buie (distribución predeterminada en Tonatiuh), reflectividad de 0.85 para la primera óptica y de 0.95 para la segunda, un error óptico global de 5 mrad en la primera óptica, y sin error óptico global en la segunda óptica. La simulación se realizó para varios días clave del año (ver Figura 8), incluyendo el equinoccio de primavera (21 de marzo), el solsticio de verano (21 de junio), el equinoccio de otoño (21 de septiembre), el solsticio de invierno (21 de diciembre), y dos fechas intermedias (6 de agosto y 6 de noviembre), tanto al mediodía solar como a las 9 a.m. hora solar. Estos horarios abarcan el punto medio y el extremo del intervalo de operación del sistema.

Para la simulación se consideraron detalles específicos como la posición y orientación de los heliostatos y sus facetas, el canteo de las facetas, sus dimensiones, y el radio de curvatura para las facetas esféricas y deformadas. Las facetas deformadas mecánicamente se modelaron como superficies esféricas de sección rectangular, ajustadas a imágenes experimentales. Se simularon 100 millones de rayos en cada corrida, con un tamaño de malla de 1 cm². El tamaño de malla se configuró así porque las imágenes experimentales presentan celdas de este tamaño en sus píxeles, lo que permitió determinar el error global de la primera óptica. Además, se pudo verificar la buena aproximación al considerar las facetas deformadas de sección rectangular como facetas esféricas de la misma sección.

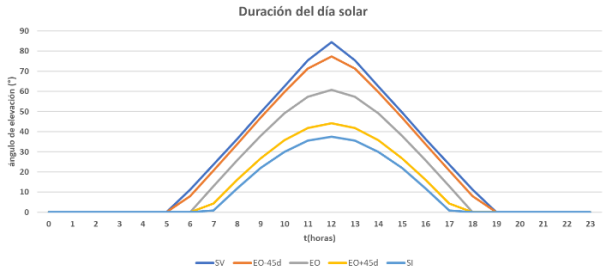


Figura 8. Trayectoria solar en los días simulados

5. RESULTADOS

La Figura 9 muestra que la hora del día (comparación entre las simulaciones a las 9 a.m. y 12 p.m.) no afecta significativamente los niveles de concentración y eficiencia dentro del intervalo de operación del sistema. Por el contrario, la posición del heliostato tiene un impacto considerable en estos parámetros, como se observa al comparar las posiciones F0 y F3 a la misma hora y fecha.

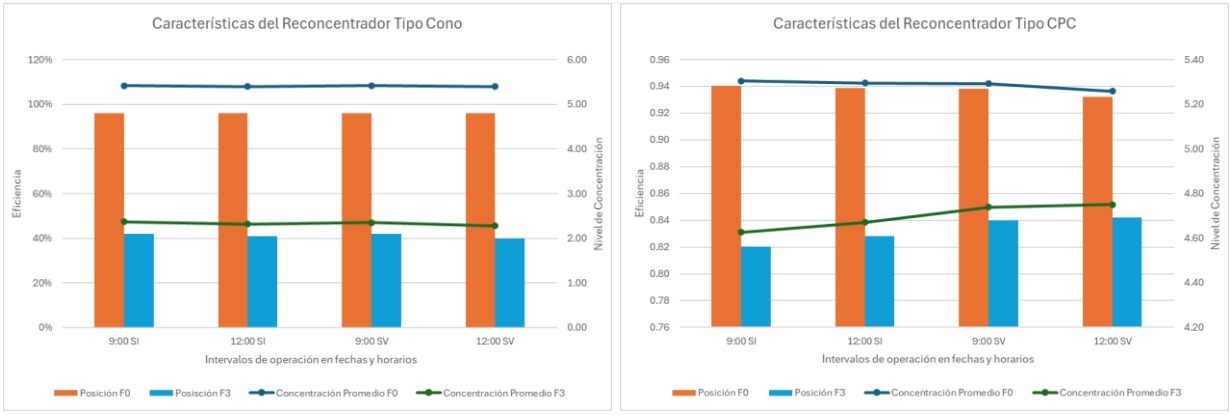


Figura 9. Eficiencia y nivel de concentración de la segunda óptica.

La Figura 10 muestra que el reconcentrador tipo CPC mantiene niveles de concentración y eficiencias superiores a los del tipo Cono a lo largo de todo el año. Además, se observa que ambos reconcentradores presentan parámetros relativamente estables durante todo el año a excepción de los niveles de concentración máximos del CPC.

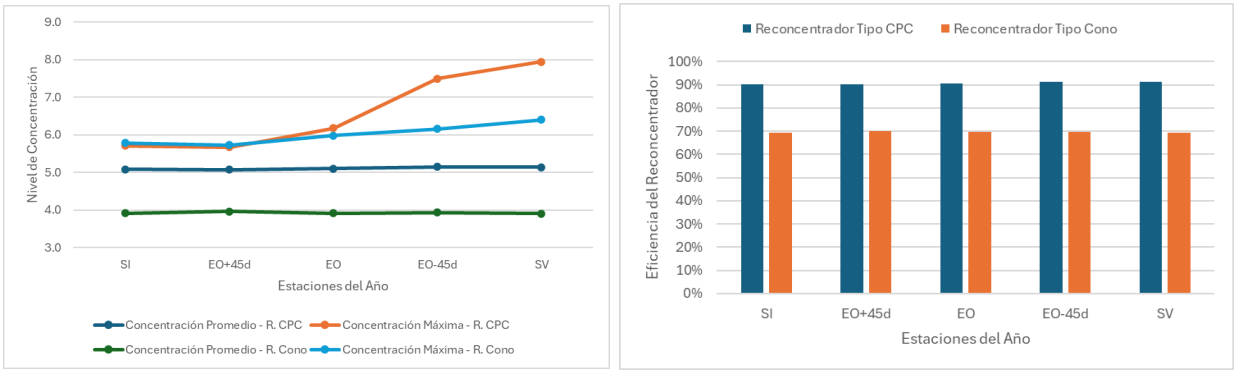


Figura 10. Eficiencia y niveles de concentración obtenidos por los distintos reconcetradores.

6. CONCLUSIONES

El diámetro del reactor termodinámico representa un gran desafío para diseñar un reconcentrador que se ajuste tanto a las especificaciones del campo de heliostatos como a las del propio reactor. La hora del día dentro del horario de operación no afecta significativamente la imagen solar proyectada por la primera óptica; sin embargo, la posición del heliostato en relación con el receptor tiene un impacto considerable.

El reconcentrador tipo CPC logró mayores niveles de concentración y eficiencia en comparación con el tipo Cono. Específicamente, el CPC alcanzó una eficiencia promedio del 91% y un nivel de concentración promedio de 5.1, mientras que el Cono obtuvo una eficiencia del 69% y un nivel de concentración promedio de 3.9.

El software de Tonatiuh es una herramienta de trabajo útil para sistemas de concentración solar, ya que es un software gratuito y de código abierto, lo que permite elaborar simulaciones matemáticas por trazado de rayos con base en información de sistemas experimentales.

REFERENCIAS

[1] Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. (n.d.). from https://concentracionsolar.org.mx/concentracion-solar/torre-central.
[2] Centro Nacional de Energías Renovables. (2017). Tonatiuh. (https://www.cener.com/documentacion/TONATIUH.pdf)

Cocinas Solares, Secaderos, Destilación y Desinfección Solar/ Solar Térmica

ID	TÍTULO	PONENTE
16361	Conservación de antocianinas durante el secado solar: Caso de estudio de la Frambuesa en el Estado de Jalisco.	Beatriz Castillo Téllez
16150	Diseño y construcción de un secador solar con hibridación de tecnologías solares para secado de productos marinos.	Margarita Castillo Téllez
16094	Sistema remoto de monitoreo termohigrométrico para un secador solar	Jesús Álvarez Ruíz
16151	Secado solar: desarrollo de secadores solares para comunidades rurales	Octavio García Valladares

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

CONSERVACIÓN DE ANTOCIANINAS DURANTE EL SECADO SOLAR: CASO DE ESTUDIO DE LA FRAMBUESA EN EL ESTADO DE JALISCO

Beatriz Castillo-Téllez1, Margarita Castillo Téllez2, Gerardo Alberto Mejía Pérez1, Alfredo Domínguez Niño3 y Octavio García Valladares3
1Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. beatriz.castillo@academicos.udg.mx y gerardo.mejia@udg.mx
2Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche. mcastill@uacam.mx
3Instituto de energías Renovables, UNAM, aldoni@ier.unam.mx y ogv@ier.unam.mx

RESUMEN
Los antioxidantes son compuestos que neutralizan los radicales libres, evitando daños en el organismo. Entre los antioxidantes alimenticios se encuentran el betacaroteno, el licopeno y las vitaminas A, C y E, presentes en alimentos como uvas, zanahorias, betabel, jitomates, fresas y té verde. Sin embargo, estos compuestos son inestables durante el procesamiento de alimentos, siendo afectados por factores como temperatura, luz y pH. El secado solar es un método de conservación amigable con el medio ambiente, pero hay poca información y contradicciones sobre cómo la temperatura, el tiempo de exposición y la irradiancia afectan el contenido de antocianinas en este proceso. Este trabajo estudia la conservación de antioxidantes en frambuesas mediante secado solar, una técnica sostenible que maximiza el contenido de antioxidantes en alimentos deshidratados. Se realizaron experimentos a 50, 60 y 70 °C, encontrando que a 60 °C se conservó mejor el color. Se utilizó un secador de gabinete, y los tiempos de secado variaron entre 250 y 425 minutos, siendo el más breve a 70 °C. Al inicio, el contenido de humedad fue de 6.69 g H2O/g ss, alcanzando 0.07 g H2O/g ss al final. Las velocidades de secado oscilaron entre 0.11 g H2O/g ss min. Los resultados indican que un control preciso de temperatura y tiempo es esencial para minimizar la degradación de compuestos bioactivos. Este estudio ayuda a desarrollar tecnologías de secado solar más efectivas y accesibles, promoviendo una economía circular en la producción de frambuesas.
Palabras claves: Energía solar, secado solar, antioxidantes, frambuesa, economía circular.

ABSTRACT
Antioxidants are compounds that neutralize free radicals, preventing damage to the body. Dietary antioxidants include beta-carotene, lycopene, and vitamins A, C, and E in foods such as grapes, carrots, beets, tomatoes, strawberries, and green tea. However, these compounds are unstable during food processing and are affected by temperature, light, and pH. Solar drying is an environmentally friendly preservation method, but there is little information and contradictions about how temperature, exposure time, and irradiance affect anthocyanin content in this process. This work studies the preservation of antioxidants in raspberries by solar drying, a sustainable technique that maximizes the antioxidant content in dehydrated foods. Experiments were conducted at 50, 60, and 70 °C, finding that color was better preserved at 60 °C. A cabinet dryer was used, and drying times ranged from 250 to 425 min, with the shortest at 70 °C. Initially, moisture content was 6.69 g H2O/g ss, reaching 0.07 g H2O/g ss at the end. Drying rates ranged from 0.11 g H2O/g ss min. The results indicate that precise control of temperature and time is essential to minimize the degradation of bioactive compounds. This study helps to develop more effective and accessible solar drying technologies, promoting a circular economy in raspberry production.
Keywords: Solar energy, solar drying, antioxidants, raspberry, circular economy.

INTRODUCCIÓN

Las antocianinas son importantes porque existen muchos estudios que las correlacionan con efectos benéficos a la salud, tales como propiedades antinflamatorias, antioxidante, protege la población de microbiota intestinal, contra enfermedades como diabetes, cardiovasculares, cáncer e incluso juega un importante rol en el sistema nervioso o la patogénesis de la obesidad (Li et al., 2021; Mattioli et al., 2020). Las antocianinas son polifenoles flavonoides, pigmentos solubles en agua que dan el color azul, rojo o morado que caracteriza a estas frutas. Las antocianinas además son ampliamente utilizadas como colorantes de alimentos los cuales pueden ser usados a un pH entre 3.5 y 5.5 [5]. Además, en general los compuestos fenólicos influyen el sabor, la apariencia y el perfil nutricional de las frutas y vegetales.

Conservación de antocianinas

Las antocianinas son inestables y se degradan por su estructura química, pH, temperatura y composición de la matriz alimentaria. Estos factores y el manejo de los alimentos afectan su color, bioactividad y biodisponibilidad, que a su vez influyen en sus beneficios para la salud. Algunos alimentos procesados pueden tener más antocianinas, pero su biodisponibilidad puede ser baja. La recolección, procesamiento y almacenamiento son cruciales para conservar estos nutrientes.

Temperatura y tiempo de exposición

Numerosos estudios sobre alimentos analizan cómo la temperatura afecta la degradación de antocianinas. Se concluye que tanto la intensidad como la duración del calor impactan su estabilidad. Sin embargo, investigaciones indican que bajas temperaturas no garantizan mejor conservación, siendo más crucial reducir el tiempo de secado. (Pateiro et al., 2022).

Por ejemplo, [6] encontró que entre diversos tipos de bayas deshidratados (a 50°C por 48 h, 65° C por 20 h y a 130°C por 2 h), aquellos secados con temperatura de 65°C conservaron más todo tipo de contenido fénolico. Esto sucede porque se incrementan las reacciones de oxidación.

Más aún, trabajos como el de [9] determinaron que, durante el proceso de secado de mora azul, (a 30°C y 50°C), el contenido de antocianinas aumenta cuando la temperatura de secado aumenta. Pateiro y colaboradores igualmente concluyen que las temperaturas y tiempos de secados

medias, ayudan a preservar el color, el contenido de polifenoles y la capacidad antioxidante de las antocianinas [8].
Aunque hay varios reportes sobre el efecto de la temperatura en la estabilidad de las antocianinas, hay opiniones contradictorias. La evidencia sugiere que la temperatura ideal debe ser mayor a 50°C, pero menor a 90°C, y que es crucial reducir el tiempo de procesamiento. Un estudio más detallado sobre las temperaturas logradas con energía solar en secadores sería valioso. Muchos estudios muestran que tanto la intensidad como la duración del calor afectan la estabilidad de las antocianinas. Sin embargo, bajas temperaturas no siempre aseguran mejor conservación; es más importante acortar el tiempo de secado (Pateiro et al., 2022).
Por ejemplo, [6] encontró que entre diversos tipos de bayas deshidratados (a 50°C por 48 h, 65° C por 20 h y a 130°C por 2 h), aquellos secados con temperatura de 65°C conservaron más todo tipo de contenido fénolico. Esto sucede porque se incrementan las reacciones de oxidación.
Más aún, trabajos como el de [9] determinaron que, durante el proceso de secado de mora azul, (a 30°C y 50°C), el contenido de antocianinas aumenta cuando la temperatura de secado aumenta. Pateiro y colaboradores igualmente concluyen que las temperaturas y tiempos de secados medias, ayudan a preservar el color, el contenido de polifenoles y la capacidad antioxidante de las antocianinas [8].
Se concluye entonces que, aún cuando existen muchos reportes sobre la influencia de la temperatura en la estabilidad de las antocianinas, existen opiniones encontradas. La evidencia parece indicar que la temperatura ideal debe ser mayor a 50°C, pero no tan alta como 90°C y que es más importante disminuir en todo caso el tiempo de procesamiento. Sería importante realizar un estudio que analice con mayor detenimiento el rango de temperaturas que pueden lograrse con energía solar en diversos tipos de secadores.
Esta propuesta es enfocada al proceso de deshidratado del alimento, por lo que es importante analizar los factores que pueden cuidarse durante el mismo. El tiempo de exposición, la luz, el oxígeno y la temperatura son los parámetros que más influyen [8] durante el procesamiento de antocianinas. Por lo tanto, la optimización es crucial para obtener un producto deshidratado de alta calidad.

Luz y radiación UV
López Vidaña y colaboradores [10], después de realizar secado de Frambuesa y medir antes y después del proceso las antocianinas, determinó que se conservaron de mejor manera durante el secado solar directo que en el secador solar indirecto. Es importante mencionar que las temperaturas más altas fueron similares. Esto significa que la radiación solar no afectó el contenido de antocianinas, por lo que habría comprobar hasta que rango de longitud de onda UV realmente afecta las antocianinas. Estudios anteriores como [11] reporta que las longitudes de onda más cortas de UV favorecen la conservación de antocianinas y que la glucosilación y copigmentación mejoran la estabilidad a la luz.
Por otro lado, el uso de luz pulsada (PL) la cual es una técnica con luz UV ha resultado muy prometedora para la preservación de alimentos. Esta puede ser usada para descontaminar, preservar o mejorar la calidad nutricional y sensorial de los alimentos [12]. Muchos investigadores la han aplicado para aumentar durante el procesamiento y almacenaje obteniendo respuestas muy beneficiosas. [13] observó que dosis bajas de UV-C en varias frutas y verduras, entre ellas fresas, incrementaron sus valores nutricionales. Dong Yi evaluó los efectos de luz UV en manzanas y encontró una acumulación de antocianinas en la piel de la manzana. Igualmente, Jagadeesh et al en 2011 encontraron aumento de antocianinas al exponer a PL con largos de onda de alrededor de 254 nm sus frutos, con temperaturas de hasta 30 °C, durante su almacenaje.
Otros autores han llegado a la conclusión de que la aplicación de radiación infrarroja durante el secado de alimentos, (la cual representa alrededor del 50% de los rayos solares), disminuye los tiempos de secado y la actividad del agua, reduce el cambio de color total y mejora la retención de nutrientes [7], [14] en especial determinó un incremento en contenido de fenoles totales de bayas con el uso de IR y [15] un aumento en antocianinas durante el secado de fresa y uso de IR

Deshidratado de alimentos con alto contenido de antocianinas

Existen muchas tecnologías para el procesamiento de alimentos pero en la actualidad la exigencia cada vez mayor por lograr una nutrición adecuada exige que estas tecnologías aseguren la estabilidad, ayuden el desarrollo nutracéutico y reduzcan el consumo de energía [1].
Una de las técnicas más maduras para preservar las propiedades y aumentar la vida útil de los alimentos es el secado. Entre las técnicas de deshidratación más utilizadas para alimentos altos en antocianinas, especialmente las bayas podemos encontrar secado convectivo, secado por aspersión, secado en frío, deshidratación osmótica, secado con bomba de calor, secado por radiación electromagnética, secado por soplado por explosión, sobrecalentamiento a baja presión y secado solar [8]
Además, el secado ayuda a reducir el volumen, facilitando la manipulación y el transporte. Existen muchas técnicas para completar el secado, pero el secado solar tecnificado tiene varias ventajas sobre otras: aumenta la velocidad de secado y mejora la calidad del producto respecto al secado a cielo abierto (Chan-Gonzálelz et al., 2021) . Otras técnicas como el horno de gas o eléctrico, microondas, liofilización, radiación infrarroja, secado por atomización han demostrado haber demostrado una gran viabilidad y eficacia (Batista et al., 2022). Sin embargo, estos métodos son tecnológicamente complicados o tienen un alto costo ambiental.
Adicionalmente, de acuerdo con la literatura, la deshidratación permite obtener una mayor biodisponibilidad de polifenoles, esto dependerá también del tipo de polifenol, el tiempo y la temperatura utilizados durante el secado. El proceso de secado causó un aumento en la concentración de antocianinas, con la magnitud del aumento en la concentración de antocianinas aumentando con la temperatura. El jugo obtenido de frutas secas a 50 °C presentó la mayor concentración de antocianinas totales (73,13 mg/L), 2,67 veces mayor que la concentración en el jugo de fruta sin secar [9].
Contrario a otras operaciones de secado, el secado solar tecnificado ha demostrado ser una operación sencilla, económica y altamente eficiente para la mayoría de los alimentos, madera, tratamiento de aguas residuales o lodos y otras industrias como automóvil, caucho, papel y pulpa, caña de azúcar (Alfiya et al., 2022). Para realizar el secado solar de alimentos existen también diversas tecnologías, que pueden clasificarse en directos, indirectos y mixtos, de acuerdo con el tipo de secador y cómo interactúa el calor con el alimento.

METODOLOGÍA

Se propone un estudio sobre la cinética de secado de frambuesas bajo condiciones no reportadas, evaluando combinaciones de temperatura, tiempo y radiación UV para identificar variables óptimas. Se medirá el color en tiempo real correlacionándolo con antocianinas. Se buscarán las condiciones ideales para el secado solar de alimentos ricos en antocianinas, evitando su degradación. Comenzaremos identificando temperaturas adecuadas (50, 60 y 70 °C), evaluando la humedad final y el color, y almacenando muestras al vacío para estudiar antocianinas sin UV. Analizaremos el impacto de la radiación UV en las propiedades antioxidantes de las frambuesas mediante secado solar directo, protegido e indirecto. Durante el secado al aire se monitorizarán humedad y radiación solar, mientras que en el secado protegido se usarán invernaderos, midiendo humedad y actividad de agua para evaluar antocianinas.

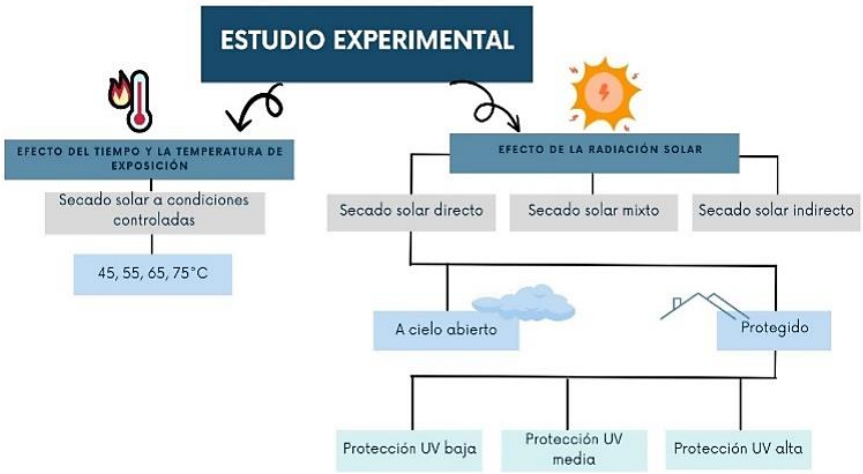


Figura 3 Diseño experimental

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

La frambuesa se obtuvo de mercados locales en Guadalajara, Jalisco. Se procederá a la selección por tamaño, color y grado de madurez. La fruta estará sometida a un lavado y una posterior desinfección antes de ser procesada.

Métodos

Contenido de humedad.

Antes de procesar las Frambuesas se determinarán los contenidos de humedad y color inicial del alimento fresco correlacionando esta con la cantidad de antocianinas presentes. Para la medición de la humedad contenida en la baya, su propone utilizar una termobalanza, que opera a temperaturas un poco arriba del punto de ebullición de agua y diferentes velocidades de calentamiento. Permite medir el contenido de humedad y de materia seca.

Resultados y Discusión

El tiempo de secado para alcanzar las humedades de equilibrio de los alimentos disminuyen cuando aumenta la temperatura, lo cual puede observarse en la Figura 1. Puede observarse que con el secado a temperaturas mayores el secado concluyó aproximadamente a los 275 minutos, mientras que con la menor temperatura se requirieron aproximadamente 475 minutos. Así mismo, puede observarse que, a mayor temperatura, menor humedad final del producto, lo cual es deseable cuando se quiere conservar por mayor tiempo el producto sin problemas de contaminación. Las velocidades finales de secado en ambos secadores se muestran en la Figura 4. Las velocidades de secado son mayores a mayores temperaturas. La mayor velocidad alcanzada al inicio del secado fue de 0.12 g H_2O/g ss min, con un contenido de humedad de 6.69 g H_2O/g ss.

Los tiempos cortos de secado son deseables debido a que puede secarse mayor volumen de producto en menos tiempo, sin embargo, es posible que muy altas temperaturas disminuyan la calidad del alimento deteriorando el color de esta baya, lo cual indica pérdida especialmente de las antocianinas.

La Tabla 3, muestra las diferencias de color finales respecto a los secadores, puede observarse que la menor pérdida de color fue a temperatura de 70 °C, mientras que el secado a 60 °C causó una mayor pérdida de antocianinas. Sin embargo, estas pérdidas de color son muy elevadas, por lo que es necesario seguir buscando una combinación de condiciones que proporcionen mejores resultados, comparado con resultados reportados en [29], [30]

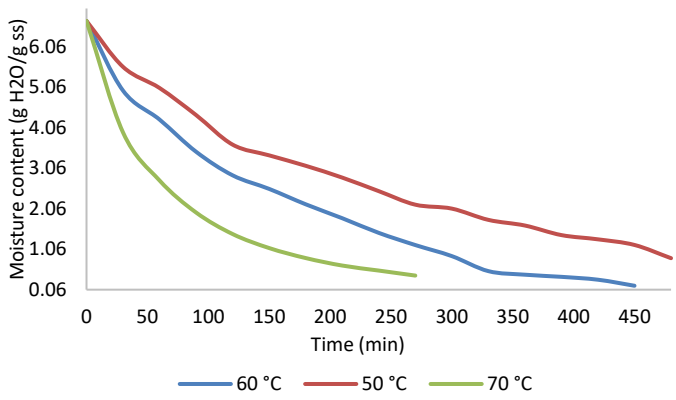


Figura 4. Contenido de humedad durante el secado

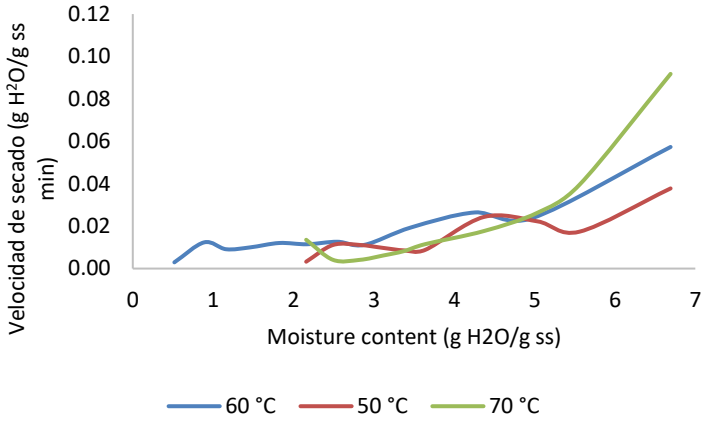
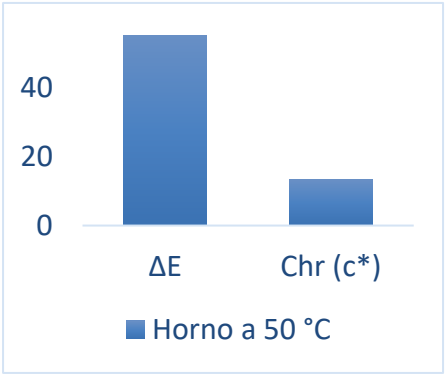
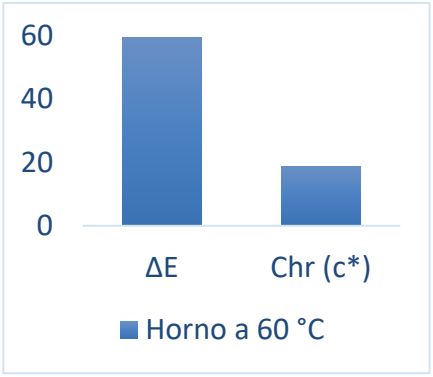
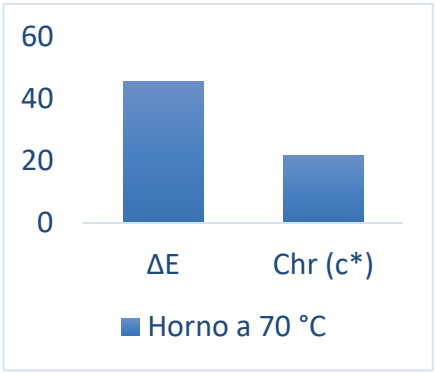


Figura 5 Velocidades de secado versus tiempo

En la literatura se ha reportado que hay una notable diferencia de color cuando los valores se encuentran entre 2 a 12 unidades [31]. La International Commission on Illumination establece que los valores entre 0 y 2 en diferencia de color resultan irreconocibles al ojo humano, pero los valores arriba de 5 los puede identificar cualquier observador fácilmente [32].







CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología experimental para determinar las mejores condiciones que permitan conservar las antocianinas durante el secado de frambuesa. Por otro lado, se realizó el secado bajo condiciones controladas (50, 60 y 70 °C). El seguimiento de las cinéticas de secado permite determinar que estas son mejores a 70 °C, ya que proporcionan una estabilización de la humedad a menor tiempo y permite obtener mayores velocidades de secado. Esto es deseable cuando se busca una mayor producción y ganancias económicas. De igual manera, el cambio total de color es menor a temperatura de 70 ° C, lo cual está de acuerdo con alguna literatura previa analizada que sostiene que el contenido de antocianinas es mayormente afectado por el tiempo de exposición al tratamiento térmico que las altas temperaturas.

Se propone continuar con la experimentación propuesta en nuestra metodología para determinar las condiciones que otros factores tales como la radiación UV y la intensidad de la misma adecuados para el secado de bayas y la conservación de antocianinas.

REFERENCIAS

[1] R. Mattioli, A. Francioso, L. Mosca, and P. Silva, "Anthocyanins: A Comprehensive Review of Their Chemical Properties and Health Effects on Cardiovascular and Neurodegenerative Diseases," *Molecules*, vol. 25, no. 17, 2020, doi: 10.3390/molecules25173809.

[2] E. O. Igwe, K. E. Charlton, Y. C. Probst, K. Kent, and M. E. Netzel, "A systematic literature review of the effect of anthocyanins on gut microbiota populations," *J. Hum. Nutr. Diet.*, vol. 32, no. 1, pp. 53–62, 2019, doi: 10.1111/jhn.12582.

[3] V. Gowd, Z. Jia, and W. Chen, "Anthocyanins as promising molecules and dietary bioactive components against diabetes – A review of recent advances," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 68, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1016/j.tifs.2017.07.015.

[4] B. Li, L. Wang, W. Bai, and W. Chen, *Anthocyanins*. 2021.

[5] H. Remini, F. Dahmoune, Y. Sahraoui, and K. Madani, "Recent advances on stability of anthocyanins," *J. Agron. Anim. Ind.*, vol. 13, no. 4, pp. 257–286, 2018, doi: 10.22363/2312-797X-2018-13-4-257-286.

[6] M. C. Bustos, D. Rocha-Parra, I. Sampedro, S. De Pascual-Teresa, and A. E. León, "The Influence of Different Air-Drying Conditions

on Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Berries," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 66, no. 11, pp. 2714–2723, 2018, doi: 10.1021/acs.jafc.7b05395.

[7] D. Huang, P. Yang, X. Tang, L. Luo, and B. Sunden, "Application of infrared radiation in the drying of food products," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 110, no. October 2020, pp. 765–777, 2021, doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.039.

[8] M. Pateiro *et al.*, "The role of emerging technologies in the dehydration of berries: Quality, bioactive compounds, and shelf life," *Food Chem. X*, vol. 16, no. May, 2022, doi: 10.1016/j.fochx.2022.100465.

[9] J. Martín-Gómez, M. Á. Varo, J. Mérida, and M. P. Serratosa, "Influence of drying processes on anthocyanin profiles, total phenolic compounds and antioxidant activities of blueberry (Vaccinium corymbosum)," *Lwt*, vol. 120, no. December 2019, p. 108931, 2020, doi: 10.1016/j.lwt.2019.108931.

[10] E. C. López-Vidaña, I. Pilatowsky Figueroa, E. G. Antonio Marcos, A. Navarro-Ocaña, L. Hernández-Vázquez, and J. A. Santiago-Urbina, "Solar drying kinetics and bioactive compounds of blackberry (Rubus fruticosus)," *J. Food Process Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1111/jfpe.13018.

[11] R. L. Jackman and J. L. Smith, "Anthocyanins and betalains BT - Natural Food Colorants," G. A. F. Hendry and J. D. Houghton, Eds. Boston, MA: Springer US, 1996, pp. 244–309.

[12] M. Vargas-Ramella *et al.*, "Impact of pulsed light processing technology on phenolic compounds of fruits and vegetables," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 115, no. April, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1016/j.tifs.2021.06.037.

[13] A. Gómez-Maqueo, Z. Escobedo-Avellaneda, and J. Welti-Chanes, "Phenolic compounds in mesoamerican fruits—Characterization, health potential and processing with innovative technologies," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21, no. 21, pp. 1–41, 2020, doi: 10.3390/ijms21218357.

[14] L. Puente-Díaz, K. Ah-Hen, A. Vega-Gálvez, R. Lemus-Mondaca, and K. Di Scala, "Combined Infrared-Convective Drying of Murta (Ugni molinae Turcz) Berries: Kinetic Modeling and Quality Assessment," *Dry. Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 329–338, 2013, doi: 10.1080/07373937.2012.736113.

[15] N. Adak, N. Heybeli, and C. Ertekin, "Infrared drying of strawberry," *Food Chem.*, vol. 219, pp. 109–116, 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.103.

[16] E. C. López- *et al.*, "Indirect and mixed- - mode solar drying and its effect on physicochemical properties of raw and cooked chicken breast meat," no. June, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1111/jfpp.16848.

[17] J. de J. Chan-Gonzálelz, M. Castillo Téllez, B. Castillo-Téllez, G. A. Mejía-Pérez, and C. J. Vega-Gómez, "Improvements and Evaluation on Bitter Orange Leaves (Citrus aurantium L .) Solar Drying in Humid Climates," *Sustain.*, 2021, doi: https://doi.org/10.3390/su13169393.

[18] O. García-Valladares *et al.*, "Effect of Modified Solar Dryers on Colorimetric and Physicochemical Properties of Pumpkin Flower (Cucurbita maxima)," *Plant Foods Hum. Nutr.*, vol. 78, no. 1, pp. 139–145, 2023, doi: 10.1007/s11130-022-01032-8.

[19] S. U. Marzuki, Y. Pranoto, T. Khumsap, and L. T. Nguyen, "Effect of blanching pretreatment and microwave-vacuum drying on drying kinetics and physicochemical properties of purple-fleshed sweet potato," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 2884–2895, 2021, doi: 10.1007/s13197-020-04789-5.

[20] R. Saengrayap, A. Tansakul, and G. S. Mittal, "Effect of far-infrared radiation assisted microwave-vacuum drying on drying characteristics and quality of red chilli," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 52, no. 5, pp. 2610–2621, 2015, doi: 10.1007/s13197-014-1352-4.

[21] Z. Duan, M. Zhang, Q. Hu, and J. Sun, "Characteristics of Microwave Drying of Bighead Carp," *Dry. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 637–643, 2005, doi: 10.1081/DRT-200054156.

[22] G. A. Reineccius, "The Spray Drying of Food Flavors," *Dry. Technol.*, vol. 22, no. 6, pp. 1289–1324, 2004, doi: 10.1081/DRT-120038731.

[23] T. R. Bajgai and F. Hashinaga, "HIGH ELECTRIC FIELD DRYING OF JAPANESE RADISH," *Dry. Technol.*, vol. 19, no. 9, pp. 2291–2302, 2001, doi: 10.1081/DRT-100107499.

[24] J. T. S. Batista, C. da Silva Araújo Matias, L. H. da Silva Martins, D. N. P. Cardoso, M. R. S. P. Joele, and L. de Fátima Henriques Lourenço, "Effect of convection drying and lyophilization of fish myofibrillar proteins on the technological properties of biodegradable films," *Dry. Technol.*, vol. 40, no. 8, pp. 1673–1687, 2022, doi: 10.1080/07373937.2021.1875230.

[25] A. Lingayat, R. Balijepalli, and V. P. Chandramohan, "Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review," *Sol. Energy*, vol. 229, pp. 52–68, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.058.

[26] P. V Alfiya, G. K. Rajesh, S. Murali, D. S. Aniesrani Delfiya, M. P. Samuel, and M. V Prince, "are many industries such as automobile, rubber, paper and pulp, sugarcane," *Sol. Energy*, vol. 246, pp. 234–244, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.048.

[27] A. Khouya, "Energy analysis of a combined solar wood drying system," *Sol. Energy*, vol. 231, pp. 270–282, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.068.

[28] A. Khanlari, A. Doğuş Tuncer, A. Sözen, C. Şirin, and A. Gungor, "Energetic, environmental and economic analysis of drying municipal sewage sludge with a modified sustainable solar drying system," *Sol. Energy*, vol. 208, pp. 787–799, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.039.

[29] M. A. Ali, Y. A. Yusof, N. L. Chin, M. N. Ibrahim, and S. M. A. Basra, "Drying Kinetics and Colour Analysis of Moringa Oleifera Leaves," *Agric. Agric. Sci. Procedia*, vol. 2, pp. 394–400, 2014, doi: 10.1016/j.aaspro.2014.11.055.

[30] M. Castillo Téllez, I. Pilatowsky Figueroa, B. Castillo Téllez, E. C. López Vidaña, and A. López Ortiz, "Solar drying of Stevia (Rebaudiana Bertoni) leaves using direct and indirect technologies," *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 898–907, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.11.031.

[31] C. L. Hii, R. A. Rahman, S. Jinap, and M. YB Che, "Quality of cocoa beans dried using a direct solar dryer at different loadings," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 86, no. February 2006, pp. 1237–1243, 2006, doi: 10.1002/jsfa.

[32] M. Zielinska and M. Markowski, "Color characteristics of carrots: Effect of drying and rehydration," *Int. J. Food Prop.*, vol. 15, no. 2, pp. 450–466, 2012, doi: 10.1080/10942912.2010.489209.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR CON HIBRIDACIÓN DE TECNOLOGÍAS SOLARES PARA SECADO DE PRODUCTOS MARINOS

Margarita Castillo Téllez, Juan Carlos Percino Picazo, Diana C. Méx Álvarez, Luz Ma. Hernández Cruz
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, Camp., México; C.p. 24087.
mcastill@uacam.mx

Beatriz Castillo Téllez, Gerardo Mejía Pérez
Centro Universitario de Tonalá, Tonalá, Jalisco, México; C.p. 45425
beatriz.castillo@academicos.udg.mx, gerardo.mejia@udg.mx

Alfredo Domínguez Niño
Instituto de energías Renovables, UNAM, Temixco, Morelos, México; C.p. 62588
aldoni@ier.unam.mx

RESUMEN

El secado de alimentos requiere un elevado consumo energético debido al calor latente de cambio de fase necesario para evaporar el agua contenida en los productos y a la baja eficiencia de los secadores industriales actuales. México cuenta con un importante recurso solar, lo que hace atractivo el desarrollo de secadores solares para deshidratar productos alimenticios, lo que beneficiaría al sector primario e industrial. Se presenta el diseño y construcción de un secador solar para productos marinos, el cual puede secar entre 400 kg y 480 kg de producto, funciona con tres tecnologías de energía solar: un banco de colectores solares para calentamiento de agua, un banco de colectores solares para calentamiento de aire y un banco de paneles solares fotovoltaicos para que pueda funcionar de forma continua durante las horas de insolación. Una vez construido y armado el secador solar tipo invernadero para productos pesqueros, con todos sus componentes y sistemas auxiliares, se realizó una evaluación experimental para evaluarlo. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Secado Solar de Alimentos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, ubicado en las coordenadas geográficas 18°50′11″N 90°24′12″W. Al operar el secador solar con el sistema solar térmico de calentamiento de agua con almacenamiento, las temperaturas promedio dentro de la cámara de secado fueron entre 52 °C y 64 °C. Al operar el secador solar con el sistema de calentamiento solar de aire, las temperaturas promedio obtenidas dentro del invernadero fueron entre 54 °C y 61 °C, en ambos casos con una velocidad promedio del aire de 2.4 m/s a 10 m/s, la cual es aceptable ya que para el secado de productos pesqueros se requieren temperaturas promedio de 55 °C con velocidad promedio de 2.5 m/s dentro del secador.

ABSTRACT

Food drying requires high energy consumption due to the latent phase change heat required to evaporate the water contained in the products and the low efficiency of today's industrial dryers. Mexico has a crucial solar resource, which makes the development of solar dryers to dehydrate food products attractive, which would benefit the primary and industrial sectors. The design and construction of a solar dryer for marine products is presented, which can dry between 400 kg and 450 kg of product works with three solar energy technologies: a bank of solar collectors for water heating, a bank of solar collectors for air heating and a bank of photovoltaic solar panels so that it can operate continuously during the hours of sunshine. Once the greenhouse-type solar dryer for fishery products was built and assembled, with all its components and auxiliary systems, an experimental evaluation was carried out to evaluate it. The experimental tests were carried out at the Solar Food Drying Laboratory of the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Campeche, located at the geographical coordinates 18°50′11″N 90°24′12″W. When operating the solar dryer with the solar thermal water heating system with storage, the average temperatures inside the drying chamber were between 52°C and 64°C. When operating the solar dryer with the solar air heating system, the average temperatures obtained inside the greenhouse were between 54 °C and 61 °C in both cases, with an average air velocity of 2.4 m/s to 10 m/s, which is acceptable since for the drying of fish products average temperatures of 55 °C with an average speed of 2.5 m/s inside the dryer are required.

Palabras claves: Secador solar tipo invernadero, Hibridación de tecnologías, Irradiación solar, Almacenamiento térmico, Intercambiador de calor.

INTRODUCCIÓN

México cuenta con un recurso solar importante en la mayor parte del año (un promedio de 6.36 kWh/m^2 por día) (ASOLMEX, 2016), lo cual hace atractivo el desarrollo de secadores solares para el deshidratado de productos alimenticios, beneficiando al sector primario.

El secado de alimentos es un método para conservar alimentos, en el que se inhibe el crecimiento de bacterias, hongos, gérmenes, etc. a través de la remoción de agua mediante el proceso de evaporación. Al reducir la cantidad de agua se impide el crecimiento de los microorganismos que producen la descomposición y también se reduce la actividad de las enzimas que provocan cambios indeseables en la composición química de los alimentos (García Valladares Octavio, 2017). El proceso de secado ayuda a obtener una mejor calidad del producto seco, un mayor período de tiempo de almacenamiento y una reducción de pérdidas por descomposición (Deng et al., 2021).

El secado de alimentos demanda un alto consumo energía, debido al calor latente de cambio de fase requerido para evaporar el agua contenida en los productos y a la baja eficiencia de los secadores industriales actuales. La energía requerida para realizar el proceso de secado puede ser del orden del 10 al 25 % del consumo total de energía del proceso (Fudholi et al., 2014), por tal razón el uso de energía solar en aplicaciones de secado resulta atractivo y podría tener un gran potencial, disminuyendo el consumo de energía convencional hasta en un 80% de la energía total utilizada en dichos procesos.

El Estado de Campeche tiene una extensión litoral de 425 km, lo que representa el 3.8 % del total, cuenta con 12,135 embarcaciones de pesa en alta mar y 3,401embarcaciones ribereñas, con 26 plantas pesqueras, ocupando el 7° lugar nacional en producción pesquera con 72,266 ton de pesca de captura, con 38,855 ton en esteros, lagunas y bahías y 33,512 en mar abierto y 158,014 de cultivo (Ramírez-Rodríguez, 2015). El sector de la pesca es crucial para la producción de alimentos y su aporte a la economía del país es sumamente importante, ya que sus operaciones refuerzan la soberanía alimentaria y territorial. Los productos pesqueros son de excelente calidad y están al alcance para cubrir la demanda interna, además de impulsar una mayor oferta en los mercados nacionales e internacionales (Wakida-Kusunoki et al., 2016).

El secado solar de pescado y sus desechos es crucial porque permite conservar y aprovechar los recursos marinos de manera sostenible y económica, especialmente en comunidades con recursos limitados. Este método extiende la vida útil del pescado sin necesidad de refrigeración, lo que mejora la seguridad alimentaria y genera ingresos adicionales al facilitar su comercialización. Además, el secado de desechos contribuye a reducir el desperdicio y maximiza el uso de estos recursos, apoyando tanto la economía local como la sostenibilidad ambiental (Machuelo et al., 2017). Por lo anteriormente planteado, el secado solar se visualiza como una alternativa atractiva para implementarse en la industria pesquera, porque no utiliza combustibles fósiles, además al hacer uso de un secador solar adecuado los alimentos se protegen de las condiciones ambientales, de la fauna y de la radiación solar directa; por lo que la eficiencia del secado puede ser mayor y por lo tanto los alimentos obtienen un valor agregado.

En el presente artículo se detalla la construcción y puesta en marcha de una planta de secado solar tipo invernadero para el deshidratado de pescado, así como los resultados experimentales de la cinética de secado solar de filetes de pescado.

PLANTA DE SECADO SOLAR

Diseño conceptual

Para el desarrollo de la planta de secado solar para productos pesqueros se diseñaron y construyeron dos secadores solares tipo invernadero que en conjunto tienen una capacidad de alojar 480 kg de producto fresco para su deshidratado, el primero es el secador primario para el deshidratado de pescado con capacidad para deshidratar aproximadamente 360 kg de pescado (75% del total del producto) y el segundo es el secador secundario de menor tamaño para deshidratar aproximadamente 120 kg de subproductos pesqueros como vísceras, piel, etc. (25% del producto.

Descripción del secador primario

El deshidratador solar principal es del tipo invernadero y se diseñó y construyó para deshidratar productos pesqueros y está conformado por una nave curva con dimensiones de 9 m de largo x 6 m de ancho y 2.5 m en la parte más alta del domo, contando con un área en su base de 54 m^2 y un volumen aproximado de 135 m^3. La envolvente del deshidratador está conformada por hojas de policarbonato celular con protección contra la radiación ultravioleta y dimensiones de 1.8 m de ancho por 12 m de largo y 6 mm de espesor. Se construyeron 4 mesas de tubular para la colocación de dos niveles de charolas, las cuatro mesas se colocaron dentro del secador de manera equidistante. En el interior del secador se instalaron 4 ramales de ducto de acero galvanizado de 4” para la correcta distribución del aire caliente en el interior.

Descripción del secador primario

El deshidratador solar secundario se diseñó y construyó para deshidratar productos pesqueros y está conformado por una nave curva con dimensiones de 6 m de largo x 4 m de ancho y 2.5 m en la parte más alta del domo, contando con un área en su base de aproximadamente 24 m^2 y un volumen aproximado de 60 m^3. Se construyeron 4 mesas de tubular de dos niveles de charolas, las 4 mesas se colocaron dentro del secador de manera equidistante. En el interior del secador se instalaron 4 ramales de ducto de acero galvanizado de 4” para la correcta distribución del aire caliente en el interior. En la figura 1, se presenta el diseño y dimensiones del secador solar primario y secundario para deshidratado de subproductos del pescado.

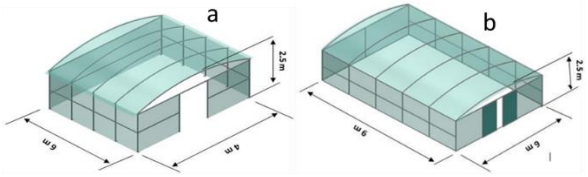


Figura 1. Diseño y dimensiones del secador solar (a: primario y b: secundario para el deshidratado de subproductos pesqueros (vísceras, piel, etc.)

Sistemas auxiliares

Los secadores solares para la planta de deshidratado de productos pesqueros cuentan con dos sistemas auxiliares para su operación los cuales se describen a continuación:

Sistema solar térmico para el calentamiento de aire de manera directa

Está conformado por 15 colectores solares para calentamiento de aire, donde cada colector cuenta con un área de captación de 1.7 m^2 obteniendo un área total de captación aproximada de 25.5 m^2, el arreglo de los colectores está distribuido en tres hileras en paralelo, con cinco colectores acoplados en serie para cada una de las hileras. Al operar los secadores solares con el sistema solar de calentamiento se obtuvieron temperaturas preliminares promedio en el interior de los secadores de 61 °C, operando el extractor-ventilador a máxima carga, lo cual es aceptable para el secado de productos pesqueros, ya que se requiere para este proceso temperaturas medias de aproximadamente 55 °C. En la figura 2, se muestra el sistema de solar térmico para el calentamiento del aire que ingresara a los secadores solares.

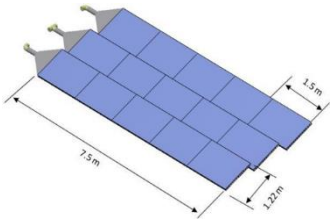


Figura 2. Sistema de solar térmico para el calentamiento del aire

Sistema solar fotovoltaico para generación de electricidad requerida

Para los secadores solares para productos pesqueros se dimensionó e instaló un sistema solar fotovoltaico (SFV) para la generación de la energía eléctrica requerida, que está constituido por 16 paneles solares fotovoltaicos, para un área total de captación aproximada de 41 m^2 con 8800 W de potencia total máxima. El sistema cuenta con 8 baterías de carga profunda, para proporcionar una autonomía de operación del secador solar de 3 hora en periodos del día donde no se cuente con irradiancia solar o bien en horario nocturno. Por las características de la operación de los secadores solares el arreglo fotovoltaico se dividió en dos secciones la primera con 8 paneles solares y 4 baterías de respaldo para accionar el ventilador-extractor que ingresara el aire caliente de manera directa proveniente de colectores solares térmicos a los secadores, una bomba de recirculación y extractores de escape de aire y la segunda sección con 8 paneles solares y 4 baterías para operar la resistencia eléctrica del sistema auxiliar de almacenamiento térmico de agua para operar los secadores con aire calentado de manera indirecta con el intercambiador de calor agua-aire. Cada una de las dos secciones cuenta con su gabinete propio que contiene los controladores de carga, inversores de carga, variadores de frecuencia e interruptores termomagnéticos correspondientes, para el accionamiento de los equipos que demandan energía eléctrica. En la figura 3 a), se muestra el arreglo del sistema solar fotovoltaico y el panel solar utilizado, y en la 3 b) los gabinetes de control.

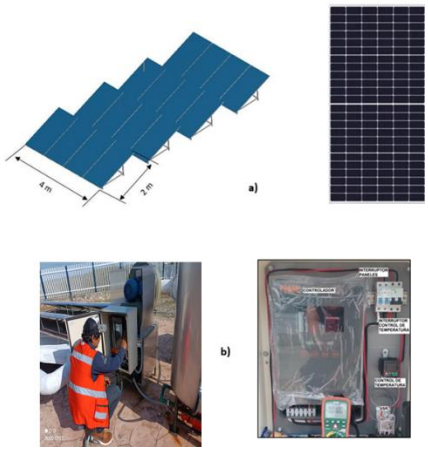


Figura 3. a) Diagrama del arreglo y panel fotovoltaico utilizado y b) gabinetes para control

En la figura 4 a), se presenta el arreglo e instalación del sistema asolar fototérmico, para el calentamiento de aire de manera directa que ingresara a los secadores solares, Mientras que en la figura 4 b), se muestra el sistema de almacenamiento térmico, el cual almacena agua a 70° calentada mediante una resistencia accionada mediante el sistema solar fotovoltaico. En la figura 5 se muestra el estado actual general de la plata termo-solar para deshidratado de productos pesqueros, en conjunto con todos los sistemas que la integran.



Figura 4 a). Instalación y arreglo de los paneles del sistema solar fotovoltaico; 4 b) Instalación del sistema de almacenamiento térmico (termotanque-resistencia-bomba).



Figura 5. Vista del estado actual de los secadores solares y de los sistemas solares fototérmico y fotovoltaico de la planta de deshidratado de productos pesqueros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de secado de pescado

En este apartado se presentan los resultados del secado de filete de pescado nativo del estado de Campeche de bajo valor comercial (Chac-chí) como ejemplo de un día tomado durante la experimentación, con el objetivo de explorar la elaboración de subproductos derivados de pescado seco. De igual forma, se presentan las temperaturas alcanzadas en los secadores solares tipo invernadero durante el secado de pescado.

En la figura 6 a) se pueden observar los datos de irradiancia y temperatura ambientes registradas durante el segundo día de secado solar, se puede apreciar que se obtuvo una irradiancia solar máxima de 881 W/m² con una temperatura máxima registrada de 35 °C a las 2:00 pm, tomados de la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. La Figura 6 b) muestra la cinética de secado solar de filete de pescado Chac-Chí. Se puede observar que el secado se llevó a cabo durante dos días de procesamiento. La prueba experimental comenzó a las 9:30 h y terminó a las 17:36 del primer día; el segundo día del proceso de secado, el experimento continuó a partir de las 10:20 h a 18:00 h, lo que representa 14 horas de secado continuo. El contenido de humedad inicial fue de 78.06 % o bien 3.55 g agua/g materia seca, en contraste la humedad final fue de 25 % base húmeda o bien 0.38 g agua/g materia seca.

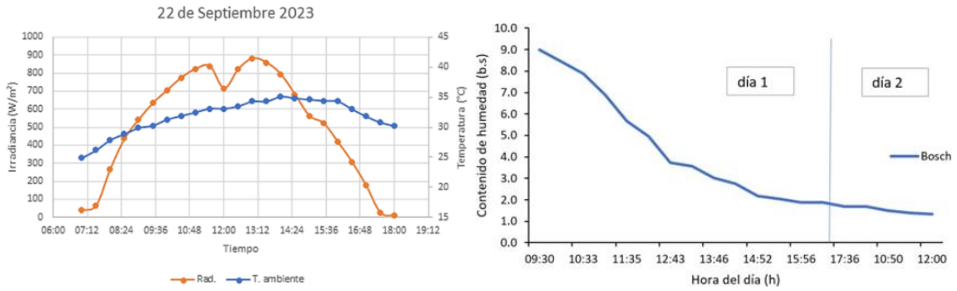


Figura 6 a): Irradiancia solar y temperatura ambiente tomado como ejemplo de un día de experimentación; 6 b) Cinética de secado solar de filete de pescado Chac-chi.

En la figura 7 se puede ver la disposición del filete de pescado en los invernaderos. Los filetes se colocaron sobre rejillas plásticas y estas a su vez sobre las charolas ubicadas en las mesas de secado.



Figura 7 Ubicación de filete de pescado fresco y deshidratado dentro de los secadores solares tipo invernadero.

Desempeño térmico de los invernaderos

Para la evaluación de los invernaderos primero se determinó la energía que reciben en cada una de sus caras: las 4 laterales y la superior. La energía recibida se determinó orientando el piranómetro en cada una de las 5 direcciones antes mencionada, comenzando 10 minutos antes del mediodía solar con una dirección y cambiando la orientación cada 4 minutos. Como el invernadero es un sistema de varias zonas con intercambio de masa, el procedimiento para determinar el calor ganado fue mediante un balance de masa y energía. El balance de masa considera el ingreso del aire desde la línea del ventilador, la salida de aire debidas al extractor y un intercambio positivo o negativo debido a elementos no sellados como la puerta, la unión con el suelo u otras uniones en general. La Tabla 1 presenta los resultados de la evaluación térmica de los invernaderos. Se consideró una corriente de aire a temperatura ambiente que ingresa al invernadero; se puede observar en estas tablas el calor de cada corriente de aire en el invernadero, obteniendo con estos datos una eficiencia global de 80% en promedio durante los días de prueba.

Tabla 1. Evaluación térmica de los invernaderos secundario y principal ($\dot{m}_{inter}$: Masa de aire interna, T: Temperatura, h: Coeficiente de transferencia de calor).

Invernadero secundario									
Corriente	Ventilador			Extractor			Intercambio		
Hora	$\dot{m}_{inter}$ [kg/s]	T [ºC]	h [kJ/kg]	$\dot{m}_{inter}$ [kg/s]	T [ºC]	h [kJ/kg]	$\dot{m}_{inter}$ [kg/s]	T [ºC]	h [kJ/kg]
12:33	0.18	58.5	331.7	1.06	46.5	319.7	0.88	39.5	312.7
12:43	0.17	62.8	336.0	1.23	47.0	320.2	1.06	39.8	313.0
12:53	0.22	62.9	336.0	1.24	45.1	318.3	1.02	40.5	313.7
Invernadero principal									
Corriente	Ventilador			Extractor			Intercambio		
Hora	$\dot{m}_{inter}$ [kg/s]	T [ºC]	h [kJ/kg]	$\dot{m}_{inter}$ [kg/s]	T [ºC]	h [kJ/kg]	$\dot{m}_{inter}$ [kg/s]	T [ºC]	h [kJ/kg]
12:33	0.13	61.9	335.1	0.63	40.1	313.3	0.51	39.5	312.7
12:43	0.16	63.4	336.6	0.58	46.4	319.6	0.43	39.8	313.0
12:53	0.16	63.4	336.6	0.70	46.5	319.6	0.54	40.5	313.7

CONCLUSIONES.

Se diseñaron e instalaron dos secadores solares, uno primario para productos pesqueros y otro secundario de menor tamaño para secado de residuos de pescado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. Se acopló un banco de paneles fotovoltaicos y un banco de colectores solares de aire a los invernaderos para inyectar a los invernaderos aire caliente y bajar la humedad del aire ambiente. Al operar los secadores solares con el sistema solar de calentamiento se obtuvieron temperaturas preliminares promedio en el interior de los secadores de 61 °C, operando el extractor-ventilador a máxima carga, lo cual es aceptable para el secado de productos pesqueros, ya que se requiere para este proceso temperaturas medias de aproximadamente 55 °C, mientras que con el sistema solar fototérmico con almacenamiento de agua caliente, se obtuvieron temperaturas promedio en el interior de los secadores de 58 °C. Pueden deshidratar hasta 480 kg de productos pesqueros frescos operando de manera continua a carga máxima. Se deshidrató pescado de bajo valor comercial nativo del estado de Campeche y se presenta la cinética de secado de la especie Chac-chí, se llevó a cabo durante dos días de procesamiento, en 14 horas de secado continuo, con una irradiancia solar máxima de 881 W/m² y una temperatura máxima registrada de 35 °C.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASOLMEX. (2016). El potencial de la energía solar en México. Deng, Z., Li, M., Xing, T., Zhang, J., Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). A literature research on the drying quality of agricultural products with using solar drying technologies. Solar Energy, 229, 69–83. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.041

Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Gabbasa, M., & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of solar drying system for red chili. Solar Energy, 99, 47–54. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.019

García Valladares Octavio, P. F. I. (2017). Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial.

Machuelo, E., Tilapias, R., & Total, O. (2017). Producción de captura de pescado. 2016–2017.

Ramírez-Rodríguez, M. (2015). La pesquería de camarón en Campeche: Desarrollo histórico y perspectiva. Ciencia Pesquera, 23(1), 73–87

Wakida-Kusunoki, A. T., Rojas-González, R. I., Toro-Ramírez, A., Medina-Quijano, H. A., Cruz-Sánchez, J. L., Santana-Moreno, L. D., & Carrillo-Nolasco, I. (2016). Caracterización de la pesca de camarón en la zona costera de Campeche y Yucatán. Ciencia Pesquera, 24(May), 3–13.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

SISTEMA REMOTO DE MONITOREO TERMOHIGROMÉTRICO PARA UN SECADOR SOLAR

Jesús O. Álvarez Ruíz 1, Set J. Castillo Avila 2, José E. Manzanero Salvador 3. Freddy I. Chan Puc 5.
División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019, México, (983) 835 0300, oriefiel@uqroo.edu.mx, setjubal@uqroo.edu.mx, 1620706@uqroo.mx. freddy@uqroo.edu,mx.

Guillermo Becerra-Nuñez 4.
División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, CONAHCYT – UAEQRoo, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019, México, 3121327097, guillermobecerran@gmail.com.

Said E. Ricardes Badillo 6.
Área de Desarrollo de Software Multiplataforma, Universidad Tecnológica de Chetumal, Lago de Patzcuaro, Subteniente López, Quintana Roo, C.P. 77965, México, (983)1655883, 8122110002@utchetumal.edu.mx.

RESUMEN

En el presente documento se describe un sistema de monitoreo remoto para un secador solar, en la península de Yucatán. El cual, se basa en un microcontrolador de la marca Espressif Systems con soporte en las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), montado sobre una placa de circuito impreso con los elementos electrónicos y sensores necesarios para las mediciones de las variables implicadas.

El sistema monitorea la temperatura y humedad a través de una aplicación web accesible desde la nube, el envío de datos se realiza por medio de una conexión WiFi. Además, esta aplicación permite observar el comportamiento de las variables, así como llevar un registro en una base de datos, que permite la descarga posterior para analizar la dinámica del comportamiento del dispositivo secador, para evaluar los tiempos de secado de diferentes productos vegetales.

Se puede destacar que al monitorear remotamente el usuario no requiere estar en sitio para realizar mediciones correspondientes, reduciendo la interrupción del seguimiento del análisis por indisponibilidad del operador. Por otro lado, el secado de productos deriva en beneficios como: mayor preservación y disponibilidad del producto, reducción de la masa, facilidad de transporte y menor exposición del usuario a la radiación solar UV.

ABSTRACT

This paper describes a remote monitoring system for a solar dryer located in the Yucatán Peninsula. The system is based on a microcontroller from Espressif Systems, with support for Internet of Things (IoT) technologies, mounted on a printed circuit board with the necessary electronic components and sensors for measuring the involved variables.

The system monitors temperature and humidity through a web application accessible from the cloud, with data is sent via a WiFi connection. Additionally, this application allows users to observe the behavior of the variables, and maintain a database record, which can be downloaded later to analyze the dynamics of the solar dryer's performance and evaluate drying times for various plant products.

It is noteworthy that by remotely monitoring, users do not need to be on-site to conduct measurements, thus reducing interruptions in analysis due to operator unavailability. Furthermore, drying products results in benefits such as better preservation and availability of the product, reduced mass, ease of transportation, and lower exposure to UV solar radiation for users.

Palabras claves: sistema de monitoreo, secador solar, microcontrolador, Internet de las Cosas, humedad-temperatura.

INTRODUCCIÓN

La energía solar se puede aprovechar para diversas aplicaciones, entre ellas el secado de productos orgánicos para el consumo humano. Uno de los propósitos del secado de productos es la conservación de estos, que se basa en que las enzimas y los microorganismos necesitan agua para realizar sus actividades. Por otra parte, cada producto debe cumplir con cierto grado de humedad (contenido de agua seguro) para mejorar su preservación y manejo post cosecha, reduciendo las reacciones químicas y el desarrollo de microorganismos [1].

El secador que se pretende implementar en este proyecto servirá para secar plantas nativas de la región, usadas como tratamientos de medicina alternativa, y de las que es difícil encontrar estudios que describan el proceso de secado de estas. Por lo tanto, es importante realizar experimentos para conocer las propiedades físico-térmicas de estas plantas, y para ello se requiere monitorear variables como: la temperatura, humedad y masa del producto en el proceso de secado. Lo cual, permitirá determinar los límites de temperatura y humedad de secado para cada especie vegetal a tratar, evitando niveles que provoquen la pérdida de compuestos químicos esenciales.

Por otro lado, aprovechando las tecnologías actuales como el Internet de las Cosas (IoT) y dispositivos de hardware abierto que son de fácil adquisición, económicos, versátiles y cumplen con las características electrónicas suficientes, se desarrolla un sistema de monitoreo remoto. El sistema podrá registrar el valor de las variables mencionadas con los sensores adecuados para su posterior análisis y estudio. Lo anterior evita la exposición prolongada a la radiación solar para el usuario y usar instrumentos de campo tradicionales que obligan al operador a estar presencialmente (método que entorpece el monitoreo por truncar la continuidad de las mediciones).

El resto del trabajo está organizado de la siguiente forma. En la sección antecedentes, se describen los sistemas de secado de algunos productos, además de sistemas y dispositivos que utilizan tecnologías IoT. Posteriormente en la sección de metodología, se describen los principales elementos que se utilizan en la presente propuesta. En la sección de resultados se muestra la primera versión del sistema de monitoreo y las mediciones obtenidas de pruebas preliminares. Por último, se presenta la sección de conclusiones y trabajos futuros.

ANTECEDENTES

En los últimos años se han desarrollado estudios con respecto al secado solar de alimentos alrededor del mundo, por ejemplo: Abdel-Rahman, Saleh, Hegazy, Fouzy y Embaby [2], reportan el secado de dátiles Siwi en Egipto mediante un secador solar cerrado para evitar la exposición a diferentes contaminantes, ya que normalmente se realizaba el secado solar abierto; Kreetachat, Imman, Suwannahong, Wongcharee, Muangthong-on y Suriyachai [3], analizan la metodología para la optimización del secado de plátano en Phayao, Tailandia, mediante un secador solar que usa el efecto invernadero; Suvanjumrat, Chuckpaiwong, Chookaew y Priyadumkol [4], evalúan el deshidratado de piña con un secador solar-electrohidrodinámico, en Pathom, Tailandia; Thomasson, Raitila y Tsupari [5], realizan el secado de biomasa en condiciones nórdicas de Finlandia, mediante un secador solar híbrido con bomba de calor.

Con respecto al uso de sistemas de automatización e internet de las cosas (IoT), existen trabajos desarrollados en diferentes ámbitos, entre ellos, el presentado por Miranda, Avilés, Márquez, Martínez, Morales y Becerra [6], donde se realizan el monitoreo del agua potable, en un prototipo enfocado a representar el sistema de la ciudad de Tecate B.C., México, para el monitoreo y automatización de éste. Otro de estos trabajos, es el presentado por Piamba-Mamian, Zambrano, Montaño-Rúales y Rojas-Gonzales [7], en él se presenta la implementación de un sistema de monitoreo de pH, temperatura y oxígeno disuelto, entre otras variables, para la etapa inicial de la producción de trucha arcoíris, en Colombia. Uno más de estos trabajos, es el presentado por Montaño-Blacio, González-Escarabay, Jiménez-Sarago, Mingo-Morocho y Carrión-Aguirre, donde se presenta un sistema de monitoreo IoT escalable basado en la tecnología Sigfox con capacidad de predicción del 89.37% a través de redes neuronales para aplicaciones agrícolas [8].

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se analizaron primero las variables de interés en el sistema de secado, las cuales, se deben medir para desarrollar modelos dinámicos y estimar el secado del producto.

Descripción del sistema

Se propone un sistema que cuenta con sensores de temperatura, humedad y galgas extensiométricas (para la medición de la pérdida de masa), los cuales, envían los datos a una tarjeta de desarrollo Devkitc_V4 que contiene un microcontrolador ESP32-WROOM-32D de la marca Espressif Systems. La tarjeta soporta los dispositivos requeridos para el funcionamiento del sistema. El dispositivo electrónico cuenta con tres etapas: la de entrada, procesamiento y salida.

Etapa de entrada

La etapa de entrada está formada por sensores que perciben las variables del entorno y las convierten en señales eléctricas, que puedan ser procesadas por el microcontrolador. Los cuales son; Sensor de temperatura digital DBS18B20 resistente al agua, Sensor de temperatura relativa y humedad DHT22, cuatro celdas de carga de 50 kg con transmisor HX711, además de un Módulo Reloj en tiempo Real (RTC, por sus siglas en inglés) modelo DS1302.

Etapa de procesamiento

La tarjeta recibe las señales de los sensores para procesarlas en el algoritmo programado mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 1. Se eligió esta tarjeta debido a: su tamaño reducido, el voltaje de operación bajo (ya que trabaja con lógica de 3.3 V), además ofrece la posibilidad de conectarse a una red WiFi sin necesidad de integrar un módulo adicional, entre otras características considerables.

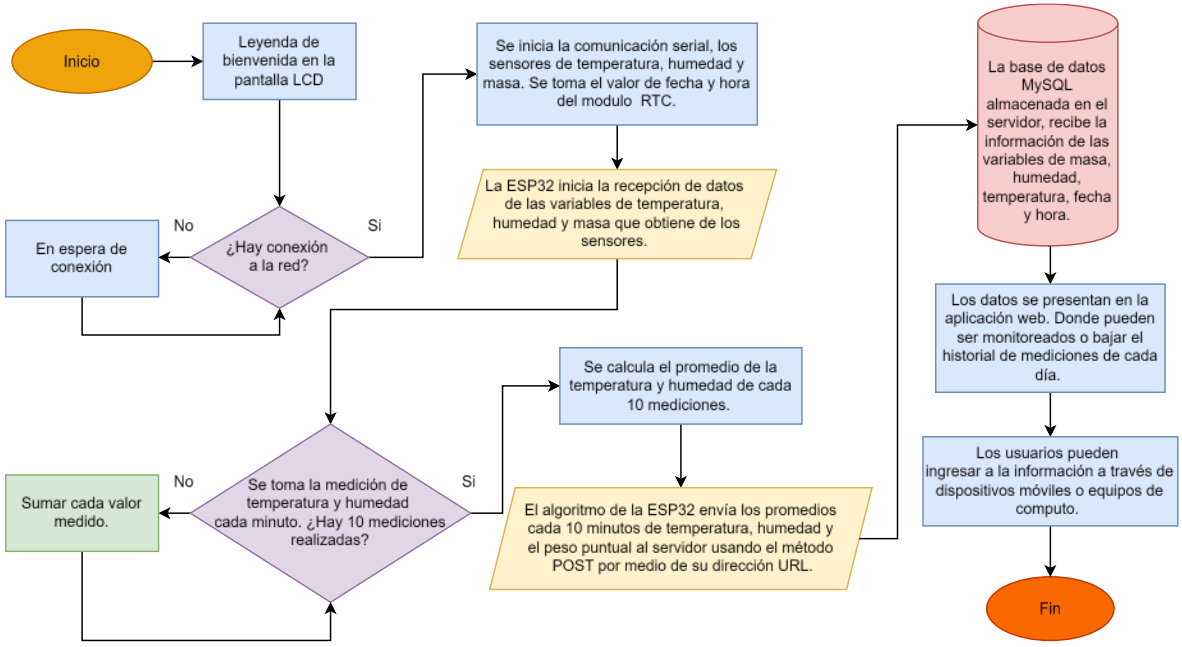


Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo programado en la tarjeta ESP32-Devkitc_V4.

Etapa de Salida

Está conformada por una parte de hardware con una pantalla LCD 20x4, la cual muestra el valor de las variables medidas cada minuto. Por otro lado, está la parte de software que incluye la base de datos almacenada en un servidor en la nube, posteriormente se pueden observar los valores de las variables en una aplicación web. A la que se puede acceder desde un dispositivo móvil o una PC, con el mapa de navegación mostrado en la Figura 2.

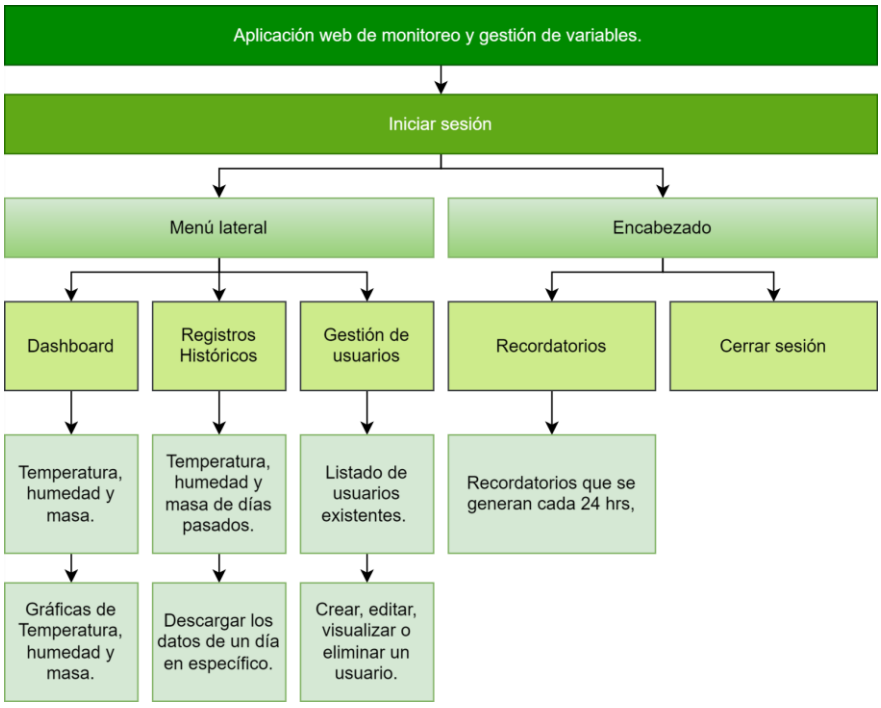


Figura 2. Mapa de navegación de la aplicación web.

RESULTADOS

Se han realizado algunas pruebas preliminares con el sistema de monitoreo. En la página web se muestra la descripción y funcionamiento del secador solar Figura 3, lo que se aprecia en la pantalla de inicio. Para consultar los datos, el usuario puede ver y descargar los registros de temperatura, humedad y masa promediados cada 10 minutos, además incluye gráficas que muestran los registros de estos Figura 4.



Figura 3. Características del secador solar en la DCIT al ingresar al sitio Web.

En la Figura 4, se aprecia la variación de las mediciones de las variables de interés; Temperatura en tonalidad rojo, Humedad azul y en amarillo la Masa.

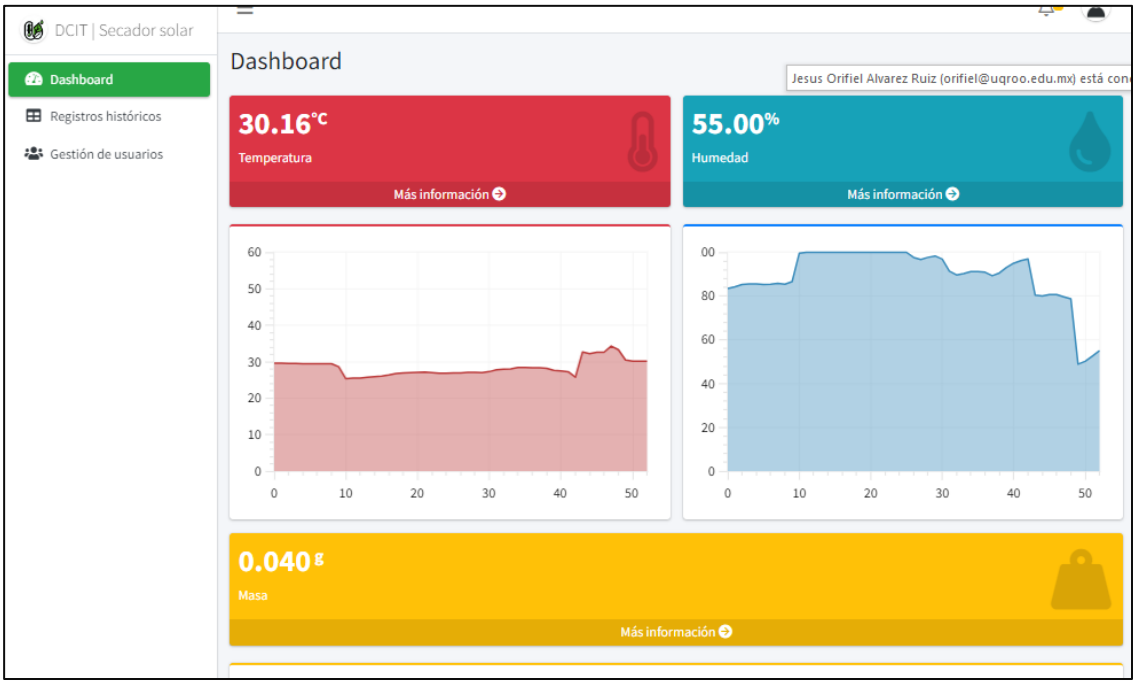


Figura 4. Datos graficados con los valores de las mediciones en la aplicación Web.

Por otro lado, la Figura 5 muestra la comparación de los datos obtenidos de un día de monitoreo de la temperatura y humedad con el datalogger desarrollado (DataloggerUQRoo) y los datos de la Estación Chetumal, del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En ellas se puede ver, que durante el tiempo de medición de cada variable el comportamiento es semejante con pequeñas variaciones.

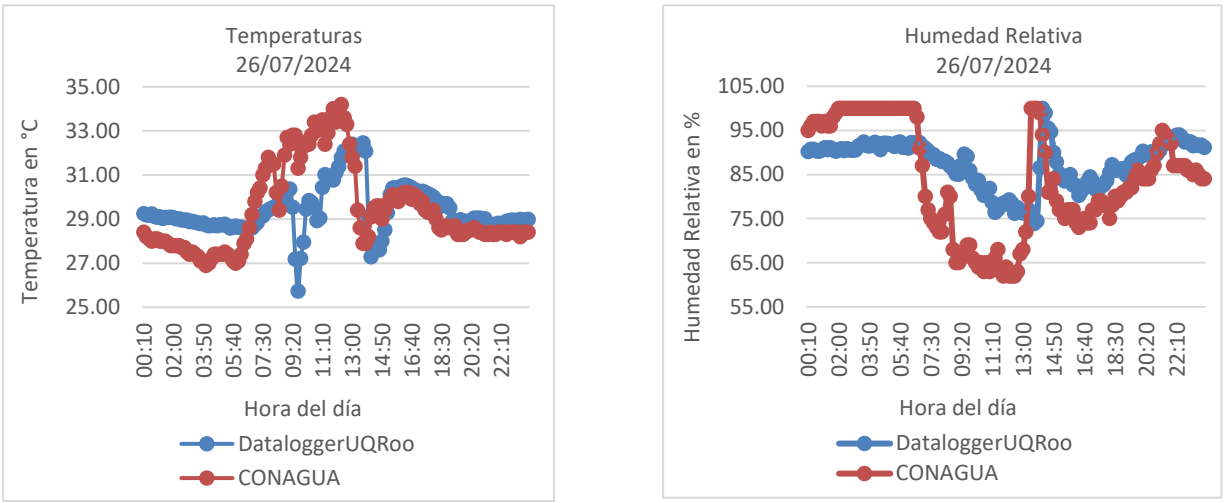


Figura 5. Comparación de datos de temperatura y humedad relativa de mediciones con el DataloggerUQRoo y de la CONAGUA.

CONCLUSIONES

En este trabajo se describe el sistema de monitoreo remoto que incluye las variables de temperatura, humedad y masa, para un secador solar de plantas nativas de la península de Yucatán, las cuales se usan como medicina alternativa. En las pruebas preliminares se logró visualizar las variables en una pantalla LCD, además de realizar algunos experimentos con variación de masa, lo que permitió corroborar el funcionamiento.

Por otro lado, se descargaron los datos de temperatura y humedad desde la aplicación Web, y se compararon con las mediciones de CONAGUA, en la Figura 5 se puede apreciar una correspondencia cercana entre el comportamiento de las mediciones del DataloggerUQRoo y de la CONAGUA. Las diferencias que se aprecian en las gráficas tienen origen en que los sensores de la CONOGUA y DataloggerUQRoo no se encuentran en el mismo sitio de la ciudad de Chetumal, el DataloggerUQRoo se encuentra enfrente de la Bahía de Chetumal y el otro en el Aeropuerto de la ciudad.

Para las mediciones de temperatura y humedad no se tuvo problemas en el registro. Para medir masa se encontraron algunos inconvenientes, entre ellos: la señal de salida de los sensores es analógica y se debe conectar a un puerto de la tarjeta de desarrollo que soporte la conversión de A/D; y otro, referente a la calibración de las galgas, pues para ello se debe considerar la masa de la tara, que introduce errores al sistema. Como trabajo a futuro se considera: el experimento de secado con algunas plantas nativas de la región; comparar la medición de masa con una báscula calibrada; pasar el circuito a PCB y colocarlo en un gabinete; y energizar el circuito mediante un sistema fotovoltaico.

REFERENCIAS

[1] Da Rocha, R. P.; Melo, E.C.; Corvín, J. B.; Berbert, P. A.; Donzeles, S. M.; Tabar, J. A. (2012). Cinética del secado del tomillo. Revista Blacileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.16, N.6, P. 675-683.

[2] Abdel-Rahman, G.N.; Saleh, E.M.; Hegazy, A; Fouzy, A.S.M.; Embaby, M.A. (2023). Safety improvement of the open sun dried Egyptian Siwi dates using closed solar dryer. Heliyon 9. p 1-10. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22425.

[3] Kreetachat, T; Imman, S.; Suwannahong, K; Wongcharee, S.; Muangthong-on. T; Suriyachai, N. (2023). Dataset on the optimization by response surface methodology for dried banana products using greenhouse solar drying in Thailand. Data in Brief 49, pp 1-10. https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109370.

[4] Suvanjumrat, C. Chuckpaiwong, I.; Chookaew, W.; Priyadumkol, J. (2024). Assessment of the pineapple drying with a forced convection solar- electrohydrodynamic dryer. Case Studies in Thermal Engineering 59. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104582.

[5] Thomasson, T.; Raitila, J; Tsupari, E. (2024). Experimental and techno-economic analysis of solar-assisted heat pump drying of biomass. Energy Reports 11. p. 316–326. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.062.

[6] Miranda, R.; Avilés, J.D.; Flores, J.; Márquez, C.L.; Martinez Clark, R.; Morales, J.; Becerra, G. (2023). Design and Application of a SCADA-IoT Platform for Monitoring a Raw Water Distribution Network. Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, pp. 431-436. https://doi.org/10.58571/CNCA.AMCA.2023.081.

[7] Piamba-Mamia, T.M.; Zambrano, L.E.: Montaño-Ruáles, L. A.; y Rojas-Gonzalez, F. A. (2021). Implementación de un sistema de monitoreo IoT aplicado a una pisciculture de trucha. Informador Técnico, 85 (1). pp. 3-19. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-ImplementacionDeUnSistemaDeMonitoreoIoTAplicadoAUn-7868820.pdf.

[8] Montaño-Blacio, M.; González-Escarabay, J.; Jiménez-Sarago, O.; Mingo-Morocho, L.; y Carrión-Aguirre, C. (2023). Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos. Ingenius. No. 30, pp. 9-18. http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n30/1390-860X-ing-30-00009.pdf.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SECADO SOLAR: DESARROLLO DE SECADORES SOLARES PARA COMUNIDADES RURALES

Octavio García Valladares, Víctor Hugo Gómez Espinoza, Alfredo Domínguez Niño, Paulina Guillén Velázquez, Daniel Hernández Tamayo, Juan Pablo Hernández Jerónimo, Rocío Carmen Martina Cortés Popoca
Instituto de Energías Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Privada Xochicalco s/n Col. Centro, CP 62580, Temixco, Morelos, México
ogv@ier.unam.mx

RESUMEN

La tecnología termosolar generada por el Instituto de Energías Renovables de la UNAM en secado solar de alimentos, han servido como base para diseñar acciones de trabajo relacionadas con los diversos problemas alimentarios del pueblo indígena de Hueyapan, Morelos. Los secadores solares desarrollados y presentados en este artículo son evaluados experimentalmente y han sido una herramienta eficiente porque está impactando en la reducción del desperdicio de alimentos y, asimismo, fortalece el desarrollo económico comunitario del pueblo y de la región. El proyecto ofrece la oportunidad social de aumentar la producción y disposición de productos nutritivos en el mercado y en la mesa de las familias de la región.

El centro comunitario para el secado solar de alimentos se ha convertido en el espacio generador de trabajo social, y el lugar para vivir la experiencia de transformar los alimentos que se han desechado durante años. La fusión entre la tecnología de los secadores solares y el aprendizaje de las personas para usar correctamente esta tecnología, da paso a la disminución de la desigualdad social, la pobreza y el hambre.

ABSTRACT

The solar thermal technology generated by the Renewable Energy Institute (UNAM) in solar food drying has served as a basis for designing work actions related to the various food problems of the indigenous people of Hueyapan, Morelos. The solar dryers developed and presented in this article are experimentally evaluated and have been an efficient tool because it is impacting the reduction of food waste and, likewise, strengthens the community economic development of the town and the region. The project offers the social opportunity to increase the production and availability of nutritious products in the market and on the tables of families in the region.

The community center for solar food drying has become the space that generates social work, and the place to live the experience of transforming food that has been discarded for years. The fusion between solar dryer technology and people's learning to correctly use this technology gives way to the reduction of social inequality, poverty and hunger.

Palabras claves: energía solar, secado solar, deshidratación solar, tecnología, alimentos.

INTRODUCCIÓN

Cada año a nivel mundial de acuerdo a la FAO, se pierden 1,300 millones de toneladas de alimentos lo que se traduce a emitir aproximadamente el 8% de los gases de efecto invernadero [FAO, 2015]. En México se desperdicia un 37% de la producción nacional, lo que equivale a 20 millones de toneladas de alimentos al año y de acuerdo a estas cifras se estima que más de 25 millones de mexicanos viven en pobreza alimentaria, dicho con otras palabras, no tienen acceso a una dieta nutritiva y suficiente [FAO, 2023]. Esta situación compleja requiere de acciones contundentes que permitan no solo la reducción de desperdicios, sino también consolide las condiciones para una seguridad alimentaria a fin de lograr que las personas tengan acceso a una nutrición adecuada.

Una técnica que permite reducir el desperdicio de alimentos de una manera sostenible, es el secado solar de alimentos, el cual utiliza la radiación solar como fuente de energía para disminuir la cantidad de agua presente en un alimento; se considera una de las aplicaciones de la energía solar ancestral (secado a cielo abierto).

En el pueblo indígena de Hueyapan, Morelos, México, el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM, implementó un proyecto social que atendió la problemática alimentaria, ambiental y social del lugar. En el proyecto se diseñó, construyó y puso en operación un centro comunitario para el deshidratado solar de productos agropecuarios de pequeños productores indígenas de Hueyapan, Morelos con el objetivo para reducir el desperdicio de alimentos, buscando contribuir en la disminución del impacto ambiental, incrementar el desarrollo económico comunitario de la región, así como una mayor producción y disposición de productos nutritivos en el mercado y en la mesa de las familias de la región.

La finalidad del centro es, consolidar un espacio de trabajo comunitario y el acopio de alimentos (frutas, verduras, hierbas aromáticas y medicinales) para lograr revalorizar los productos que están dejando de consumirse y generar un impacto alimentario, social, cultural, ambiental y económico. Específicamente, el presente artículo describe las características de la tecnología de los secadores solares y su apropiación social para ser usados por mujeres, hombres, niñas, niños y juventudes de Hueyapan para la conservación alimentaria. Los secadores solares, permitieron que las personas aprendieran a manejar las tecnologías generadas en un contexto de economía circular.

TECNOLOGÍA DE SECADO SOLAR DESARROLLADA

Secador solar para uso doméstico y capacitación de niños, jóvenes y adultos.

En estos secadores, los rayos solares son transformados en calor a través del efecto invernadero en un secador solar (Figura 1a), que tiene los siguientes elementos: a) una superficie que se debe orientar hacia la dirección del Sol, que recibe y absorbe los rayos luminosos; b) una cubierta transparente, que deja pasar la radiación solar y evita el escape del calor; c) elementos aislantes en todo su cuerpo para evitar que el calor generado se pierda al ambiente.

Está construido con materiales ligeros, con una buena transmitancia a la radiación solar y que actúa a su vez como aislante térmico con efecto de invernadero. Cuenta con un área de secado de 0.3 m^2 (una capacidad entre 0.5 y 1 kg de producto fresco dependiendo de la presentación en que se seque el alimento); son para uso doméstico y son comerciales. Se han empleado de forma exitosa para la capacitación inicial de personas productoras indígenas, así como en la enseñanza (ver Figura 1b) en el sector educativo (jardín de niños, primaria y secundaria), ya que son pequeños y fáciles de transportar. Y se han dejado en las bibliotecas de las escuelas para que los alumnos los puedan sacar prestados y utilizarlos en sus casas.

Estos secadores han sido evaluados con diferentes plantas y frutas comestible utilizando diferentes cubiertas (vidrio, policarbonato, acrílico, polietileno y superficie selectiva), para evaluar el tiempo de secado del alimento y como afectan estas cubiertas las propiedades nutrimentales y el color final del alimento.



Figura 1 a) *Secador solar uso doméstico b) enseñanza a nivel básico utilizando estos secadores c)secador con diferentes cubiertas*

Como ejemplo de alguno de los trabajos realizados con estos equipos, se tiene el de "Efecto del uso de un secador solar modificado sobre las propiedades fisicoquímicas del fruto de carambola (Averrhoa carambola L.)" [García-Valladares et al., 2022], donde se analiza cómo las condiciones óptimas de secado dependen del material de la cubierta del secador. En dicho trabajo, se modificó la cubierta un secador solar con cuatro materiales diferentes: vidrio, acrílico, policarbonato y polietileno (Figura 1c). El contenido de humedad de las rodajas de carambola se redujo de 89.23% a un contenido de humedad final entre 2.2% y 5.9% en un tiempo máximo de 650 min. La actividad de agua final de las muestras secas varió de 0.310 a 0.414. Se obtuvo que la degradación del ácido ascórbico es menor en los secadores de vidrio (159.50 mg/100 g base seca) y superiores en secadores de polietileno (124.37 mg/100 g base seca) y la menor diferencia de color (13.83) obtenido por los parámetros de Hunter L, a y b entre el producto fresco y seco se obtuvo con la cubierta de policarbonato donde también se obtuvo la mayor cantidad de carotenoides (4.26 mg/g base seca). Mientras que desde el punto de vista de la rapidez del secado el orden de menor tiempo a mayor fue: vidrio, acrílico, policarbonato y polietileno.

Secador solar tipo gabinete (secador mixto) para pequeños productores.

El secador solar cuenta con 10 bandejas de 43 x 63 cm en el interior (un área de secado de 2.7 m^2 con una capacidad aproximada de entre 5 y 10 kg de producto fresco dependiendo de la presentación en que se desee secar el alimento), un captador solar para calentamiento de aire y un pequeño ventilador fotovoltaico, lo que lo hace totalmente autónomo (ver Figura 2a). El equipo puede funcionar como un secado mixto (directo e indirecto) de los productos agropecuarios o puede convertirse en un secador indirecto si se cubre el gabinete con una malla sombra o algún otro material para utilizarse con productos donde el color o propiedades puedan ser degradados por los efectos de exposición directa a la radiación solar.

Este secador se puede desarmar y trasladar fácilmente en una pequeña camioneta, en caso de ser necesario, para instalarse en huertos y hacer pruebas locales de deshidratación solar o se puede emplear para dar cursos de capacitación en diferentes lugares o comunidades (Figura 2b). Uno de los trabajos de investigación realizados con este secado es la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y colorimétricas de Zompantle (Erythrina americana). Para lo cual fue operado en diferentes formas con malla sombra para cubrir el gabinete (modo indirecto) y sin ella sombra (modo directo), y variando el flujo de aire (convección natural y convección forzada). Se obtuvo que para conservar mejor las propiedades de la flor se debía usar la malla sombra. En estas condiciones, la eficiencia total de secado (calculada con base a la energía necesaria para evaporar el agua del producto dividida entre la energía solar total recibida por el secador [García-Valladares et al., 2022]) fue 17.10%, la temperatura máxima alcanzada fue de 62.28 °C, las proteínas completas en el producto deshidratado fueron 7.65%, grasas 2.30%, fibra 4.93%, cenizas 8.08% y sólidos solubles totales 36°Brix. Bajo estas condiciones también se asegura un color rojo en el zompantle deshidratado. Con lo que se sugiere utilizar el secador solar en modo indirecto sin exposición a la radiación solar. Las flores de Zompantle deshidratadas pueden tener varias aplicaciones prácticas, por ejemplo, como aditivo no sólo en la cocina tradicional mexicana sino también para platos como pastas, cremas, harinas e incluso formulados alimentos [García-Valladares et al., 2022].



Figura 2 a) Secador solar tipo gabinete. b)

Secador solar tipo túnel (secador mixto).

Se diseñó y construyó un secador solar tipo túnel de 40 charolas de 43 x 63 cm con un área de secado de 10.8 m^2 y una capacidad aproximada de entre 25 y 50 kg de producto fresco dependiendo de la presentación en que se quiera secar el alimento. Cuenta con 4 captadores solares para calentamiento de aire en serie (de 1.7 m^2, los presentados en la subsección 2.2) y un ventilador accionado por un sistema fotovoltaico lo que le permite operar sin necesidad estar conectado a la red eléctrica (Figura 4a) o bien con electricidad (Figura 4b). Al igual que el anterior se puede utilizar como secador mixto o indirecto.



Figura 3 a) Secador solar tipo túnel ventilador fotovoltaico b) secador solar tipo túnel ventilador eléctrico

En la investigación de las aplicaciones del secador solar tipo túnel, se han realizado entre otras cosas la evaluación térmica de un secador bajo diferentes condiciones de operación, una de ellas por ejemplo con 40 charolas de agua con medio litro cada una (20 kg de agua en total), para evaluar la eficiencia de secado y del secador, así como para observar cómo se comporta las diferentes áreas de secado del secador. Las pruebas se realizaron desde las 11 a las 15 horas (hora solar), obteniéndose una eficiencia de los 4 colectores conectados de serie de 35% y una eficiencia de secado de 16.5% [Hernández Tamayo et al., 2022] con temperaturas en el secador tipo túnel de 45 a 65 °C. Al final de la prueba de secado con el agua, se midió el agua contenida en cada charola, para ver la cantidad de agua que se había evaporado durante el transcurso de la prueba, la cual fue de 9.82 kg, con una insolación es ese periodo de 12.3 MJ/m^2. Los resultados de la evaporación del agua se pueden ver en la Figura 4, donde como era de esperarse la cantidad de agua evaporada fue mayor en las charolas de arriba que reciben directamente los rayos del sol y en las charolas de la entrada del aire caliente, lo que da la pauta para dos conclusiones u observaciones, a la mitad del proceso de secado de alimentos deberían rotarse las charolas de arriba hacia abajo y las más alejadas de la entrada de aire caliente hacia la entrada de aire (o bien si tomamos como referencia la Tabla 1, las casillas pintadas de color rojo y naranja hacia las posiciones amarillas y verdes) para poder obtener un secado más homogéneo. Adicionalmente se trabajará en rediseñar la entrada de aire al túnel para intentar que se tenga un secado más homogéneo a lo largo de todo el túnel [Hernández Tamayo et al., 2022].

Tabla 1. Representación esquemática de las charolas a lo largo y alto de secador y los gramos de agua evaporada en cada una.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	446	460	433	448	444	494	437	438
2	107	165	150	158	188	260	180	188
3	169	133	131	169	174	192	187	177
4	161	160	153	191	129	224	223	142
5	312	293	240	275	241	267	216	270



Figura 4 Secador solar tipo túnel en un prueba de secado con irradiación de 12.3 MJ/m^2, humedad relativa ambiental de 48.6 % y una temperatura ambiente de 34.2 °C.

Secador solar tipo invernadero (secador mixto).

El secador solar tipo invernadero está conformado por una nave curva con dimensiones de 8 m de largo x 8 m de ancho y 2.5 m en la parte más alta del domo; tiene un volumen aproximado de 160 m^3. En el interior del secador por la parte inferior se instalaron 4 ductos para la distribución del aire caliente proveniente de los captadores solares, tiene una capacidad de alojar cerca de 200 kg de producto fresco (160 charolas de 43 x 63 cm). En la Figura 5 se muestra el secador solar tipo invernadero.

El sistema solar está conformado por 16 captadores solares para calentamiento de aire de 1.7 m^2 obteniendo un área total de captación de 27.2 m^2; el arreglo de los captadores está distribuido en cuatro hileras en paralelo, con cuatro captadores acoplados en serie para cada una de las hileras. El banco de captadores solares está acoplado e interconectado al secador tipo invernadero mediante ductos circulares. El aire a temperatura ambiente es inducido a través de los captadores solares mediante un extractor-ventilador centrífugo para después ser ingresado al secador solar. El sistema solar fotovoltaico (SFV) para la generación de la energía eléctrica requerida, está constituido por 8 paneles solares fotovoltaicos, donde cada panel tiene un área de captación de 2.56 m^2 y 550 W de potencia eléctrica máxima, lo que da un área total de captación de 20.4 m^2 con 4400 W de potencia máxima. El SFV opera de manera continua acoplado al secador durante los periodos con suficiente radiación. El sistema cuenta con 8 baterías de carga para proporcionar una autonomía de operación al ventilador de hasta 4 h.

Centro Comunitario para el deshidratado solar de productos agropecuarios de pequeños productores indígenas de Hueyapan.

La planta comunitaria de secado solar de alimentos de Hueyapan (ver Figura 6) cuenta con: 4 secadores solares tipo gabinete; 2 secadores solares tipo túnel; un secador solar tipo invernadero mixto y un cuarto de procesamiento de alimentos 64 m^2 con la infraestructura necesaria para la selección, el lavado y desinfectado, el procesamiento, el empaque y el almacenamiento de los productos que se van a secar, producir y comercializar. Cuenta con un sistema solar de 150 litros para calentamiento de agua, la cual es usada para los procesos de limpieza y desinfección. Los sistemas de secado solar instalados actualmente tienen una capacidad de 280 charolas (de 43 x 63 cm), lo que representa un área de secado solar de alimento equivalente a 75.6 m^2. Esto permite que en un buen día de sol se pueda secar aproximadamente 170 kg de manzanas, peras o duraznos frescos en rebanadas de 3 mm de espesor, lo que producirá cerca de 17 kg de manzanas, peras o duraznos deshidratados equivalentes a una producción diaria de alrededor de 500 bolsas comerciales de 35 g o bien una producción mensual estimada de unas 10,000 bolsas.



Figura 5 *Secador solar tipo invernadero*



Figura 6 Vista área del Centro Comunitario para el Deshidratado Solar de Productos Agropecuarios de Pequeños Productores Indígenas de Hueyapan. Video: https://www.youtube.com/watch?v=CWS7ZeNf29c

EL INTERCAMBIO DE SABERES PARA LA TRANSFORMACIÓN AMBIENTAL Y ALIMENTARIA.

La responsabilidad social para conservar un medioambiente sano, en favor de las personas y el planeta, es fundamental para lograr erradicar la pobreza. Para lograr estos objetivos, el IER con el apoyo de Conahcyt, crearon este proyecto que permitió establecer un diálogo, para promover nuevas prácticas alimentarias con base a la enseñanza del secado solar.

Hueyapan está en Morelos, en las estribaciones del Volcán Popocatépetl. Sus tierras son muy fértiles y cuentan con un excelente suministro de agua, lo cual genera una alta producción de cultivos agrícolas durante todo el año, que terminan clasificándose como desperdicio alimentario. Los desperdicios alimentarios representan un impacto negativo en el medio ambiente porque nadie los consumirá. [FAO, 2015]

El trabajo del Centro Comunitario se sustentó el empleo de metodologías participativas para asegurar el respeto cultural y ecológico. Para lograr los objetivos, se establecieron 4 componentes:

a. ***Creación de una planta de secado solar de alimentos.*** Es un espacio de trabajo donde dialogan la ciencia y la visión cultural, social, climática, histórica y geográfica, porque en él se realizan las prácticas de transformación de las frutas. Se creo la cooperativa FRUtas FREscas DEShidratadas para la COmercialización (FruFreDesCo) de carácter productivo y social; con base al respeto de las decisiones y a la cultura organizacional de los productores. La cooperativa cuenta con 8 mujeres y 7 hombres, encabezados por una presidenta elegida por unanimidad.

b. ***Ejecución de programas educativos.*** El manejo de la tecnología generadora de energía limpia para el secado de alimentos, fue el medio para valorar sus saberes y sabores culturales promoviendo un pensamiento crítico en las y los alumnos de educación básica (jardín de niños, primaria y secundaria). Los programas educativos y de capacitación sobre la deshidratación solar de alimentos, higiene y valores nutrimentales de productos locales, son acordes con los procesos culturales alimentarios y cuidado del ambiente y se adaptan al nuevo modelo educativo; además de con el interés suscitado se hicieron también talleres para los padres de familia con perspectiva de género, cada destacar la mayor participación y empuje de las mujeres en estos talleres. Para lo anterior cabe destacar la elaboración del libro tipo cuento "El secreto de Julia para secar alimentos con el sol", el cual abre la oportunidad de desarrollar el interés y la intención de manejar estrategias de conservación y transformación de los alimentos. El libro ha sido traducido al náhuatl de Hueyapan por integrantes de la cooperativa; trae en la parte final un instructivo para el armado de un secador solar (Figura 7a). Además, se han utilizado medios masivos de divulgación como el TikTok para fomentar entre los más jóvenes en interés por el secado solar de alimentos (como ejemplo Figura 7b: https://www.tiktok.com/@secado_solar_ier.unam/video/7170108264296893702).

c. ***Tecnología generadora de energía limpia para el deshidratado de alimentos en un contexto de economía circular*****.** Se logró que los pequeños productores indígenas, valoraran el uso del secado solar de sus alimentos para el mejoramiento de su contexto aplicando las tecnologías de secado solar de alimentos realizadas de acuerdo al clima de la región y a los productos que se van a secar, utilizando tecnología 100% nacional, fácil de usar y dada la capacitación adecuada para que se apropien de estas tecnologías.

d. ***Cadenas rentables y justas de comercialización, poniendo énfasis en la transformación alimentaria de las frutas consideradas como desperdicio*****.** La planta fortaleció el trabajo colectivo para garantizar que los pequeños productores, realicen una justa comercialización de los productos deshidratados y reciban los beneficios sociales, económicos y alimentarios. Se creó y registró la marca HUELIC ("sabroso" en náhuatl, ver Figura 7c), así como el diseño de su empaque final con los sellos, tabla nutrimental y demás requisitos para su venta masiva. Con lo anterior se ha iniciado su venta en diferentes mercados ecológicos y en algunas plazas donde se ha dado a conocer con bastantes buenos resultados, aunque aún se espera ampliar los puntos de venta y la venta de los mismos en un futuro cercano para lo cual se llevan a cabo con los productores indígenas de la cooperativa

talleres sobre marketing, producto, precio, plaza y promoción con el objetivo de ayudar a consolidar el proyecto y hacerlo viable a largo plazo.



Figura 7 a) Libro bilingüe español-náhuatl "El secreto de Julia para secar alimentos con el sol". Descarga gratuita del libro: https://doi.org/10.22201/ier.9786073066525e.2022 b) TikTok ¿Cómo se deshidratan las frutas? c)Producto HUELIC

CONCLUSIONES

La tecnología generada, instalada y evaluada por investigadores del Instituto de Energías Renovables de la UNAM en secado solar de alimentos, han servido como base para diseñar acciones de trabajo relacionadas con los diversos problemas alimentarios de comunidades rurales, poniendo como ejemplo el pueblo indígena de Hueyapan, Morelos. La tecnología desarrollada ha sido diseñada, evaluada y se han obtenido buenos rendimientos térmicos. Su implementación está impactando en la reducción del desperdicio de alimentos y, asimismo, fortalece el desarrollo económico comunitario del pueblo y de la región. La tecnología ofrece la oportunidad social de aumentar la producción y disposición de productos nutritivos en el mercado y en la mesa de las familias de la región.

El Centro Comunitario se ha convertido en el espacio generador de trabajo social, y el lugar para vivir la experiencia de transformar los alimentos que se han desechado durante años en Hueyapan. También es el espacio que cobra un significado social para el cuidado de la riqueza agrícola y alimentaria del pueblo. La fusión entre la tecnología de los secadores solares y el aprendizaje de las personas para usar correctamente esta tecnología, da paso a la disminución de la desigualdad social, la pobreza y el hambre.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por proyecto CONAHCyT 319188: Centro Comunitario para el Deshidratado Solar de Productos Agropecuarios de Pequeños Productores Indígenas de Hueyapan, Morelos.

REFERENCIAS

FAO (2015). Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos. Recuperado de: https://www.fao.org/3/i4068s/i4068s.pdf

FAO (2023). Alimentación y agricultura sostenibles. Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved December 29, from https://www.fao.org/sustainability/es/

O. García-Valladares, A.L. Cesar-Munguia, E.C. López-Vidaña, B. Castillo-Téllez, C.A. Ortiz-Sánchez, F.I. Lizama-Tzec, A. Domínguez-Niño (2022). Effect by using a modified solar dryer on physicochemical properties of carambola fruit (Averrhoa carambola L.). Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 21, No. 1, Alim2650. https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2650

O. García-Valladares, Alfredo Domínguez-Niño, Ana María Lucho-Gómez, Andrea Gail Jiménez-Montiel, Arcel Siareth Rodríguez-Mendoza, Beatriz Castillo-Téllez, Mario Luna-Flores, Margarita Castillo-Téllez (2024). Mixed-Mode Solar Drying and its Effect on Physicochemical and Colorimetric Properties of Zompantle (*Erythrina Americana*). Plant Foods for Human Nutrition. Vol. 79 pp 194-201. https://doi.org/10.1007/s11130-024-01147-0

D. Hernández Tamayo, R. Pérez-Espinoza, O. García Valladares (2022). Evaluación térmica de un deshidratador solar tipo túnel mixto bajo diferentes condiciones de operación. 3er congreso nacional de secado, cocción y refrigeración solar de alimentos, Campeche, México.

Tecnología y Sistemas Fotovoltaicos

ID	TÍTULO	PONENTE
16172	Electroluminiscencia Blanca en Heteroestructuras tipo MOS con Grafeno y Óxidos de Silicio	José Alberto Luna López
16164	Materiales opto-electrónicos basados en InGaN Micro- y Nano-estructurado para Aplicaciones en Iluminación de Estado Sólido y Celdas Solares de Alta Eficiencias	Rafael García Gutiérrez
16145	Propuesta del PEDOT: PSS envejecido mediante tratamiento con isopropanol y acetona para su posible aplicación como capa transportadora de huecos en celdas solares de perovskita	José Erro Quiñonez
16208	Instalación de Plantas Fotovoltaicas por la Administración Pública Estatal.	Carlos Eduardo Borjas Castillo

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ELECTROLUMINISCENCIA BLANCA EN HETEROESTRUCTURAS MOS CON ÓXIDO DE GRAFENO Y ÓXIDOS DE SILICIO

Gabriel Omar Mendoza Conde, José Alberto Luna López, Zaira Jocelyn Hernández Simón, Karim Monfil Leyva, José Álvaro David Hernández De la Luz, Xóchitl Aleyda Morán Martínez
Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores (CIDS-ICUAP), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Col. San Manuel, Cd. Universitaria, Av. San Claudio y 14 Sur, Edificios IC5 y IC6, Puebla, 72570, México, 22-22-29-55-00, **gaomec13@gmail.com, jose.luna@correo.buap.mx, imezaira@gmail.com, karim.monfil@correo.buap.mx, jose.hernandez@correo.buap.mx, xochitlmoran@gmail.com**

Javier Flores Méndez
Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Col. San Manuel, Cd. Universitaria, Av. San Claudio y 18 Sur. Edificio FCE1, Puebla, 72570, México, 22-22-29-55-00, **javier.floresme@correo.buap.mx**

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo es investigar las propiedades eléctricas de materiales nanoestructurados basados en silicio como son el silicio poroso (SiP) y el óxido de silicio fuera de estequiometría (SiO_X), y su interacción con el óxido de grafeno (OG), así como películas de óxido de zinc (ZnO). Las capas de SiP fueron obtenidas mediante anodización electroquímica. Estas capas de SiP sirvieron como sustrato en donde se depositó OG por el método de spin coating, con el objetivo de infiltrar el SiP y modifiquen las propiedades luminiscentes y eléctricas del mismo. Para confinar estos materiales dentro del SiP, se depositaron películas delgadas de SiO_X en las estructuras Si-n/SiP/OG mediante la técnica de depósito químico en fase vapor activado por filamento caliente (HFCVD). Para poder estudiar las características eléctricas de estas estructuras se depositó un contacto de ZnO usando la técnica de spray pirólisis ultrasónico (SPU). Finalmente se depositó un contacto posterior de oro (Au) en las estructuras mediante sputttering, formando las estructuras tipo MOS, Au/Si-n/SiP/OG/SiO_x/ZnO. Las estructuras con OG presentaron electroluminiscencia (EL) blanca, en un amplio rango de voltaje (-140 a -210 V) y las corrientes necesarias para la emisión son bastante bajas (1 a 100 μA). La presencia de luz blanca es debido a la combinación de las emisiones luminiscentes de estos materiales nanoestructurados que conforman las estructuras, además de que la electroluminiscencia observada fue de área completa. Estos resultados indican que los dispositivos obtenidos en este trabajo se pueden aplicar como dispositivos fotónicos con bajo consumo de potencia.

ABSTRACT

The main objective of the present work is to investigate the electrical properties of silicon-based nanostructured materials such as porous silicon (SiP) and non-stoichiometric silicon oxide (SiO_X), and their interaction with graphene oxide (GO), as well as zinc oxide (ZnO) films. The SiP layers were obtained by electrochemical anodization. These SiP layers served as substrates where OG was deposited by the spin coating method, with the aim of infiltrating the SiP and modifying its luminescent and electrical properties. To confine these materials within the SiP, thin SiO_X films were deposited on the Si-n/SiP/OG structures by the hot-wire chemical vapor deposition (HFCVD) technique. In order to study the electrical characteristics of these structures, a ZnO contact was deposited using the ultrasonic spray pyrolysis (SPU) technique. Finally, a gold (Au) back contact was deposited on the structures by sputtering, forming the MOS type structures, Au/Si-n/SiP/OG/SiOx/ZnO. The structures with OG presented white electroluminescence (EL), in a wide voltage range (-140 to -210 V) and the currents necessary for the emission are quite low (1 to 100 μA). The presence of white light is due to the combination of the luminescent emissions of these nanostructured materials that make up the structures, in addition to the fact that the observed electroluminescence was full area. These results indicate that the devices obtained in this work can be applied as photonic devices with low power consumption.

Palabras claves: SiO_X, Óxido de Grafeno, Silicio Poroso, Óxido de Zinc, Electroluminiscencia.

1. Introducción

En 1990, Canham descubrió que, bajo ciertas condiciones, el SiP presenta fotoluminiscencia bajo la excitación de luz azul en el espectro visible e infrarrojo cercano a la temperatura ambiente [1]. La intensa fotoluminiscencia fue explicada en términos del confinamiento cuántico en la nanoestructura que se genera en el material. A partir de este descubrimiento, se generó una carrera en la comunidad científica hacia la búsqueda de dispositivos optoelectrónicos integrados, fabricados completamente de silicio. Este fue el primer paso hacia la denominada fotónica del silicio. La integración optoelectrónica basada en silicio sería muy importante debido a la necesidad de miniaturizar los circuitos integrados. Estas investigaciones vincularon al SiP con la fotónica, la cual permite modelar las propiedades ópticas y la posterior fabricación de cristales fotónicos de SiP con silicio macro y nanoporoso [2]. Por otro lado, muchos investigadores comenzaron a trabajar el óxido de silicio rico en silicio, en el cual mediante un proceso de recocido se generaban ncs-Si a partir de estos óxidos de silicio ricos en silicio, con la finalidad de poder aprovechar las interesantes propiedades ópticas que estos presentan en cuanto a la emisión de luz [1], además, de que al producir ncs-Si a partir de películas delgadas de SiO_X se obtiene una ventaja debido a que este material se puede integrar a la tecnología de semiconductor complementario de óxido metálico y con ello al desarrollo de tecnología fotónica basada en silicio. Para el desarrollo de esta tecnología, sin embargo, es necesario también el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos como lo son fotodetectores, celdas solares, guías de onda, etcétera

[3], lo anterior ha despertado un fuerte interés en este material para su aplicación a dispositivos optoelectrónicos, lo que ha acrecentado el número de investigaciones al respecto. A pesar de ser uno de los temas de investigación más populares en la última década, el grafeno tiene aplicaciones limitadas en optoelectrónica, debido a su estructura metálica sin ancho de banda prohibida, limitación que es superada al oxidar el grafeno y obtener OG. Se ha reportado que este ancho de banda prohibida le otorga propiedades ópticas interesantes, un ejemplo de ello es la presencia de emisión fotoluminiscente, la cual se presenta en la región azul y en un rango que va de 500 a 650 nm, lo cual se ha relacionado con la presencia de puntos cuánticos de óxido de grafeno [4].Por otro lado, el ZnO en diversos trabajos ha demostrado tener excelentes propiedades para aplicaciones optoelectrónicas, principalmente en dispositivos electroluminiscentes, logrando un amplio rango en la emisión, que abarca desde el ultravioleta hasta cubrir la luz blanca, además, también se ha observado la presencia del efecto fotoconductivo y fotovoltaico en películas de ZnO depositadas por SPU [5]. Los dispositivos fotónicos con estos materiales nanoestructurados son de gran interés en la actualidad, debido a sus interesantes propiedades eléctricas y fotónicas que son mejoradas y debidas a los efectos cuánticos que proporcionan las nanopartículas de silicio (nps-Si) y el OG, estas nanoestructuras mejoraran sustancialmente las propiedades de estos materiales, que a su vez incrementan la funcionalidad en dispositivos fotónicos.

2. Experimental

Las heteroestructuras se fabricaron utilizando sustratos de Si tipo n (1 0 0) con baja resistividad (<0.005 Ω-cm). El proceso para obtener la heteroestructura Sin/Psi/GO/SRO se describe a continuación. Las capas de SiP se obtuvieron por anodización electroquímica utilizando una celda de teflón, y el proceso de grabado se realizó durante 120 s, 240 s, 360 s y 480 s, respectivamente, con una densidad de corriente de anodización de 45,45 mA/cm^2. Para identificar las diferentes capas de SiP obtenidas, se utilizó la siguiente nomenclatura:

Tabla 1. Etiquetado de las capas de SiP.

Muestra	Tiempo de anodizado [s]	Densidad de corriente de anodizado [mA/cm^2]
B1	120	45.45
B2	240	45.45
B3	360	45.45
B4	480	45.45

La deposición de OG se realizó utilizando un método de recubrimiento por centrifugación; la concentración de OG fue de 2,6 g/L. El método de recubrimiento por centrifugación para la deposición de película delgada de OG tuvo los siguientes parámetros: El sustrato SiP recibió tres gotas de solución coloidal. Los sustratos se centrifugaron a 700 rpm durante 10 s antes de centrifugarse a 3000 rpm durante 15 s. Este proceso se realizó tres veces. Se utilizó un reactor HFCVD para depositar las películas de SRO. Las deposiciones se llevaron a cabo con un flujo de hidrógeno molecular (H_2) constante a 100 sccm y una distancia de fuente a sustrato (dfs) de 8 mm. Durante la deposición, se establecieron parámetros como la distancia de filamento a fuente (dff) y se mantuvieron constantes a 6 mm; a presión atmosférica, los filamentos tenían un voltaje aplicado de 84 V y un tiempo de deposición de 1 min. La disposición de la heteroestructura es la siguiente: para los contactos frontales, se depositaron películas de ZnO utilizando un método de spray pirólisis ultrasónica (SPU). La solución de ZnO (0,2 M) se preparó a partir de 2,195 g de acetato de zinc deshidratado, $Zn(O_2CCH_3)_2(H_2O)_2$, disuelto en 50 ml de metanol. El método SPU se aplicó con un nebulizador y la temperatura de los sustratos de fue de 300 ◦C con un tiempo de deposición de 10 min. Los contactos frontales tienen una geometría circular (0,28 mm^2) y un espesor de 215 nm. Un sistema de pulverización catódica depositó películas delgadas de oro para los contactos posteriores. Estas deposiciones se realizaron con una presión de vacío de 31 mTorr, una corriente de pulverización catódica de 24 mA y un tiempo de 10 min. Finalmente, las heteroestructuras se sinterizaron a 450 ◦C en una atmósfera de nitrógeno. En la figura 1, se presenta un diagrama esquemático de la heteroestructura.

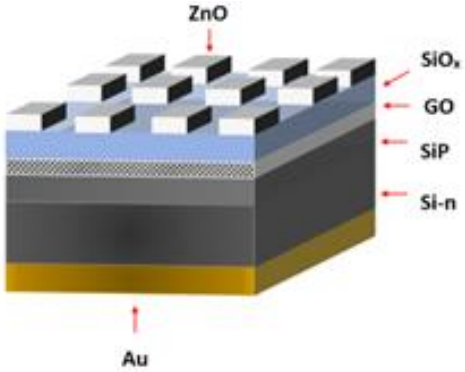


Figura 1. Esquema de las estructuras Si-n/SiP/OG/SiO$_X$/ZnO.

2.1 Caracterizaciones

Los espectros de FL se obtuvieron con Espectrofluorómetro FluroMax 3 de la marca Horiba Jobin Yvon, el cual contiene una lámpara de excitación de xenón de 150 W, una resolución de 0.3 nm, un rango de 370 a 1000 nm y un detector de emisión de alta sensibilidad. Las mediciones se realizaron con una excitación de 330 nm y un ángulo de incidencia de 35°. Las gráficas de la Figura 3 se encuentran agrupadas por tiempo de anodizado. La caracterización eléctrica de las estructuras tiene como objetivo estudiar las propiedades eléctricas, fotoeléctricas, fotoconductoras y electroluminiscentes de las mismas. Mediante las mediciones I-V en oscuridad y bajo iluminación, se puede observar el comportamiento eléctrico de la estructura, así como los mecanismos de conducción. Las mediciones eléctricas de Corriente-Voltaje (I-V) se realizaron con un sistema de caracterización de semiconductores Keithley 4200 SCS, realizando un barrido de voltaje el cual fue determinado por la respuesta que mostrará el dispositivo, el voltaje de barrido se determinó primero en polarización positiva de 0 a 30 V y en polarización negativa de 0 a -30 V para las estructuras y Au/Si-n/SiP/OG/SiOX/ZnO. El paso de voltaje para todas las mediciones fue de 0.0125 V y los barridos de voltaje fueron determinados en función del voltaje soportado por cada estructura. En la Figura 2 se muestra el esquema de medición vertical empleado para el presente trabajo de investigación.

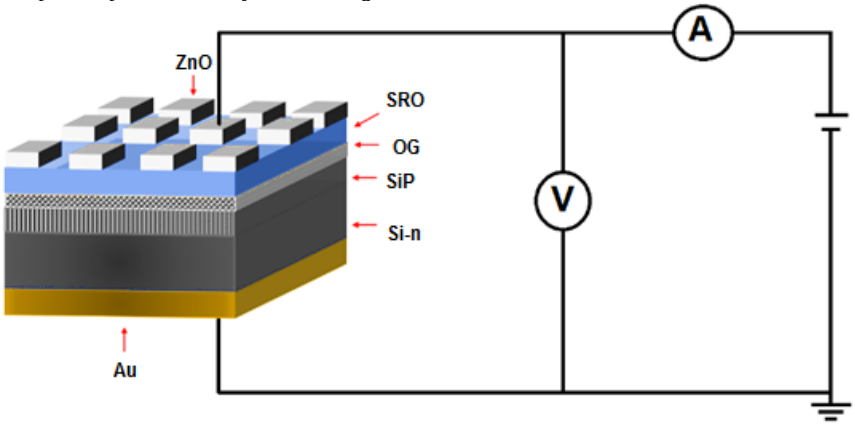


Figura 2. Esquema de la conexión empleada para la caracterización eléctrica de las estructuras Au/Si-n/SiP/OG/SiO$_X$/ZnO.

3. Resultados y Discusión

3.1 Fotoluminiscencia

La Figura 3 presenta los espectros de FL de las estructuras Si-n/SiP/OG/SiO$_X$, estos espectros se obtuvieron con la finalidad de observar el efecto combinado que tienen las diferentes capas de SiP obtenidas, con el OG y el SiO$_X$, estos espectros presentan una banda de emisión que va de los 400 a los 700 nm, donde la máxima emisión se observa en la región que va de los 400 a los 750 nm, con un pico máximo de emisión localizado alrededor de los 480 nm, el cual es atribuido al óxido de grafeno. Asimismo, tampoco se observa una tendencia en las intensidades de emisión, esto como consecuencia del efecto de apantallamiento que tiene el OG dentro de la estructura de SiP.

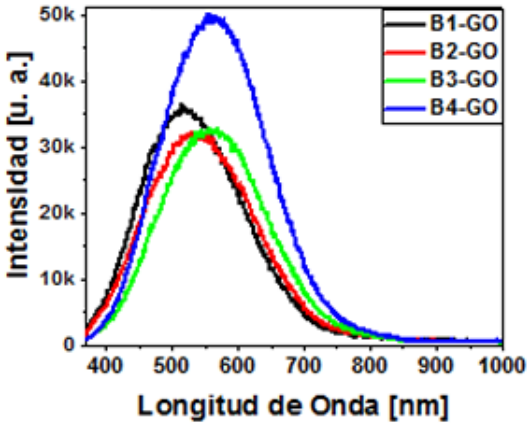


Figura 3. Espectros de FL de las estructuras Si-n/SiP/OG/SiO$_X$.

En general, los espectros son bastante amplios, debido a las diversas contribuciones que el OG, SiO$_X$ y las capas de SiP aportan. Con la finalidad de identificar los fenómenos que contribuyen a los mecanismos de emisión, los espectros mostrados en la Figura 3 fueron

deconvolucionados para obtener los mecanismos de emisión presentes en las estructuras, tales como se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de defectos ligados a la emisión FL de las estructuras Si-n/SiP/OG/SiO_X.

	Puntos Cuánticos del OG [4]	**Interacciones entre planos de G y OD [6]**	**E_g del SiP**
B1	474	542	603
B2	478	557	618
B3	488	566	634
B4	472	522	637

En la Tabla 2 se muestran los mecanismos de emisión presentes en los espectros de la Figura 3. El óxido de grafeno presenta dos bandas de emisión localizadas aproximadamente a, 450 nm y 542 nm, respectivamente. Estas bandas son similares a las reportadas en la literatura [4, 6]. El origen del pico de emisión localizado en 450 nm es debido a la presencia de puntos cuánticos de grafeno (GQD, graphene quantum dots, por sus siglas en inglés) [4]. Se ha reportado que al dopar con nitrógeno a los GQD que contienen grupos funcionales ricos en oxígeno, se provoca un desplazamiento de la fotoluminiscencia hacia la región del azul [4]. Asimismo, la fotoluminiscencia de los GQD está muy influenciada por la transición n-π^*, que es originada a partir de los anillos aromáticos que contienen nitrógeno y la estructura del grafeno [7]. El GO contiene fragmentos de hidrocarburos aromáticos policíclicos altamente oxidados, llamados desechos oxidativos (OD, por sus siglas en inglés, Oxidative debris), que están presentes en el óxido de grafeno y están unidos al óxido de grafeno en un plano similar al grafeno [6]. Estos OD tienen grupos que contienen oxígeno como en el OG, por lo que estos grupos no deberían ser una fuente directa de la banda de 496 nm. Por lo tanto, es razonable que la banda de 496 nm se atribuya a la interacción entre el plano de grafeno y los OD. La banda en 600 nm es debida al ancho de banda prohibida del SiP.

3.2 Caracterización eléctrica

En la Figura 4 se muestran los resultados típicos que se obtuvieron al realizar las mediciones I-V, estas curvas graficadas en escala semilogaritmica corresponden a la estructura B2. En la figura se presentan 3 curvas, la curva color gris representa la medición en condición de oscuridad en estado prístino, esto es, sin tener ningún tipo de estrés eléctrico, la curva color negro representa el comportamiento del dispositivo en condición de oscuridad en posteriores mediciones, por último, la curva color azul corresponde a las mediciones realizadas al incidir luz blanca sobre los dispositivos. A partir de estas curvas se obtuvieron los mecanismos de conducción de los dispositivos.

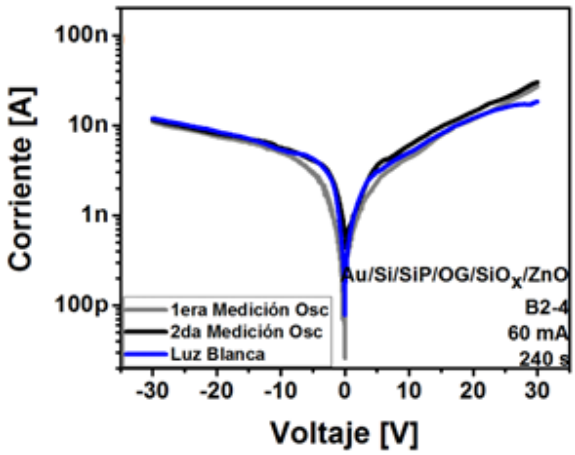


Figura 4. Curvas I-V de la estructura Au/Si-n/SiP/OG/SiO_X/ZnO, B2

En la Figura 4 se muestran las curvas I-V de las estructuras Au/Si/SiP/OG/SiO_X/ZnO, todas las mediciones se realizaron con un barrido de voltaje que va de 0 a 30 V y de 0 a -30 V. Se observa que los niveles de corriente son bajos (del orden de nanoamperes) en ambas polarizaciones, además, no hay gran diferencia entre las mediciones prístinas, ni un incremento de la corriente al incidir luz, por el contrario, la corriente se ve reducida. Estos bajos niveles de corriente pueden deberse al óxido de grafeno, ya que este actúa como un aislante dentro de la estructura [8].

3.3 Electroluminiscencia.

Con la finalidad de observar el fenómeno de emisión electroluminiscente en las estructuras, estás fueron sometidas a voltajes más altos,

como consecuencia de esto, se observó la presencia de emisión electroluminiscente (EL) de área completa en diferentes dispositivos. Para la obtención de los espectros, se ocupó la conexión mostrada en la Figura 2, con la diferencia de que se utilizó una fibra óptica que fue colocada por encima del contacto de ZnO, la cual conduce la luz emitida hacia un espectrómetro Ocean Optics USB-4000, los espectros son procesados con el software SpectraSuite. En la Figura 5 se presenta el esquema del arreglo experimental para la obtención de los espectros de electroluminiscencia (EL) de los dispositivos.

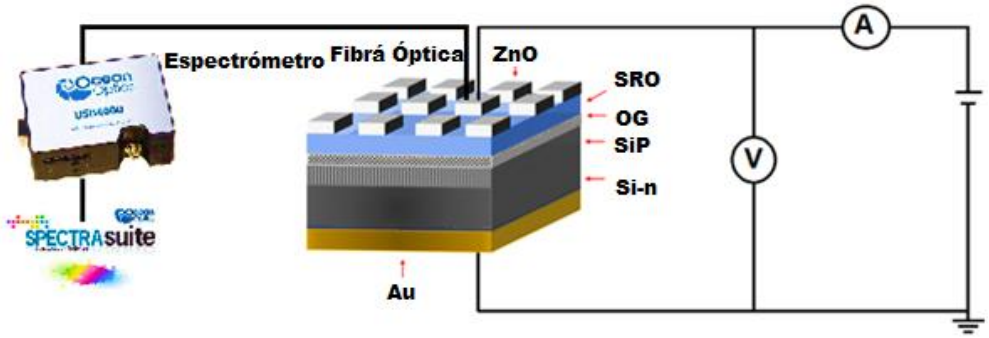


Figura 5. Esquema de la conexión empleada para la obtención de los espectros EL.

La EL se presentó en polarización negativa, a continuación, se presentan los espectros de EL en un rango de 400 a 1000 nm, las respectivas curvas I-V, así como las fotografías de los dispositivos sin y con emisión. Al momento de obtener las curvas I-V, se observó que la emisión se presenta en un rango que va de los -160 hasta los -210 V, cabe resaltar que el color de la luz no presento variaciones al incrementar la polarización aplicada. En la Figura 6(a) se presenta el dispositivo en reposo e iluminado, mientras que en la Figura 6(b) se observa el dispositivo emitiendo luz en área completa y con iluminación, la cual es observada a simple vista finalmente en la Figura 6(c) el dispositivo sigue emitiendo luz, pero se quitó la iluminación externa, la emisión observada corresponde al color blanco, además, el dispositivo presenta emisión de área completa.

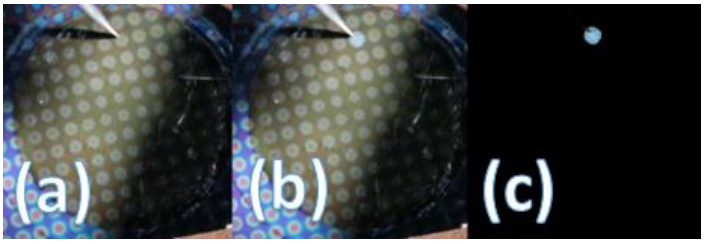


Figura 6. Fotografías de un dispositivo sin excitación e iluminado (a), polarizado e iluminado (b) polarizado y en oscuridad (c),

En la Figura 7 se presenta la curva I-V de la estructura en polarización negativa, en la que se aprecian 5 regímenes de conducción (1, 2, 3, 4 y 5) lo que nos indica la presencia de cinco mecanismos de transporte diferentes. El primer régimen (1), que va de 0 a -18 V, presenta un incremento abrupto de la corriente (100 nA). El segundo régimen de conducción, que va de -18 a -32 V, muestra un incremento menos abrupto en la corriente, alcanzando un valor de aproximadamente 400 nA a -32 V. El tercer régimen se encuentra entre -32 y -50 V, en el cual se presenta un incremento más moderado en la corriente, alcanzando los 2 µA. El siguiente régimen de conducción va de -50 a -150 V, en este intervalo la corriente sigue incrementándose, alcanzando un valor de casi 9 µA. Por último, el régimen de conducción 5 corresponde a los voltajes donde se presentó la emisión EL, se observa que la corriente se incrementó hasta llegar a los 10 µA, siendo una corriente bastante baja para la emisión EL comparada a lo que se ha reportado en la literatura en dispositivos con los mismos materiales [9-10].

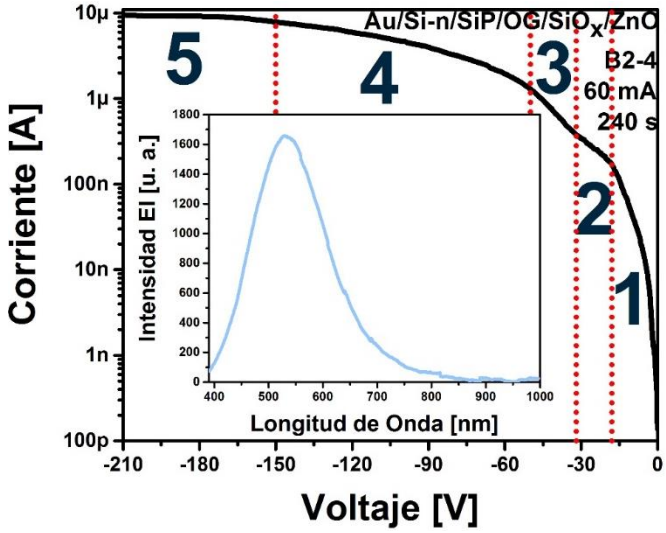


Figura 7. Curva I-V y espectro EL de la estructura B2.

En el inserto de la Figura 7 se muestra el espectro EL que fue obtenido a una polarización de -210 V, el cual tiene la máxima intensidad EL en 556 nm (2.23 eV), que corresponde al color verde, sin embargo, la emisión observada se muestra de un color blanco, además, el espectro EL es bastante amplio (400 a 800 nm) lo que nos indica que es muy probable la contribución de otros mecanismos de emisión, originados por los materiales utilizados en el dispositivo.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó el estudio y la caracterización eléctrica, fotoeléctrica y electroluminiscente de estructuras, Au/Si-n/SiP/OG/SiOx/ZnO. Para el OG se observó FL en dos bandas, 45 y 542 nm, las que se atribuyen a la presencia de puntos cuánticos de grafeno y la interacción de planos de grafeno con los debris de oxidación, respectivamente. Mientras que, para el silicio poroso, la banda de emisión localizada en aproximadamente 620 nm es debida al ancho de banda prohibida del SiP. En las estructuras Au/Si-n/SiP/OG/SiOx/ZnO, se presentó EL en un rango de -150 a -210 V, esta emisión es de color blanco, debido a la interacción de los diferentes materiales que conforman la heteroestructura, además. las corrientes a las que se presenta la emisión son del orden de 4 a 10 µA, las cuales son muy bajas. Finalmente, demostramos que es posible fabricar dispositivos de emisión de luz en un sustrato de Si que es totalmente compatible con el proceso CMOS para aplicaciones en sistemas fotónicos.

Referencias

[1] Canham, L. T. (1990). Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of Wafers. *Applied Physics Letters, 57*(10), 1046–1048.
[2] Zhong, F., Mo, J., Li, Y., Sun, B., & Wu, Z. (2020). Optical characteristics of porous silicon photonic crystals prepared on the back surface of silicon wafers. Optik, 201, 163486.
[3] Morales-Sánchez, A., Barreto, J., Domínguez, C., Aceves-Mijares, M., Perálvarez, M., Garrido, B., & Luna-López, J. A. (2010). DC and AC electroluminescence in silicon nanoparticles embedded in silicon-rich oxide films. Nanotechnology, 21(8), 085710
[4] Santiago, S. R., Chang, C.-H., Lin, T.-N., Yuan, C.-T., & Shen, J.-L. (2019). Diethylenetriamine-doped graphene oxide quantum dots with tunable photoluminescence for optoelectronic applications. ACS Applied Nano Materials, 2(6), 3925–3933
[5] Vazquez Valerdi, D. E., Luna López, J. A., Abundiz Cisneros, N., & Juarez Díaz, G. (2022). Synthesis and characterization of Zinc Oxide thin films deposited by Spray Pyrolysis technique for possible applications in solar cells. Journal Renewable Energy, 6(17), 8–14.
[6] Du, D., Song, H., Nie, Y., Sun, X., Chen, L., & Ouyang, J. (2015). Photoluminescence of graphene oxide in visible range arising from excimer formation. The Journal Of Physical Chemistry C, 119(34), 20085-20090
[7] Sun, J., Yang, S., Wang, Z., Shen, H., Xu, T., Sun, L., Li, H., Chen, W., Jiang, X., Ding, G., Kang, Z., Xie, X., & Jiang, M. (2014). Ultra-high quantum yield of graphene quantum dots: Aromatic-nitrogen doping and photoluminescence mechanism. Particle & Particle Systems Characterization, 32(4), 434–440.
[8] Punckt, C., Muckel, F., Wolff, S., Aksay, I. A., Chavarin, C. A., Bacher, G., & Mertin, W. (2013). The effect of degree of reduction on the electrical properties of functionalized graphene sheets. Applied Physics Letters, 102(2), 02311
[9] Chen, J., Zhu, W., Gao, Y., Yang, D., & Ma, X. (2019). Electroluminescence from light-emitting devices based on erbium-doped zno/n-si heterostructures: Enhancement effect of fluorine co-doping. Optics Express, 27(21), 30919.
[10] Sarkar, A., Bar, R., Singh, S., Chowdhury, R. K., Bhattacharya, S., Das, A. K., & Ray, S. K. (2020). Size-tunable electroluminescence characteristics of quantum confined si nanocrystals embedded in SI-rich oxide matrix. Applied Physics Letters, 116(23), 231105.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

MATERIALES OPTO-ELECTRÓNICOS BASADOS EN InGaN MICRO- Y NANO-ESTRUCTURADO PARA APLICACIONES EN ILUMINACIÓN DE ESTADO SÓLIDO Y CELDAS SOLARES DE ALTA EFICIENCIAS

Rafael García Gutiérrez
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, 83000, México. 662 289 3792, **rafael.gutierrez@unison.mx.**

Ricardo Rangel Segura
División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 36000, México.

Ricardo Rodríguez Carvajal
Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Morelia, Michoacán, 58030, México.

RESUMEN

Celdas solares de alta concentración basadas en micro- y nano-estructuras de $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) pueden ser fabricadas usando técnicas similares a aquellas utilizadas en la producción de diodos emisores de luz, con las cuales ha sido posible obtener una excelente calidad cristalina en estos materiales semiconductores. Los nano-cristales de InGaN en forma de columnas pueden ser crecidos usando técnicas del estado del arte: Depósito por vapores químico y depósito por vapores químicos metal-orgánicos.

En esta investigación se crecieron columnas y películas delgadas de InGaN utilizando un método eficiente y de bajo costo como es el de Deposito de Vapores Químicos de Haluros (HCVD, por sus siglas en ingles) con la finalidad de explorar el continuo de soluciones sólidas entre InN y GaN en forma de micro- y nano-columnas para aplicarlas en lámparas electroluminiscentes y celdas solares de alta eficiencia. Estas columnas pueden ser uniones p-n en forma de micro- y nano-columnas de $In_xGa_{1-x}N$ las cuales pueden cubrir completamente el rango del espectro solar.

ABSTRACT

High concentration solar cells base on micro- and nanostructures of $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) can be manufactured using techniques similar to those used in the production of light-emitting diodes, with which it has been possible to obtain excellent crystalline quality in these semiconductor materials. InGaN nano-crystlas in the form of columns can be grown using state-of-the-art techniques: Chemical Vapor Deposition and Metal-Organic Chemical Vapor Deposition.

In this research, InGaN columns and thin films were grown using an efficient and low-cost method such as Halide Chemical Vapor Deposition (HCVD) in order to explore and high-efficiency solar cells. These columns can be p-n junctions in the form of micro- and nano-columns to be applied in electroluminescent lamps and high-efficiency solar cells. These columns can be p-n junction in the form of micro- and nano-columns of InxGa1-xN which can completely cover the range of the solar spectrum.

Palabras claves: InGaN, nano-columnas, HCVD, Celdas FV, Celdas Solares de Alta Eficiencia.

INTRODUCCIÓN

Los semiconductores III-Nitruros son la base de la tecnología actual debido a sus amplias brechas de energía prohibida directa, los cuales se pueden sintonizar en diferentes regiones del espectro visible de alta energía [1]. Compuestos semiconductores como GaN, AlN, InN, AlGaN e InGaN pueden tener un ancho de energía prohibida desde 0.7 eV hasta 6.2 eV, lo cual puede tener aplicaciones en diferentes dispositivos como diodos emisores de luz (LED), diodos láser, celdas solares de alta eficiencia y dispositivos electrónicos de alta potencia [2]. Los compuestos semiconductores nitruros del grupo-III pueden cristalizar en la estructura wurtzita o hexagonal, la cual es la fase estable. Estos compuestos semiconductores también pueden cristalizar en la estructura zinc blenda o cúbica, la cual es la fase meta-estable, donde las fases cúbica y hexagonal pueden llegar a coexistir bajo ciertas condiciones de crecimiento [3]. Uno de los compuestos III-Nitruros menos estudiados en forma de polvos es el InGaN, el tiene su principal aplicación en el ahorro de energía eléctrica, reemplazando a las lámparas incandescentes por lámparas de tecnología LED, de esta forma reduciendo las emisiones de hidrocarburos a la atmósfera [4].

Generalmente la aleación ternaria InGaN ha sido sintetizada por MOCVD por sus siglas en inglés (metal organic chemical vapor deposition), así como por el método de deposición epitaxial por haces moleculares (MBE) [5, 6]. En la literatura también se puede encontrar la obtención de polvos de la aleación ternaria InGaN por pirólisis de sales complejas de hexaflouro indio-galio amoniacal, en un flujo de amoníaco de ultra alta pureza [7]. La síntesis de polvos de los nitruros del grupo-III se ha destacado últimamente debido a que con ellos se pueden fabricar blancos para el depósito de películas delgadas vía ablación iónica (RF sputtering) o por alguna otra técnica de crecimiento cristalino por ablación [8]. El objetivo de esta investigación es depositar estructuras nano- y micro-cristalinas de GaN, InN e InGaN para aplicarlas en dispositivos fotovoltaicos de alta eficiencia. El uso de nano-estructuras para generar energía fotovoltaica permite a las celdas solares alcanzar su máximo teórico a través de multiuniones del semiconductor con diferentes bandas prohibidas controladas por la concentración de uno de sus componentes.

MARCO TEORICO

El sistema InGaN tiene algunas propiedades especiales que lo hacen factible para aplicaciones fotovoltaicas. Una banda prohibida de la aleación ternaria que abarca todo el espectro visible y campos piezoeléctricos internos que pueden ayudar a separar los portadores de carga y dar lugar a dispositivos de mayor eficiencia. En la figura 1 se puede observar como una aleación ternaria entre el nitruro de galio, GaN y, el nitruro de indio, InN pude crear dispositivos que absorban luz solar desde los 3 eV hasta 1 eV, lo cual corresponde a todo el rango visible del espectro solar.

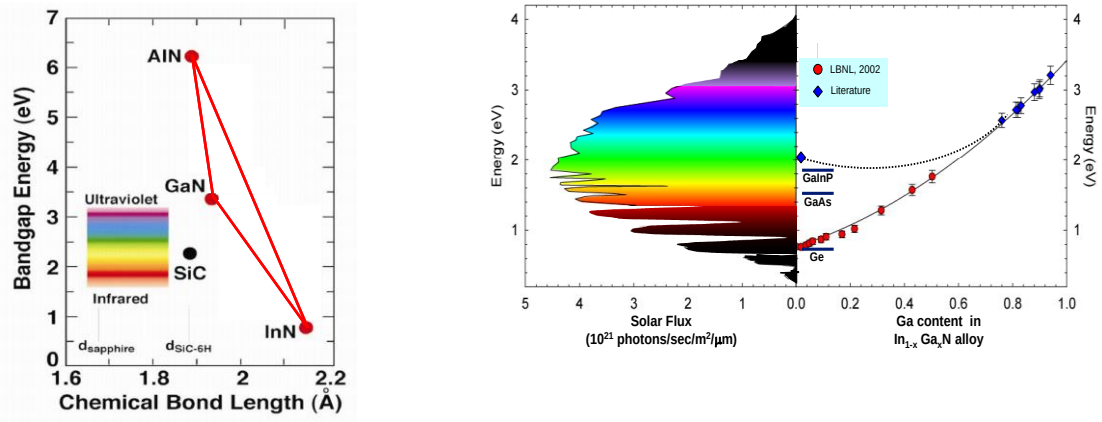


Figura 1. Espectro Solar versus banda gap de la aleación InGaN con diferentes contenidos de indio en la matriz de nitruro de galio.

La idea de las celdas solares de los nitruros del grupo-III se basa en el crecimiento de nano-estructuras de $In_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 1$) que varíen en su concentración de indio y además del tipo de dopaje (p-n), dando como resultado una estructura multicapa como se muestra en la figura 2. Y como se observa en la figura 1, esta heroestructura de la figura 2, con diferentes concentraciones de indio (x), tendría diferentes bandas de energía prohibida y sintonizada por energías iniciando desde 3.4 eV para x = 0 hasta 0.7 eV para x = 1. Este proceso se conoce como ingeniería de bandas.

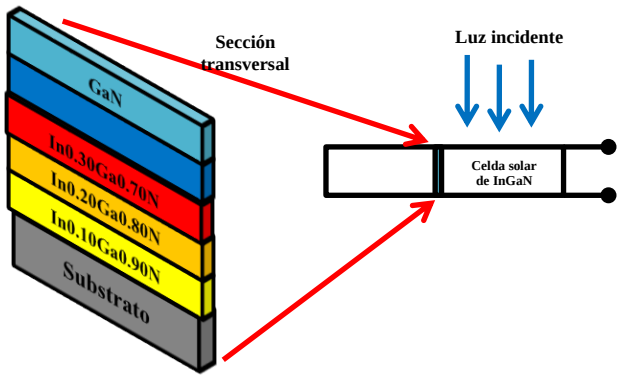


Figura 2. Diagrama esquemático de la celda multicapa de InGaN propuesta.

Como se muestra en la figura 2, cada bloque de $In_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 1$) a una cierta concentración (x) representa la unión p-n de dos aleaciones de $In_xGa_{1-x}N$ tipo p y tipo n. Por lo tanto, el arreglo multicapa representa celdas solares conectadas en serie lo cual representaría varias fuentes de voltaje independientes y sumando los voltajes de cada celda y por lo tanto aumentaría la potencia de salida de la celda.

La figura 3, en la izquierda se muestra un esquema de una una columna hexagonal de InGaN en una unión P-N y a la derecha se presenta un bosquejo de una celda solar basada en múltiples columnas de InGaN nano-estucturado como producto terminado que se espera obtener en este proyecto de investigación.

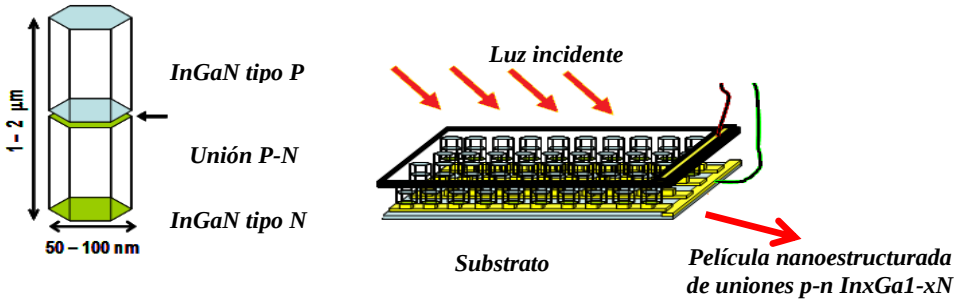


Figura 3. Estructura propuesta de una celda fotovoltaica nano-estructurada basada en InGaN.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El sistema CVD que se utilizó en esta investigación consiste de dos partes principales: La cámara de introducción (CI) y el reactor (RT). La CI es la parte del sistema CVD donde los substratos son colocados para ser llevados hacia la interface del reactor; utilizando un manipulador magnético. El reactor consiste de dos secciones importantes: el tubo principal (de un diámetro de 2.5 pulgadas) y tres tubos internos (de ¾ de pulgada).

Los tubos internos y el externo están divididos en tres zonas: la zona uno contiene los botes con cloruro de amonio (NH_4Cl), la segunda a los botes con metales (Ga e In) y finalmente la tercera, únicamente al substrato (éste está fuera de los tubos internos). Cada zona del tubo del reactor está aislada térmicamente, por lo que las condiciones de temperatura son independientes de cada zona. En la figura 4 se muestra una fotografía del sistema con que se cuenta actualmente en las instalaciones de la Universidad de Sonora.

Preparado el sistema, la siguiente serie de reacciones directas se llevan a cabo en el reactor:

- Zona 1: $NH_4Cl \rightarrow NH_3 + HCl$
- Zona 2: $HCl + In_x\text{-}Ga_{1-x} \rightarrow (In_x\text{-}Ga_{1-x})Cl + ½\ H_2$
- Zona 3: $(In_x\text{-}Ga_{1-x})Cl + NH_3 \rightarrow \mathbf{In_xGa_{1-x}N} + HCl$
- Salida: $NH_3 + HCl \rightarrow NH_4Cl$

Con base a las reacciones anteriores, el proceso de depósito es descrito a continuación:

Una vez que el bote que contiene al substrato de silicio y/o silica (Si , SiO_2), las fuentes de metal (≈ 7 g) y el cloruro de amonio (2g/bote), éstos son colocados dentro de los tubos internos de cuarzo; después, un flujo de nitrógeno es liberado con un bombeo mecánico menor de un 1 Pa. con el propósito de eliminar impurezas en el sistema.

La temperatura se incrementada en la zona dos hasta los 900 °C, el flujo del nitrógeno es retirado y uno de amoniaco empieza a fluir a 350 ml por minuto, y una presión de 97 kPa, creando una atmosfera de este gas; la liberación de amoniaco (NH_3) provoca que el substrato experimente un proceso de nitruración, lo que causa el crecimiento de una capa *buffer* muy delgada (reacción entre el amoniaco y el silicio).

Posteriormente, la temperatura en la zona uno es regulada en ≈ 300 °C, lo que provoca que el cloruro de amonio (NH_4Cl) empiece a evaporarse; el vapor que se genera es conducido a través de los tubos internos mediante el flujo de nitrógeno y una vez que el vapor alcanza los 700 °C, éste se descompone en acido hidroclórico y amoniaco.

El acido hidroclórico reacciona con el galio y el indio formando cloruros volátiles que son llevados hacia el substrato por medio del gas (N_2); después los cloruros de galio reaccionan con el amoniaco (NH_3) sobre la superficie de la capa *buffer* formando la capa de nucleación GaN. Posteriormente, los cloruros de galio e indio más el amoniaco (NH_3) reaccionan sobre la superficie del substrato produciendo InGaN. El crecimiento alcanza su terminación después de una hora aproximadamente cuando el NH_4Cl ha sido consumido. El bote con el substrato y el depósito (InGaN) es removido rápidamente utilizando el manipulador magnético; el flujo del amoniaco (NH_3) es entonces reemplazado por uno de Nitrógeno (N_2). Cuando el sistema se ha enfriado a temperatura ambiente, el bote con el depósito es llevado fuera del reactor.



Figura 4. Reactor tubular de quarzo para depósito por vapores químicos utilizado en esta investigación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de InGaN que se utilizarán en la fabricacion de las celdas solares de alta eficiencia presentan una estructura tipo columnar, que son mono-cristales nano-métricos donde la densidad de dislocaciones es despreciable dentro de su red cristalina, lo que hace que la eficiencia optoelectrónica del material sea superior en comparación a otros materiales sintetizados por otras técnicas de deposito sobre películas delgadas. En la figura 5 se puede observar un ejemplo de una estructura tipo columnar de InGaN la cual se sintetizó utilizando la técnica CVD en experimentos previos llevados a cabo en la Universidad de Sonora.

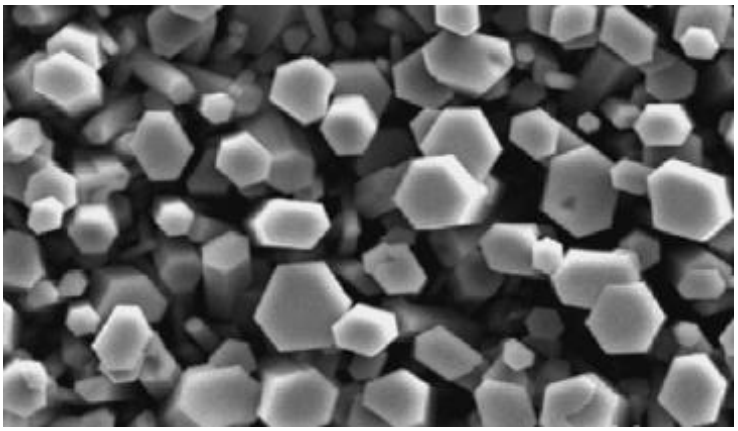


Figura 5. Micrografía SEM de una estructura tipo columna de las películas de nitruro de galio-indio depositadas por CVD.

En la figura 6 se muestran los espectros de fotoluminiscencia a 300 K de las columnas de GaN sin dopar y dopadas con Mg (tipo-p) depositadas por HCVD en este trabajo. En el GaN sin dopar se observa una emisión característica ancha cerca del borde de la banda prohibida alrededor de 367 nm (3.378 eV). Por otro lado, la luminiscencia Azul, un pico ancho centrado en 431 nm (2.87 eV) es la emisión dominante en la muestra dopada con Mg (GaN tipo-p). Esta emisión es característica del GaN fuertemente impurificado debido a pares de aceptor-donante profundos (DDAP) relacionados con un complejo de Mg. La emisión de banda a banda centrada en 370 nm (3.35 eV) también es visible en el espectro de GaN tipo-p, pero es 6 veces menos intensa que la luminiscencia Azul. Cabe recalcar que no se observó la indeseable luminiscencia amarilla en el GaN sintetizado por este método.

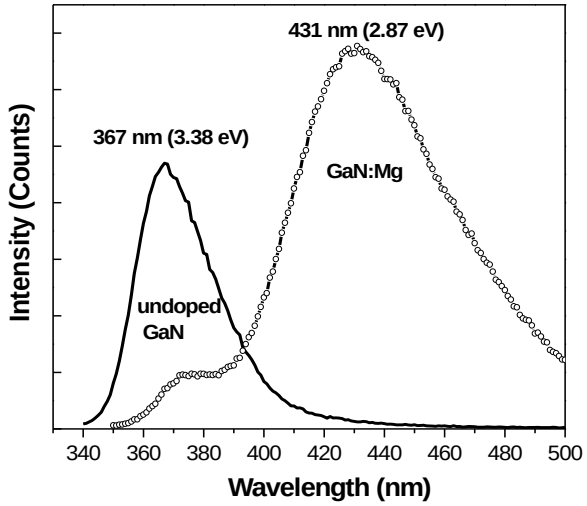


Figura 6. Espectro de Fotoluminiscencia a 300 K de las películas de GaN crecidas por CVD.

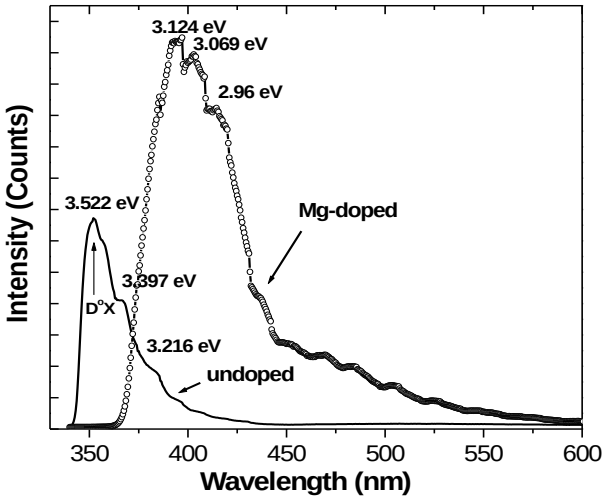


Figura 7. Espectro de Fotoluminiscencia a 10 K de las películas de GaN depositadas por CVD.

La figura 7 muestra los espectros de fotoluminiscencia a 10 K de las columnas de GaN no-dopadas y dopadas con Mg depositadas por HCVD en este trabajo. El pico ancho que va desde 345 nm (3.59 eV) hasta 400 nm (3.10 eV), en la muestra no-dopada, es el excitón unido al donante (DºX) que normalmente se observa en películas delgadas de GaN de alta calidad [5]. También se observa en el espectro la emisión del par donante aceptor (DAP) en los 386 nm (3.216 eV). Por otra parte, en la película dopada con Mg se observa un pequeño hombro correspondiente al D°X y al DAP en 380 nm (~3.26 eV) y sus réplicas de fonones relacionados (3,12, 3.07 y 2.96 eV) como emisiones dominantes lo cual es típico en el GaN fuertemente dopado con Mg [4]. También es posible observar en este espectro la luminiscencia Azul, pico ancho entre 450 y 500 nm, relacionado con el complejo de Mg como donante profundo. Tanto en el análisis de fotoluminiscencia a temperatura ambiente como en el análisis a bajas temperaturas es posible observar que la intensidad de luminiscencia del GaN tipo-p es superior a la luminiscencia del GaN no-dopado o dopado no intencionalmente. Por tanto, se concluye que el Mg como dopante mejora las propiedades ópticas del GaN por lo tanto del InGaN ya que este ultimo tiene la misma estructura cristalina, hexagonal tipo wurzita.

CONCLUSIONES

La meta final de este proyecto es desarrollar un método de crecimiento de nano-estructuras de InGaN de bajo costo que deberán ser la base para la producción comercial de celdas solares de alta eficiencia basadas en multiuniones p–n de este material. Cada una de estas uniones tendrá una banda de energía-prohibida especifica para que en conjunto, la estructura tipo tándem aproveche la mayor parte de la energía lumínica del espectro solar y la convierta en energía eléctrica. El método novedoso propuesto en esta investigación produce columnas nano-estructuradas de InGaN de alta calidad mediante la técnica de deposición de vapores químicos de halogenuros depositados sobre silicio. Los estudios estructurales y ópticos proporcionan evidencia clara de que las películas de InGaN son altamente luminiscentes con eficiencias comparables a las observadas en otras técnicas mas costosas como los MOCVD y MBE [5, 6], lo que sugiere que el material es un buen candidato para ser utilizado en celdas solares multiunión de alta eficiencia.

REFERENCIAS

[1] De Walle V. and Gilbert C 2012 ed. Wide-band-gap Semiconductors. Elsevier.

[2] Yu E. T. 2003 III-Nitride semiconductors: Applications and devices, Optoelectronic properties of semiconductors and superlattices 16 pp 161–192.

[3] E. Gastellóu, C. Morales, R. García, G. García, G.A. Hirata, A.M. Herrera, R. Galeazzi, E. Rosendo, T. Díaz, Influence of the GaAs crystals diffusion in the shift towards loww energies in the photoluminescence emission band of the GaN/GaNbuffer/GaAs structure. Optical Materials (88)(2019) pp. 227-281.

[4] H. Amano, I. Akasaki, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) L2112.

[5] K.Y. Zang, Y.D. Wang, H.F. Liu, S.J. Chua, Structural and optical properties of InGaN/GaN multiple quantum wells grown on nano-air-bridged GaN template, Applied physics letters 89(2006) 171921.

[6] C. Boney, D. Starikov, Molecular beam epitaxy growth of InGaN-GaN superlattices for optoelectronic devices, Journal of Vacuum Science & Technology B 29(2011) 03C106.

[7] R. Garcia, G.A. Hirata, M-H. Farías, J. McKittrick, A novel method for the synthesis of sub-microcrystalline wurtzite-type $In_xGa_{1-x}N$ powders, Materials Science and Engineering B90(2002) 7 - 12.

[8] E. Gastellóu, C. Morales, G. García, R. García, G.A. Hirata, A.M. Herrera, R. Galeazzi, E. Rosendo, T. Díaz, R. Romano, A. Coyopol, Structural and optical changes of undoped GaN layers grown via radio-frequency magnetron sputtering obtained from GaN powders. European Journal of Engineering Research and Science (4)(2)(February 2019) pp. 59 – 63.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES
ISES International Solar Energy Society

PROPUESTA DEL PEDOT: PSS ENVEJECIDO MEDIANTE TRATAMIENTO CON ISOPROPANOL Y ACETONA PARA SU POSIBLE APLICACIÓN COMO CAPA TRANSPORTADORA DE HUECOS EN CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA

José E. Erro Quiñonez, Rafael García Gutiérrez

División de Investigación en Física, UNIVERSIDAD DE SONORA, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México, 6622592156 Ext. 2500, rgarcia@cifus.uson.mx.

Dainet Berman Mendoza.

Posgrado en Electrónica, UNIVERSIDAD DE SONORA, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México, 662259-2249 Ext. 4507, dainet.berman@unison.mx.

Resumen

Este documento presenta un estudio sobre la recuperación de PEDOT: PSS envejecido para su uso como capa transportadora de huecos en celdas solares de perovskita. Se depositaron películas delgadas de PEDOT: PSS sobre sustratos de vidrio mediante la técnica de spin-coating. Inicialmente, se observaron aglomeraciones y manchas en las películas, lo que indica una posible degradación del PEDOT: PSS. Para mejorar la dispersión del polímero y solucionar este problema, se experimentó con la adición de disolventes como isopropanol y acetona. Los resultados más prometedores se obtuvieron con muestras tratadas con isopropanol. Estas muestras fueron caracterizadas mediante mediciones de resistencia de hoja usando el método de cuatro puntas, análisis de transmitancia por UV-vis y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Abstract

This document presents a study on the recovery of aged PEDOT: PSS for its use as a hole transport layer in perovskite solar cells. Thin films of PEDOT: PSS were deposited on glass substrates using the spin-coating technique. Initially, agglomerations and stains were observed on the films, indicating possible degradation of the PEDOT: PSS. To improve polymer dispersion and address this issue, experiments were conducted with the addition of solvents such as isopropanol and acetone. The most promising results were obtained with samples treated with isopropanol. These samples were characterized using sheet resistance measurements by the four-point probe method, UV-vis transmittance analysis, and scanning electron microscopy (SEM).

Keywords:

- PEDOT: PSS

- Perovskite solar cells

- Hole transport layer

- Spin-coating

- Sheet resistance

Introducción

Las celdas solares de perovskita (CSP) son una tecnología prometedora para convertir energía solar en eléctrica, destacando por su alta eficiencia y potencial bajo coste de fabricación. Un componente clave es la capa transportadora de huecos (HTL), que facilita el desplazamiento de cargas positivas generadas en la capa de perovskita hacia el electrodo, reduciendo pérdidas y optimizando la eficiencia.

El PEDOT: PSS es un material preferido para la HTL debido a sus excelentes propiedades ópticas y eléctricas. Sin embargo, su degradación con el tiempo puede disminuir la conductividad eléctrica y afectar el desempeño de las celdas solares. En este estudio, se prepararon películas delgadas de PEDOT: PSS sobre sustratos de vidrio mediante spin-coating. Inicialmente se formaron aglomerados, sugiriendo degradación del material. Para solucionar esto, se investigó la adición de disolventes polares como isopropanol y acetona, mejorando la dispersión del polímero.

En las CSP con arquitectura inversa, el PEDOT: PSS es ampliamente utilizado como HTL debido a su alta conductividad, estabilidad ambiental y transparencia. Es una solución acuosa de polímero macromolecular compuesta por PEDOT y PSS, destacando por su excelente solubilidad en agua, conductividad y estabilidad.Algunos datos importantes son [3]:

- Formula empírica: **C16H18O5S2.**
- Peso molecular: **354.441g/mol.**
- Conductividad: **100 a 10^{-5} S.**
- Apariencia: **liquido azul oscuro.**
- Soluble en agua.
- **HOMO de 5.3 eV y LUMO de 3.5 eV** [4].

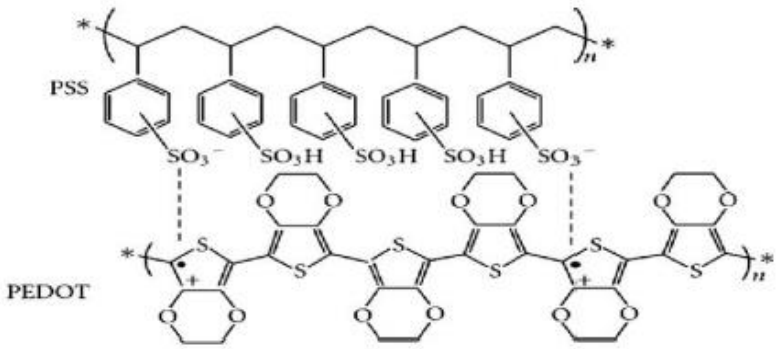


Figura 1. Estructura química del PEDOT: PSS [3].

La conductividad eléctrica del PEDOT: PSS es una propiedad de crucial importancia para su utilización como HTL (capa transportadora de huecos) en las CSP (celdas solares de perovskita). Una manera de determinarla en una muestra experimental es a través de la medición de la resistencia eléctrica de hoja, utilizando la caracterización por el método de cuatro puntas. Este método, también conocido como el "método de cuatro terminales" o la "técnica de cuatro puntas", es una técnica precisa para medir la resistencia eléctrica de una hoja o lámina delgada de material. Fue desarrollado originalmente por Lord Kelvin y más tarde perfeccionado por Frank Wenner a comienzos del siglo XX, quien lo utilizó para medir la resistividad del suelo.

El proceso se realiza de la siguiente manera:

- Se colocan cuatro puntas o electrodos en línea recta sobre la muestra a medir, espaciadas uniformemente entre sí (s).
- Se aplica una corriente conocida (I) a través de las dos puntas exteriores.
- Se mide el voltaje (V) entre las dos puntas interiores.
- Mediante la Ley de Ohm, $V=I*R$, se calcula la resistencia.
- Conociendo el espesor de la muestra (t), se puede calcular la resistividad usando la fórmula: $\rho=V/I*(\pi\ln(2)*s/t)$, donde ρ es la resistividad en Ω por cm.

Una vez obtenida la resistividad, la conductividad (σ) se puede calcular aplicando la fórmula: $\sigma=1/\rho$.

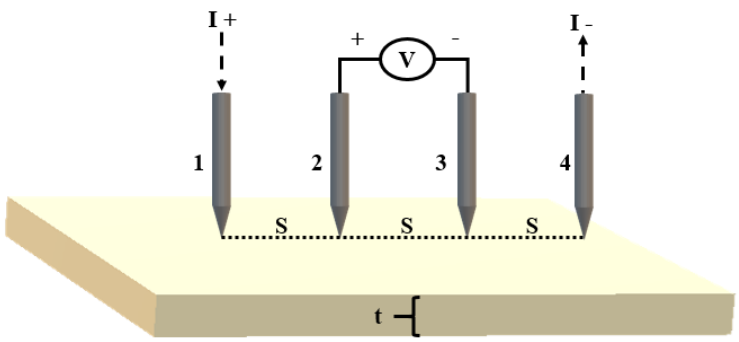


Figura 2. Método de cuatro puntas.

Metodología

Se seleccionó la técnica de spin-coating para fabricar las capas delgadas de PEDOT: PSS debido a su simplicidad. Para este propósito, se utilizó el spin-coater modelo VTC 50 A, capaz de alcanzar hasta 8000 RPM y compatible con sustratos de hasta 4". Este equipo está instalado en el laboratorio nanofab de la Universidad de Sonora.

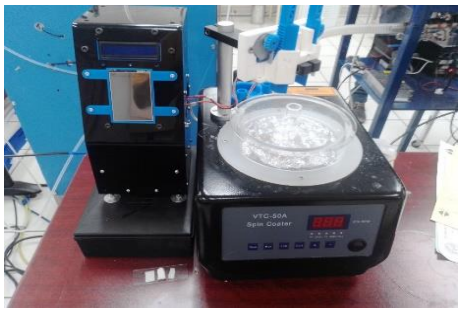


Figura 3. Spin Coater VTC-50 A.

El sustrato elegido fue vidrio borosilicato de 20 x 20 mm, el cual se sometió a un proceso de limpieza que involucró los siguientes pasos:

1. Lavado de los sustratos con una mezcla de agua desionizada y Surfact-Amps™ Detergent Solution.
2. Enjuague con agua desionizada.
3. Limpieza con un cotonete.
4. Lavado en alcohol isopropílico en la tina de ultrasonido por 10 minutos.
5. Limpieza nuevamente con un cotonete.
6. Lavado en acetona en la tina de ultrasonido por 10 minutos.
7. Secado con nitrógeno.
8. Calentamiento en una plancha caliente a 85°C por 10 minutos, envuelto en papel aluminio.

Con el sustrato ya limpio, se realizaron depósitos de PEDOT: PSS con las siguientes variables:

1. Cantidades de PEDOT: PSS de 100µl y 40µl.
2. Velocidad de 6000 RPM por 60 segundos.
3. Se deposita en el spin-coater de forma dinámica (en funcionamiento).
4. Se aplicó un tratamiento térmico a 120°C por 30 minutos

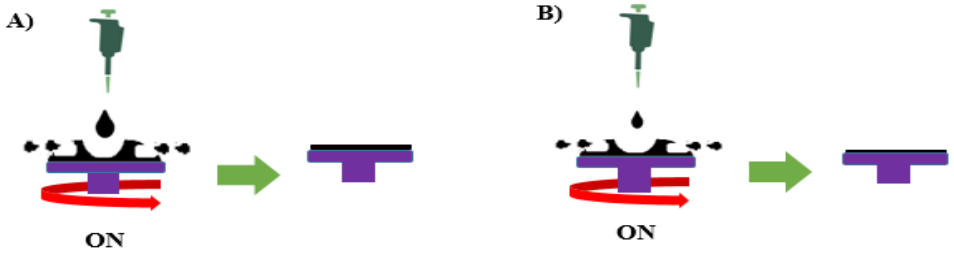


Figura 4. Depósitos de PEDOT: PSS en deposición dinámica a 6000 RPM, con concentraciones de: A)100 µl PEDOT: PSS y B) 40 µl PEDOT: PSS

Al concluir el proceso de spin-coating, se observaron manchas de PEDOT: PSS en el sustrato en ambas concentraciones, visibles a simple vista, como se muestra en la Figura 5.

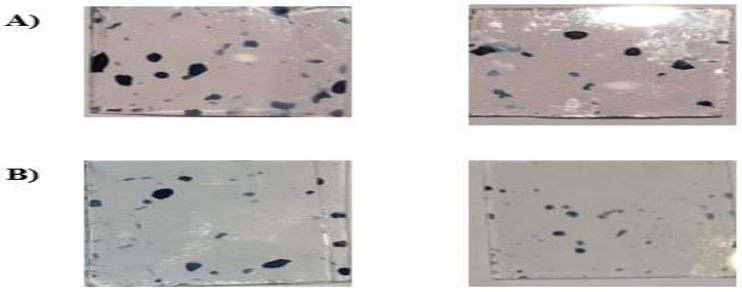


Figura 5. Aglomeraciones de PEDOT:PSS sobre el sustrato observables a simple vista.

Estas aglomeraciones aleatorias son resultado de un PEDOT: PSS envejecido, que tiende a formar aglomerados debido a varios factores:

- Interacciones hidrofóbicas entre las cadenas de PEDOT, que tienden a interactuar entre sí a través de interacciones hidrofóbicas débiles, favoreciendo la formación de aglomerados.
- Cristalización del PEDOT, que promueve interacciones π-π entre cadenas vecinas, resultando en zonas cristalizadas que actúan como centros de aglomeración.
- Inmiscibilidad entre PEDOT y PSS, tendiendo a separarse en dominios a lo largo del tiempo.

Este fenómeno puede manifestarse entre 2 y 4 años después de su adquisición, aunque puede ocurrir antes si no se almacenó refrigerado y alejado de la luz.

Utilizando una hoja de calibración y el software Jimage, se identificaron manchas que varían de 0.21 a 3.25 mm para 100 µl y de 0.03 a 0.81 mm para 40 µl de PEDOT:PSS.

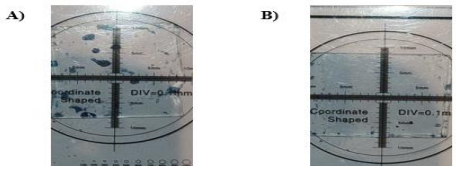


Figura 6. Mediciones del tamaño de las aglomeraciones de PEDOT:PSS, A) 100µl y B) 40 µl.

La resistencia de hoja en los sustratos con depósito de PEDOT:PSS fue medida utilizando un analizador de parámetros KEITHLEY modelo 4200A-SCS, el cual está instalado en el nanofab.



Figura 7. KEITHLEY modelo 4200A-SCS.

El análisis de cinco muestras reveló resistencias de hoja con un máximo de 6.38E+09 y un mínimo de 4.05E+06 Ω por cm.

Esta alta resistividad hace que el material no sea adecuado para su uso como capa transportadora de huecos. Además, las zonas saturadas de PEDOT: PSS en forma de manchas resultarían en áreas de cero transmitancia.

Para mejorar la dispersión del PEDOT:PSS y su conductividad, algunos investigadores han añadido disolventes como DMSO (dimetilsulfóxido), metanol, 2-propanol, DMF (dimetilformamida) y clorobenceno, así como combinaciones entre ellos. En este estudio, se optó por utilizar isopropanol y acetona en una proporción volumétrica de 100:3. El proceso consistió en introducir 4 ml de isopropanol en un recipiente, añadir 120 µl de acetona, agitar manualmente durante dos minutos, calentar a 50°C por 10 minutos y sumergir en un baño ultrasónico por 60 minutos. Se repitió el proceso utilizando acetona en la misma proporción.

Resultados

Se lograron obtener muestras sin aglutinamiento aparente a simple vista; sin embargo, al examinarlas bajo el microscopio, se detectaron micro gotas en las muestras tratadas con isopropanol y microfilamentos en aquellas tratadas con acetona, como se muestra en la Figura 8.

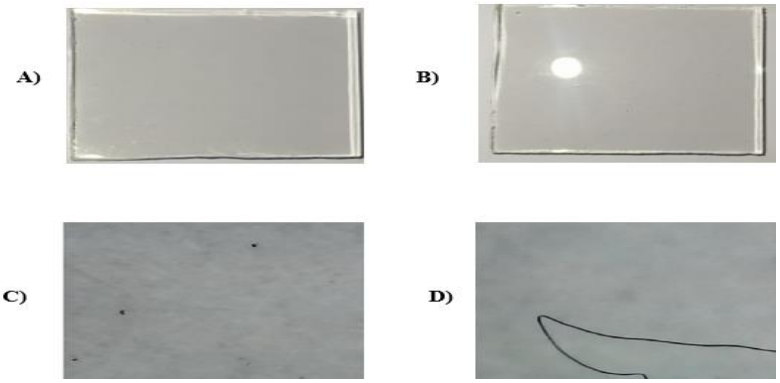


Figura 8. Vista de la deposición de PEDOT: PSS mezclado con A) Isopropanol y B) Acetona, con un aumento de 1600x; C) Isopropanol y D) Acetona.

La resistencia de hoja fue medida mediante el método de cuatro puntas, obteniéndose resistividades significativamente altas en las muestras tratadas con acetona, como se indica en la siguiente tabla:

	RPM	µl	t(s)	MIN	MAX	PROM
EA	6000	100	60	9.93E+05	2.53E+09	1.15 E+8
EB	6000	40	60	4.05E+06	6.38E+09	1.13 E+9

Tabla 1. Resistividad de hoja en lotes de 5 muestras de mezcla PEDOT: PSS con acetona.

Con el uso de isopropanol, los resultados fueron aceptables, como se muestra en la tabla 3:

	RPM	µl	t(s)	MIN	MAX	PROM
EA	6000	100	60	2.3630E+3	165.4914E+3	110.475 E+3
EB	6000	40	60	394.3569E+0	136.6507E+3	98.719 E+3

Tabla 2. Resistividad de hoja en lotes de 5 muestras PEDOT: PSS con isopropanol.

En cuanto a la transmitancia, un factor clave para el uso del PEDOT: PSS en celdas solares, que idealmente debe estar entre el 80% y el 90%, las muestras de 40 µl mostraron resultados dentro de este rango. Las muestras de 100 µl registraron una transmitancia del 79% al 78% en la región del espectro electromagnético de 724 a 800 nm.

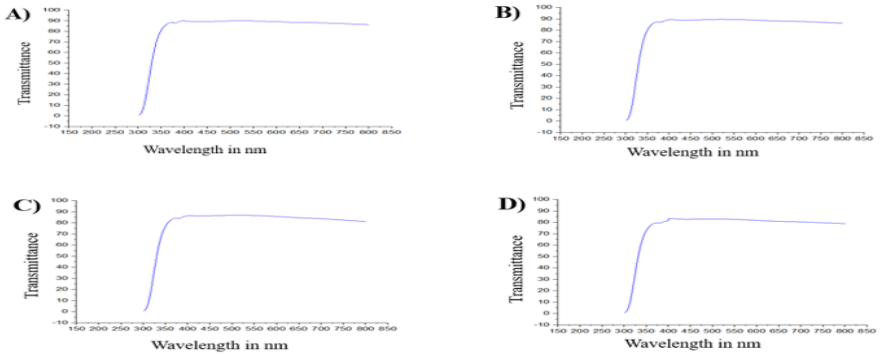


Figura 9. Espectros de transmitancia UV-vis con concentraciones de PEDOT: PSS A) y B) 40 µl; C) y D) 100 µl.

Para analizar la morfología y el espesor de las películas, se realizó una caracterización mediante SEM. Se midieron espesores de muestra que varían de 17 a 64 nm, resultando muy uniformes en las deposiciones de 40 µl. Las deposiciones de 100 µl variaron de 87 a 42 nm, siendo menos uniformes. Ambas muestran una morfología esponjosa debido a la evaporación del solvente, como se puede apreciar en la Figura 10.

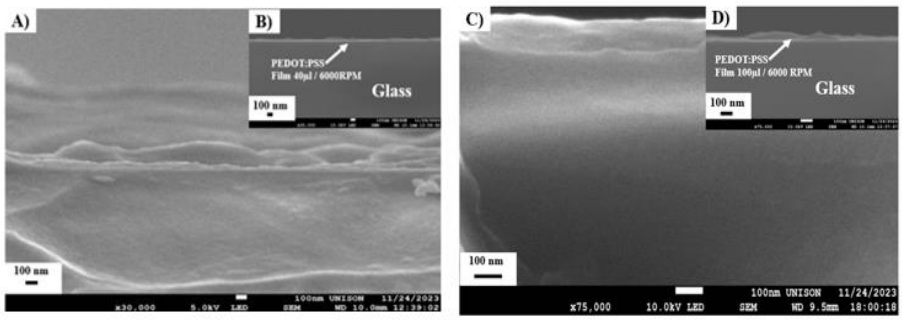


Figura 10. Caracterización SEM. A) y C) Vista de la superficie de la película PEDOT: PSS sobre vidrio; B) y D) sección transversal de la película PEDOT:PSS sobre vidrio.

Conclusiones

La inclusión de isopropanol en la formulación de PEDOT: PSS mejoró significativamente la dispersión del polímero y redujo la formación de aglomerados comparado con muestras sin tratamientos. Las películas tratadas con isopropanol mostraron resistencias de hoja aceptables, de 2,363 a 165,491 Ω por cuadrado, mientras que las tratadas con acetona tuvieron resistividades más altas.

Las películas con isopropanol alcanzaron niveles óptimos de transmitancia (80-90%) para aplicaciones fotovoltaicas, con valores entre 79% y 78% en la región de 724 a 800 nm. La caracterización SEM mostró que las películas de PEDOT: PSS tenían una morfología esponjosa, debida a la evaporación del solvente, y espesores uniformes de 17 a 64 nm para deposiciones de 40 µl. Las deposiciones de 100 µl presentaron espesores menos uniformes, variando de 87 a 42 nm.

Estos resultados sugieren que añadir isopropanol a las soluciones de PEDOT: PSS es una estrategia efectiva para optimizar la calidad de las películas delgadas y sus propiedades eléctricas y ópticas, haciéndolas más adecuadas para su uso como capas transportadoras de huecos en celdas solares de perovskita.

Referencias

[1] Xia, Y., Dai, S. Review on applications of PEDOTs and PEDOT:PSS in perovskite solar cells . J Mater Sci: Mater Electron 32 , 12746–12757 (2021). https://doi.org/10.1007/s10854-020-03473-w

[2] Salinas García, Ivan Uriel. Study of the change in conductivity due to the degradation of PEDOT: PSS films. AUGUST, 2022.http://reini.utcv.edu.mx/bitstream/123456789/1399/1/20203J101008.pdf

[3] Yacoo Science. (s.f.). Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) CAS 155090-83-8. Recuperado el 16 de febrero de 2024, de https://es.yacooscience.com/poly-3-4-ethylenedioxythiophene-poly-styrenesulfonate-pedot-pss-cas-155090-83-8_p92.html

[4] Bechara, R., Petersen, J., Gernigon, V., Le´veque, P., Heiser, T., Toniazzo, V., Ruch, D., & Michel, M. (2011). PEDOT:PSS-free organic solar cells using tetrasulfonic copper phthalocyanine as buffer layer. Solar Energy Materials & Solar Cells 98, pages 482-485.

https://www.sciencedirect.com/journal/solar-energy-materials-and-solar-cells

[5] Kuan Sun, Shupeng Zhang , Pengcheng Li.(2015). Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 26(7):1-25. DOI:10.1007/s10854-015-2895-5

[6] Suo Tu, Ting Tian , Anna Lena Oechsle. (2022). Improvement of the thermoelectric properties of PEDOT:PSS films via DMSO addition and DMSO/salt post-treatment resolved from a fundamental view Chemical Engineering Journal 429 (2022) 132295. www.elsevier.com/locate/cej

[7] Wang, Xizu; Kyaw, Aung Ko Ko; Yin, Cailiu; Wang, Fei; Zhu, Qiang; Tang, Tao; Yee, Phang In; Xu, Jianwei (2018). Enhancement of thermoelectric performance of PEDOT:PSS films by post-treatment with a superacid. RSC Advances, 8(33), 18334–18340. doi:10.1039/c8ra02058b.

[8] Namkoong, Gon; Younes, Enas M.; Abdel-Fattah, Tarek M.; El-Maghraby, E.M.; Elsayed, Adly H.; Abo Elazm, A.H. (2015). Aging process of PEDOT:PSS dispersion and robust recovery of aged PEDOT:PSS as a hole transport layer for organic solar cells. Organic Electronics, 25(), 237–244. doi:10.1016/j.orgel.2015.06.049.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

INSTALACIÓN DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS POR LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA ESTATAL

Carlos E. Borjas Castillo, Rafael E. Cabanillas López, Juan A. Colín Ibarra, Erick M. Rascón Martínez.

Dirección General de Energía de la Secretaría de Economía del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83260, México.
carlos.borjas@sonora.gob.mx

RESUMEN

Este documento describe el Programa Social de Generación Solar Distribuida (PSGSD) en Sonora, que se enmarca en el Plan Sonora de Energías Sostenibles. El programa tiene como objetivo promover el uso de energía limpia mediante la instalación de pequeñas plantas solares en comunidades marginadas con alto potencial de desarrollo local. Estas plantas permitirán reducir los costos de electricidad para familias, pequeños empresarios y/o servicios municipales.

El artículo detalla el proceso de instalación de una planta fotovoltaica desde la adquisición del terreno, la gestión por medio de licitación pública, la interconexión con la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) hasta el sistema de medición de la energía generada por la planta fotovoltaica. Además, También se proporcionan lineamientos sobre los trámites necesarios para la adquisición del terreno, gestión del sistema fotovoltaico e interconexión a las redes de distribución de CFE, así como las dependencias o instituciones involucradas durante todo el proceso, y se mencionan recomendaciones para optimizar los procesos administrativos involucrados en la instalación de estas plantas solares.

Palabras clave: Planta fotovoltaica, adquisición del terreno, gestión del sistema, trámites de interconexión, medición.

ABSTRACT

This document describes the Social Program for Distributed Solar Generation (PSGSD) in Sonora, which is part of the Sonora Sustainable Energy Plan. The program aims to promote the use of clean energy by installing small solar plants in marginalized communities with high local development potential. These plants will reduce electricity costs for families and small businesses, improve public services and promote economic growth and employment in rural areas.

The article details the installation process of a photovoltaic plant from the acquisition of the land, the management through public bidding, the interconnection with the network of the Federal Electricity Commission (CFE) to the measurement system of the energy generated by the plant. photovoltaic plant. In addition, guidelines are also provided on the procedures necessary for the acquisition of the land, management of the photovoltaic system and interconnection to the CFE distribution networks, as well as the agencies or institutions involved throughout the process, and recommendations are mentioned to optimize the processes administrative involved in the installation of these solar plants.

Keywords: Photovoltaic plant, land acquisition, system management, interconnection procedures, measurement.

1. INTRODUCCIÓN

El Programa Social de Generación Solar Distribuida, Sonora 2022-2027, está inscrito en el Plan Sonora de Energías Sostenibles proyecto estratégico del Gobierno Federal y del Gobierno del Estado, tiene por objeto entre otras muy importantes acciones, fomentar el uso de energía limpia mediante la inversión en pequeñas plantas de energía solar fotovoltaica de generación distribuida con capacidad menor a 0.5 MW (Figura 1), en comunidades y municipios de la entidad en condiciones de marginación o desfavorecidas, pero con alto potencial para desarrollo local con fuerte impacto en el medio rural (Figura 2). La electricidad así producida, permitirá reducir los gastos asociados al consumo eléctrico de familias o pequeños empresarios locales o del servicio público que prestan los municipios en agua potable o alumbrado por citar algunos [1].

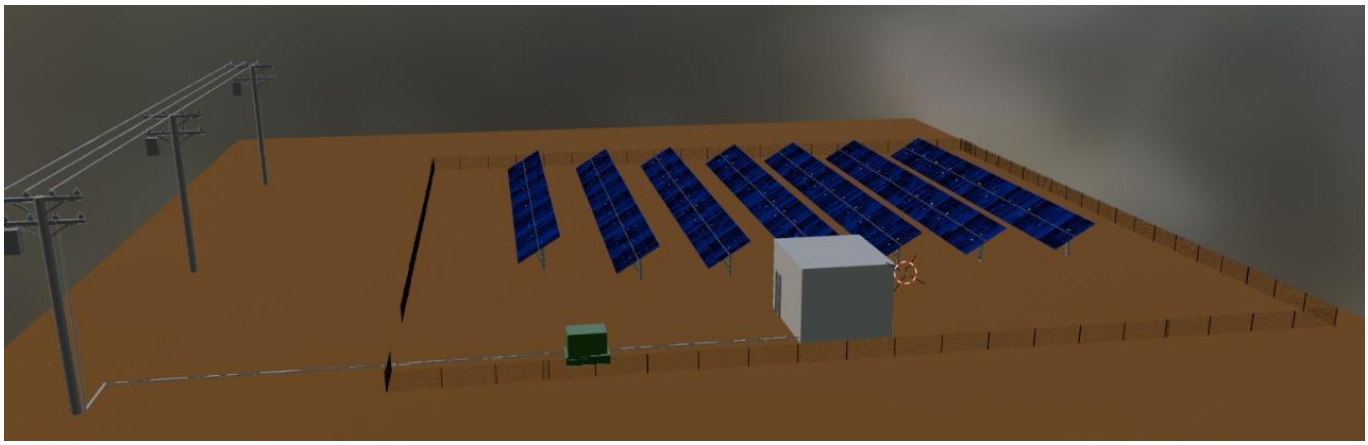


Figura 1. Modelo en 3D de la planta fotovoltaica.

La Secretaría del Bienestar y el INAES han señalado que: "El aprovechamiento de las energías sustentables es un elemento de desarrollo local, con el que las comunidades pueden obtener los beneficios de las mejoras, en el marco regulatorio del sector energético mexicano. La transición energética representa beneficios, pero hasta ahora éstos no han permeado a nivel local o comunitario. Por esto, las energías renovables generadas por iniciativas comunitarias y cooperativas son una alternativa para potenciar el desarrollo local, atendiendo las particularidades y vocaciones de las comunidades. Estas iniciativas permiten incrementar la participación de la sociedad de manera activa, así como el acceso a servicios energéticos; además de democratizar el sector e incrementar la cuota de energía descentralizada de fuentes," [2].

Un estudio reciente para América Latina y el Caribe, apoyado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUD), señala, que el 90% los mercados reportan una o más reglamentaciones, programas, proyectos de ley o políticas nacionales relacionadas a la incorporación o desarrollo de recursos energéticos distribuidos y que si bien "el desarrollo es incipiente "en dos tercios de los mercados de la región el esquema de generación solar comunitaria o compartida forma parte de uno de los diversos esquemas de implementación o compensación incluidos en la regulación de generación distribuida". El reporte informa que algunos de los mercados estudiados, "han comenzado a incluir mini redes interconectadas en sus políticas de planificación del sistema eléctrico, y realizan instalaciones a modo de ensayo y pruebas piloto" [3].



Figura 2. Planta fotovoltaica del municipio de Bacerac, Hermosillo, Sonora.

La región noroeste presenta los más altos valores de radiación solar de México (Figura 3). El estado de Sonora, ubicado en ella, está conformado por una gran planicie que se encuentra entre la costa del Mar de Cortes (Golfo de California) y la Sierra Madre Occidental; cuenta con una variedad de climas que van desde cálido húmedo (sur del estado), subtropical templado (en la sierra), hasta cálido seco (en el desierto).

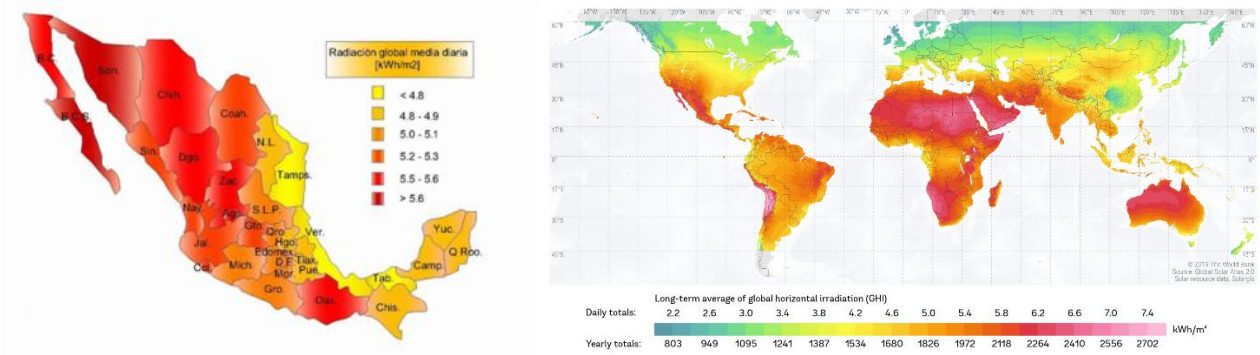


Figura 3. Potencial de recurso solar en México y el mundo.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El diagrama presentado (Figura 4) ilustra el proceso general de instalación de una planta fotovoltaica que se ha llevado a cabo dentro del PSGSD desde la perspectiva de la administración pública. Este proceso comienza con la adquisición del terreno, seguido por la licitación, que permite seleccionar al contratista encargado de la instalación. Una vez realizada la instalación, en caso de ser necesario, se llevan a cabo obras complementarias y se procede a la interconexión con la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Posteriormente, se supervisa y se mantiene la instalación, asegurando su correcta operación.

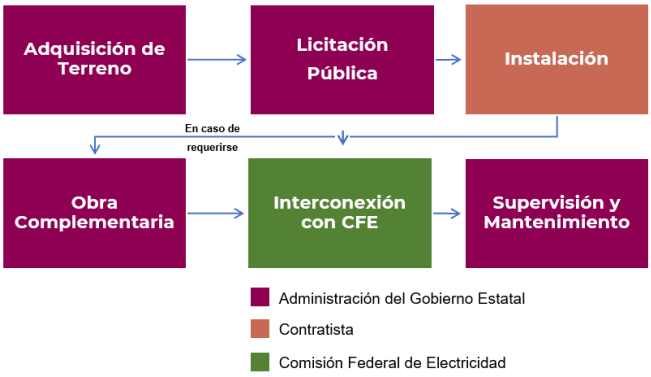


Fig 4. Diagrama del procedimiento general para la instalación de una planta fotovoltaica en el sector público.

2.1 Adquisición del Terreno

El diagrama presentado (Figura 5) detalla la etapa inicial del procedimiento para la instalación de una planta fotovoltaica, el cual consiste en el proceso de adquisición del terreno, en este diagrama se destaca la participación de diferentes entidades gubernamentales y sus atribuciones dentro del proceso.

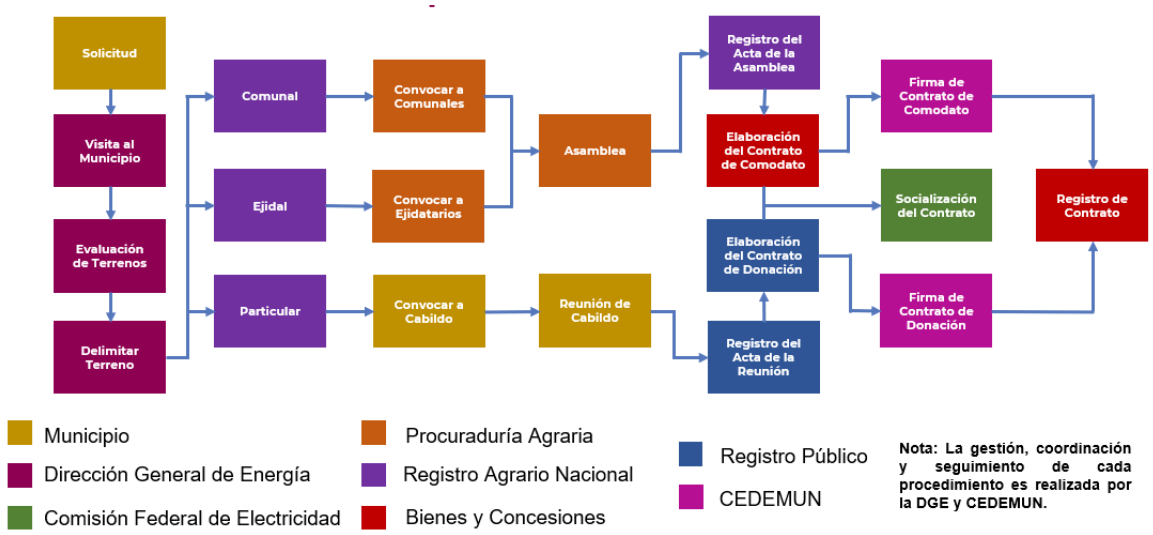


Fig 5. Diagrama del procedimiento de adquisición de un terreno.

El proceso se inicia con un oficio de solicitud de apoyo del PSGSD por parte del municipio, seguida de una visita en la cual se evalúan los terrenos pertinentes. Posteriormente, se procede a la selección y delimitación del polígono del terreno. El procedimiento que seguir varía en función del tipo de propiedad del terreno, ya sea comunal, ejidal o particular. Según corresponda, se convoca a una asamblea o reunión de cabildo con las autoridades competentes para formalizar los acuerdos necesarios. Tras la realización de estas reuniones, se elaboran y suscriben los contratos de comodato o donación, los cuales son debidamente registrados de manera oficial.

2.2 Gestión del Sistema Fotovoltaico

Para proceder con la instalación de la planta fotovoltaica, es necesario llevar a cabo un proceso de licitación pública (Figura 6) con base en lo estipulado en la Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público del Estado de Sonora (LAASSPES) [4]. Este proceso involucra la participación de varias dependencias del gobierno estatal, con el objetivo de asegurar que el procedimiento sea transparente, legal y cumpla con todas las normativas vigentes. La coordinación entre estas entidades garantiza que la licitación se desarrolle de manera justa y eficiente, permitiendo la selección del proveedor más adecuado para la ejecución del proyecto.



Figura 6. Diagrama del procedimiento de gestión de una planta fotovoltaica.

El proceso general, representado en el diagrama anterior (Figura 6), comienza con la recepción de un oficio por parte de la Subsecretaría de Egresos, donde se indica la disponibilidad de un techo presupuestal para la licitación. A partir de ese momento, se realiza un estudio de mercado con posibles licitantes para determinar si existe suficiencia presupuestaria, después se elabora la convocatoria de la licitación. Una vez finalizadas estas etapas, se envía toda la documentación a la Contraloría General y a la Consejería Jurídica para verificar que la convocatoria de la licitación cumpla con la normativa aplicable. Tras la verificación y aprobación, se publica en el portal web de CompraNet-Sonora. A continuación, se espera el registro de los participantes y, una vez cumplidos los plazos establecidos en las bases de la licitación, se procede con

las siguientes fases de la licitación hasta llegar al fallo. Una vez determinado el ganador, se firma el contrato, permitiendo a la empresa iniciar el proceso de construcción.

2.3 Trámites de Interconexión

La interconexión de una planta de generación eléctrica a las redes de la CFE es crucial porque permite que la electricidad generada por la planta se distribuya de manera eficiente a los usuarios finales a través de la infraestructura existente de CFE, asegurando que la energía llegue a hogares, industrias y otros consumidores.

Para poder llevar a cabo la interconexión de la planta fotovoltaica es importante conocer el manual de interconexión [5], ya que este indica el procedimiento a seguir además de como presentar la solicitud de interconexión con la siguiente información:

- Solicitud de Interconexión.
- Croquis de la ubicación geográfica de la planta eléctrica.
- Diagrama unifilar de la planta eléctrica.
- Ficha técnica y certificado de la tecnología de generación utilizada.
- Ficha técnica y certificado del inversor de corriente.
- INE del titular del contrato.
- Carta poder simple/notariada si se realiza el trámite por un tercero.
- INE del tercero.
- Fotos de la instalación.

Una vez entregada la documentación solicitada por la CFE, se procede a la ejecución del proceso establecido en el diagrama (Figura 7).

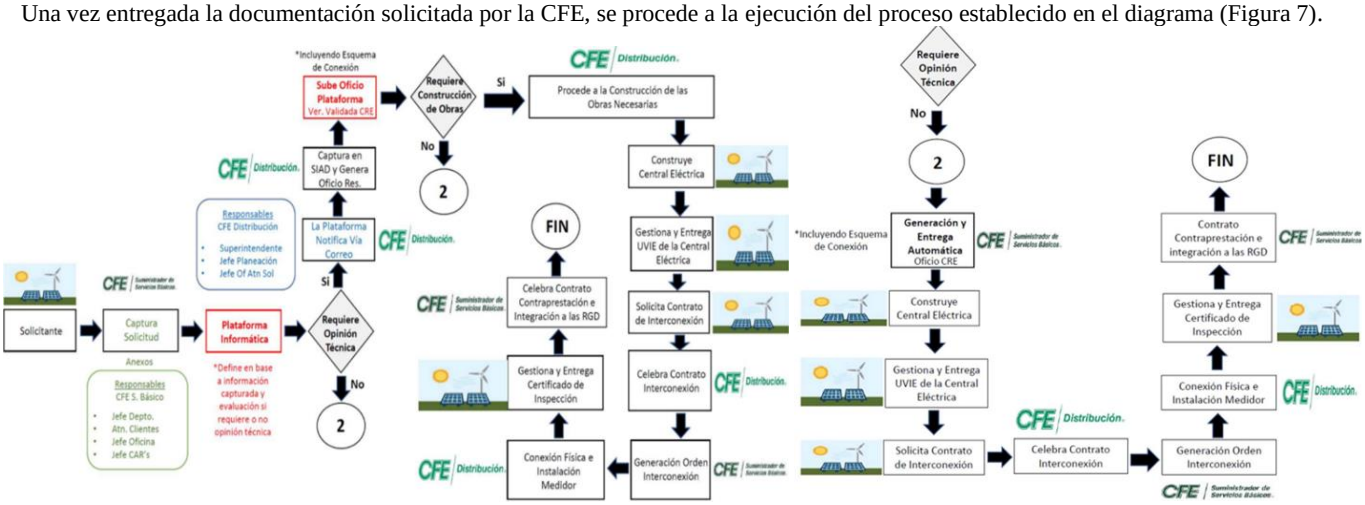


Figura 7. Diagrama del procedimiento para la interconexión de una central eléctrica.

2.4 Medición

Para el esquema de contraprestación a través de Venta Total de Energía en Media Tensión superior a 250 kW y menor a 500 kW (MT2) requiere que el medidor a instalar cumpla con la especificación de CFE G00048 que implica un sistema de comunicación que permite toma y envío de datos de manera cincominutal para su medición.

Es requisito indispensable que la central generadora cuenta con un servicio de comunicación vía internet con una IP de uso exclusivo para el medidor. A la vez el generador deberá proporcionar a CFE acceso a un servidor que esté recibiendo los datos de medición en generados por el medidor. Es un caso común que el generador proporcione el servidor y lo de a resguardo a CFE para que lo mantenga operando en alguna de sus instalaciones de CFE Informática.

3. RECOMENDACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS ADMINISTRATIVOS

Uno de los factores determinantes para lograr dicha optimización es la implementación de una comunicación eficiente entre las partes involucradas. Esta comunicación debe establecerse desde la fase de planeación, garantizando una coordinación efectiva que facilite todos los pasos posteriores, como la selección del sitio óptimo para la instalación de la planta.

Un aspecto clave en la selección del sitio es la consideración de factores arqueológicos. Por ejemplo, una consulta previa con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) puede evitar la instalación de la planta en áreas con alto potencial de yacimientos arqueológicos, lo que podría retrasar o incluso detener el proyecto. Este tipo de coordinación temprana no solo previene inconvenientes, sino que también optimiza el uso de recursos al evitar costos asociados con posibles reubicaciones.

La ejecución de acciones en paralelo es otro elemento fundamental para la optimización. Este enfoque permite llevar a cabo varios procesos simultáneamente, lo que reduce significativamente el tiempo total del proyecto. Por ejemplo, mientras se gestiona la adquisición del terreno, es posible avanzar en estudios técnicos, ambientales, sociales y arqueológicos de manera concurrente. Este método de trabajo en paralelo no solo acelera el progreso del proyecto, sino que también asegura que todos los aspectos críticos se aborden de manera integral.

Además, es esencial mantener un seguimiento proactivo de todos los trámites y procesos que se realizan en las diferentes instituciones involucradas. Este seguimiento continuo permite identificar y resolver rápidamente cualquier obstáculo, asegurando que el proyecto se mantenga en el cronograma previsto. La proactividad en la gestión de trámites administrativos es, por tanto, un componente clave para la optimización de procesos en proyectos de construcción de plantas solares.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones que pueden derivarse de este artículo sobre la instalación de plantas fotovoltaicas por la administración pública estatal en Sonora son las siguientes:

- Proceso de Instalación Estructurado: La instalación de plantas fotovoltaicas sigue un proceso detallado y bien estructurado que abarca desde la adquisición del terreno, la gestión de licitaciones públicas, la interconexión con la red de CFE hasta la supervisión y medición del sistema. Este enfoque asegura que el proyecto sea legal, transparente y eficiente, cumpliendo con las normativas vigentes.

- Desafíos Administrativos: La optimización de los procesos administrativos es clave para el éxito de estos proyectos. La coordinación eficiente entre las diferentes entidades gubernamentales, la ejecución de acciones en paralelo y el seguimiento proactivo de los trámites son factores críticos para evitar retrasos y sobrecostos.

REFERENCIAS

[1] Primer Informe de Gobierno 2021-2022, Alfonso Durazo Montaño, Gobernador del Estado de Sonora. 13 octubre 2022, versión estenográfica). www.sonora.gob.mx

[2] Guía de cooperativas de energía sustentable en México | Instituto Nacional de la Economía Social | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)

[3] El Estado de la Generación Distribuida Solar Fotovoltaica en América Latina y El Caribe | UNEP - UN Environment Programme

[4] Ley 087 de 2024. Por la cual se reglamenta las adquisiciones, arrendamientos de bienes muebles y prestación de servicios de cualquier naturaleza, que realice la administración pública estatal. 28 de julio del 2022. D.O. No.

[5] Secretaria de Energía. (2016). Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad menor a 0.5 MW. Diario Oficial de la Federación.

Cocinas Solares, Secaderos, Destilación y Desinfección Solar/ Solar Térmica

ID	TÍTULO	PONENTE
16201	Comparativo tecnoeconómico de una planta de torre central versus una planta fotovoltaica con almacenamiento de energía	Iván Salgado Transito
16124	Estudio energético y exergético de un destilador solar semiesférico en la remoción de arsénico y fluoruro	Alfonso Octavio Padilla
16104	Sistema Solar de Potabilización: Prototipo autónomo para remoción de contaminantes del agua en comunidades de Aguascalientes	Miguel Ángel Hernández

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

COMPARATIVO TECNOECONOMICO DE UNA PLANTA DE TORRE CENTRAL VERSUS UNA PLANTA FOTOVOLTAICA CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Ivan Salgado Tránsito
Centro de Investigaciones en Óptica AC. Prol. Constitución No. 607. Fracc. Reserva de Loma Bonita. CP. 20200. Aguascalientes, Ags.
isalgadotr@cio.mx

RESUMEN
En este trabajo se presenta un análisis comparativo de una planta de torre central de 100 MW con almacenamiento de energía de 8h ubicada en Puerto Libertad Sonora versus una planta Fotovoltaico de igual capacidad con almacenamiento de baterías de 6 h. Para el análisis se utilizó System Advisor Modelo de NREL y se utilizó el año meteorológico típico (TMY) para modelar las condiciones meteorológicas del lugar. En el estudio tecno-económico se determinó la energía generada por el sistema, el costo nivelado de la energía (LoCE), el valor presente neto (NPV) y la tasa de retorno (TIR). Para el estudio se consideraron las tarifas horarias industriales de la región de acuerdo con lo reportado por CFE. Para maximizar los ingresos de las plantas se implementó un plan de gestión (despacho) de la energía para evacuar a la red en los horarios de mayor precio de la energía. Los resultados muestran que implementar estrategias de gestión de la energía incrementan la viabilidad económica de las plantas de generación.

ABSTRACT
This work compares a 100 MW central tower plant with 8h energy storage located in Puerto Libertad Sonora versus a Photovoltaic plant with 6 h of battery storage. NREL's System Advisor Model was used for the analysis, and the typical meteorological year (TMY) was used to model the meteorological conditions of the site. The techno-economic study determined the energy generated by the system, the levelized cost of energy (LoCE), the net present value (NPV) and the rate of return (IRR). The study considered the region's industrial hourly rates as reported by CFE. An energy dispatch plan was implemented to evacuate energy to the grid during peak energy price hours to maximize plant revenues. The results show that implementing energy management strategies increases the economic viability of the generation plants.

Palabras claves: CSP, Baterry Storage, Planta termosolar, Simulación dinámica, Planta fotovoltaica, Torre central.

INTRODUCCIÓN

La transición hacia un futuro energético sostenible y limpio es una prioridad global. En este contexto, las tecnologías solares han emergido como una de las soluciones más prometedoras para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático. Entre las diversas tecnologías solares disponibles, las plantas de torre central y las plantas fotovoltaicas se destacan por su capacidad para generar electricidad a gran escala.

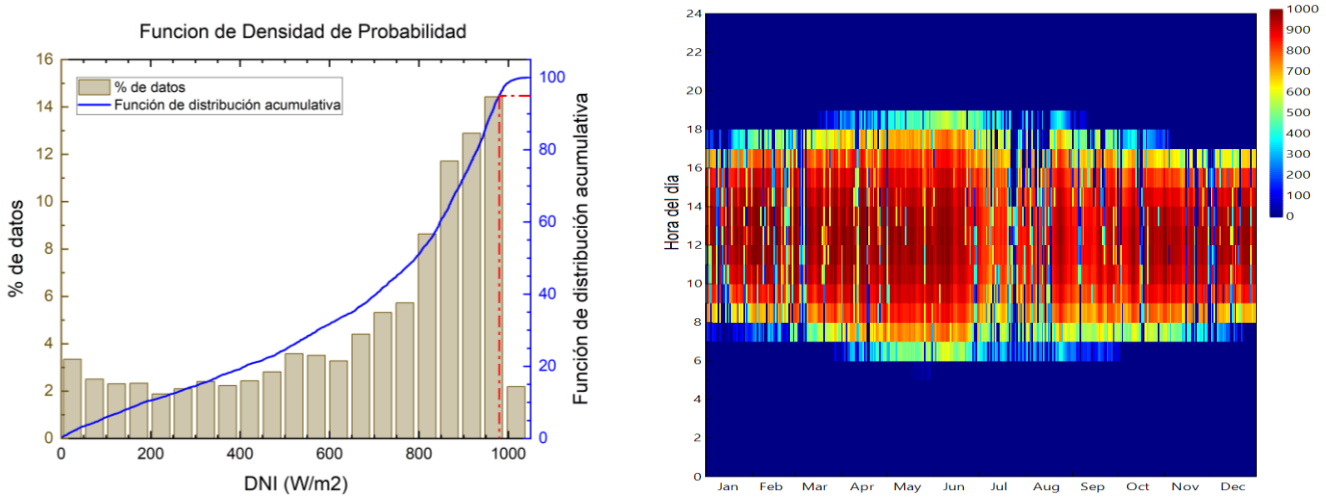
El presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis comparativo exhaustivo entre una planta de torre central de 100 MW con almacenamiento de energía de 8 horas y una planta fotovoltaica de igual capacidad con almacenamiento de baterías de 6 horas, ambas ubicadas en Puerto Libertad, Sonora. La elección de esta región se fundamenta en su alto potencial solar y su creciente demanda energética. A través de este análisis, se busca evaluar las ventajas y desventajas de cada tecnología en términos de: Eficiencia de conversión, comparación de la eficiencia de conversión de la energía solar en electricidad en ambas tecnologías, considerando factores como la radiación solar incidente, la temperatura y la tecnología de los receptores y celdas solares. Capacidad de almacenamiento: Evaluación de la capacidad de almacenamiento de energía de ambas tecnologías, considerando la duración de la descarga, la eficiencia de carga y descarga, y el costo por kWh almacenado. Factores económicos: Análisis de los costos de inversión, operación y mantenimiento de cada planta, así como la estimación del costo nivelado de la energía (LCOE).

Los resultados de este estudio proporcionarán información valiosa para la toma de decisiones en el sector energético, al permitir identificar la tecnología solar más adecuada para la generación de electricidad a gran escala en regiones con características similares a Puerto Libertad, Sonora. Además, se espera que este trabajo contribuya al avance del conocimiento en el campo de las energías renovables y fomente el desarrollo de políticas energéticas más sostenibles.

METODOLOGÍA.

Para este estudio comparativo se seleccionó la ubicación de puerto Libertad Sonora, **(latitud 29.9, longitud -112.69)** porque actualmente ahí se ubica una central eléctrica de CFE y por la amplia disponibilidad de recurso solar, principalmente DNI, así como el bajo costo del terreno

necesario para la instalación de los sistemas de captación Solar. En la figura 1 se muestra la disponibilidad del recurso solar (DNI) en el lugar. El inciso a) muestra la densidad de probabilidad de la DNI para el año meteorológico típico, ahí se observa que el valor de DNI con el 14 % de probabilidad esta entre 950-1000 w/m^2; ahí se observa que el punto de diseño optimo esta en 976w/m^2. El inciso b) muestra un mapa de calor del valor de DNI en W/m^2 durante los 12 meses del año y como función de la hora del día, del grafico se puede observar que durante el medio día y durante varios meses del año la DNI es superior a 800 W/m^2 con un descenso durante los meses de verano.



a) **b)**

Figura 1. Disponibilidad del recurso solar de Puerto Libertad Sonora, a) Función de densidad de probabilidad de la DNI, en la gráfica se observa que el punto de diseño (95%) de DNI está en 979 W/m^2. b) muestra el mapa de calor del valor de DNI horario durante los 12 meses del año.

Referente a la simulación de las 2 plantas, una central de torre Central de 100 MW con almacenamiento térmico y a una planta fotovoltaica con almacenamiento de baterías con una capacidad de DC de 100 MW y de 75 MW de capacidad de AC, sus esquemas se muestran en la figura 2. Para simular las plantas se utilizo el System Advisor Model (SAM) desarrollado por el laboratorio nacional de energías renovables de USA (NREL por si siglas en inlgles). SAM es una plataforma de código abierto diseñada para evaluar la viabilidad técnica y económica de una amplia gama de sistemas de energía renovable [DiOrio, 2020][Gilman, 2018]. SAM permite modelar diversos sistemas de energía renovable, incluyendo fotovoltaica, eólica, termosolar, biomasa y geotérmica; simula el rendimiento de los sistemas a lo largo del tiempo, considerando factores como la irradiación solar, la velocidad del viento, las condiciones climáticas y los perfiles de carga; realiza análisis económicos detallados, incluyendo el cálculo del costo nivelado de la energía (LCOE), el retorno de la inversión (ROI) y el análisis de sensibilidad. Además, permite modelar sistemas con almacenamiento de energía, como baterías, para mejorar la gestión de la energía y la flexibilidad de la red.

En la figura 2 se ilustra 2 esquemas simplificados de los sistemas modelados con SAM, [Wagner, 2017] mientras que en las tablas 1 y 2 se muestran los parámetros de entrada de cómo se definió cada una de las plantas. La planta de Torre central esta integrada por un campo de heliostatos de 7871 con un tamaño de 12 x 12 m. El área de captación del campo solar es de 1.1 Millones de m^2. La altura de la torre es de 180 m y el diámetro del receptor es de 18 m. La potencia neta del sistema es de 98 MWe y la capacidad del sistema de almacenamiento térmico de sales fundidas es de 8 hrs.

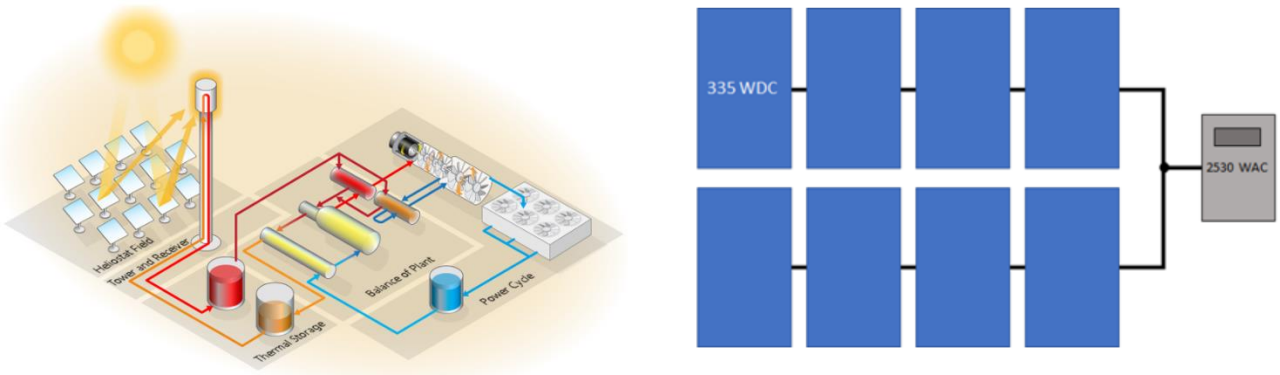


Figura 2. Esquema de la planta termosolar de 100 MW y de la planta fotovoltaica de 100 MW con almacenamiento de energía, [Kesseli, 2018 NREL].

Tabla 1. Datos de entrada para la planta de torre central de 100 MW con almacenamiento térmico.

Dato de entrada	valor	Dato de entrada	valor
Punto de diseño DNI (W/m^2)	979	Altura del receptor (m)	18
Multiplo solar	2.2	∅ del receptor (m)	15.43
Tiempo de almacenamiento (hr)	8	Altura de la Torre (m)	180
Potencia neta (MWe)	98.89	Número de helióstatos	7871
Eficiencia del ciclo	0.412		

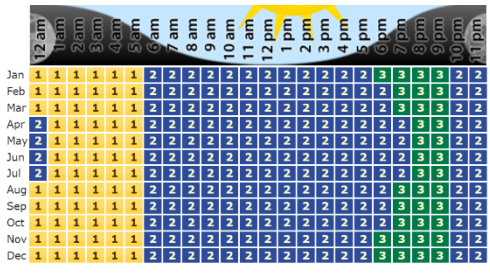
Por otro lado, la planta fotovoltaica tiene una Capacidad de 100 MW DC, pero debido a un razón de conversión de 1.33 de DC a AC, la capacidad total de AC es de 75 MWe. La planta esta compuesta por 166, 431 paneles fotovoltaicos de la marca trina solar TSM 600 con una potencia nominal de 600 W. Los paneles están interconectados en serie a razón de 29 paneles en 5 739 cadenas. El sistema cuenta con 30 inversores de la marca Sungrow Power Supply Co., con una capacidad de 2.5 MWac. El banco de baterias tiene una capacidad de almacenamiento de 6 hrs lo que equivale una capacidad de 60 MWe.

Tabla 2. Datos de entrada para la planta fotovoltaica con almacenamiento de baterías

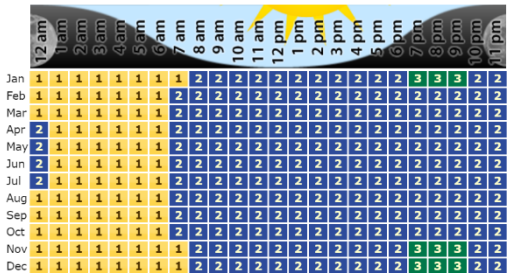
Dato de entrada	valor	Dato de entrada	valor
Capacidad total AC (MWe)	75.215	Modelo de panel	Trina Solar TSM 600
No. de Módulos	166,431	Potencia del panel (W)	600
No. de cadenas en paralelo (strings)	5,739	Modelo de inversor	Sungrow Power Supply
Módulos por cadena	29	Capacidad del inversor (MWac)	2.5
No. de inversores	30	Eficiencia del ciclo	0.412
Inclinación	Fijo a latitud del lugar	Capacidad del banco de baterías	60 MWe

Referente a la parte económica se utilizaron los valores de costes por default de SAM, considerando que son costes internacionales y para fines del análisis comparativo se asumieron como válidos. El costo de capital de la planta de torre central fue de $638 Millones de USD, mientras que la planta fotovoltaica con almacenamiento de baterías ascendió a un costo de $280 Millones de USD. Para calcular los ingresos su utilizó como dato los costos promedio de una tarifa eléctrica industrial reportada por CFE. El valor de la tarifa varia como función de la hora del día, repartiéndose en 3 periodos tarifarios. La tarifa baja, con un valor de $ 0.84 Pesos mexicanos, la tarifa intermedia a un costo de $ 1.4 pesos y

la tarifa de alta demanda de $ 1.556 pesos. Con estos datos se crean las matrices del factor TOD que se declaran datos de entrada en SAM. En la Figura 3 se muestran las matrices con los periodos tarifarios de la región Noroeste de CFE. Como se puede observar las tarifas eléctricas son bajas, lo cual ocasiona que la viabilidad económica de ambas plantas sea complicada.



a)



b)

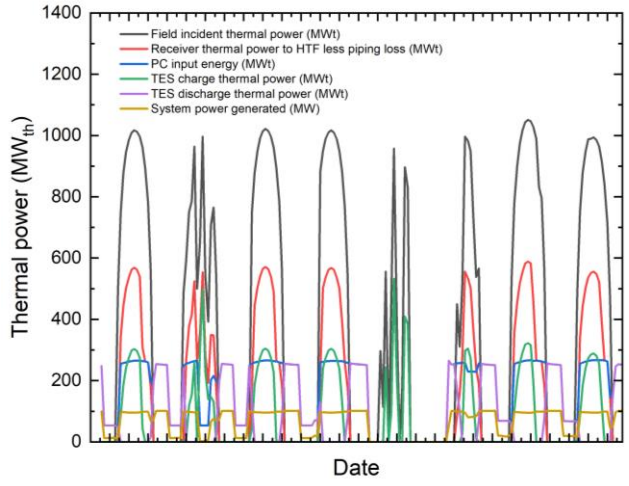
Periodo	Tarifa $MXN/kWh
1	0.8401
2	1.4085
3	1.556

Figura 3. Tarifas Industriales horarias para la región Noroeste de CFE. a) Tarifas entre semana, b) tarifas fin de semana. Los precios son en pesos mexicanos.

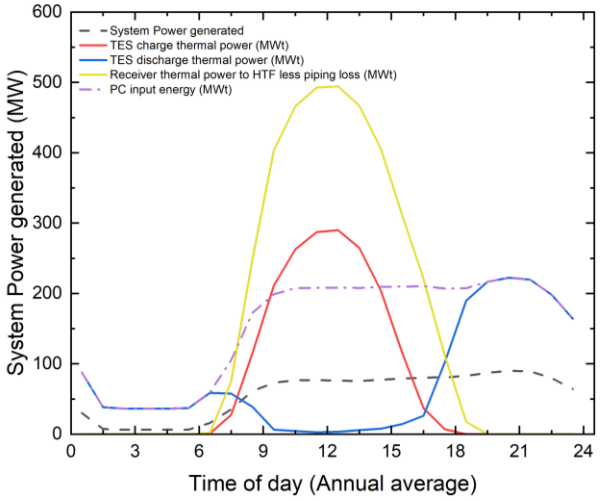
RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados de la simulación de la planta de torre central se muestran en la figura 4 y se resumen en la tabla 3. En la figura 4 a) se muestra los resultados de 8 días de trabajo, representando la energía térmica incidente en el campo solar, posteriormente esa energía es reflejada al receptor y una vez captada se trasfiere al fluido de trabajo, posteriormente esa energía pasa al bloque de generación de potencia para producir el vapor y finalmente como salida se muestra a energía eléctrica generada por el sistema. Adicionalmente se muestran las etapas de carga y descarga del sistema de almacenamiento térmico. La figura 4 b) muestra las mismas variables del inciso anterior con la diferencia que es el comportamiento promedio anual para 1 día de operación. Claramente se observa la magnitud de energía térmica del campo solar de la cual, debido al múltiplo solar de 2.2, de manera aproximada la mitad de la energía térmica se va al bloque de generación de potencia y la otra fracción se utiliza para cargar el sistema de almacenamiento térmico. Una vez que van disminuyendo el recurso solar, la generación del sistema se mantiene con la descarga del sistema de almacenamiento. En la figura se puede observar como la energía eléctrica generada por el sistema mantiene una relación del 40% de la energía térmica entrante en el bloque de generación de potencia.

En la tabla 3 se presenta un resumen de los principales parámetros tecno-económicos de la planta de torre central. Ahí se muestra que la producción estimada anual de la planta es de 497 GWh, el factor de capacidad es de 57.5 % y el costo nivelado de la energía LCOE es de $10.86 centavos de dólar. Debido a que el precio de venta del PPA se aproximó al precio de la tarifa intermedia de la región Noroeste, que es de $7.21 ¢/kWh, el valor presente neto (NPV) obtenido fue negativo de $ -77 Millones de USD, esto debido a que la tarifa eléctrica es muy baja. Para obtener mejor desempeño económico el precio de venta PPA debería ser un poco mayor al LCOE.



a)



b)

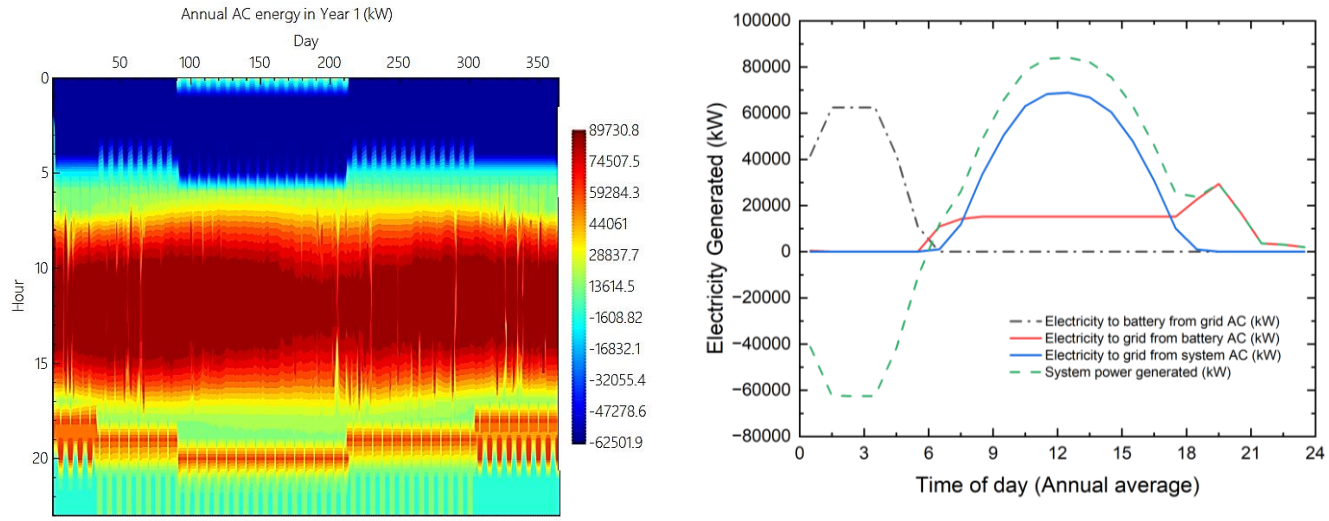
Figura 4. Desempeño energético de la planta de torre central. a) la captación de energía térmica del campo solar en un periodo de 8 días, la proporción de energía térmica trasferida al fluido de trabajo, la energía entrante al bloque de generación de potencia y la energía

generada por el sistema. b) Variables idénticas al inciso a) con la diferencia que es el comportamiento promedio anual para un día de operación.

Tabla 3. Resumen de resultados de la simulación de la planta de torre central del 100 MW.

Métrica	Valor	Métrica	Valor
Energía anual de CA (año 1)	497.68 GWh	LCOE Coste nivelado de la energía real	8.62 ¢/kWh
Factor de capacidad (año 1)	57.5%	NPV valor presente neto	$-77,159,800
Consumo anual de agua	87,472 m^3	Tasa de retorno (TIR)	1.78 %
Precio del PPA en el año 1 (USD)	7.21 ¢/kWh	Año en que se alcanza la TIR	20
Incremento del precio PPA (USD)	3.00 %/year	Coste neto del capital	$638,891,072
LCOE Coste nivelado de la energía nominal	10.86 ¢/kWh	Capital propio	$422,939,488

En contraste, los resultados de la Planta fotovoltaica con almacenamiento de baterías se muestran en la figura 5 y la tabla 4. La figura 5 a) es un mapa de calor de la generación de electricidad en AC horaria durante los 365 del año, como se puede observar el pico de generación coincide con el pico de irradiancia solar incidente, y posteriormente hay otro pico de generación en la tarde noche de 6-9 pm, coincidiendo con los horarios donde la tarifa eléctrica tiene su costo más elevado. En inciso b) muestra la energía nete generada y consumida por el sistema. Durante la madrugada, el horario donde el precio de la energía es el más bajo, el sistema está configurado para cargar el banco de baterías en este horario y descargarse en horarios donde el precio es el más alto.



a) **b)**

Figura 5. Generación de energía eléctrica de la planta fotovoltaica con almacenamiento de baterías. a) mapa de calor de la generación de electricidad horaria durante los 365 días del año. b) generación de electricidad diaria promedio anual.

Tabla 4. Resumen de resultados de la simulación de la planta fotovoltaica de 100 MW dc.

Métrica	Valor	Métrica	Valor
Energía anual de CA (año 1)	186.530 GWh	LCOE Coste nivelado de la energía real	7.86 ¢/kWh
Factor de capacidad (año 1)	21.3%	NPV valor presente neto	$-45,791,584
		Tasa de retorno (TIR)	-0.59 %
Precio del PPA en el año 1 (USD)	7.21 ¢/kWh	Año en que se alcanza la TIR	20
Incremento del precio PPA (USD)	3.00 %/year	Coste neto del capital	$279,817,056
LCOE Coste nivelado de la energía nominal	9.84 ¢/kWh	Capital propio	$182,255,696

Comparando los resultados de ambas plantas se puede observar que el costo nivelado de la planta PV es de $ 9.84 ¢/kWh mientras que de la planta de torre solar es de $ 10.86 ¢/kWh, $10 ¢/ mayor. Sin embargo en cuanto a la estimación de energía producida la planta de torre es de 497 GWh más del doble de la energía producida por la planta PV que es de 186 GWh.

CONCLUSIONES

Basado en el análisis realizado utilizando el software SAM y considerando las condiciones específicas de Puerto Libertad, Sonora, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Viabilidad de ambas tecnologías: Tanto la planta de torre central como la planta fotovoltaica demostraron ser tecnológicamente viables para la generación de energía en la región, considerando las condiciones climáticas y las tarifas eléctricas locales.
- Importancia del almacenamiento: El almacenamiento de energía, tanto térmico en la torre central como en baterías para la fotovoltaica, resulta crucial para maximizar la eficiencia económica de las plantas. Permite despachar la energía generada en los horarios de mayor demanda y precio, incrementando los ingresos del proyecto.
- Costo nivelado de la energía (LCOE): El LCOE obtenido para ambas tecnologías permitirá comparar de manera más precisa su viabilidad económica a largo plazo. Se espera que este indicador, junto con el NPV y la TIR, permita tomar decisiones de inversión informadas.
- Influencia del año meteorológico típico (TMY): El uso del TMY ha permitido obtener resultados representativos de las condiciones climáticas de la región, lo que brinda mayor confiabilidad a los análisis realizados.
- Potencial de las energías renovables en la región: Los resultados obtenidos reafirman el potencial de las energías renovables, en particular de la solar, para contribuir a la generación eléctrica en la región de Sonora.
- En resumen, este estudio demuestra que tanto las plantas de torre central como las fotovoltaicas, con un adecuado sistema de almacenamiento y una gestión eficiente de la energía, representan opciones atractivas para la generación de electricidad en Puerto Libertad, Sonora. La elección de una tecnología u otra dependerá de factores específicos como el costo de inversión inicial, las políticas energéticas locales y las preferencias de los inversionistas.

REFERENCIAS

DiOrio, N.; Denholm, P.; Hobbs, W. (2020). A Model for Evaluating the Configuration and Dispatch of PV Plus Battery Power Plants. Applied Energy Vol 262 March 2020.

Gilman, P.; Dobos, A.; DiOrio, N.; Freeman, J.; Janzou, S.; Ryberg, D. (2018) SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update. 93 pp.; NREL/TP-6A20-67399.

Kesseli, D.; Wagner, M.; Guédez, R.; Turchi, C. (2018). CSP-Plant Modeling Guidelines and Compliance of the System Advisor Model (SAM). SolarPACES Conference Paper. 8pp. NREL Report No. CP-5500-72183.

Wagner, M.; Newman, A.; Hamiltion, W.; Braun, R. (2017). Optimized Dispatch in a First-principles Concentrating Solar Power Production Model. Applied Energy Vol. 203 October 2017, pp. 959-971.

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE UN DESTILADOR SOLAR SEMIESFÉRICO EN LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y FLUORURO

Alfonso Octavio Padilla Sánchez, Sandra Chávez Sánchez y Israel Labastida Núñez
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Pablo No. 420, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02128. México, Tel. 5611159855,
al2223800602@azc.uam.mx.

María Aurora Armienta Hernández
Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510. México,
victoria@igeofisica.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se realizó un análisis de energía y exergía en un destilador solar semiesférico experimentado en agua contaminada con arsénico (As) y fluoruro (F^-). La muestra de agua se obtuvo de un pozo ubicado en la localidad de Zimapán, Hidalgo, realizando dos pruebas experimentales con un volumen de 3 L, el cual se destilo en su totalidad en un periodo de 10 h por día, durante 3 días En cada prueba se registraron datos de temperatura y radiación solar empleando un equipo Compact FieldPoint y un Piranómetro. Para describir el comportamiento real del destilador, se aplicó el modelo térmico de Kumar y Tiwari, obteniendo datos de eficiencia instantánea energética y exergética. La primera prueba presentó valores máximos de eficiencia energética y exergética en el tercer día, de 79.47% y 9.76%, respectivamente. La segunda prueba presentó valores máximos el segundo día, con una eficiencia energética de 68.09% y una eficiencia exergética de 7.06%. Tanto la remoción de As como F^- fue >99%, demostrando la viabilidad de esta tecnología para su aplicación en zonas rurales con presencia de estos elementos en agua subterránea.

ABSTRACT

In this work, an energy and exergy analysis was carried out in a hemispherical solar still experimented in water contaminated with arsenic (As) and fluoride (F-). The water sample was obtained from a well located in the town of Zimapán, Hidalgo, carrying out two experimental tests with a volume of 3 L, which was distilled entirety in a period of 10 h per day, for 3 days. For each test, temperature and solar radiation data were recorded using Compact FieldPoint equipment and a pyranometer. To describe the real behavior of the distiller, the Kumar and Tiwari thermal model was applied, obtaining data on instantaneous energy and exergetic efficiency. The first test presented maximum values of energy and exergetic efficiency on the third day, of 79.47% and 9.76%, respectively. The second test presented maximum values on the second day, with an energy efficiency of 68.09% and an exergy efficiency of 7.06%. Both removal of As and F- was >99%, indicating the viability of this technology for its application in rural areas with the presence of these elements in groundwater.

Palabras claves: Destilación solar, energía, exergía, remoción, agua subterránea, arsénico, fluoruro.

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural más valioso para la supervivencia de los seres vivos, incluido el ser humano. El agua dulce se emplea en los sectores agrícolas, industrial y el de servicios, pero sin duda su uso más preciado es el que se da para consumo humano; aun así, su acceso está restringido en muchos lugares debido a falta de infraestructura, a la contaminación de los cuerpos de agua y a sobreexplotación. A nivel mundial, alrededor de 3600 millones de personas no cuentan con servicios de saneamiento, y de estos más de 2000 millones no cuentan siquiera con acceso al agua potable (Banco Mundial, 2023).

El agua dulce está distribuida en muchas formas, ríos, lagos, esteros, presas, embalses; no obstante, el agua subterránea es el reservorio más importante del vital líquido, ya que representa hasta el 99% del volumen de agua dulce existente, aunque no siempre disponible (UNESCO, 2022). En lugares como México, con grandes extensiones de territorio con un clima árido y semiárido donde las fuentes superficiales son limitadas, el agua subterránea se vuelve la única fuente de agua disponible para el abastecimiento público, con un 56.7% del volumen total concesionado en todo el territorio (CONAGUA, 2023). Para 2010, México era el séptimo país que más agua subterránea extrajo en el mundo, con un volumen de 29.5 km^3 por año, lo que refleja la importancia que tiene este recurso (UNESCO, 2022).

El agua subterránea no está exenta de contaminación, en algunos casos debido a actividades humanas como la minería, el vertido de aguas residuales, el uso de fertilizantes y recientemente la aplicación de la fracturación hidráulica; la contaminación también puede deberse a fuentes naturales, como puede ser la intromisión de agua marina o salobre, y la disolución de elementos presentes en el acuífero donde el agua se encuentra confinada (Li *et al*., 2021). Entre los elementos presentes en agua subterránea de mayor preocupación se encuentran el As y F-, cuya presencia se ha reportado en 170 municipios pertenecientes a 23 estados de la república mexicana; los estados con un mayor número de municipios afectados son Chihuahua, Zacatecas, Durango, San Luis Potosí, Jalisco y Sonora (Alfaro *et al*., 2021). Los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la NOM-127-SSA1-2021, que indican concentraciones máximas para As de 0.025 mg/L y para F^- de 1.5 mg/L.

La destilación solar ha sido probada como una tecnología eficaz para proveer agua libre de contaminantes como As y F- (Hernández,

2019) (Espino-Valdez, 2019). Los tipos de destiladores solares se dividen entre pasivos y activos, los primeros emplean solamente la radiación solar en forma de calor para funcionar, mientras que los segundos se sirven de energía eléctrica o accesorios para aumentar la eficiencia de destilación. Entre los destiladores pasivos más estudiados se encuentran los convencionales, esféricos, tubulares, multietapas y semiesféricos, por su parte los destiladores activos emplean colectores solares y paneles solares para suministrar energía extra al proceso de destilación (Kapadia *et al*., 2021).

El rendimiento energético del destilador se lleva a cabo mediante el análisis de modelos matemáticos validados por resultados experimentales, a partir del balance de energía y exergía del sistema con lo que se obtienen las eficiencias instantáneas y la producción de destilado (Ali et al., 2023). La eficiencia energética considera de manera cuantitativa la transferencia de energía a partir de la primera ley de la termodinámica, al ser una relación entre la energía utilizada para evaporar el fluido y la energía que es suministrada por la radiación solar. Por su parte la eficiencia exergética toma en cuenta las irreversibilidades de los componentes del destilador, por medio de la segunda ley de la termodinámica, y ha probado ser útil en reducir la ineficiencia del sistema y lograr una mejor relación costo-eficiencia (Ranjan *et al*., 2013). Se ha estudiado el comportamiento energético y exergético de un destilador de acrílico convencional, con valores de eficiencia energética de 32% y eficiencia exergética de 1.69% (Vaithilingam *et al*., 2022). También se han realizado balances de energía para un destilador solar semiesférico convencional, con paredes y recipiente negros, con valores de eficiencia térmica promedio de 37.95% además de reportar valores de eficiencia exergética promedio de 12.44% (Attia *et al*., 2021). El presente estudio busca conocer el comportamiento energético y exergético de un destilador solar semiesférico, para la remoción de As y F^- en agua proveniente de un pozo ubicado en Zimapán, Hidalgo.

METODOLOGÍA

Descripción e instrumentación del destilador

El equipo empleado es un destilador solar pasivo, compuesto por una estructura metálica, un recipiente absorbedor de acero cubierto de una capa de pintura negra, con medidas de 0.697 m x 0.697 m x 0.056 m y un volumen de 0.026 m^3. Las paredes del destilador, canaletas y la cubierta están fabricadas de acrílico; la cubierta tiene una geometría semiesférica que parte de una base cuadrangular con dimensiones de 0.875 m x 0.845 m. Las cuatro canaletas están ubicadas en las paredes del destilador, con un ángulo de inclinación de 8° hacia dos orillas del destilador, conectadas a mangueras por donde se recolecta el agua. El destilador empleado en las pruebas experimentales se muestra en la figura 1.



Figura 1. Destilador solar semiesférico empleado para las pruebas experimentales.

Se realizó la instrumentación del destilador solar para la medición de la radiación y temperatura. Se utilizó una fuente poder modelo *Quint Power* para el suministro de energía a 24 V. Para la toma de la temperatura se emplearon termopares tipo K, hechos de dos alambres de cromel y alumen, con un rango de trabajo de 200 a 1250 °C ± 2.2 °C. Para la medición de la radiación solar se utilizó un piranómetro Eppley 8-48, que capta la radiación solar incidente 180° en el plano horizontal, con unidades de medición en W/m2. Se conectaron los termopares y el piranómetro a un equipo llamado *Compact Field Point* (CFP), que transmite los datos de temperatura y radiación a un ordenador. El CFP utiliza un software programado en LabView para el almacenamiento de los datos, que se despliega en un ordenador.

Obtención de muestras

La muestra incial (M0) se obtuvo de un pozo ubicado en la localidad de Zimapán, Hidalgo, el pozo denominado “Muhi” al norte de la presidencia municipal (20°44'59"N y 99°22'37"O). El muestreo se realizó de acuerdo con la NOM-230-SSA1-2002, siguiendo la recomendación de dejar correr el agua durante 1 minuto antes de la toma de muestra. Todos los envases plásticos se lavaron con una solución de HCl al 10% y se enjuagaron con agua destilada. Para la muestra M0 se utilizaron dos botes de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de 250 mL, a uno de los botes se le agregaron 5 gotas de HNO_3 concentrado para preservar las características de los metales que se analizaron,

conservando las muestras en hielo para su traslado al laboratorio. Para el transporte del agua destinada a las pruebas experimentales se empleó un bidón de 20 L, resguardado en un lugar fresco fuera de la luz directa del sol.

Pruebas experimentales

El proceso de destilación solar se llevó a cabo en el edificio W de la UAM-Azcapotzalco (19°30'10"N y 99°11'20"O), colocando el destilador en la azotea de modo que la radiación no se viera interrumpida por sombras. Se realizaron dos pruebas experimentales, identificadas con el acrónimo M1 y M2, durante el mes de agosto durante la temporada de lluvias, por lo que algunos días se tuvieron días con nubosidad parcial. Cada prueba se realizó durante 3 días, que fue el tiempo que se requirió para destilar completamente 3 L de agua contenida en el recipiente absorbedor. Se tomaron dos muestras durante cada prueba, con la finalidad de conocer las características fisicoquímicas del agua destilada a lo largo de la prueba; la primera muestra (M1.1 y M2.1) se tomó el día inicial de la prueba a las 13:00 horas, mientras la segunda muestra (M1.2 y M2.2) se tomó el tercer día, cuando el fluido dentro del recipiente estaba a punto de agotarse;

La duración de cada día de prueba fue de 10 horas, en un horario de 09:00 a 17:00 horas, lapso durante el cuál se tomaron las mediciones de temperatura y radiación cada 10 minutos. Los termopares se colocaron de manera que se captara la temperatura del recipiente (TR), temperatura del fluido (TF), temperatura del vapor (TV), temperatura de la cubierta interior (TCI), temperatura de la cubierta exterior (TCE) y temperatura ambiente (TA). El piranómetro se colocó a un lado del destilador, en un lugar donde no fuera cubierto por sombras en ningún momento de la prueba, con la finalidad de leer la radiación solar incidente (RAD).

Análisis energético y exergético

Se estudió el comportamiento térmico del destilador durante las pruebas experimentales a partir de ecuaciones que describen la transferencia de energía y exergía de los principales componentes, el recipiente absorbedor, fluido y condensador (Aghaei Zoori *et al*., 2013). Las presiones de vapor parciales se calculan a partir de las temperaturas tanto del fluido como de la cubierta interior:

$$P_f = \exp\left(25.317 - \left(\frac{5144}{T_f + 273}\right)\right) \quad (1)$$

$$P_{ci} = \exp\left(25.317 - \left(\frac{5144}{T_{ci} + 273}\right)\right) \quad (2)$$

A partir del modelo de Kumar y Tiwari se puede calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor, entre el fluido y el condensador interior, que incluye el incluye al número de Grashof (Gr) y al número de Prandtl (Pr) (Kumar y Tiwari, 1996):

$$h_{C,f-ci} = \frac{k_v}{L_v} C\ (Gr * Pr)^n \quad (3)$$

Para calcular Gr se utilizan las constantes C = 0.1255 y n = 1/3:

$$Gr = \frac{g\beta'\rho^2(L_v)^3\Delta T}{\mu^2} \quad (4)$$

La ecuación para conocer el Pr está dada por:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K_v} \quad (5)$$

El coeficiente de transferencia de calor evaporativo del fluido hacia la cubierta interna está dado por:

$$h_{E,f-ci} = 16.273 \times 10^{-3} * h_{C,f-ci}\left(\frac{P_f - P_{ci}}{T_f - T_{ci}}\right) \quad (6)$$

A partir de un balance de energía se obtiene la tasa de transferencia de calor evaporativo entre el fluido y la cubierta interna, expresado como:

$$Q_{E,f-ci} = h_{E,f-ci}(T_f - T_{ci}) \quad (7)$$

La eficiencia térmica instantánea expresa la relación entre la tasa de calor evaporativo y la radiación solar incidente sobre la superficie del destilador:

A partir de un balance de energía se obtiene la tasa de transferencia de calor evaporativo entre el fluido y la cubierta interna, expresado como:

$$\eta_i = \frac{Q_{e,f-ci}}{I(t)_s} \quad (8)$$

Por otra parte, el análisis de exergía toma en cuenta las irreversibilidades del sistema. El balance de exergía en la cubierta se emplea para encontrar la exergía evaporativa, descrita como:

$$Ex_{E,f-ci} = h_{E,f-ci}A_f\left(T_f - T_{ci}\right)\left(1 - \frac{T_\infty + 273}{T_f + 273}\right) \quad (9)$$

Las pérdidas de exergía del sol se calculan como:

$$Ex_{sol} = A_c I(t)\left(1 + \frac{1}{3} + \left(\frac{T_\infty + 273}{6000}\right)^4 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_\infty + 273}{6000}\right)\right) \quad (10)$$

La eficiencia exergética es una medida de la relación entre la salida de exergía evaporativa y la entrada de exergía solar:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{salida}}{Ex_{entrada}} = \frac{Ex_{e,f}}{Ex_{sol}} \quad (11)$$

Determinaciones fisicoquímicas

Se realizó la determinación de As mediante la técnica de ICP-OES, filtrando previamente la muestra. Mientras que la determinación de F- se realizó utilizando un equipo *Orion 5 Star*, el cuál se conectó a un diodo selectivo de F^-; para la lectura de muestras se agregó a la muestra solución TISAB en una proporción 1:1. Se determinó además el pH y conductividad, Tanto el pH como la conductividad se midieron con un equipo *Conductronic PC45*, empleando soluciones de calibración de pH de 4, 7 y 10, y un estándar de conductividad de 1314 µS/cm, realizando la medición a aproximadamente 25°C

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio, se investigaron varios parámetros como parámetros como temperatura en los principales componentes, la radiación solar, eficiencia energética y eficiencia exergética. Se estudió además la remoción de As y F- en agua subterránea sometida a destilación solar. Las temperaturas y la radiación de la prueba M1 se muestran en la figura 2.

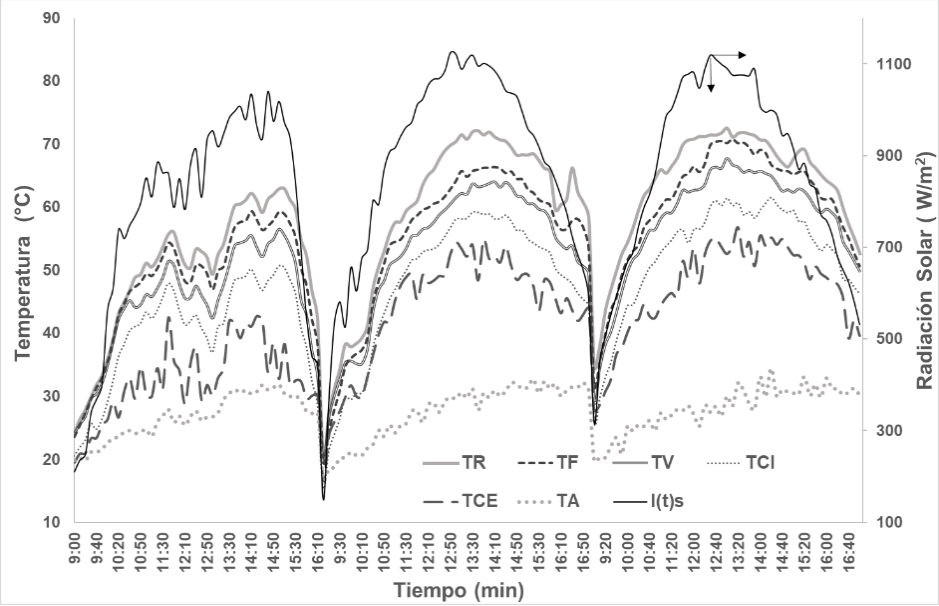


Figura 2. Distribución de las temperaturas y radiación para la prueba M1.

La prueba M1 tuvo una duración de tres días hasta que se evaporó completamente el fluido en el recipiente absorbedor. La recuperación total del destilado fue de 2.83 L (94%), mientras que la recuperación por día fue de 1.25 L el primer día, 0.96 L el segundo y 0.62 L el tercero. Las temperaturas máximas por día fueron de 62.95 °C, 72.15 °C y 72.56 °C. La temperatura dentro del destilador fue mayor el tercer día, cuando el destilador tuvo la menor cantidad de fluido, y también la menor producción de destilado. La radiación solar promedio por día fue de 769 W/m^2 el primero, 878 W/m^2 el segundo y 862 W/m^2 el tercero. La temperatura en el destilador fue menor el primer día, cuando se tuvo una menor radiación solar promedio. Además de la radiación, la cantidad de fluido en el recipiente juega un papel importante en el aumento de la temperatura, ya que se necesita más energía para aumentar un mayor volumen la temperatura del fluido. Sin embargo, la producción de destilado del primer día fue mayor aún con menores temperaturas en la charola. Las temperaturas y radiación correspondientes a la prueba M2 se observan en la figura 3.

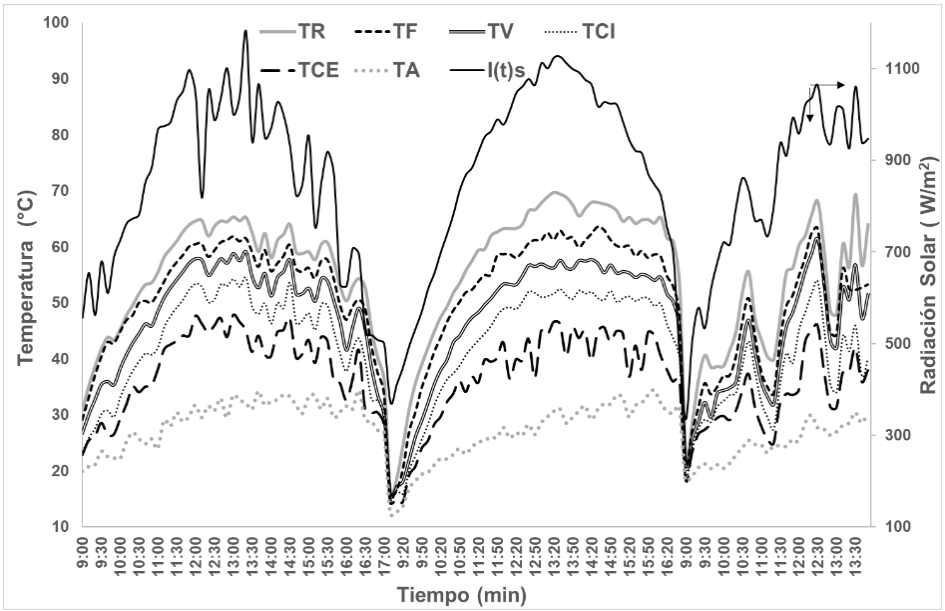


Figura 3. Distribución de las temperaturas y radiación para la prueba M2.

La prueba M2 tuvo una duración aproximada de 2 días y medio, durante los cuales se recuperó un 91% de destilado del total del fluido; la producción por día fue de 1.32 L, 0.81 L y 0.61 L, respectivamente; la producción fue similar a la prueba M1, con la mayor cantidad de destilado el primer día cuando se tiene un mayor volumen en el recipiente. La temperatura máxima que alcanzó el recipiente cada día fue similar con valores de 65.35 °C el primero, 69.73 °C el segundo y 69.40 °C el tercero; a pesar de menores temperaturas en el destilador el primer día de prueba, se obtuvo la mayor cantidad de destilado en la prueba. La radiación solar promedio incidente fue de 847 W/m^2 el primer día, 876 W/m^2 el segundo y 832 W/m^2 el tercero. Los valores similares de radiación solar se reflejaron en la similitud entre temperaturas máximas que se registraron. Los resultados de eficiencia energética y exergética se muestran conjuntamente en la figura 4 y figura 5, para las pruebas M1 y M2, respectivamente.

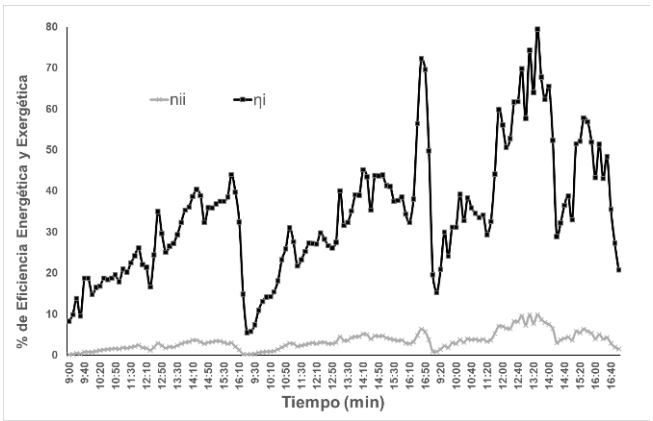


Figura 4. Variación de las eficiencias energética y exergética para la prueba M1.

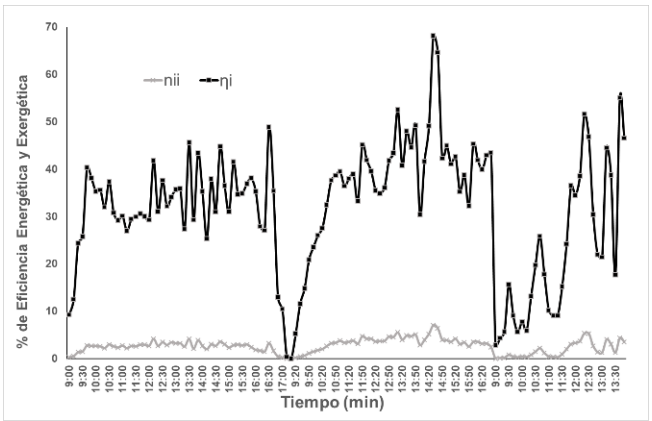


Figura 5. Variación de las eficiencias energética y exergética para la prueba M2.

Los valores de eficiencia térmica del destilador en la prueba 1 tuvieron una tendencia a incrementar al paso de los días, similar al aumento de la temperatura dentro del destilador. Los valores máximos alcanzados fueron de 43.96% el primer día, 72.23% el segundo y 79.47% el tercero. Los valores fueron mayores durante las últimas horas de la prueba el primer y segundo día, mientras en el tercer día se tuvo valores más altos alrededor del mediodía. El aumento de la eficiencia energética en las últimas horas del día indica que el destilador conserva la energía suficiente para mantener una alta tasa de transferencia de calor evaporativo a pesar de la disminución de la radiación solar incidente. Los valores de eficiencia exergética máximos para la prueba M1 fueron de 3.61% el primer día, 5.07% el segundo y 9.76% el tercero. Solamente el primer día no se tuvieron valores máximos de la eficiencia energética y exergética el mismo momento, lo anterior se debe a que la eficiencia exergética toma en cuenta las irreversibilidades del sistema, que no solo dependen del sol sino también del clima y las

condiciones de operación.

Durante la prueba M2 el destilador alcanzó eficiencias energéticas máximas de 48.84% el primer día, 68.09% el segundo y 55.01% el tercero. Los valores máximos de eficiencia exergética instantánea por día fueron de 4.16% el primero, 7.06% el segundo y 5.32% el tercero. Los valores de eficiencias exergéticas son menores que los de la eficiencia energética, debido a que se toma en cuenta la calidad de la energía para llevar a cabo la evaporación. Las eficiencias se mantuvieron más o menos constantes para el primer y segundo día, con una radiación casi ininterrumpida, mientras que para el tercer día tanto la eficiencia energética y exergética variaron a lo largo del día, alcanzando los mayores valores durante las últimas horas del día. La cantidad de fluido en el recipiente no influyó el comportamiento de ambas eficiencias, ya que se mantuvieron similares a pesar de la disminución del volumen en el recipiente. La radiación solar fue un factor mucho más decisivo en el comportamiento térmico del destilador que la cantidad de fluido dentro del mismo.

Los resultados de la remoción de As y F^- durante el proceso de destilación solar se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados fisicoquímicos del agua subterránea y las pruebas experimentales.

Muestra	Día de prueba	pH	Conductividad (µS/cm)	Arsénico (mg/L)	Fluoruro (mg/L)
M0	-	8.12	514	1.094	2.19
M1.1	1	6.85	36	<0.002	0.0154
M1.2	3	6.00	32	<0.002	0.0133
M2.1	1	7.22	33	<0.002	0.0083
M2.2	3	6.66	24	<0.002	0.0076

Las concentraciones para M0 representan las características iniciales del agua subterránea. Los valores fueron para As de 1.094 mg/L y para F^- de 2.19 mg/L, ambas con concentraciones por encima de lo que se considera agua segura para el consumo humano, con casi 44 veces el límite para As y 1.46 veces para el F^-. Además, se determinó un pH de 8.12, propio del agua proveniente de un medio carbonatado. La conductividad fue de 514 µS/cm, lo que indica una presencia significativa de especies iónicas. Tanto para las muestras M1 como M2 se tuvieron valores de As por debajo del límite de detección, lo que representa más de 99% de remoción en el agua destilada. De forma similar, el F- en las muestras de agua destilada fue muy bajo, en un rango entre 0.0154 – 0.0076 mg/L, que representa una eliminación de más del 99%. Estos valores comprueban que la destilación es un proceso efectivo para separar a al As y al F- del agua destilada, sin cambios significativos aún con el aumento de la concentración a medida que se disminuía el volumen del fluido. Durante la prueba M1, se tuvo una disminución en el pH de 6.85 el primer día a 6.00 el tercero; algo similar ocurrió para la prueba M2, que pasó de un pH de 7.22 a un valor ligeramente ácido de 6.66. La disminución de pH se atribuye a la pérdida de carbonatos en el proceso de destilación, además de que el incremento de la temperatura provoca la disociación del agua en sus elementos hidrógeno y oxígeno, aumentando la concentración de iones H^+. La conductividad del agua destilada estuvo en el rango de 24-36 µS/cm, lo que confirma la disminución de iones presentes en el agua, demostrando que la mayoría de elementos disueltos en el agua se conservan dentro del recipiente absorbedor, lo que se puede ver en el precipitado de color blanco que se forma cuando se evapora completamente el fluido.

CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la remoción del As y F^- presente en agua de un pozo de Zimapán Hidalgo. Se estudió el comportamiento térmico del destilador durante las pruebas experimentales, a partir del cálculo de las eficiencias energéticas y exergéticas. Se encontró que las máximas eficiencias energéticas se obtuvieron durante las últimas horas del día, debido a que disminuyó la radiación solar, pero se mantuvo la transferencia de calor evaporativo, demostrando una buena conservación de energía dentro del sistema. Las eficiencias exergéticas máximas también se dieron en las últimas horas del día, aunque para la segunda prueba se registraron exergías altas a medio día, lo que refleja que la exergía no depende exclusivamente de la radiación solar, sino de factores como el viento o irreversibilidades en los componentes del destilador. Se comprobó la eficacia de la destilación para la remoción de contaminantes como As y F^- de agua subterránea, cumpliendo con las concentraciones de acuerdo con la normatividad mexicana. Los resultados de pH y conductividad sugieren remineralizar el agua destilada para su posible consumo humano.

REFERENCIAS

Aghaei Zoori, H., Farshchi Tabrizi, F., Sarhaddi, F., Heshmatnezhad, F. (2013). Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still. *Desalination*, 325, 113–121.

Ali, H., Ali, S., Khan, S., Siddiqui, M. (2023). Experimental Investigations of a Single-Slope Solar Still: Energy and Exergy Analysis. *Energies*, *16*(22), 7659.

Alfaro, M., Ortíz, M., Alarcón, M., Martínez, D., Ledón, J. (2021). Concentraciones de arsénico y fluoruro en agua subterránea. En *Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua. Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México*. (pp. 40-58). UNAM

Attia, M. E. H., Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., Abdullah, A. (2021). A comparative study of the effect of internal reflectors on a performance of hemispherical solar distillers: Energy, exergy, and economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47*, 101465.

Banco Mundial. (2023). Agua. Panorama general. Obtenido el 10 de julio de 2024, de

https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview.
CONAGUA. (2023). *Estadísticas del agua en México*. Comisión Nacional del Agua.
Espino-Valdés, M., Hernández-Herrera, C., Pinales-Munguía, A., Ballinas-Casarrubias, M. (2019). Utilización de un sistema de destilación solar para remoción de Arsénico y Flúor en agua subterránea destinada al consumo humano. *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología*, 14–22.
Hernández, C. (2019). *Desalinización de agua subterránea con alto contenido de arsénico mediante un sistema de destilación solar*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chihuahua.
Kapadia, Y., Mehta, A., Shah, V., Kotadia, D., Shah, S., Shah, M. (2021). A comprehensive study on amalgamation of sustainable solar powered distillation for arsenic and fluoride removal from groundwater. Environmental Science and Pollution Research, 28(48), 67909–67924.
Kumar, S., Tiwari, G. (1996). Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems. *Solar Energy*, 57(6), 459-464.
Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T., Srinivasamoorthy, K. (2021). Sources and Consequences of Groundwater Contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *80*(1), 1–10.
UNESCO. (2022). *Groundwater. Making the invisible visible*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
Vaithilingam, S., Muthu, V., Athikesavan, M. M., Afzal, A., & Sathyamurthy, R. (2021). Energy and exergy analysis of conventional acrylic solar still with and without copper fins. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(4), 6194–6204).

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES
XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SISTEMA SOLAR DE POTABILIZACIÓN: PROTOTIPO AUTÓNOMO PARA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DEL AGUA EN COMUNIDADES DE AGUASCALIENTES

Miguel A. Hernández Barajas, Claudio Frausto Reyes
Centro de Investigaciones en Óptica A.C, Unidad Aguascalientes, Calle Prolongación Constitución, Aguascalientes, Aguascalientes, C.P. 20200, México.

Carlos A. Pineda Arellano
CONAHCYT, Centro de Investigaciones en Óptica A.C, Unidad Aguascalientes, Calle Prolongación Constitución, Aguascalientes, Aguascalientes, C.P. 20200, México.

Pedro R. Martínez Manuel
Dirección de investigación, Centro de Investigaciones en Óptica A.C, Unidad Aguascalientes, Calle Prolongación Constitución, Aguascalientes, Aguascalientes, C.P. 20200, México.

Patricia García Ramírez
Dirección de investigación, Centro de Investigaciones en Óptica A.C, Loma del bosque 115, Lomas de campestre León de los Aldama, Gto. C.P. 37150, México.

RESUMEN

El agua es un recurso vital que enfrenta una alarmante escasez a nivel mundial. A pesar de su importancia fundamental para el desarrollo de las civilizaciones, los niveles de contaminación han aumentado notablemente, disminuyendo las fuentes de agua de calidad óptima. Esta situación obliga a las comunidades a recurrir a fuentes de agua inmediatas, incluso consumiendo agua sin tratar, lo que propicia la aparición de enfermedades, algunas de ellas mortales. En el estado de Aguascalientes, los desafíos son significativos debido a las altas concentraciones de sales, minerales y contaminantes persistentes en el agua. Una gran parte de los afluentes contaminados presenta niveles elevados de sustancias tóxicas, convirtiéndolos en no aptos para el consumo humano. Para combatir estas problemáticas, se ha desarrollado un prototipo solar de potabilización de agua. Este sistema emplea tecnología de filtración por ósmosis inversa y degradación de contaminantes en un reactor fotocatalítico, utilizando procesos de fotocatálisis heterogénea. El funcionamiento del potabilizador es supervisado por una etapa de control que monitorea el desempeño y recolecta la información de los diversos sensores que lo constituyen. Durante el proceso de potabilización, el prototipo cuenta con diferentes tanques de almacenamiento que dividen el proceso por el cual pasa el efluente. Además, cuenta con diferentes sensores los cuales monitorean el pH, la conductividad, el oxígeno disuelto y la temperatura del producto de salida. La energía necesaria para el funcionamiento del prototipo proviene de un sistema fotovoltaico tipo isla. Este innovador sistema busca proporcionar una solución sostenible y eficiente para la potabilización del agua, abordando los desafíos de contaminación y escasez de agua potable en la región. Mediante el aprovechamiento de la energía solar y la implementación de tecnologías avanzadas de filtración y degradación de contaminantes y así mejorar la calidad del agua en comunidades afectadas.

ABSTRACT

Water is a vital resource facing alarming scarcity worldwide. Despite its fundamental importance for the development of civilizations, contamination levels have notably increased, reducing sources of water with optimal quality. This situation forces communities to resort to immediate water sources, even consuming untreated water, leading to the spread of diseases, some of them deadly. In the state of Aguascalientes, the challenges are significant due to high concentrations of salts, minerals, and persistent contaminants in the water. A large portion of the contaminated streams contain elevated levels of toxic substances, making them unfit for human consumption. To address these issues, a solar water purification prototype has been developed. This system uses reverse osmosis filtration technology and contaminant degradation in a photocatalytic reactor, utilizing heterogeneous photocatalysis processes. The operation of the purifier is monitored by a control stage that tracks performance and collects information from the various sensors that constitute it. During the purification process, the prototype has different storage tanks that divide the process through which the effluent passes. Additionally, it features various sensors that monitor the pH, conductivity, dissolved oxygen and temperature of the output product. The energy required for the prototype's operation comes from an island-type photovoltaic system. This innovative system aims to provide a sustainable and efficient solution for water purification, addressing the challenges of contamination and potable water scarcity in the region. By harnessing solar energy and implementing advanced filtration and contaminant degradation technologies, it seeks to improve water quality in affected communities.

Palabras claves: *Fotocatálisis, Ósmosis inversa, Potabilización, Reactor fotocatalítico, Sistema fotovoltaico. Sistema de control y monitoreo*

INTRODUCCIÓN

El agua es considerada un recurso vital para la humanidad; sin embargo, actualmente es uno de los recursos más explotados en el desarrollo de las civilizaciones, lo que ha generado un notable incremento en los índices de contaminación de los mantos acuíferos, poniendo en riesgo su disponibilidad y abastecimiento. La Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) se ha fijado como objetivo, dentro de la agenda 2030, garantizar el acceso a agua potable segura y asequible, ya que en la actualidad el 29% de la población mundial no cuenta con este servicio

(United Nations, 2015). En diversas regiones, se observa un alto índice de contaminación del agua, lo que provoca enfermedades entre los usuarios, incluyendo graves problemas digestivos (García Gil et al., 2021).

Según la información recopilada en la página oficial de CONAGUA (2024), se ha obtenido un panorama detallado sobre la calidad del agua en el estado de Aguascalientes. Los reportes indican que en diversas fuentes de agua subterránea se detectan elevadas concentraciones de fluoruros y arsénico, además de presentar una notable dureza y un alto nivel de alcalinidad. En cuanto a las aguas superficiales, se reportan niveles alarmantes de coliformes fecales, en particular *Escherichia coli*, así como una alta concentración de sólidos suspendidos totales. Asimismo, se registran valores elevados en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO), reflejando un significativo grado de contaminación orgánica y química en estas fuentes.

ANTECEDENTES

Durante las últimas dos décadas, el tratamiento de aguas para su potabilización ha avanzado con técnicas como la coagulación, floculación, filtración y adsorción, pero estos métodos enfrentan problemas significativos, como la generación de lodos que causa contaminación secundaria y un alto consumo de energía, mayormente dependiente de combustibles fósiles (Pandey et al., 2021). Una de las opciones que actualmente ha estado utilizándose es la ósmosis inversa es una tecnología de purificación de agua ampliamente utilizada debido a su capacidad para eliminar una amplia gama de contaminantes, incluidos sales disueltas, metales pesados y microorganismos patógenos. Sin embargo, el proceso de ósmosis inversa requiere una cantidad significativa de energía, lo que ha limitado su adopción en regiones con recursos energéticos limitados (Ahmed et al., 2023; Sadare et al., 2024).

Para abordar estos desafíos, se han desarrollado tecnologías más sostenibles, destacando el uso de sistemas fotovoltaicos tipo isla, que permiten la generación de electricidad a partir de energía solar de manera independiente de la red eléctrica. Estos sistemas no solo ofrecen una solución viable para áreas remotas y económicamente inviables, sino que también pueden integrarse en los procesos de tratamiento de aguas, reduciendo el impacto ambiental y los costos asociados a la energía, y mejorando la eficacia en la eliminación de contaminantes complejos (Hassan et al., 2023). Dentro de las opciones de tecnologías solares para la potabilización de agua destacan la fotocatálisis solar, la desalación solar, la desinfección solar, la desintoxicación y la pasteurización solares. Estas técnicas emergentes aprovechan la radiación solar para eliminar metales pesados y productos químicos sintéticos del agua (Malato et al., 2009). Por ejemplo, la fotocatálisis, utilizando catalizadores como el dióxido de titanio, acelera las reacciones químicas bajo la luz solar para descomponer contaminantes en el agua. Este enfoque ha demostrado ser eficaz en la desinfección de efluentes y en la eliminación de residuos de pesticidas, mostrando un avance notable frente a los métodos tradicionales (Sharshir et al., 2020). A pesar de los altos costos iniciales en comparación con los métodos basados en combustibles fósiles, las recientes mejoras en los materiales, como los basados en grafeno, han mejorado significativamente la eficiencia y la viabilidad económica de estas tecnologías (Rueda-Marquez et al., 2020).

La integración de sistemas fotovoltaicos para proporcionar energía renovable desempeña un papel crucial en la sostenibilidad de estos procesos, al reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables y mejorar la gestión de recursos hídricos (Pandey et al., 2021). En este contexto, la combinación de ósmosis inversa y fotocatálisis, alimentadas por un sistema fotovoltaico autónomo tipo isla y monitoreado mediante un sistema de control regulado por sensores en las diversas etapas del proceso, ofrece una solución integral que no solo incrementa la eficiencia y eficacia del tratamiento de agua, sino que también promueve la sostenibilidad y la autonomía energética. Este enfoque combina las fortalezas de cada tecnología para abordar de manera efectiva los desafíos asociados con el tratamiento de aguas en entornos con recursos energéticos limitados.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del prototipo autónomo, se definieron diversas fases, que se detallan a continuación:

- **Dimensionamiento del sistema de desalinización:** Se realizó considerando las condiciones de contaminación del agua en la región. Este sistema tiene como objetivo principal reducir la dureza y retener los contaminantes inorgánicos presentes en el efluente, incluyendo altas concentraciones de minerales.
- **Dimensionamiento del reactor fotocatalítico:** Este sistema cuenta con colectores CPC y un tubo receptor de vidrio de 32.2 mm de diámetro. Su propósito principal es eliminar los contaminantes orgánicos presentes en el efluente, como agentes bacterianos.
- **Diseño del sistema de control y monitoreo:** A partir del dimensionamiento del sistema de desalinización y del reactor fotocatalítico, se desarrolló un sistema de control y monitoreo que integra tecnología para regular el proceso y medir parámetros del agua como oxígeno disuelto, pH, entre otros.
- **Dimensionamiento del sistema fotovoltaico:** Considerando los componentes del sistema, se dimensionó un sistema fotovoltaico con el fin de suministrar la energía eléctrica necesaria, evitando así la dependencia total de una fuente eléctrica convencional.

A continuación, se describen detalladamente cada una de las etapas antes mencionadas.

Sistema de desalinización

La etapa de desalinización se lleva a cabo mediante membranas de ósmosis inversa seleccionadas con el software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) de Dow Chemical™. Este programa permite elegir la membrana adecuada considerando variables como temperatura, pH, caudal y parámetros de calidad del agua. Basándose en datos específicos de la calidad del agua en Aguascalientes, se realizó una simulación que determinó que la membrana ideal para el proceso es el modelo RE4040-BLN, operando con una presión de bomba de 100 psi. La membrana presenta las siguientes características de trabajo: presión nominal de funcionamiento inferior a 150 psi, rechazo nominal de sal del 99.2%, máximo caudal de operación de 68 L/min y máxima presión de funcionamiento de 600 psi.

Con base en estas especificaciones, se decidió implementar una bomba de 0.75 HP, que proporciona una presión aproximada de 160 psi,

suficiente para generar la presión de trabajo requerida.

Para proteger las membranas y optimizar la eficiencia del sistema, se instaló un filtro de carbón activado como pretratamiento, el cual elimina contaminantes orgánicos y el cloro libre residual presente en el agua de alimentación. En la **figura 1** se presenta la construcción del sistema de desalinización, que incluye dos membranas de ósmosis inversa y un filtro de carbón activado.



Figura 1: Sistema de desalinización

Reactor fotocatalítico

Para la generación del diseño y construcción del reactor, se llevaron a cabo varias etapas.

Primero, se establecieron los parámetros de operación del reactor; posteriormente, se diseñaron y fabricaron los CPC (Concentradores Parabólicos Compuestos), y finalmente, se seleccionó la bomba que hará circular el efluente a través del sistema.

Parámetros de operación del reactor. Los parámetros utilizados para el funcionamiento del fotorreactor incluyen un volumen de agua de 1m^3/día, con tubos receptores 0.001 m de espesor, un diámetro interno de 0.032 m, y un área del reactor de 3 m^2 se muestran en la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Parámetros para el dimensionamiento del reactor fotocatalítico.

Parámetros	Cantidad	Unidad
$E_{UV,\,n}$	647	J/m^3
Q_{UV}	3,196	KJ/ m^3
$UV_{G,n}$	37	J / m^2
V_t	365	m^3
T_s	10.51 x 10^6	S
Ar	3	m^2

En dicha tabla, $E_{UV,\,n}$ representa la energía acumulada por unidad de volumen del reactor para una muestra del proceso fotocatalítico, Q_{UV} es la energía requerida por unidad de volumen del reactor solar, $UV_{G,n}$ es la radiación incidente efectiva promedio, V_t es el volumen anual, T_s es el tiempo de operación y Ar es la superficie necesaria del reactor.

Diseño y fabricación de CPC. Para mejorar la eficiencia óptica de los CPC, se implementó un método de fabricación que utiliza impresión 3D para crear el perfil del colector parabólico. Este enfoque busca minimizar la deformación del colector. La impresión 3D sirvió como molde para fabricar el colector, con capacidad para generar una intensidad de 1 sol. El diseño del CPC fue elaborado utilizando el software AutoCAD® 2019 y se presenta en la figura 2.

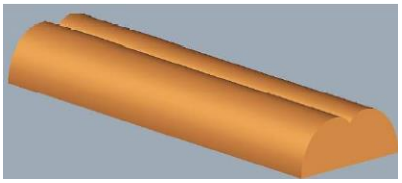


Figura 2. Diseño 3D en AutoCAD® 2019 utilizado para generar el molde en la impresora 3D.

El sistema consta de 4 piezas con conexiones macho-hembra que permiten su ensamblaje. Las dimensiones de cada pieza son 99.4 x 330 x 40.9 milímetros. El molde fue fabricado utilizando una impresora 3D con filamento PLA de 1.75 mm de diámetro. En la figura 3 se muestra el ensamblaje del molde para el colector CPC.



Figura 3. Configuración de 4 piezas para formar el colector CPC.

Para fabricar el CPC, se construyó una caja de acero con las mismas dimensiones que la configuración de 4 piezas necesarias para formar el colector. Como material reflectante, se utilizó lámina de aluminio de alta reflectividad, la cual se colocó dentro de la caja y sobre un molde diseñado para generar el CPC. Para asegurar un moldeado adecuado, se utilizó espuma de poliuretano, que ejerció presión sobre la lámina. El tiempo de secado fue de aproximadamente 4 a 6 horas. En la figura 4 se muestra el resultado final del colector CPC.



Figura 4. Colector CPC construido a partir de un molde 3D

Bomba de reactor fotocatalítico, En el proceso de fotocatálisis, la velocidad del flujo dentro del reactor es un parámetro crucial, ya que influye en el fenómeno de transporte de masa. En un flujo laminar, el contacto con el fotocatalizador se reduce, lo que disminuye la eficiencia del proceso. Por otro lado, un flujo turbulento favorece una mejor dispersión de los reactivos en la solución, lo que resulta en una mayor eliminación de los contaminantes presentes.

Para asegurar un flujo turbulento en el sistema, se utilizó la ecuación 1, presentada a continuación.

$$(1)\ \boldsymbol{Re} = \frac{\boldsymbol{\rho v D}}{\boldsymbol{\mu}}$$

Donde ρ es la densidad del agua, v es la velocidad del flujo, D es el diámetro hidráulico de los tubos y μ es la viscosidad del efluente. Números mayores o iguales a 4000 indican un flujo turbulento, mientras que valores menores o iguales a 2000 se consideran flujo laminar. La bomba seleccionada para cumplir con estas condiciones tiene una potencia de ½ HP y un caudal con una velocidad de 0.9 m/s.

Sistema de control y monitoreo

La etapa de control está compuesta por un sistema de monitoreo de la calidad del agua que integra sensores para medir pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura. Estos parámetros se regulan de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", y con las directrices de la Comisión Nacional del Agua a través del Sistema Nacional de Información del Agua.

Durante el proceso de potabilización, se utilizan tres tanques de almacenamiento situados antes, durante y después del tratamiento. Se incluye una válvula de tres vías ubicada después del sistema de desalinización, que permite redirigir el flujo al segundo tanque de almacenamiento si la conductividad es inferior a 800 µS/cm; de lo contrario, el agua se dirige al primer tanque para su recirculación.

Después del reactor fotocatalítico, se monitorean el pH y el oxígeno disuelto. Si los valores de pH se encuentran entre 6.5 y 8.5 y el oxígeno disuelto es igual o superior a 6 mg/L, el efluente se dirige a un tanque de almacenamiento final. En caso contrario, el efluente se recircula al segundo tanque para repetir el proceso en el reactor fotocatalítico.

Es importante destacar que el sistema está programado utilizando el software Arduino y ofrece la opción de seleccionar entre un modo de funcionamiento manual o automático. La selección y visualización de los modos se realiza a través de una pantalla Nextion HMI.

Sistema fotovoltaico

Para diseñar la etapa del sistema fotovoltaico, se analizaron los diferentes componentes que consumen energía eléctrica, considerando que la bomba de ósmosis inversa y la del reactor foto catalítico no operan simultáneamente. Por esta razón, se seleccionó solo la bomba con mayor demanda energética, que en este caso es la de ósmosis inversa. Otros componentes que interactúan en el sistema son los reguladores de carga, los sistemas de medición, la pantalla Nextion HMI, el Arduino, entre otros. Con base a los cálculos hechos en la tesis “Diseño y construcción de potabilizador integral solar de agua para comunidades rurales” y considerando un periodo de operación diario de 8 horas, se concluye que es recomendable utilizar 2 baterías, para un sistema compuesto por 4 paneles fotovoltaicos para suministrar suficiente energía de funcionamiento del dispositivo. El sistema completo está diseñado por 4 paneles fotovoltaicos, 2 baterías, 1 inversor solar y 1 regulador de carga (Martínez P. 2022).

RESULTADOS

Sistema de potabilización armado

El sistema de potabilización, ensamblado como se muestra en la figura 5, incluye un prototipo con 3 tanques de almacenamiento que gestionan el efluente antes, durante y después del proceso de potabilización. Cada tanque está equipado con sensores de nivel que registran las capacidades mínimas y máximas de almacenamiento.

El proceso de potabilización comienza con un sistema de desalinización, compuesto por un filtro de carbón activado y 2 membranas de ósmosis inversa. Este proceso es monitoreado por un sensor de conductividad. Una vez que el efluente alcanza los parámetros ideales, se transfiere al segundo tanque de almacenamiento. Desde allí, el agua se dirige al reactor fotocatalítico, donde los sensores de pH, temperatura y oxígeno disuelto garantizan que se mantengan los valores óptimos. Cuando se alcanzan estos valores ideales, el agua pasa al tanque de almacenamiento final, que contiene agua potabilizada.

Todo el sistema está alimentado energéticamente por un sistema fotovoltaico tipo isla, lo que le permite operar de manera independiente de una fuente de energía externa.



Figura 5. Prototipo solar de potabilización de agua.

Medición del sistema de desalinización

Analizando la información del sensor de conductividad, como se muestra en la figura 6, se observa inicialmente un valor de conductividad elevado, superior a 1000 µS/cm. Sin embargo, tras unos minutos de proceso, la concentración de sales y minerales en el efluente comienza a disminuir, lo que permite la apertura de las válvulas hacia el segundo tanque de almacenamiento. Después de un período de 30 minutos, los valores de conductividad se reducen a menos de 200 µS/cm, manteniéndose en un nivel mínimo.

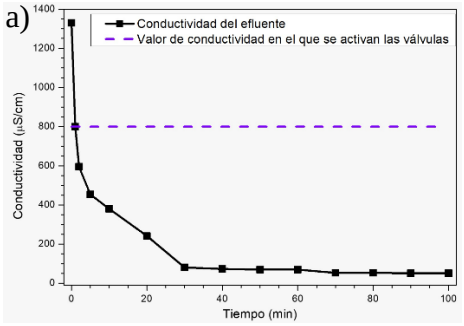


Figura 6. a) Gráfica de valores obtenidos a partir del sensor de conductividad.

Medición del reactor fotocatalítico

Al analizar los datos mostrados en la figura 7, en el sensor de oxígeno disuelto se observa que, al inicio del proceso, la lectura es baja, cercana a 0, lo que indica una alta concentración de materia orgánica en el efluente. Sin embargo, después de aproximadamente 10 minutos, el valor de oxígeno disuelto aumenta, superando los 6 mg/L.

Simultáneamente, al examinar el pH, se nota que inicialmente el efluente presenta un nivel de alcalinidad. Sin embargo, en menos de 10 minutos, este valor disminuye, estabilizándose cerca de un pH de 5.

En cuanto a la temperatura, se observa que se mantiene cercana a la temperatura ambiente, oscilando entre 26 °C y 29 °C, incluso después de más de 40 minutos de exposición.

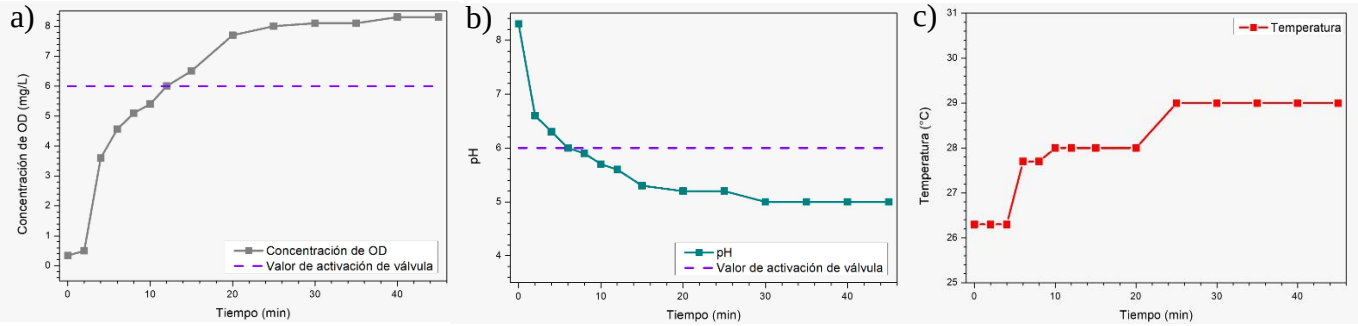


Figura 7. Gráficas de valores obtenidos a partir de los sensores de: a) oxígeno disuelto, b) pH, c) temperatura.

CONCLUSIONES

La creciente escasez y contaminación del agua a nivel mundial plantea un grave riesgo para la salud y el bienestar de las comunidades, especialmente en regiones como Aguascalientes, donde las altas concentraciones de sales, minerales y contaminantes hacen que gran parte del agua sea inadecuada para el consumo humano. En este contexto, el desarrollo de un prototipo solar de potabilización de agua representa una solución innovadora y prometedora. Utilizando tecnologías avanzadas como la ósmosis inversa y la fotocatálisis heterogénea, el sistema no solo aborda la necesidad urgente de purificar el agua, sino que también se apoya en un sistema fotovoltaico para garantizar una operación sostenible y eficiente. La integración de una etapa de control rigurosa y un sistema de monitoreo avanzado asegura la calidad del agua tratada, mostrando resultados de disminución de contaminantes en el sistema implementando las tecnologías de desalinización al trabajar en sinergia con un reactor fotocatalítico, evidenciando el funcionamiento del sistema implementado un proceso automatizado y obteniendo información de diferentes parámetros a partir del sistema de monitoreo.

REFERENCIAS

United Nations. (2015). Division for Sustainable Development Goals – DSDG Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.

García-Gil, Á., García-Muñoz, R. A., McGuigan, K. G., & Marugán, J. (2021). Solar water disinfection to produce safe drinking water. A review of parameters, enhancements, and modelling approaches to make SODIS faster and safer. Molecules, Vol. 26. https://doi.org/10.3390/molecules26113431

Comisión Nacional del Agua (2024, 06 de agosto) Calidad del agua en México. https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua

Ahmed, M. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2023). Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon*, *9*(4), e14908. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e1490.

Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. Results in Engineering, 20 (November), 101621. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621

Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M. I., Blanco, J., & Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. Catalysis Today, 147(1), 1–59. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018

Pandey, A. K., Reji Kumar, R., B, K., Laghari, I. A., Samykano, M., Kothari, R., Abusorrah, A. M., Sharma, K., & Tyagi, V. V. (2021). Utilization of solar energy for wastewater treatment: Challenges and progressive research trends. Journal of Environmental Management, 297(May), 113300. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113300

Rueda-Marquez, J. J., Levchuk, I., Fernández Ibañez, P., & Sillanpää, M. (2020). A critical review on application of photocatalysis for toxicity reduction of real wastewaters. Journal of Cleaner Production, 258. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120694

Sadare, O. O., Oke, D., Olawuni, O. A., Olayiwola, I. A., & Moothi, K. (2024). Modelling and optimization of membrane process for removal of biologics (pathogens) from water and wastewater: Current perspectives and challenges. Heliyon, 10(9), e29864. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29864

Sharshir, S. W., Algazzar, A. M., Elmaadawy, K. A., Kandeal, A. W., Elkadeem, M. R., Arunkumar, T., Zang, J., & Yang, N. (2020). New hydrogel materials for improving solar water evaporation, desalination and wastewater treatment: A review. Desalination, 491(May), 114564. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114564

Manuel, P. R. M (2022). Diseño y construcción de potabilizador integral solar de agua para comunidades rurales. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Aguascalientes.

snes48.anes.org.mx

ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA SIN LÍMITES

XLVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 7 AL 11 DE OCTUBRE 2024 • LOS MOCHIS, SINALOA

GRACIAS A NUESTROS PATROCINADORES

SOLAREVER

Quality is our life

AHOME

ESPÍRITU DE TRABAJO

2021 - 2024

PROMAN | GPO PLANTA DE FERTILIZANTES

ANES®

ISES International Solar Energy Society

Universidad Autónoma de Sinaloa

Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N

Fracc. Las Fuentes C.P. 81223