Revista Energías Renovables, Año 12 Núm.58, SNES 2025
Certificado de reserva al uso exclusivo del Título:
No. 04-2014-101414142700-203
Registro ISSN: 2395-930
DOI: 10.59730/rer.v12n58m1

XLIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.

Conectando con el sol por un futuro sostenible

PUBLICACIONES DE LA SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

ANES® Asociación Nacional de Energía Solar

ISES International Solar Energy Society

UNAM CAMPUS MORELOS

IER Instituto de Energías Renovables

Temixco, Morelos / Hibrido

XLIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.

Conectando con el sol por un futuro sostenible

snes49.anes.org.mx



Mensaje de Presidencia 2024-2026

Estimada comunidad ANES:

Es un honor darles la bienvenida a la **XLIX Semana Nacional de Energía Solar**, un espacio que durante casi cinco décadas ha sido punto de encuentro entre investigadores, estudiantes, empresas, instituciones y sociedad.

Este año nos convoca el lema **"Conectando con el sol por un futuro sostenible"**, que refleja la urgencia de establecer vínculos sólidos entre el conocimiento científico, la innovación tecnológica, las políticas públicas y las necesidades de las comunidades.

Hoy, más que nunca, resulta indispensable que la energía solar sea motor de transformación social y ambiental. No basta con el avance tecnológico si éste no se traduce en bienestar compartido y en la construcción de un futuro justo y sostenible. Nuestro reto es lograr que la investigación, la formación académica y el compromiso empresarial se articulen en acciones concretas que fortalezcan la soberanía energética, reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y promuevan la equidad en el acceso a las energías renovables.

México cuenta con un recurso solar privilegiado, colocándolo entre los países con mayor potencial solar a nivel mundial. Actualmente, el país supera los 10 GW instalados en campos fotovoltaicos, y se proyecta un crecimiento sostenido que permitirá diversificar la matriz energética. A este panorama se suman el potencial eólico estimado en más de 50 GW, así como la biomasa, la energía termosolar, la cocción y la destilación solar, tecnologías que dependen directamente del recurso solar y que por su bajo costo pueden ser adoptadas en comunidades con rezago económico, directamente ligadas con el potencial solar de nuestro territorio.

ANES® Asociación Nacional de Energía Solar

ISES International Solar Energy Society

Instituto de Energías Renovables IER-UNAM
Xochicalco s/n, Azteca, 62580 Temixco, Morelos
(a 20 min del centro de Cuernavaca)

XLIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.

Conectando con el sol por un futuro sostenible

snes49.anes.org.mx

Desde la **ANES** debemos impulsar la generación de estrategias y la difusión de estas alternativas, convencidos de que su aprovechamiento contribuye no sólo al crecimiento de las energías renovables, sino también al desarrollo justo y sostenible del país.

La **ANES** debe reafirmar su vocación de ser un puente entre generaciones, regiones y sectores, convencida de que la transición energética sólo será posible con la participación de toda la sociedad. En esta Semana Nacional reconocemos el trabajo incansable de quienes impulsan proyectos que integran ciencia, innovación y compromiso comunitario, y que hacen de la energía solar un instrumento para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Invito a todos los miembros de la Asociación a redoblar su esfuerzo cotidiano para seguir fortaleciendo el crecimiento de nuestra comunidad. El Consejo Directivo, la Junta de Honor y los ex presidentes de la **ANES** están llamados a mantener un liderazgo visionario que inspire y consolide la trayectoria de nuestra institución. De igual manera, agradezco a las empresas y a las instituciones educativas que cada año participan en este congreso con valiosas contribuciones académicas e innovadoras, fortaleciendo así el desarrollo de las energías renovables y, con ello, el crecimiento de nuestro país.

Agradezco al Comité Organizador y a cada uno de los participantes por hacer posible este encuentro, que fortalece la visión de un México más sustentable, justo y resiliente.

Sigamos conectando con el sol, iluminando juntos el camino hacia un futuro sostenible.

Dra. Margarita Castillo Téllez
Presidenta ANES

ANES® Asociación Nacional de Energía Solar

ISES International Solar Energy Society

Instituto de Energías Renovables IER-UNAM
Xochicalco s/n, Azteca, 62580 Temixco, Morelos
(a 20 min del centro de Cuernavaca)

ANES®
Asociación Nacional de Energía Solar

XXIII CONSEJO DIRECTIVO 2024 - 2026

Presidencia
Margarita Castillo

Vicepresidencia
Gilberto Sánchez

Secretaría General
Dulce Guevara

Tesorería
Aarón Caro

Secretaría de Organización
Carlos Pérez

Secretaría para Vinculación Estudiantil
José G. Partida

Secretaría para Normatividad Fotovoltaica
Isaac Flores

Secretaría para vinculación Científico-Tecnológica
Iris Santos

Secretaría de Asuntos Internacionales
Beatriz Castillo

Secretaría de Publicaciones (Fomento y Promoción)
Norma Rodríguez

Secretaría para Relaciones Estratégicas
Isaac Pilatowsky

Secretaría de Asuntos Internos
Jorge Narro

Secretaría para Industria Solar Térmica
Daniel García

Secretaría para Normatividad Térmica
Yuridiana R. Galindo

Secretaría para Vinculación Académica
Liliana Pampillón

Secretaría de Comité Editorial
Iván Salgado

Secretaría para Vinculación Social
José Campos

Secretaría para Presencia Virtual
Laura Ceballos

Secretaría para Atención Regional
Pedro Betancourt

Secretaría para Inclusión y Género
Paulina Guillén

Secretaría para Industria Fotovoltaica
Luis Martínez

Secretaría para Industria Eléctrica
Oscar Hernández

Secretaría para Innovación y Emprendimiento
Octavio García / Rafael Carmona

Más información en: anes@anes.org.mx soporte@anes.org.mx

XLIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.

Conectando con el sol por un futuro sostenible

snes49.anes.org.mx

Comité Organizador ANES

Dra. Margarita Castillo
Dr. Carlos Alberto Pérez
Ing. Daniel García
Dra. Laura Ceballos
Ing. Marianh Solis
Lic. Dafne Krinis

Comité Organizador LOCAL

Dr. Miguel Robles
Dr. Carlos Alberto Pérez
Lic. Daniela Juárez
L.I. María de Jesús Pérez

Moderadores

Dra. Laura Ceballos
Dra. Yuridiana Galindo
Ing. Daniel García
Dr. José Campos
Dr. Carlos Pérez
Dr. Octavio García
Mtra. Dulce Guevara

ANES Asociación Nacional de Energía Solar

ISES International Solar Energy Society

stripsteel S. de R.L. de C.V.

Un mundo sustentable se construye con energías renovables.

XLIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.

Conectando con el sol por un futuro sostenible

snes49.anes.org.mx

Staff

Ana Cristina Peláez Hernández
Cinthia Cuevas Zapata
Fernando Hernández Ramírez
Kenji Arturo Trechuelo Medina
Moisés Jared Suárez Román
Julieta Landa Bautista
Carlos Antonio González Sánchez

Staff

Erick Jahir Romo Eligio
Sócrates Aníbal Rivera Cerecero
Xochitl Corona Morales
Daniel Hernández Tamayo
Oscar de Jesús Padilla González
Sonny Francisco Díaz Calderón

Apoyo ANES Nacional

Fátima García
Marialy Sauceda
Antonio Melendrez

GRUPO Apolo

UNAM CAMPUS MORELOS

IER Instituto de Energías Renovables

Un mundo sustentable se construye con energías renovables.

XLIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
snes49.anes.org.mx

Publicaciones de la Semana Nacional de Energía Solar, año 12, No 58, Octubre 2025, 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 Nacional de Derechos de Autor. Certificado de Reserva al Uso Exclusivo No. 04-2015-082714164300-203, ISSN: 2448-5543.

Presidencia: Dra. Margarita Castillo Téllez.

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 2025.

SESIONES TÉCNICAS

Cocinas Solares, Secaderos, Destilación y Desinfección Solar

ID	TÍTULO	PONENTE
2224	Aprovechamiento sustentable de residuos de pescado mediante secado solar en el marco de la economía circular	Margarita Castillo Tellez
2207	Estufa solar parabólica para la cocción de tamales como alternativa energética sostenible	Cesar Ramírez Palma
2174	Diseño, construcción y evaluación de un deshidratador solar directo para secado de mango en la comunidad de Santiago, Baja California Sur	Alfonso Rodríguez Medina
2168	Evaluación del secado solar del xoconostle: cinética de deshidratación, conservación visual y aplicaciones en sistemas térmicos rurales	Beatriz Castillo Téllez

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE RESIDUOS DE PESCADO MEDIANTE SECADO SOLAR EN EL MARCO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

Margarita Castillo Téllez, Eduardo Silva Pot, Juan Carlos Percino, Alfonso Lorenzo Flores
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Juan de la Barrera s/n, 24039, Campeche, Cam., México
mcastill@uacam.mx, al056849@uacam.mx, jcperccin@uacam.mx, alflores@uacam.mx

Gerardo Mejía Pérez, Beatriz Castillo Téllez, Martha Fabiola Martín del Campo
Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Nuevo Perif. Ote. 555, Ejido San José, Tateposco, 45425 Tonalá, Jal., México
gerardo.mejia@udg.mx, beatriz.castillo@academicos.udg.mx, martha.martindelcampo@academicos.udg.mx

RESUMEN

La economía circular propone un modelo integral para optimizar el uso de los recursos, fomentando su restauración y regeneración. En este contexto, los residuos pesqueros representan una oportunidad estratégica, al constituir más del 50% del peso del producto y contener nutrientes de alto valor como proteínas y ácidos grasos omega 3. Para su aprovechamiento sustentable, se diseñó y construyó una planta de secado solar compuesta por dos secadores solares tipo invernadero, integrados a un sistema híbrido de tecnologías limpias: un banco de 16 paneles fotovoltaicos, 15 captadores solares de aire y un termo tanque con resistencias eléctricas, que garantizan operación continua. Esta infraestructura permitió secar 450 kg de producto fresco por jornada, obteniendo subproductos con valor agregado, como alimentos balanceados para aves de corral, caninos, tilapia, y harina de pescado. Además del beneficio ambiental y económico, esta iniciativa contribuye al fortalecimiento de la economía local, al ofrecer nuevas oportunidades productivas para pescadores campechanos, quienes pueden diversificar el uso de sus capturas y residuos. El proceso de secado solar fue monitoreado mediante análisis de humedad, actividad de agua y colorimetría para asegurar calidad constante. Las pruebas se llevaron a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, en un clima cálido y húmedo, ubicado entre los paralelos 17°49′ y 20°51′ de latitud norte y los meridianos 89°06′ y 92°27′ de longitud oeste. Los resultados demuestran que el diseño e implementación de esta planta fortalecen los principios de la Economía Circular y contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: Economía circular, Secado solar, Residuos pesqueros, Energías limpias, Desarrollo comunitario

ABSTRACT

The circular economy proposes a comprehensive model to optimize resource use, promoting their restoration and regeneration. In this context, fishery residues represent a strategic opportunity, as they account for more than 50% of the product's weight and contain high-value nutrients such as proteins and omega-3 fatty acids. To enable their sustainable use, a solar drying plant was designed and built, composed of two greenhouse-type solar dryers integrated into a hybrid clean technology system: a bank of 16 photovoltaic panels, 15 solar air collectors, and a thermal tank with electric resistances, ensuring continuous operation. This infrastructure enabled the drying of 450 kg of fresh product per day, obtaining value-added by-products such as balanced feed for poultry, canines, tilapia, and fishmeal. In addition to the environmental and economic benefits, this initiative contributes to strengthening the local economy by offering new productive opportunities for Campeche fishermen, who can diversify the use of their catches and residues. The solar drying process was monitored through moisture analysis, water activity, and colorimetry to ensure consistent quality. The tests were conducted at the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Campeche, in a warm and humid climate located between parallels 17°49′ and 20°51′ north latitude and meridians 89°06′ and 92°27′ west longitude. The results demonstrate that the design and implementation of this plant strengthen the principles of the circular economy and contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals.

Palabras claves: Circular economy, Solar drying, Fishery waste, Clean energy, Community development

INTRODUCCIÓN

La transición energética representa uno de los mayores retos y oportunidades del siglo XXI. Implica no solo sustituir fuentes fósiles por energías renovables, sino rediseñar sistemas productivos, sociales y tecnológicos que permitan a las comunidades ser protagonistas del cambio. En este contexto, tecnologías como el secado solar tienen un papel fundamental, especialmente en regiones rurales donde el acceso a soluciones tecnológicas eficientes y sustentables es limitado (Rahman, Choudhury & Hasan, 2021).

El secado solar ha sido históricamente una técnica utilizada para la conservación de alimentos, pero su evolución tecnológica ha permitido desarrollar sistemas más eficientes, seguros e higiénicos. A diferencia del secado a la intemperie, los secadores solares mejorados permiten controlar parámetros como la temperatura del aire, la humedad relativa y el flujo de aire, lo que mejora la calidad del producto final (Lian et al., 2022).

Entre los tipos de secadores solares más comunes se encuentran: Secadores directos: donde la radiación solar incide directamente sobre el producto; Secadores indirectos: el aire se calienta en colectores solares y luego se conduce al área de secado; Secadores mixtos o híbridos: combinan ambas estrategias; Secadores tipo invernadero: estructuras cerradas que maximizan la captación solar y permiten un secado más

uniforme y protegido de las inclemencias ambientales.

Los secadores tipo invernadero han demostrado ser particularmente útiles para el secado de productos agroalimentarios y pesqueros en zonas con climas tropicales o húmedos. Su estructura tipo túnel permite manejar grandes volúmenes de producto y se presta para la hibridación con otras tecnologías, como colectores solares de aire, paneles fotovoltaicos y resistencias eléctricas, con lo cual se garantiza continuidad operativa incluso en condiciones nubladas o con alta humedad ambiental (Gupta, Sharma & Sahu, 2020; Rodríguez-López, Gómez-de la Cruz & Morales-Acevedo, 2021).

Este artículo describe la experiencia de construcción y operación de una planta de secado solar híbrida en Campeche, México. Su objetivo principal es valorar residuos pesqueros y especies de bajo valor comercial mediante tecnologías limpias, enmarcadas en los principios de economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo a la soberanía alimentaria, el desarrollo comunitario y la protección ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipo experimental y proceso de secado solar

El proyecto se desarrolló en la localidad de Lerma, Campeche, una comunidad pesquera con fuerte arraigo cultural y alto potencial para la implementación de tecnologías sustentables. El estudio se desarrolló en este clima cálido húmedo, con temperaturas medias superiores a 35 °C y humedad relativa promedio por encima del 60 %, condiciones que pueden favorecer el proceso de secado solar si se controla adecuadamente la ventilación y la acumulación de calor.

La planta piloto construida consta de dos secadores solares tipo invernadero, cada uno con una superficie de 12 m², orientados para maximizar la captación solar. Estos secadores están acoplados a un sistema híbrido conformado por:

- Banco de 16 paneles fotovoltaicos (325 Wp cada uno) que alimentan resistencias eléctricas de apoyo en caso de baja radiación.
- 15 captadores solares de aire diseñados para elevar la temperatura del aire en el interior del sistema.
- Termotanque con resistencias eléctricas internas, que actúa como respaldo térmico y estabilizador del sistema.

El sistema permite el secado de hasta 450 kg de pescado fresco por jornada, transformándolo en subproductos con valor agregado, como harina de pescado o ingrediente base para croquetas, alimentos balanceados y productos gastronómicos (Ver Figura 1).



Figura 1. Secadores solares tipo invernadero y componentes

Se registraron las variables del residuo de pescado en fresco y seco, como: Porcentaje de humedad inicial y final del producto, Actividad de agua (Aw), cambios de color y pérdida de peso. De igual forma se monitoreó la irradiancia solar, temperatura ambiente y humedad relativa mediante la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. El contenido de humedad se evaluó con un analizador de humedad Boeco BMA 150, con precisión de ± 0.01 % mg. La actividad de agua se determinó mediante un medidor portátil Rotronic Hygropalm, con igual precisión. Para el control de peso durante el secado se utilizó una balanza digital de alta precisión Boeco BPS 40 plus. Las temperaturas internas de las cámaras de secado se registraron con termopares tipo K, lo que permitió asegurar condiciones térmicas estables durante las jornadas de trabajo.

Metodología de trabajo de campo con pescadores.

Se implementó una estrategia participativa con los pescadores locales para asegurar la apropiación tecnológica y la pertinencia del proyecto. La metodología incluyó:

- Reuniones comunitarias iniciales para presentar la planta y los beneficios esperados, donde se promovió el diálogo horizontal.
- Capacitación técnica básica sobre operación y mantenimiento de los secadores solares, así como manejo higiénico de producto.
- Sesiones prácticas de clasificación, preparación y distribución del pescado en las charolas de secado.
- Talleres de aprovechamiento de subproductos y sensibilización sobre economía circular y sostenibilidad.

Además, se documentaron sus inquietudes, propuestas de mejora y conocimientos locales para integrarlos al diseño operativo de la planta. Esta interacción permitió una retroalimentación continua y fortaleció los lazos entre academia y comunidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica del secado solar

Durante la jornada del 21 de septiembre de 2024, se registró una irradiancia solar superior a los 900 W/m² en las horas centrales del día, con un comportamiento parabólico típico de cielos despejados. La temperatura ambiente se mantuvo estable, alcanzando un máximo de aproximadamente 35 °C. Estas condiciones permitieron un secado eficiente del residuo de pescado, como se refleja en la reducción significativa del contenido de humedad en las primeras cuatro horas. El ambiente cálido y húmedo, característico de la región, resultó favorable para operar los secadores solares tipo invernadero, demostrando que este tipo de infraestructura es climáticamente viable y puede sostener procesos productivos dentro de un modelo de economía circular (Ver figura 2).

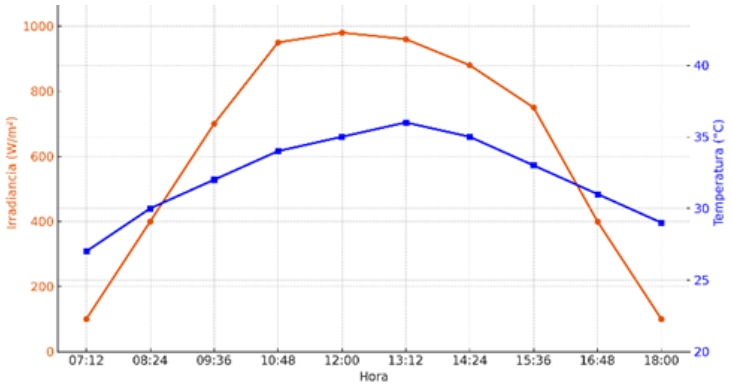


Figura 2. Irradiancia solar y temperatura ambiente registradas el 21 de septiembre de 2024

La Figura 3 muestra la curva de secado de los residuos de pescado, expresada como contenido de humedad (g agua/g s.s.) en función del tiempo. Se observa una disminución drástica en las primeras 4 horas de exposición, alcanzando valores por debajo de 0.2 g agua/g s.s. después de las 6 horas, lo que indica que el sistema híbrido permitió un secado eficiente y sostenido. Este comportamiento es característico de un proceso de secado en dos fases: una etapa inicial de velocidad constante, seguida de una etapa de velocidad decreciente donde predomina la difusión interna de humedad. La eficiencia del secado responde tanto al diseño del sistema como a las condiciones climáticas del día.

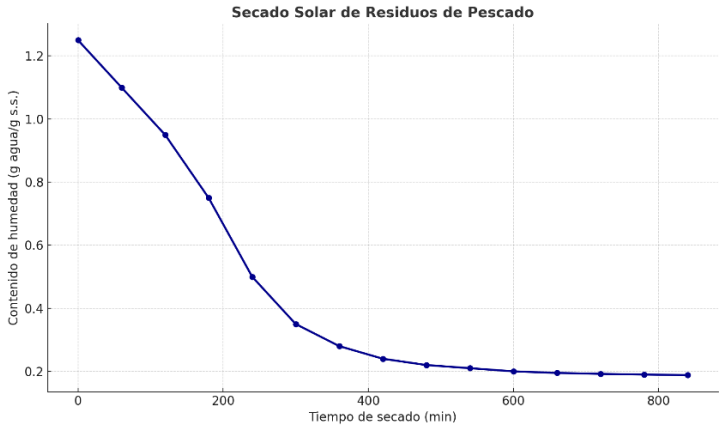


Figura 3. Curva de secado solar de residuos pesqueros en secador tipo invernadero.

Proceso de secado y control de calidad

Durante la jornada de secado, los residuos fueron colocados en bandejas perforadas (Figura 4), permitiendo una buena circulación del aire caliente. El personal técnico y alumnos participantes realizaron mediciones de peso y actividad de agua cada hora, utilizando básculas de precisión y un medidor digital (Figura 5).



Figura 4. Acondicionamiento del residuo de pescado en secadores solares tipo invernadero.



Figura 5. Control de masa y medición de actividad de agua (aw) durante el proceso de secado.

Las mediciones permitieron validar la pérdida progresiva de humedad y asegurar que el producto final tuviera valores de actividad de agua menores a 0.60, garantizando así su estabilidad microbiológica sin necesidad de conservadores.

El secado eficiente del residuo de pescado permitió convertir un desecho perecedero en un insumo valioso para múltiples aplicaciones: desde ingredientes de croquetas para caninos hasta propuestas gastronómicas de valor agregado. Este aprovechamiento integral responde a los principios de la Economía Circular, donde los residuos se transforman en recursos y se cierra el ciclo productivo. Además, la participación activa de estudiantes, investigadores y pescadores en la jornada de secado fortaleció el tejido comunitario y promovió el aprendizaje mutuo entre saberes académicos y tradicionales.

Una vez alcanzadas las condiciones óptimas de secado, el residuo fue sometido a procesos de molienda, mezcla y extrusión en las instalaciones de transformación habilitadas por el proyecto. Con base en formulaciones técnicas, se elaboraron pellets para alimentar aves de corral, tilapia en cultivo y perros, así como harina de pescado para aplicaciones diversas en agricultura y alimentación animal (figuras 6, 7 y 8).



Figura 6. Pescadores procesando el pescado deshidratado para la elaboración de alimentos balanceados.



Figura 7. Productos obtenidos tras el procesamiento del pescado deshidratado: pellets para diversas especies.



Figura 8. Mezclado de ingredientes balanceados con base en harina de pescado, cereales y minerales.

Esta actividad representa una aplicación práctica de los principios de economía circular, al reinsertar un desecho orgánico en cadenas productivas que benefician directamente a la comunidad pesquera local. Se evita con ello la disposición inadecuada de subproductos pesqueros (frecuente en zonas costeras), se reduce la carga contaminante y se amplía la oferta productiva de los pescadores.

Además del valor económico, se fortalece la resiliencia alimentaria rural, se diversifican los ingresos de las familias vinculadas al sector y se promueven prácticas sostenibles que contribuyen a mitigar el impacto ambiental del sector pesquero artesanal. Este enfoque integral no solo aporta beneficios tecnológicos y ambientales, sino que también fortalece a las comunidades pesqueras al integrar el conocimiento técnico-científico con el saber local, generando un impacto positivo y duradero.

Fortalecimiento de Capacidades Comunitarias

Uno de los impactos más relevantes del proyecto no solo se centró en el diseño y operación de una planta de secado solar con tecnologías híbridas, sino en la dimensión humana y social de su implementación. A través de un enfoque de intervención comunitaria, se llevaron a cabo actividades de capacitación integral con pescadores y sus familias, reconociendo que la sostenibilidad tecnológica depende también del capital humano que la opera y mantiene. La formación incluyó no solo aspectos técnicos del proceso de secado solar, sino también desarrollo de habilidades blandas como liderazgo, trabajo en equipo, comunicación efectiva, resolución de problemas y toma de decisiones. Estos elementos se trabajaron en sesiones presenciales y dinámicas participativas, con el fin de empoderar a los beneficiarios en un modelo de economía solidaria.



Figura 9. Sesiones de capacitación con pescadores (fortalecimiento de capacidades)

En paralelo, se brindaron talleres sobre mercadotecnia social, diseño de imagen de marca, comercialización de productos deshidratados y elaboración de modelos de negocio participativos, incorporando conocimientos sobre circuitos cortos de comercialización, canales alternativos de venta, empaque y etiquetado, así como evaluación de costos e ingresos. Este enfoque integrador permitió a las y los pescadores visualizar su actividad no solo como una mejora técnica, sino como una oportunidad de emprendimiento comunitario.

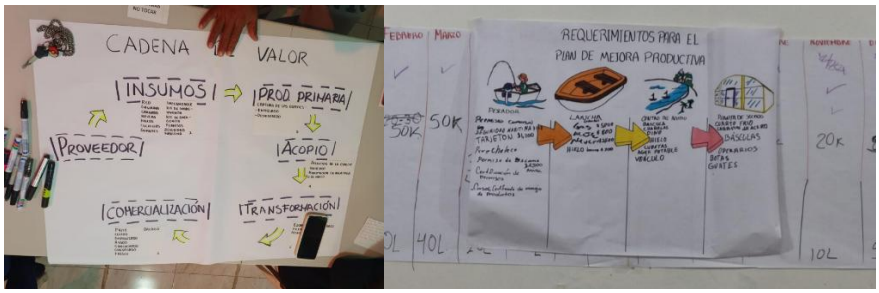


Figura 10. Talleres sobre mercadotecnia social y comercialización a pescadores y sus familias

Cabe resaltar que, como parte del proyecto SECIHTI FOP04-2021-03-319524, la infraestructura completa fue entregada formalmente a las cooperativas participantes, mismas que se fusionaron en una sola, para recibir este beneficio, incluyendo los dos secadores solares tipo invernadero, colectores térmicos, sistema fotovoltaico y termotanques,

Esta acción, unida al fortalecimiento de capacidades, constituye un modelo replicable que demuestra cómo la transición energética justa puede ser también una vía para la inclusión social, la seguridad alimentaria y el desarrollo territorial sustentable.



Figura 11. Cooperativa de pescadores: Planta comunitaria para el secado de productos pesqueros

CONCLUSIONES

La planta comunitaria de secado solar, equipada con tecnología híbrida —colectores solares de aire, paneles fotovoltaicos y termo tanque eléctrico— demostró ser eficaz para la transformación de residuos pesqueros en productos de valor agregado, bajo condiciones climáticas cálidas y húmedas.

Los resultados técnicos mostraron que, en un periodo de aproximadamente 7 horas, el contenido de humedad de los residuos de pescado se redujo de 75 % a menos de 10 %, con una actividad de agua final de 0.54, adecuada para inhibir el crecimiento microbiano. Asimismo, se observaron variaciones en el color tras las primeras tres horas de secado, confirmando el impacto de la temperatura y la radiación solar sobre las características sensoriales del producto.

Este proceso permitió obtener productos como harina de pescado y alimentos balanceados para aves, tilapia y caninos, impulsando una estrategia local de economía circular. A la par, se realizaron acciones de capacitación a pescadores y sus familias en operación de la planta, comercialización, desarrollo de habilidades blandas y diseño de modelo de negocio, con un enfoque participativo y de transferencia tecnológica.

La entrega formal del equipamiento, como parte del proyecto SECIHTI FOP04-2021-03-319524, consolidó una experiencia exitosa de transición energética con inclusión social, vinculando energías renovables, aprovechamiento de residuos, autonomía alimentaria y fortalecimiento comunitario en el litoral campechano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gupta, A., Sharma, A., & Sahu, B. M. (2020). Design and performance analysis of solar greenhouse dryer: A review. Materials Today: Proceedings, 46, 8617–8623. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.927

Lian, Y., Zhang, C., Wang, X., Ma, S., Xie, W., & Meng, Y. (2022). Review on recent progress of solar-assisted drying technologies for food preservation. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47, 101476. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101476

Rahman, A., Choudhury, A. M. S., & Hasan, M. M. (2021). Performance evaluation of a hybrid solar dryer integrated with biomass backup heater for fish drying. Solar Energy, 219, 87–99. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.063

Rodríguez-López, C. M., Gómez-de la Cruz, A., & Morales-Acevedo, L. (2021). Development of a solar fish dryer with thermal energy storage system. Renewable Energy, 170, 1114–1123. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTUFA SOLAR PARABÓLICA PARA LA COCCIÓN DE TAMALES COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA SOSTENIBLE

Cesar A. Ramírez Palma y Álvaro E. Lentz Herrera
Programa de Energía, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, S. Lorenzo 290, Ciudad de México, CDMX, 03104, México,5554886661,
cesar.armando.ramirez@uacm.edu.mx, alvaro.lentz@uacm.edu.mx

RESUMEN

Esta investigación evalúa el uso de una estufa solar parabólica para la cocción de tamales, con el objetivo de analizar su viabilidad como alternativa energética sostenible. Este estudio se realizó en marzo de 2025 en la Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, donde se registró una radiación solar diaria de 7.51 kWh/m² . Se realizaron pruebas de cocción de 3 kg de pechuga de pollo, 1.5 kg de tomates con chiles verdes, 1 kg de huevos y 33 tamales (11 kg) utilizando únicamente energía solar térmica. Los tiempos de cocción fueron de 2 h 1 min, 33 min, 37 min y 3 h 22 min respectivamente, con un tiempo total de operación de aproximadamente 6.5 horas.

Con base en un consumo promedio de gas LP de 0.52 kg/h para un quemador doméstico y a un precio promedio de $19.71 por kilogramo (Gobierno de México, 2025). El ahorro diario aproximado de la cocción de tamales seria de $108.5 MXN. Además del impacto económico, el uso de la estufa solar reduce la dependencia de combustibles fósiles y contribuye a la soberanía energética y alimentaria, al promover el aprovechamiento de recursos renovables y locales.

Este estudio demuestra que la cocción de tamales mediante energía solar es técnica y económicamente viable en regiones con alta radiación solar, aunque presenta limitaciones en días nublados o con baja insolación. Se concluye que la estufa solar parabólica puede integrarse como tecnología complementaria en la preparación de alimentos, fortaleciendo la autonomía energética y reduciendo la huella ambiental.

ABSTRACT

This study evaluates the use of a parabolic solar cooker for tamale preparation, aiming to assess its viability as a sustainable energy alternative. The research was conducted in March 2025 in Tlalpan, Mexico City, where an average daily solar radiation of 7.51 kWh/m² was recorded. Cooking tests were performed using only solar thermal energy to prepare 3 kg of chicken breast, 1.5 kg of tomatoes with green chilies, 1 kg of eggs, and 33 tamales (11 kg). The respective cooking times were 2 h 1 min, 33 min, 37 min, and 3 h 22 min, with a total operating time of approximately 6.5 hours.

Based on an average LP gas consumption of 1.35 kg/h for a domestic burner and a mean price of $19.71 MXN per kilogram (Government of Mexico, 2025), the estimated daily savings from solar tamale cooking amount to $108.5 MXN. Beyond economic benefits, the solar cooker reduces fossil fuel dependence and promotes energy and food sovereignty by harnessing renewable and local resources.

The findings demonstrate that solar-based tamale cooking is technically and economically feasible in regions with high solar radiation, though it faces limitations on cloudy days or during low insolation. The parabolic solar cooker is proposed as a complementary technology for food preparation, enhancing energy autonomy and reducing environmental impact.

Palabras clave: Cocina solar, tamales, energía solar térmica, sostenibilidad, gas LP.

INTRODUCCIÓN

Los tamales son una parte esencial en la alimentación de los mexicanos apreciados por su portabilidad, la gran variedad que existe y a su preparación, lo anterior mencionado hace que sean un modelo atractivo de negocio. Sin embargo, la cocción de los tamales suele depender de combustibles como el gas o la leña, lo que implica costos energéticos elevados además de contribuir a la generación de emisiones contaminantes. Ante esta problemática surge una alternativa que es más sostenible la cocción de los tamales por medio de estufas solares parabólicas, este tipo de estufas reducen de manera significativa el consumo de gas, además de incrementarlas ganancias ya que la energía solar es gratuita y abundante.

MARCO TEÓRICO

Energía Solar Térmica

La energía solar se puede dividir en dos tipos principales: la fotovoltaica, la cual convierte la radiación solar en electricidad y la solar térmica, que utiliza la energía del sol para generar calor. En particular, la energía solar térmica ha demostrado ser una alternativa limpia, eficiente además de económicamente rentable, tanto en aplicaciones industriales como en entornos residenciales. La energía solar térmica utiliza la reflexión de rayos como principio de funcionamiento, mediante la utilización de placas reflejantes los rayos se concentran en un solo punto focal, permitiendo de esta manera alcanzar altas temperaturas. Este proceso permite su aplicación en diversos procesos térmicos como lo es la cocción de alimentos.

Estufas Solares Parabólicas

En la búsqueda de tecnologías más sostenibles, las estufas solares parabólicas, representan una gran alternativa, dado que, gracias a su

diseño en forma de parábola, tienen un gran rendimiento térmico lo cual las hace destacar sobre sus similares como lo pueden ser la Cookit[1] y el Horno Solar[2] (Megía, 2010). La forma parabólica de la estufa, tiene un papel importante debido a que su geometría nos permite concentrar los rayos solares en un punto focal, maximizando así la transferencia de calor.

Un uso aplicado de las estufas solares parabólicas es en la cocción de tamales los cuales son un alimento tradicional presente en la vida cotidiana de cientos de familias mexicanas, este tipo de alimentos requieren calor intensivo por un tiempo prolongado lo que implica el uso constante ya sea de leña o de gas. Esto genera una alta dependencia energética a los combustibles convencionales los cuales generan impactos tanto ambientales como económicos y dado que aproximadamente el 72% de gas consumido a nivel nacional es importado de Estados Unidos (Amador, 2024) nos deja a expensas de terceros para satisfacer nuestras necesidades energéticas.

En este sentido, el uso de tecnologías solares como las estufas parabólicas presenta grandes ventajas como una alternativa sobre los combustibles convencionales puesto que no generan emisiones de CO_2, reducen la dependencia de combustibles que provienen del extranjero además de minimizar la carga sobre el recurso maderable. Al aprovechar un recurso abundante y gratuito como lo es la energía solar térmica, nos hará avanzar hacia la autosuficiencia como a prácticas más sostenibles.

METODOLOGÍA

Este estudio se realizó en el mes de marzo del 2025, en la alcaldía Tlalpan en una latitud de 19.2708583 y longitud de -99.19915 en donde se pusieron a prueba dos medios distintos de cocción de tamales la primera por medios convencionales como lo es la utilización de gas LP y la segunda utilizando la energía termo solar. Para este estudio se analizaron los tiempos de cocción de 4 tipos de alimentos:

- 3 kg de pechuga de pollo.
- 1.5 kg de tomates y chiles.
- 1 kg de huevo.
- 11 kg de tamales.

Estos alimentos son la base de la preparación de los tamales, la cocción se realizó por separado para analizar los tiempos específicos de cada ingrediente para finalmente coser el producto final permitiendo de esta manera comparar el tiempo total requerido para cada tecnología en ambos casos se utilizaron recipientes metálicos con tapa para garantizar la retención de calor.

Estufa de gas

Para la cocción de tamales por medios convencionales se empleó una estufa de gas LP marca Coriat, modelo EC-3 HG PETIT, equipada con tres quemadores abiertos. De acuerdo con su ficha técnica el consumo energético por hora es de aproximadamente de 0.52 kg/h (Direyco, s.f.). La cocción de los tamales se realizó en una sola olla con una carga de aproximadamente 11 kg lo cual incluía: la masa, el relleno, hojas y el agua. La cocción comenzó con una flama con alta intensidad, transcurridos 20 minutos que fue el tiempo en que el agua alcanzo su temperatura de ebullición, se procedió a reducir la intensidad de la flama a un nivel medio para finalizar su cocción de manera controlada.

Estufa Solar Parabólica

Para la cocción de manera alternativa se utilizó una estufa solar parabólica de la marca GDAE10 (ilustración 1), la orientación de la misma y el seguimiento del sol fueron manuales de modo que conforme avanzaba el día se ajustaba la posición de la estufa para mantener la reflexión de los rayos solares. Puesto que el rendimiento térmico de este tipo de sistemas depende directamente de la posición del sol se necesita realizar un análisis de algunos parámetros de geometría solar como lo es el cambio de hora civil a la hora solar, la altura solar y el ángulo de incidencia. Para ello se necesitan datos importantes como lo es la latitud y la longitud de donde se realizará el análisis, además de un meridiano de referencia. En el caso de México el meridiano estándar más común para la zona centro es el de -90°.

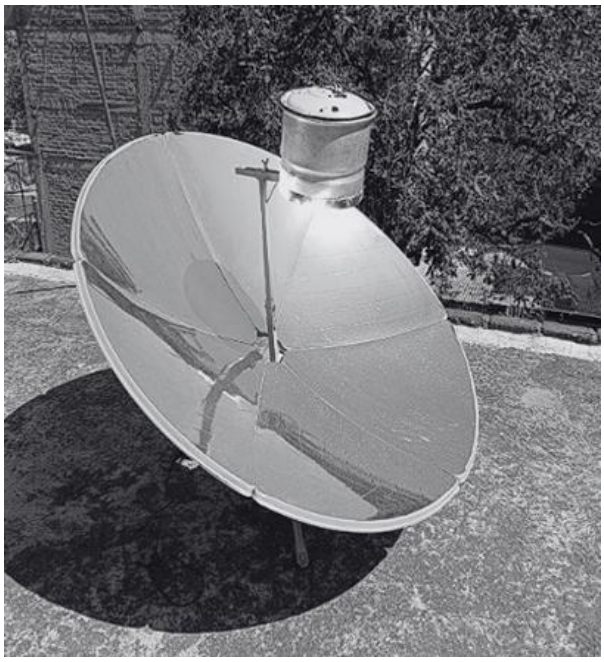


Ilustración 1 Estufa Solar Parabólica

Fundamentos para la orientación solar

Conversión de hora civil a solar. La posición del sol no necesariamente coincidirá con la hora que marca el reloj por ello es necesario

[1] Este tipo de cocinas van a constituir la forma más simple de cocinar su poco peso y facilidad de plegado hacen de ella un objeto que es muy fácil de guardar y transportar además de utilizar tanto la acumulación como la concentración permitiéndole a si alcanzar temperaturas de hasta 100 °C.

[2] Este tipo de cocina depende del conocido "efecto invernadero", en donde el vidrio transparente permite el paso de la radiación solar de onda más corta al interior del horno, pero es opaco a la mayoría de la radiación de longitud de onda más larga procedentes de los objetos que se calientan en el interior.

convertir la hora estándar a hora solar mediante la ecuación 1[3].

$$H_s = H_c + 4(Lst - Lloc) + E \qquad (1)$$

Donde

- H_s = Hora solar
- H_c = Hora civil
- Lst = Meridiano de referencia
- Lloc = Longitud de la ubicación
- E = Ecuación del tiempo

Ecuación del tiempo. La ecuación del tiempo E (ecuación 2) representa la diferencia entre la hora solar y la hora local y dependerá del parámetro B (ecuación 3).

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\,cosB - 0.032077\,sen\,B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\,sen\,2B) \qquad (2)$$

$$B = (n-1)\frac{360}{365} \qquad (3)$$

Donde

- n = Numero del día del año

Declinación solar. El ángulo de declinación solar **δ** se define como el ángulo formado por un rayo de sol cuando se extiende hasta el centro de la Tierra y el plano ecuatorial, tiene un rango de -23.5°<δ<23.5°. Y se calcula con la ecuación 4.

$$\delta = 23.45\,sen\left(360\frac{284+n}{365}\right) \qquad (4)$$

Angulo horario. El ángulo horario **ω** es el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje. Se mide en grados y cada hora equivale a 15°. En el medio día solar **ω** = 0, antes del mediodía **ω** = negativo y después del mediodía **ω** = positivo.

El ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar **α** es el ángulo formado entre la dirección que une el centro geométrico del Sol con el observador y el plano horizontal que pasa por este. Indica la altura angular del Sol sobre el horizonte en un lugar y momento determinados y esta dado por la ecuación 5.

$$sen\,\alpha = \cos\delta * \cos\emptyset * \cos\omega + sen\,\delta * sen\,\emptyset \qquad (5)$$

Donde

- $\emptyset$ = latitud del lugar

Para el cálculo de los parámetros se utilizó una hoja de cálculo en Microsoft Excel el cual tiene integrado las ecuaciones (1) a (5) permitiendo obtener la hora solar, la declinación solar, el ángulo horario y la altura solar, de este modo se automatizaron los cálculos.

El estudio se llevó a cabo durante dos días, en el primer día se realizó la cocción de la pechuga de pollo, huevo, tomates y chiles. La cocción de los alimentos comenzó a las 11:24 h y termino a las 14:06 h con una radiación solar diaria de 7.42 kW/m^2 (Servicio Meteorológico Nacional, 2025). En el segundo día se realizó la cocción completa de los tamales, comenzando a las 10:40 h y terminando a las 13:16 h con una radiación solar diaria 7.6 kW/m^2.

A partir de las mediciones realizadas con ambas tecnologías de cocción se presentan a continuación los resultados obtenidos.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las jornadas de cocción, en la Tabla 1 se puede apreciar tanto las horas de cocción como el consumo de gas LP por cada alimento.

Como se puede apreciar en la Tabla 1 el consumo total de gas LP fue de 2.55 kg mismos que están distribuidos entre los diferentes alimentos. Y el alimento que requirió mayor tiempo de cocción fueron los tamales esto debido a la cantidad de masa y su contenido de agua. Considerando un precio promedio del gas LP en la Ciudad de México de aproximadamente $ 19.71 kg el costo total de la cocción de tamales asciende a $ 50.26 pesos. Este gasto energético representa un factor importante ya que reduce el margen de ganancia o provoca el encarecimiento del

[3] Las ecuaciones utilizadas para la conversión de hora civil a solar, la ecuación del tiempo, la declinación solar, el ángulo horario y el ángulo de elevación solar fueron tomadas directamente del libro Solar Engineering of Thermal Processes (Duffie & Beckman, 2013).

producto para los consumidores.

Tabla 1 Cocción convencional, tiempo y consumo de gas LP por alimento

Alimento	Cantidad (kg)	Hora inicio	Hora final	Tiempo total	Gas LP consumido (kg)
Pechuga de pollo	3	09:24	10:43	01:19	0.68
Tomates y Chiles	1.5	09:24	09:52	00:28	0.25
Huevos duros	1	08:42	09:08	00:26	0.23
Tamales	11	13:33	16:13	02:40	1.39
				04:53	2.55

En comparación la cocción de tamales utilizando estufa solar no tiene un gasto económico puesto que la energía solar además de ser gratuita es abundante prácticamente en toda la república mexicana. En la Tabla 2 se puede apreciar los datos tano iniciales como finales para la cocción de los alimentos.

Tabla 2 Registro de altura solar, ángulo horario y tiempos de cocción en la estufa solar parabólica

Día	Radiación solar diaria	Declinación solar	Alimento	Cantidad	Hora civil inicio	Hora solar inicio	Altura solar	Angulo horario	Hora civil final	Hora solar final	Altura solar	Angulo horario	Tiempo total
#	(kW/m²)	(°)		(kg)			(°)	(°)			(°)	(°)	
75	7.42	-2.41	Pechuga de pollo	3	11:24	10:37	62.02	-20.75	13:25	12:38	66.39	9.5	02:01
			Tomates y Chiles	1.5	13:35	12:48	65.32	12	14:08	13:21	60.56	20.25	00:33
			Huevos duros	1	14:16	13:29	59.21	22.25	14:53	14:06	52.21	31.5	00:37
76	7.6	-2.02	Tamales	11	10:40	09:54	52.44	-31.5	14:02	13:16	61.69	19	03:22
													06:33

Como se puede apreciar en la Tabla 2 la altura solar desempeña un papel importante debido a que en ambos días la cocción de los alimentos se realizó en momentos en que el Sol alcanzaba su punto más alto, lo que lo que favoreció a un mayor aprovechamiento de la irradiación solar y por consecuencia mejoro su eficiencia.

En cuanto al ángulo horario, se registraron varios valores, los cuales fueron tanto negativos como positivos, lo que nos indica que las cocciones comenzaron antes del mediodía solar y finalizaban después de este. Pese a un desfase de 30° en su punto más lejano la cocción de los alimentos se pudo llevar a cabo sin mayor problema.

Al comparar el tiempo total acumulado de la estufa solar parabólica con el tiempo que tardo la estufa de gas LP se puede observar que la primera requirió de aproximadamente de 1 h con 40 min más para lograr la cocción de los mismos alimentos. Sin embargo, la estufa solar no requirió de un gasto adicional sobre algún energético esto genero un ahorro económico de aproximadamente $50.26 pesos si se extrapola a la semana es un ahorro de $351 pesos y ya que estos tamales están destinados para la venta este ahorro ayuda a mantener el precio accesible para los consumidores sin poner en riesgo las ganancias.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten observar que, bajo condiciones climáticas favorables, la estufa solar parabólica logra competir contra la estufa de gas LP en tiempos de cocción muy similares como se puede observar en la ilustración 2 y 3 además de eliminar la necesidad de realizar el gasto por el combustible, lo cual genera un ahorro económico para el usuario. No solo tiene beneficios económicos, a su vez, tiene grandes beneficios ambientales, ya que, según el informe “Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México” (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2014) por cada kg de gas LP que se consume se generan aproximadamente 3.01 kgCO_2. Esto nos indica que aproximadamente se evitó generar 7.68 kg de CO_2 para la cocción de tamales.

Esta tecnología no solo tiene el potencial de ser una alternativa viable como un modelo de negocio, si no que, a su vez, puede influir de manera directa en la vida de los hogares mexicanos ya que aprovecha energía que tiene la ventaja de ser no solo limpia, sino que, además, es gratuita y abundante. Esto reduce la dependencia de combustibles convencionales asegurando una soberanía alimentaria.

Estos resultados fortalecen el gran potencial de la energía solar como una opción, sostenible, viable además de poder ser replicada prácticamente en toda la república mexicana.

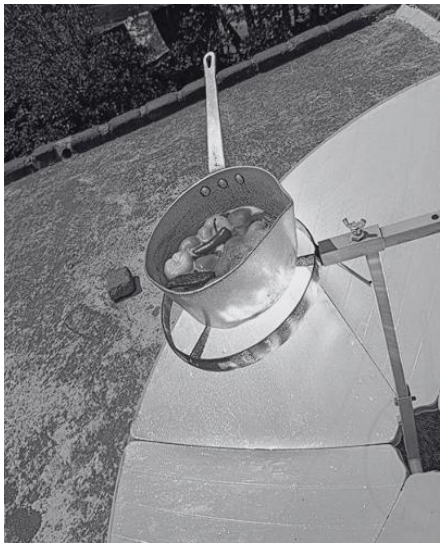


Ilustración 2 Cocción de tomates con estufa solar parabólica



Ilustración 3 Producto final con estufa solar parabólica

REFERENCIAS

Amador, O. (12 de 12 de 2024). Importación de gas natural desde EU marcó récord con AMLO . Obtenido de EL ECONOMISTA: https://www.eleconomista.com.mx/empresas/importacion-gas-natural-eu-marco-record-amlo-20241212-738051.html

Direyco. (s.f.). Estufa Coriat EC-3-HG PETIT De 3 Quemadores Abiertos y Horno Linea Trend. Obtenido de DIREYCO REFRIGERACION: https://www.direyco.mx/Estufa-Coriat-EC-3-HG-PETIT-De-3-Quemadores-Abiertos-y-Horno-Linea-Trend-,67_1563223198

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (abril de 2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Obtenido de https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman(auth.)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20(2013).pdf

Esteves Miramont , A., & Quiroga, V. N. (28 de septiembre de 2017). Evaluación de cocinas solares parabólicas con diferente tiempo de uso. Obtenido de CONICET: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/60958/CONICET_Digital_Nro.02396f25-e294-4c5f-82ac-c165cbf9d16a_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y#page=1.31

Gobierno de México. (10 de junio de 2025). Precios máximos vigentes del 01 al 07 de junio de 2025. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/999459/PRECIOS_MA_XIMOS_VIGENTES_DEL_01_AL_07_DE_JUNIO_DE_2025.pdf

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (s/n de diciembre de 2014). Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México (. Obtenido de INECC: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf#page=24.79

Megía, M. M. (s/f de Junio de 2010). Caracterización de una cocina solar parabólica (Proyecto de fin de carrera). Obtenido de Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.: https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/a8c329f3-7e92-4ef9-a3c2-021af07879be/content#page=76.40

SENER. (2018). REPORTE DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA ENEERGÍA TERMOSOLAR . Obtenido de gob: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/341706/IT_TERMOSOLAR_Final_Rev_1.pdf#page=10.60

Servicio Meteorológico Nacional. (17 de 3 de 2025). Radar meteorológico. Gobierno de México. Obtenido de https://smn.conagua.gob.mx/es/?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=46

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN DESHIDRATADOR SOLAR DIRECTO PARA SECADO DE MANGO EN LA COMUNIDAD DE SANTIAGO, BAJA CALIFORNIA SUR.

Alfonso R. Rodríguez Medina, Oscar Reséndiz Pacheco, Madelein Galindo de La Cruz, Bryanda Belén Gutiérrez Caballero y Federico Poujol Galván
Departamento o División, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Boulevard Forjadores S/N entre Calle Av. Universidad y Calle Félix Cota Col. Universitario, La Paz, B.C.S.,23088, México, 612 123 8800 ext. 4612, arodriguez_23@alu.uabcs.mx, resendiz@uabcs.mx y mgalindo@uabcs.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y evaluación de un deshidratador solar directo, planteado como una alternativa sustentable para la comunidad rural de Santiago. Mediante el secado, se busca aprovechar al máximo la producción local de mango, minimizando el desperdicio a pie de árbol y dando respuesta a la necesidad de conservar el fruto.

El prototipo consiste en una cámara de secado, la cual está cubierta con acrílico, tiene una estructura de ángulo de metal de ¾ de pulgada y bandejas de malla de acero inoxidable para favorecer el flujo de aire. El colector está elaborado con una estructura de ángulo de metal de ¾ de pulgada, recubierto de vidrio por la parte superior, acrílico transparente en los laterales y madera con lámina negra en la parte inferior. El acrílico favorece el secado mediante la exposición directa a los rayos solares.

Durante la evaluación, se monitorearon los parámetros de temperatura en el colector y en la cámara de secado, la humedad relativa en la entrada de aire y el peso del fruto. Mediante el análisis de estos resultados, se determinó que las temperaturas alcanzadas dentro de la cámara de secado son favorables para el secado del fruto, permitiendo alcanzar la humedad comercial en un tiempo razonable y con una calidad de exportación en el producto.
Este prototipo representa una alternativa para el aprovechamiento familiar mediante la venta de productos locales con valor agregado.

Palabras clave: deshidratador solar, radiación, temperatura, humedad relativa, colector, cámara de secado.

ABSTRACT

This work presents the design, construction, and evaluation of a direct solar dehydrator, proposed as a sustainable alternative for the rural community of Santiago. The objective is to maximize the utilization of the local mango harvest through drying, minimizing on-tree waste and addressing the need to preserve the fruit.

The prototype consists of a drying chamber covered with acrylic, built on a ¾-inch metal angle frame, and equipped with stainless steel mesh trays to promote airflow. The solar collector features a ¾-inch metal angle frame, with a glass cover on top, transparent acrylic on the sides, and wood with a black metal sheet at the bottom. The acrylic covering allows direct sunlight to enhance the drying process.

During the evaluation phase, temperature in both the collector and drying chamber, relative humidity at the air inlet, and fruit weight were monitored. Analysis of these results showed that the temperatures reached inside the drying chamber are favorable for fruit dehydration, enabling the product to achieve commercial moisture content within a reasonable time while maintaining export-quality standards.
This prototype represents a viable alternative for local families to add value to regional products and expand market opportunities.

Keywords: solar dehydrator, radiation, temperature, relative humidity, collector, drying chamber.

INTRODUCCIÓN

El pueblo de Santiago, ubicado en el municipio de Los Cabos, es uno de los principales productores y exportadores de mango. La problemática que enfrentan los productores de dicha comunidad es el desperdicio del fruto cuando este no logra ser comercializado por diversos factores, como, por ejemplo, que los clientes principales decidan importar el fruto de otro estado, lo que muchas veces trae consecuencias como la descomposición del mango a pie de árbol.

Ante esto, se propone un deshidratador solar indirecto de convección natural como una herramienta eficiente que optimiza el aprovechamiento de los recursos naturales y reduce el desperdicio de alimentos, en este caso, del mango. Implementar un deshidratador solar no solo contribuye a la reducción de pérdidas poscosecha, sino que también crea nuevas oportunidades económicas para los productores locales.
Además, con las nuevas regulaciones que buscan mejorar la alimentación de los jóvenes en México, la fruta deshidratada —en este caso, el mango— actúa como una alternativa saludable que promueve buenos hábitos alimenticios sostenibles.

Para obtener productos deshidratados de mayor calidad y reducir el tiempo de secado, es necesario aumentar la velocidad del proceso y proteger el producto del polvo, insectos, roedores y lluvia durante el secado (Eissen y Muhlbauer, 1983). También es indispensable realizar pruebas de secado y estudiar detalladamente la calidad del producto final antes de recomendar condiciones adecuadas para el proceso (Doe y col., 1983).

ANTECEDENTES

Reséndiz et al. (2000) realizaron pruebas experimentales de secado de mango en un deshidratador tipo túnel con condiciones constantes de temperatura, velocidad y humedad absoluta en el aire, con la intención de obtener curvas de secado que permitieran conocer el comportamiento del mango durante este proceso, ya que no se encontraban reportadas en la literatura. Mencionan que, en Santiago, B.C.S., se cosecha más mango del que los ejidatarios pueden vender a un precio justo.

Por otro lado, Guevara y Segura (2017) resaltan la relevancia del tipo de materiales en términos de rendimiento térmico. Ellos eligen la madera por su capacidad para retener calor y el mosquitero de plástico por su durabilidad y facilidad de mantenimiento. Sin embargo, mencionan que su diseño, al ser directo, podría provocar decoloración en ciertos frutos.

Asimismo, Ruiz (2023) se inclina hacia la madera como un material excepcional en el secado solar y lleva a cabo un análisis numérico del flujo de convección natural dentro de un secador solar de madera en una comunidad indígena de Michoacán. El enfoque de su trabajo resalta la importancia de la dinámica del flujo de aire dentro del equipo para mejorar el rendimiento térmico del mismo.

METODOLOGÍA

Con el objetivo de mostrar el potencial del valor agregado que se le puede otorgar al mango mediante el secado solar, primeramente, se determinó su composición en peso y contenido de humedad. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Para la preparación de cada prueba, se seleccionó un mango de un lote de 2.8 kg adquirido en el comercio local. A este se le hicieron dos cortes longitudinales en forma de cruz para retirar la corteza. Luego, se cortaron porciones irregulares de aproximadamente 40 g de peso, con un espesor promedio de 0.2 mm y 5 cm por lado.

Tabla 1. Composición en Peso del Mango

Componente	% en peso promedio	% en peso
Pulpa	64.6	42
Hueso	12	13
Corteza	19	27.3
Padecería		17.8
Características adicionales		
Densidad del mango		0.850 g/cm^2
Humedad Inicial		87%
Humedad de la pulpa seca		25.6%

Diseño y construcción

El deshidratador solar directo fue diseñado considerando las condiciones climáticas de la comunidad de Santiago, Baja California Sur, caracterizadas por alta radiación solar y baja humedad relativa durante la temporada de cosecha de mango. El modelado se realizó en SketchUp para definir dimensiones y materiales.

La estructura se construyó con ángulo metálico de ¾", paredes de acrílico y bandejas de malla de acero inoxidable, a fin de permitir un flujo de aire constante y minimizar la corrosión. El colector solar se fabricó con la misma estructura metálica, cubierto en su parte superior con vidrio, en los laterales con acrílico transparente y en la parte inferior con madera y lámina metálica pintada en color negro mate, para favorecer la absorción de radiación solar.



Figura 1. Diseño y Construcción de Deshidratador Solar.

Evaluación

Se utilizaron sensores HOBO para registrar temperatura y humedad relativa, programados para realizar mediciones a intervalos de 1 minuto. Se colocaron en puntos estratégicos del deshidratador:

- Sensor 1: parte inferior de la cámara de secado.
- Sensor 2: parte superior de la cámara de secado, cerca de los orificios de salida de aire.
- Sensor 3: interior del colector, en la zona de entrada de aire.

Se realizaron dos pruebas en el sitio bajo diferentes condiciones climatológicas para comparar el comportamiento del deshidratador y determinar si estas afectaban el proceso de secado del mango. En ambas pruebas, el mango fue lavado, pelado y cortado en tiras de espesor uniforme. Estas se distribuyeron de manera uniforme sobre las bandejas de acero inoxidable para favorecer la circulación del aire. Se midió el peso inicial y final de la fruta con una balanza digital.

Prueba 1: En un día soleado, el peso inicial fue de 435 g y el final de 55 g. La textura resultó ligeramente seca, similar a una fritura; el color permaneció radiante y el sabor fue agradable.
Prueba 2: En un día con intervalos nubosos (pronóstico de lluvia), el peso inicial fue de 335 g y el final de 55 g. La textura fue un poco más blanda, pero el color y sabor se mantuvieron agradables.

El proceso de secado se consideró completo cuando el peso se estabilizó y la humedad alcanzó niveles compatibles con los estándares comerciales de mango deshidratado.

RESULTADOS

Con base en ambas pruebas experimentales, se monitorearon temperatura, humedad relativa y pérdida de peso del producto. Se realizaron dos pruebas de secado hasta alcanzar niveles de humedad del 15%.
En la Figura 2 se muestra la evolución de la temperatura y humedad relativa en la parte inferior de la cámara de secado. Se observó que la temperatura aumentó progresivamente durante el día, mientras que la humedad relativa disminuyó. Se inició la prueba con una humedad relativa del 60%, que bajó hasta 20%. La temperatura pasó de 30 °C a 60 °C.

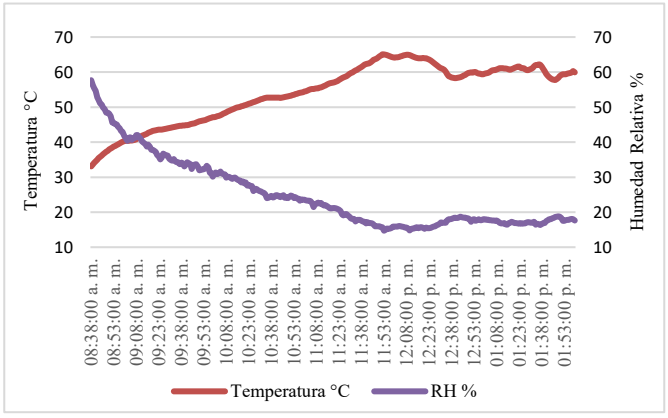


Figura 2. Evolución de la temperatura y humedad relativa en función del tiempo en la parte inferior de la cámara de secado.

En la Figura 3, correspondiente a la parte superior de la cámara de secado, se registró una humedad inicial del 80% y final del 20%. La temperatura fue de 30 °C al inicio y alcanzó 40 °C al final. La ubicación del sensor (por encima de la muestra) explica la mayor humedad detectada en comparación con la parte inferior.

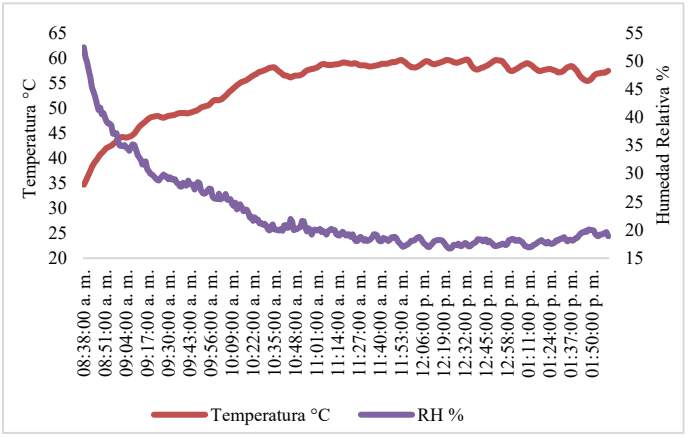


Figura 3. Evolución de la temperatura y humedad relativa en función del tiempo en la parte superior dentro de la cámara de secado.

En la Figura 4, correspondiente al interior del colector solar, se registró una humedad inicial del 70% y final del 15%. La temperatura varió entre 30 °C y 55 °C a lo largo del día.

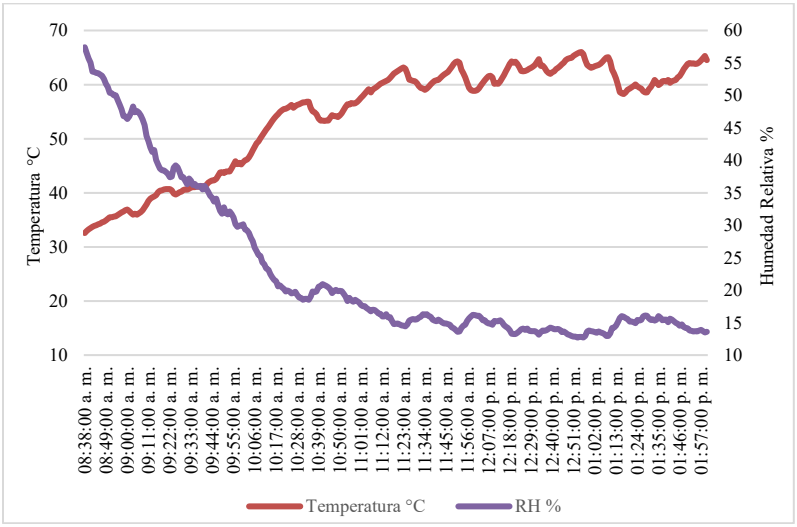


Figura 4. Evolución de la temperatura y humedad relativa en función del tiempo al inicio del colector solar.

.

CONCLUSIONES

El deshidratador solar directo demostró ser una alternativa eficiente para el secado de mango en la comunidad de Santiago, B.C.S. Las pruebas realizadas evidencian que el equipo puede reducir el contenido de humedad del mango a niveles comerciales en tiempos razonables, manteniendo la calidad sensorial e inocuidad del alimento.

En la Prueba 1 (día soleado), el peso inicial fue de 435 g y el final de 55 g, lo que representa una pérdida de humedad del 87.36%. La

temperatura máxima en el colector fue de 65 °C, mientras que en la cámara de secado se alcanzaron 59 °C en la parte superior y 64 °C en la parte inferior. La humedad relativa disminuyó progresivamente, favoreciendo el proceso de secado.

En la Prueba 2 (día con nubosidad parcial), el peso inicial fue de 335 g y el final de 55 g, con una pérdida de humedad del 83.58%. Las temperaturas fueron ligeramente menores, lo que prolongó ligeramente el tiempo de secado.

Las curvas de pérdida de peso (Fig. 3) muestran una disminución pronunciada durante las primeras horas, seguida de una estabilización, patrón característico del secado solar en productos agrícolas.

Las mediciones de temperatura y humedad relativa confirmaron que el equipo alcanzó condiciones óptimas para el secado, incluso en escenarios con variabilidad climática. Bajo condiciones favorables, el deshidratador logró temperaturas superiores a las mínimas necesarias para el secado de mango, y aun en días con nubosidad parcial se obtuvieron resultados satisfactorios.

El uso de materiales accesibles y duraderos, junto con la simplicidad del diseño, facilita su replicación tanto en Santiago como en otras comunidades productoras de mango. Esto contribuye a reducir pérdidas poscosecha y generar productos con valor agregado para el mercado local y regional.

RECOMENDACIONES

Realizar más pruebas para determinar la humedad óptima de la muestra que sea aceptada por los consumidores, con el objetivo de establecer tiempos y niveles de humedad adecuados.

BIBIOGRAFÍA

Doe, P. E., Curran, C. A., & Poulter, R. G. (1983). Determination of the Water Activity and Shelf Life of Dried Fish Products. FAO Fish. Rep., 279: 202-208.

Eissen, W. & Muhlbauer, W. (1983). Development of Low-Cost Solar Grape Dryers. En: Proceedings of the International Workshop on Solar Drying and Rural Applications.

Gutiérrez, M. F., Chagoyán, S. J., Rodríguez, M. J. A., Alba, H. M. C., & Talavera, G. R. (1992).

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DEL SECADO SOLAR DEL XOCONOSTLE: CINÉTICA DE DESHIDRATACIÓN, CONSERVACIÓN VISUAL Y APLICACIONES EN SISTEMAS TÉRMICOS RURALES

Gerardo Alberto Mejía-Pérez1, Beatriz Castillo-Téllez1*, Margarita Castillo Téllez2*, Charlotte M. Llanes Chiquini2, Alfredo Domínguez Niño3
1Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara
2Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche
3Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México
4Dirección de Ingeniería en Tecnologías de la Información e Innovación Digital, Universidad Politécnica del Estado de Guerrero
Autor de correspondencia: mcastill@uacam.mx.

RESUMEN

El secado solar representa una tecnología sostenible de gran relevancia para la conservación de alimentos en zonas rurales. En este estudio se evaluó el comportamiento del xoconostle (Opuntia joconostle) durante su deshidratación en un secador solar tipo invernadero. Se analizó la cinética de pérdida de humedad y el cambio de color, bajo condiciones controladas de temperatura (55–62 °C) y humedad relativa (20–35 %). Los resultados mostraron que es posible reducir la humedad del producto desde un 82 % hasta menos del 10 % en un periodo aproximado de 7 horas. Asimismo, se identificó un cambio de color perceptible (ΔE*>5) tras las primeras 3 horas. Estos hallazgos aportan evidencia para optimizar los procesos de secado solar en agroindustrias de pequeña escala, priorizando la conservación de calidad visual y eficiencia energética. Las pruebas se realizaron en Tonalá, Jalisco (abril de 2025), durante el final de la estación seca, con temperaturas diurnas ~29–31 °C, prácticamente sin lluvia y alta irradiación solar, condiciones favorables para el secado.

Palabras claves: Secado solar, Xoconostle (Opuntia joconostle), Cinética de secado, Cambio de color, Secador solar tipo invernadero.

ABSTRACT

Solar drying is a sustainable technology of high relevance for food preservation in rural areas. In this study, we evaluated the drying behavior of xoconostle (Opuntia joconostle) in a greenhouse-type solar dryer. Moisture-loss kinetics and color change were analyzed under controlled temperature (55–62 °C) and relative humidity (20–35%). The results showed that the product's moisture content can be reduced from 82% to less than 10% in approximately 7 hours. A perceptible color change (ΔE* > 5) was also identified after the first 3 hours. These findings provide evidence to optimize solar-drying processes for small-scale agro-industries, prioritizing preserving visual quality and energy efficiency. Experiments were conducted in Tonalá, Jalisco (April 2025), at the end of the dry season, with daytime temperatures ~29–31 °C, virtually no rainfall, and high solar irradiance, all favorable for solar drying

Keywords: Solar drying, Xoconostle (Opuntia joconostle), Drying kinetics, Color change, Greenhouse-type solar dryer.

INTRODUCCIÓN

El xoconostle (*Opuntia joconostle*), una cactácea nativa de México, es un fruto con alto contenido de compuestos bioactivos como vitamina C, carotenoides, ácidos orgánicos y fibra dietética. Debido a su estructura carnosa y su elevado contenido de humedad (alrededor del 82 %), su conservación representa un reto tecnológico, particularmente en zonas rurales con acceso limitado a refrigeración o energía eléctrica. El secado solar surge como una alternativa sostenible y de bajo costo para alargar su vida útil, con un impacto positivo en la economía local y la soberanía alimentaria [1]. El xoconostle deshidratado, en polvo u hojuelas, es un insumo versátil para salsas instantáneas, sazonadores, infusiones y adobos, actuando como acidulante natural y fuente de fibra. Su obtención por secado solar habilita esquemas de valor agregado en agroindustrias de pequeña escala.

Dada su disponibilidad regional, bajo costo, y potencial de revalorización como producto deshidratado, se seleccionó este fruto como modelo de estudio para la presente investigación.

Sin embargo, el secado solar también implica desafíos importantes, especialmente en términos de conservación de nutrientes sensibles al calor. La vitamina C y los carotenoides, por ejemplo, son compuestos hidrosolubles y termolábiles cuya degradación puede verse acelerada por la exposición prolongada a altas temperaturas y a la radiación solar directa. Estudios como el de [2] documentaron pérdidas considerables de estos nutrientes durante el secado solar abierto de perejil, mientras que investigaciones con sistemas indirectos, como las realizadas por [3] en zanahoria, reportaron pérdidas más moderadas (65 % de vitamina C y 47 % de carotenoides), subrayando la influencia decisiva del diseño del secador en la conservación nutricional.

Adicionalmente, la literatura resalta la importancia de emplear estructuras que permitan un control térmico más estable y reduzcan la exposición directa del alimento al sol. Tecnologías como los túneles solares o secadores tipo invernadero han mostrado un mejor desempeño en la retención de calidad nutricional y sensorial [4] y [5]. Aunado a ello, se ha evidenciado que ciertos tratamientos previos al secado pueden mejorar significativamente la estabilidad de compuestos bioactivos. [6], por ejemplo, reportaron que el blanqueo previo al secado redujo las pérdidas de β-caroteno y vitamina C entre un 7 y 15 % en comparación con muestras crudas, atribuible a la inactivación de enzimas oxidativas y a la

reducción de la actividad microbiana.
A partir de estos antecedentes, se establece que el éxito del secado solar depende tanto del diseño térmico del equipo como de las condiciones operativas y los tratamientos previos aplicados. Para el xoconostle, esto implica utilizar secadores que mantengan la temperatura interna en el rango de 50 a 60 °C y que reduzcan al máximo la exposición directa a la radiación, condiciones que favorecen la conservación de atributos funcionales. Por otro lado, los valores de humedad final reportados en estudios previos (~7–10 %) concuerdan con los objetivos del presente trabajo, sirviendo como referencia para evaluar la eficiencia del proceso.

METODOLOGÍA

Durante abril de 2025, en Tonalá, Jalisco, se realizaron pruebas piloto de secado solar en días con radiación estable, utilizando el secador tipo invernadero descrito anteriormente, se desarrolló un diseño experimental orientado a evaluar el efecto del secado solar sobre el contenido de humedad y la calidad visual del xoconostle (Opuntia joconostle), con el objetivo de establecer una metodología reproducible para futuras pruebas de conservación nutricional.

Variables experimentales

Se definieron dos grupos de variables a controlar:
a) Variables independientes (factores de estudio):
Método de secado:

— Secado solar en prototipo de tipo invernadero (cubierta de policarbonato) Figura 1.

b) Variables dependientes (respuesta):

— Contenido de humedad residual (% base húmeda y seca).
— Tiempo total de secado (min).
— Cambio de color (medido como ΔE*).
— Temperatura y humedad relativa del aire en el interior del secador.

Estas variables permiten evaluar la eficiencia del proceso y los posibles cambios fisicoquímicos del producto a lo largo del tiempo.

Diseño del secador solar

El equipo utilizado fue

1) Un secador solar directo tipo gabinete, con las siguientes características:

— Dimensiones: .0.5 m × 0.3 m × 0.4 m.
— Cubierta de policarbonato.
— Bandejas de malla para favorecer el flujo de aire.
— Ventilación pasiva (ranuras laterales).

2) Sensor termo-higrómetro para monitorear condiciones internas.

Este tipo de estructura permite elevar la temperatura interna por efecto invernadero, alcanzando entre 50 y 65 ˚C en días soleados, ideal para reducir la humedad sin someter al producto a temperaturas destructivas.



Figura 1 Secadores solares utilizados

Selección y preparación del material
Se recolectaron xoconostles seleccionando frutos con características de madurez uniforme, sin daños físicos ni signos de descomposición. Los frutos fueron lavados, desinfectados y cortados en rebanadas circulares de 4 mm de grosor, utilizando una mandolina para asegurar uniformidad en el espesor, ya que la geometría influye directamente en la velocidad de deshidratación. Réplicas triplicadas por tratamiento.

Plan de muestreo
Se definieron puntos de muestreo cada 30 minutos durante las primeras 4 horas, y luego cada hora hasta alcanzar una humedad residual inferior al 10 %. En cada punto, se registrarán los siguientes parámetros:

- Peso de la muestra.
- Temperatura y humedad del aire en el secador.
- Color visual (observación directa y fotografía estandarizada).
- Textura y flexibilidad (evaluación sensorial descriptiva).

Estos datos permitirán construir curvas de secado y modelar los cambios físicos durante el proceso.

Recolección de condiciones ambientales
Contexto climático de referencia (Tonalá, abril 2025): temperaturas máximas típicas ~29–31 °C (mínimas ~13–15 °C), prácticamente sin precipitación (≈0–1 días/mes) y elevada irradiación solar diaria (~6.9–7.4 kWh·m^{-2}·día^{-1}). Estas condiciones son consistentes con el final de la estación seca en el AMG y son propicias para el secado solar.
Se utilizarán registros meteorológicos (temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar global) durante los días de secado, a partir de:
Estación meteorológica local (SIAPA – CUTonalá).
Sensor digital portátil (DHT22 acoplado a Arduino, si se requiere redundancia).
Estas condiciones permitirán correlacionar el comportamiento de las muestras con la variabilidad ambiental, aspecto clave en procesos solares pasivos.

Experimentación y recopilación de datos
Debido a limitaciones logísticas y de acceso a laboratorio, no fue posible realizar la totalidad de los análisis fisicoquímicos planeados (contenido de vitamina C y carotenoides). No obstante, se logró ejecutar parcialmente el protocolo experimental propuesto y se desarrolló el secado de xonocostle lo que permite presentar resultados esperados para la cinética de secado y el cambio de color del xoconostle.

Ejecución del protocolo experimental
Durante el mes de abril, se realizaron pruebas piloto de secado solar en días con radiación estable, utilizando el secador tipo invernadero descrito anteriormente. Las muestras de xoconostle fueron preparadas en rebanadas de 4 mm, sin pretratamiento. Se tomaron registros colorimétricos, se midió el peso a intervalos regulares y se documentaron las condiciones ambientales internas del secador (temperatura: 55-62 ˚C; humedad relativa: 20-35 %).
Se observaron los siguientes aspectos clave:

- La pérdida de humedad fue notoria durante las primeras 3 horas.
- La textura cambió de firme y húmeda a correosa y seca.
- Se evidenció un oscurecimiento progresivo en la superficie del fruto, compatible con procesos de oxidación no enzimática.

La diferencia visual fue evidente. Si bien no se pudo determinar de forma cuantitativa los compuestos nutricionales, estos ensayos sirvieron para validar el diseño experimental, afinar tiempos de muestreo, y documentar los cambios físicos observables.

RESULTADOS

Cinética de secado
Se realizó el seguimiento de la pérdida de humedad, ampliamente utilizado en estudios de secado de frutas y hortalizas. La humedad inicial fue de 82 % y la final de 8 % (ambas en base húmeda), se generó una curva con puntos de muestreo cada 30 minutos durante 8 horas.
Resultados clave:

- La relación de humedad (MR) decreció exponencialmente, con una reducción del 50 % en las primeras 180 minutos.
- La humedad base seca pasó de 4.56 a 0.087 g agua/g materia seca.
- La humedad base húmeda alcanzó el umbral deseado (<10 %) en aproximadamente 420 minutos.

Esta curva puede considerarse representativa del comportamiento del xoconostle bajo condiciones ideales Figura 2, y se alinea con lo reportado en estudios previos para productos similares.

La gráfica muestra la evolución simultánea de dos indicadores clave durante el proceso de secado solar del xoconostle:

1) La Relación de Humedad (MR), definida como

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e}$$

representa la fracción de humedad remanente respecto al total que se espera eliminar. disminuye de forma exponencial a lo largo del tiempo, siguiendo un comportamiento típico de primera clase, lo cual concuerda con las cinéticas de alimentos de este tipo.

2) El Porcentaje de Humedad (base húmeda) refleja el contenido de agua del producto en términos prácticos, y es el parámetro más utilizado en normativas alimentarias para evaluar si un producto está completamente deshidratado. En los primeros 120–180 minutos, se observa una pérdida rápida de humedad, donde el MR cae por debajo de 0.5, indicando que más de la mitad del agua ha sido eliminada.

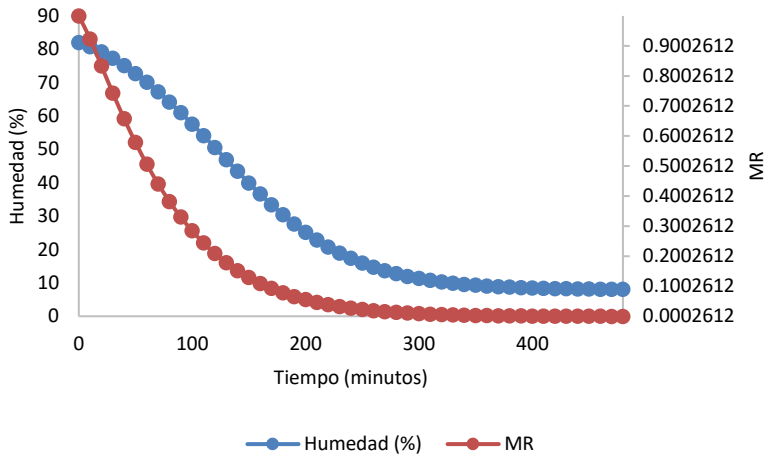


Figura 2 Cinética de Secado del Xoconostle: Evolución de la Relación de Humedad (MR) y Porcentaje de Humedad (base húmeda)

Después de las 5 horas (300 minutos), ambas curvas se estabilizan, sugiriendo que el producto ha alcanzado una humedad cercana al equilibrio (8–10 %), típica de productos secos listos para almacenamiento. Esta fase final se asocia con una reducción significativa en la velocidad de secado, lo cual puede deberse al efecto de formación de una "corteza" en la superficie del producto que dificulta la difusión del agua interna.
La información contenida en esta gráfica permite optimizar el tiempo de secado para maximizar eficiencia energética sin prolongar innecesariamente el proceso. También sirve para estimar cuándo conviene retirar el producto del secador según estándares de conservación (p. ej., <10 % humedad base húmeda).

Cambio de color

Utilizando un colorímetro, se realizó el seguimiento del cambio de color del xoconostle a lo largo del tiempo de secado Figura 3, basada en los parámetros del espacio CIE L*a*b*. El valor inicial del fruto fresco (L*=60, a*=25, b*=30) y el valor final fue de (L*=45, a*=10, b*=20). Se calculó el ΔE* (diferencia total de color) en cada intervalo, y se generó una escala visual del oscurecimiento progresivo del producto. Entre los resultados destacan:
Un ΔE* superior a 5 se observó a los 180 minutos, indicando un cambio visible perceptible al ojo humano. El color viró de un tono rojo-brillante hacia una apariencia más opaca y amarronada, especialmente al final del proceso.
La Figura 3 muestra ΔE* (diferencia de color) durante el secado del xoconostle. Se puede observar cómo el cambio de color se vuelve perceptible (>3) entre los 100 y 150 minutos, y claramente evidente (>5) después de las 3 horas
La representación gráfica de estos datos proporciona una herramienta útil para comprender la evolución del color durante el secado solar y para diseñar protocolos de evaluación sensorial o visual en futuras etapas del proyecto.

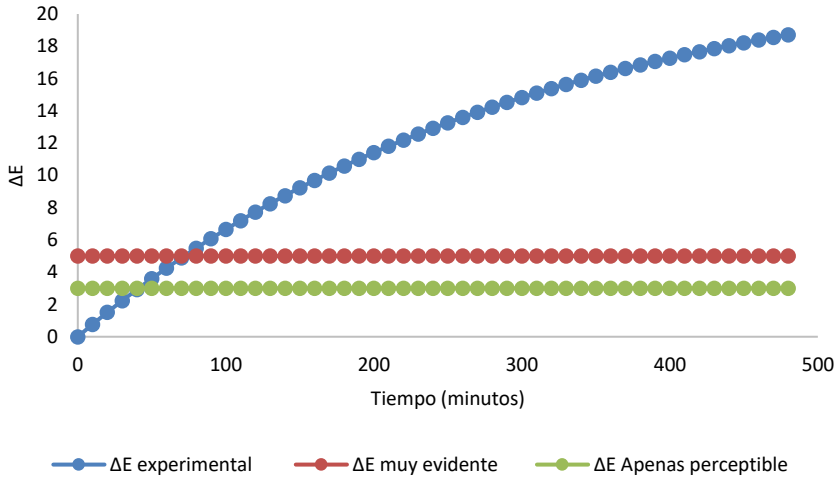


Figura 3 Evolución de la Diferencia de Color (ΔE*) durante el Secado Solar del Xoconostle

CONCLUSIONES

El secado solar se confirma como una alternativa viable y accesible para la deshidratación del xoconostle, especialmente en contextos rurales o de baja infraestructura. A través del seguimiento de la cinética de secado, se evidenció que es posible alcanzar una humedad final inferior al 10 % en aproximadamente 7 horas con temperaturas entre 55 y 65 ˚C, lo cual coincide con los parámetros estándar para productos deshidratados.

El MR mostró el comportamiento esperado del xoconostle durante el secado, con una fase inicial de pérdida rápida de humedad seguida de una etapa de desaceleración típica de productos de alta humedad.

El cambio de color reveló que el producto sufre un oscurecimiento progresivo y perceptible a partir de las primeras tres horas de exposición. El valor de ΔE* superó el umbral visual de 5 unidades hacia los 180 minutos, lo cual indica un cambio evidente en la apariencia del producto. Este fenómeno es consistente con la literatura y debe considerarse al momento de definir la aceptabilidad del producto final. Bajo las condiciones evaluadas se obtuvo un producto con humedad <10% y cambio de color controlado, apto como acidulante natural e ingrediente funcional en salsas, sazonadores, infusiones y adobos. Estos resultados confirman la viabilidad del secado solar del xoconostle para diversificar productos y fortalecer el aprovechamiento local.

El trabajo desarrollado por la estudiante fortaleció sus competencias en investigación aplicada, incluyendo la búsqueda y análisis crítico de información científica, diseño experimental, análisis de datos y redacción técnica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A.A. Morales-Tapia, F.E. González-Jiménez, G. Vivar-Vera, J.A. Del Ángel-Zumaya, M. Reyes-Reyes, L. Alamilla-Beltrán, E. Barojas-Zavaleta, B.L. Cooper-Bribiesca4, J. Jiménez-Guzmán, Use of freeze-drying and convection as drying methods of the xoconostle by-product and the effect on its antioxidant properties, Rev. Mex. Ing. Quim. 21 (2022). https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2692.

[2] M. Mahecha, M. Cortes, E. Rodríguez, Evaluación del Secado de Perejil Aplicando Técnicas de Deshidratación Osmótica Como Pretratamiento, Rev. Fac. Agron. Univ. Nac. Medellin 63 (2010) 5693–5705. http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/25057.

[3] A. James, A. Matemu, Solar-drying of vegetables for micronutrients retention and product diversification, Am. J. Res. Commun. 4 (2016) 1–13. https://www.researchgate.net/profile/Athanasia_Matemu/publication/308415132_Solar-Drying_of_Vegetables_for_Micronutrients_Retention_and_Product_Diversification/links/57e3a91408ae054b20bdba7c/Solar-Drying-of-Vegetables-for-Micronutrients-Retention-and-Prod.

[4] S. Aien, F. Judith, Actualización del estado de arte del secado solar de alimentos a partir de una revisión bibliográfica latinoamericana, Rev. Iberoam. Tecnol. Postcosecha 23 (2022) 101–124.

[5] A. Domínguez-Niño, A.M. Lucho-Gómez, I. Pilatowsky-Figueroa, E.C. López-Vidaña, B. Castillo-Téllez, O. García-Valladares, Experimental study of the dehydration kinetics of chicken breast meat and its influence on the physicochemical properties, CYTA - J. Food 18 (2020) 508–517. https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1791961.

[6] A. Sharma, C.R. Chen, N. Vu Lan, Solar-energy drying systems: A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 13 (2009) 1185–1210. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015.

Enseñanza de las Energías Renovables/ Energía y medio ambiente

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2134	Automatización del procesamiento de datos experimentales en celdas solares de perovskita mediante una suite informática en Python con programación asistida por inteligencia artificial	José Eulalio Erro Quiñonez
2219	Estudio y diseño de un sistema híbrido de colector cilindro parabólico y celdas Peltier con seguimiento para la generación de energía térmica y eléctrica	José D Gámez Avilez
2363	Energías renovables como eje transversal en la educación superior: enfoque interdisciplinario para un futuro sostenible	Laura Ceballos-Mendivil

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES EN CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA MEDIANTE UNA SUITE INFORMÁTICA EN PYTHON CON PROGRAMACIÓN ASISTIDA POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL

[1]Erro Quiñonez José Eulalio , [2]García Gutiérrez Rafael, [3]Zhao Hu Hailin ,[4]Corpus Mendoza Asiel Neftalí, [5]Arias Ramos Carlos Fabián, [6]Cancino Gordillo Francisco Enrique , [7]Paola Gabriela Abrego Martínez
[1,2]Universidad de Sonora, Hermosillo Son., México. [3,4]Instituto de Energías Renovables, Temixco Mor., México

Resumen
El presente trabajo aborda el desarrollo de una suite informática personalizada, cuyo fin es servir como herramienta de automatización en el procesamiento de archivos nativos de dispositivos de caracterización que contienen datos experimentales de películas y celdas solares de perovskita.
La metodología integra la inteligencia artificial con la interacción con los chatbots de Chatgtp, Claude y Deepseek. Al utilizarlos como asistentes de programación en Python. La suite es capaz de procesar directamente archivos de perfilómetro AMBios XP-200, espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV-1800 y simulador solar ORIEL LCS-100, con lo cual se elimina la limpieza manual en Excel y graficación en OriginPro. Los resultados arrojan una reducción del 98% en tiempo de procesamiento (de 185 a 3 minutos para 10 archivos de perfilometría), eliminando la dependencia de software comercial y errores manuales. La suite ofrece una interfaz gráfica amigable con opciones de personalización y elimina el pago de licencias comerciales. Al ser software propietario la escalabilidad y la adaptación a las necesidades particulares del investigador o centro de investigación son posibles.

Palabras clave
Celdas solares de perovskita, chatbots, Python, inteligencia artificial, suite informática.
Autor de correspondencia: Erro Quiñonez José Eulalio, a222230161@unison.mx,

Abstract
This work addresses the development of a customized software suite intended to serve as an automation tool for processing native characterization device files containing experimental data for perovskite films and solar cells.
The methodology integrates artificial intelligence with interaction using Chatgtp, Claude, and Deepseek chatbots, utilizing them as programming assistants in Python. The suite is capable of directly processing files from the AMBios XP-200 profilometer, the Shimadzu UV-1800 UV-Vis spectrophotometer, and the ORIEL LCS-100 solar simulator. This eliminates the need for manual cleaning in Excel and graphing in OriginPro. The results show a 98% reduction in processing time (from 185 to 3 minutes for 10 profilometry files), eliminating dependence on commercial software and manual errors. The suite offers a user-friendly graphical interface with customization options, eliminating the need for commercial licenses. As it is proprietary software, it is scalable and adaptable to the specific needs of the researcher or research center.

Keywords
Perovskite solar cells, chatbots, Python, artificial intelligence, computing suite.

Introducción
Las celdas solares de perovskita han surgido como una tecnología fotovoltaica prometedora, que requiere técnicas de caracterización como espectroscopia UV-Vis, perfilometría y análisis de curvas de densidad de corriente vs voltaje J-V.
Al procesar los archivos de los dispositivos de caracterización puede involucrar múltiples pasos repetitivos tales como apertura de archivos propietarios, extracción manual de datos, procesamiento en hojas de cálculo y graficación en software comercial como OriginPro. Este flujo es repetitivo, tedioso, propenso a errores, consume un tiempo considerable y genera dependencia de licencias comerciales, [1].

Una opción para ayudar al investigador(es) es generar una herramienta informática, para ello Python se ha posicionado como lenguaje ideal para análisis científico debido a sus librerías especializadas para análisis de datos y capacidades de interfaz gráfica. [2], [3], [4]. Desarrollos previos como PLACE [5] y LABS [6] han demostrado el potencial de Python en automatización de procesos.

Y el objetivo de este trabajo es desarrollar una suite informática modular que automatice completamente el procesamiento de datos experimentales de celdas solares de perovskita, reduciendo tiempos de análisis y eliminando la dependencia de software comercial.

Materiales y Métodos
Equipos de Caracterización
Los investigadores del laboratorio de celdas solares del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) utilizan frecuentemente los siguientes dispositivos de caracterización: Perfilómetro AMBios XP-200 para medición de espesor, espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV-1800 para propiedades ópticas y simulador solar ORIEL LCS-100 para curvas J-V (figura 1).



Figura 1: Dispositivos de caracterización de izquierda a derecha: Perfilómetro AMBios XP-200 para medición de espesor, espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV-1800 para propiedades ópticas y simulador solar ORIEL LCS-100 para curvas J-V.

Metodología de Desarrollo

Levantamiento de Requerimientos

Se llevó a cabo una capacitación sobre procedimientos experimentales, manejo de equipos y protocolos de procesamiento manual. Aplicando enfoque de zona de desarrollo próximo de Vygotsky [7], donde expertos del laboratorio capacitaron Análisis del Método Manual: Se documentó el proceso tradicional: apertura e importación de archivos en Excel, limpieza y formateo de datos, exportación vía copiar-pegar a OriginPro y graficación.

Selección de Herramientas

Python posee librerías en: procesamiento de datos (numpy, pandas, etc.), visualización (matplotlib, seaborn, plotly etc.) e interfaces gráficas (tkinter, PyQt, Kivy y PySimpleGUI). Además de su facilidad de aprendizaje, una gran comunidad y múltiples aplicaciones.

Integración de inteligencia artificial

Con el uso de los chatbots de Chatgtp, Claude y Deepseek, como herramienta de asistencia, proporcionando contexto específico sobre formatos de archivo y requerimientos técnicos. El proceso incluyó:

- Iteración con la IA sobre conceptos relevantes, mediante chats donde guarda temporalmente los datos para contextualizarse.
- Generación iterativa de código con supervisión y depuración humana.

Arquitectura Modular

Para facilitar su programación y uso se optó por desarrollar módulos independientes para cada tipo de análisis, integrándolos en una aplicación principal como una interfaz gráfica unificada.

Resultados y Discusión

El producto final es una suite informática que integra varios módulos que realizan un procesamiento de datos de los archivos nativos provenientes del software propietario de los equipos de caracterización (figura 2).



Figura 2: Interfaz gráfica de la suite.

Cada módulo es capaz de la lectura directa de archivos nativos, procesamiento automático de datos, opciones de personalización gráfica, automatizando el procesamiento de datos (figura 3). En la figura 4 se pueden observar los resultados al graficar en OriginPro y en la suite,

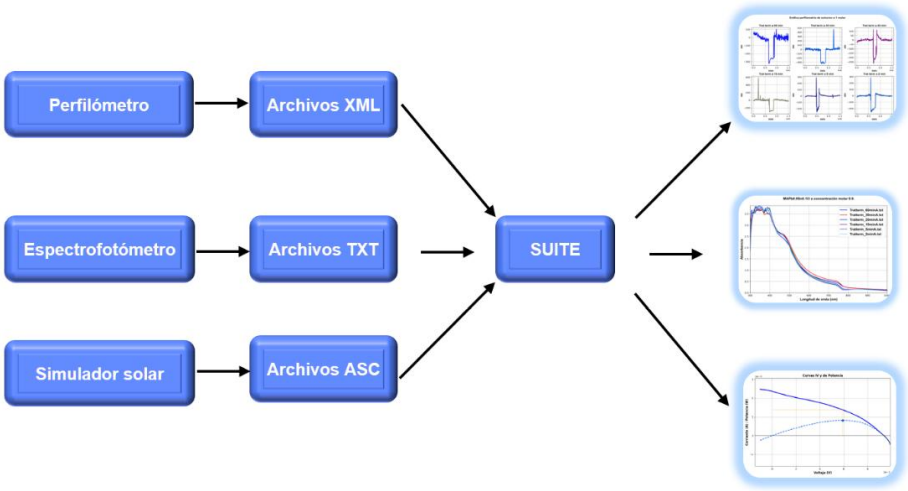


Figura 3: Proceso automatizado de análisis de datos experimentales mediante la suite.

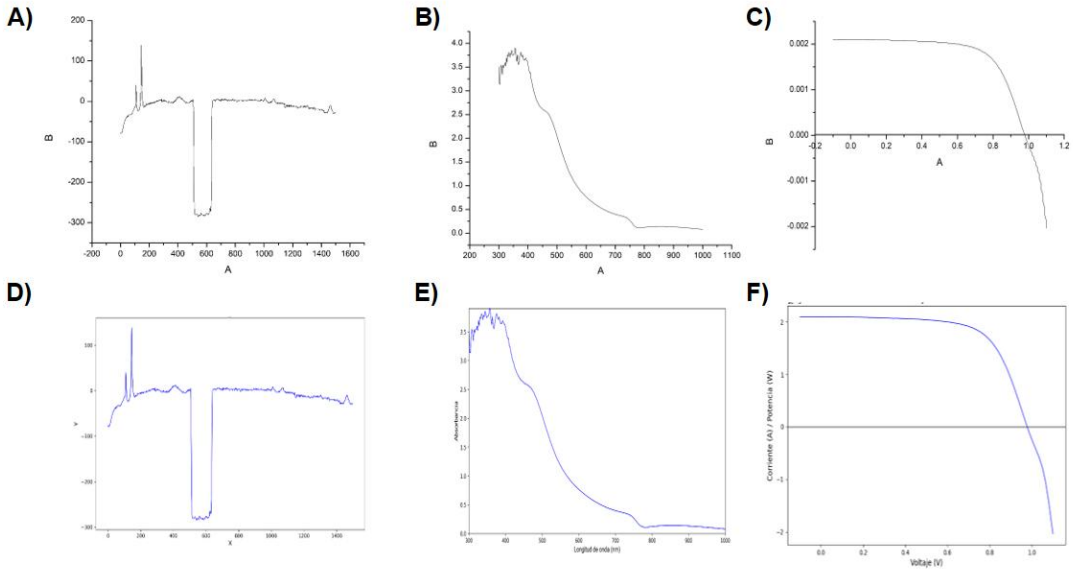


Figura 4: Graficas de perfilometría, absorbancia y curva JV en OriginPro (A, B y C) y suite (D, E y F)

Reducción de Tiempo

Eliminando el procesamiento manual de los archivos nativos para extraer los datos de intereses, darles el formato necesario para graficarlos en Origin. Reduce considerablemente el tiempo invertido para obtener las gráficas de los datos, para evidenciarlo se cronometro el procesamiento de 10 archivos:

- Perfilometría: 285 min → 3 min (98.9% reducción)
- Absorbancia: 185 min → 3 min (98.4% reducción)
- Curvas J-V: 340 min → 5 min (98.5% reducción)

Conclusiones

El desarrollo de herramientas propietarias y hechas a la medida es una alternativa viable ya que automatiza el procesamiento de archivos nativos provenientes de dispositivos de caracterización de celdas solares de perovskita. Con el uso de las herramientas integradas en la suite se puede lograr una reducción de hasta 98.9 % en el tiempo de procesamiento otras ventajas son que elimina la dependencia de software comercial

y disminuyendo los errores derivados del procesamiento cíclico manual. La metodología presentada tiene el potencial del desarrollo de soluciones informáticas personalizables a otros entornos de laboratorio. Constituyendo un aporte significativo en la investigación de perovskitas con aplicaciones fotovoltaicas ya que acelera el análisis de resultados experimentales y el investigador puede enfocarse en otros aspectos de su investigación.

Agradecimientos

Se agradece a los apoyos financieros de los proyectos UNAM.

Referencias

[1] Quiñones, C. J., Antunez, L. E., Krujoski, M. G., & Koloziej, J. E. (2024). Desarrollo de software de análisis de datos de voltamperometría cíclica en Python con interfaz gráfica. JIDeTEV, (14).

[2] Python, W. (2021). Python. *Python releases for windows*, *24*.

[3] Fernandez, A. (2013). *Python 3 al descubierto*. Alfaomega Grupo Editor.

[4] Navlani, A., Fandango, A., & Idris, I. (2021). *Python Data Analysis: Perform data collection, data processing, wrangling, visualization, and model building using Python*. Packt Publishing Ltd.

[5] Johnson, J. L., tom Wörden, H., & van Wijk, K. (2015). PLACE: an open-source python package for laboratory automation, control, and experimentation. Journal of Laboratory Automation, 20(1), 10-16.

[6] Hielscher, M. M., Dörr, M., Schneider, J., & Waldvogel, S. R. (2023). LABS: Laboratory automation and batch scheduling–a modular open source Python program for the control of automated electrochemical synthesis with a web interface. Chemistry–An Asian Journal, 18(14), e202300380.

[7] Vygotsky, L. S. (1978). Mind in society: The development of higher psychological processes (Vol. 86). Harvard University Press.

[8] Chen, C., Maqsood, A., & Jacobsson, T. J. (2023). The role of machine learning in perovskite solar cell research. Journal of Alloys and Compounds, 960, 170824.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO Y CELDAS PELTIER CON SEGUIMIENTO PARA LA GENERACION DE ENERGÍA TÉRMICA Y ELÉCTRICA

José D Gámez Avilez, Saúl Islas Pereda y Naomi A Saguchi Perez de Alva
Centro de estudios de las energías renovables, Instituto de ingeniería , Calle Normal s/n Blvd. Benito Juárez Col. Insurgentes Este, Parcela 44, 21100 Mexicali, B.C. México, 6864248180, jose.daniel.gamez.avilez@uabc.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología de dimensionamiento para sistemas híbridos que integran colectores cilindro-parabólicos (CCP) con módulos termoeléctricos tipo Peltier (TEC-12706). El enfoque metodológico incluye el análisis del recurso solar local, el cálculo óptico-geométrico del colector, la evaluación de condiciones térmicas y eléctricas requeridas por los módulos termoeléctricos, así como la estimación de potencias de entrada y salida mediante simulación y validación experimental de los módulos. Se simuló un prototipo con un absorbedor rectangular no convencional, al que se integraron 24 módulos termoeléctricos acoplados a un CCP con una apertura de 1 m². Se planteó un modelo térmico-eléctrico para el módulo tipo Peltier del sistema y se validó en un banco de pruebas de módulos termoeléctricos, obteniendo una precisión del ±5 %.

En condiciones estándar (1000 $\frac{W}{m^2}$ de irradiancia y 25 °C), el sistema generó hasta 6.8 W de potencia eléctrica con un diferencial térmico de 38 °C, y un aumento de temperatura del fluido caloportador superior a 6 °C. La eficiencia global alcanzó un 73.38 %. Este trabajo enfatiza el desarrollo de una metodología replicable para el diseño de sistemas compactos de cogeneración en aplicaciones rurales o en entornos extremos.

ABSTRACT

This work presents a sizing methodology for hybrid systems integrating parabolic trough collectors (PTC) with Peltier-type thermoelectric modules (TEC-12706). The methodological approach includes analysis of local solar resources, optical-geometric calculations of the collector, evaluation of thermal and electrical conditions required by the thermoelectric modules, and estimation of input/output power through simulation and experimental validation of the modules. A prototype was simulated using a non-conventional rectangular absorber, integrating 24 thermoelectric modules coupled to a PTC with a 1 m² aperture. A thermal-electrical model was developed for the Peltier module and validated on a thermoelectric module test bench, achieving ±5% accuracy.

Under standard conditions (1000 $\frac{W}{m^2}$ irradiance, 25 °C), the system generated up to 6.8 W of electrical power with a 38 °C thermal differential and a heat transfer fluid temperature increase exceeding 6 °C. Overall efficiency reached 73.38%. This work emphasizes developing a replicable methodology for designing compact cogeneration systems in rural applications or extreme environments.
Palabras clave: Colector cilindro-parabólico, Termoelectricidad, Hibridación energética, Cogeneración, Dimensionamiento

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por los efectos del cambio climático y la crisis ambiental global ha impulsado la transición hacia fuentes de energía renovable que sean sostenibles, limpias y eficientes. En este contexto, la energía solar se posiciona como una de las alternativas más prometedoras debido a su disponibilidad, abundancia y bajo impacto ambiental [1]. A pesar de ello, en países como México, su aprovechamiento sigue siendo limitado, particularmente en zonas con alta irradiación como Baja California [2].

En el ámbito de la energía térmica, los colectores cilindro parabólicos (CCP) representan una tecnología madura con capacidad para generar temperaturas de hasta 300 °C, ideales para aplicaciones industriales [3]. Sin embargo, su implementación a pequeña escala enfrenta barreras técnicas y económicas, especialmente por la complejidad en la manufactura de absorbedores y la necesidad de sistemas de seguimiento solar [4]. Paralelamente, los módulos termoeléctricos tipo celda Peltier han emergido como una alternativa versátil para la generación directa de electricidad a partir de gradientes térmicos, sin partes móviles, aunque con eficiencias moderadas [5]. Ante este panorama, la integración de tecnologías CCP con módulos termoeléctricos, en un enfoque híbrido, permite combinar las ventajas de ambos sistemas: alta captación térmica y conversión directa de calor a electricidad [6]. Esta combinación resulta especialmente atractiva para entornos aislados o rurales donde se requiere cogeneración eficiente de energía [7].

Este artículo presenta una metodología de dimensionamiento para sistemas híbridos denominados CCP-TEG, enfocada en optimizar el diseño de absorbedores planos modificados acoplados a módulos Peltier, con base en parámetros térmicos, eléctricos, ópticos y geométricos. La metodología tiene como objetivo facilitar la implementación de sistemas compactos y escalables capaces de generar simultáneamente calor y electricidad en condiciones reales de operación.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO CCP-TEG

El sistema híbrido desarrollado integra un colector cilindro-parabólico (CCP) con un absorbedor térmico rectangular adaptado para el acoplamiento de módulos termoeléctricos tipo Peltier, lo que permite la generación simultánea de energía térmica y eléctrica. Esta hibridación responde a la necesidad de superar barreras técnicas de los colectores solares convencionales, mediante una configuración que aprovecha el flujo de calor concentrado en el receptor para alimentar dispositivos termoeléctricos de estado sólido [8].

El colector consiste en un reflector de geometría cilindro-parabólica de 1 metro de longitud que busca tener $1m^2$ de apertura, construido con lámina de acrílico reflectivo. El sistema está montado sobre una estructura con capacidad de orientación sobre un eje con seguimiento solar manual o automático para maximizar la captación solar directa y satisfacer las necesidades de un sistema como se muestra en la Figura 1).

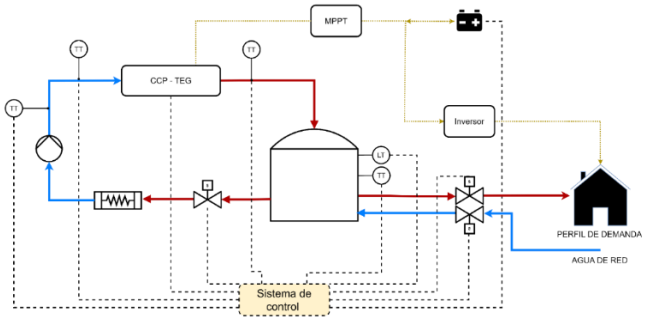


Figura 1. Diagrama de conexiones del sistema co-generativo.

El absorbedor no convencional fue diseñado con geometría rectangular en lugar del tubo receptor tradicional, a fin de permitir una mejor adaptación superficial de los módulos termoeléctricos TEC-12706. (Figura 2). Sobre la cara superior del absorbedor (la cual recibe directamente la radiación concentrada del colector) se colocaron 24 módulos Peltier dispuestos linealmente a lo largo del eje focal. A diferencia de configuraciones tradicionales que utilizan disipadores externos, en este diseño el propio absorbedor cumple una doble función: actúa como superficie de captación térmica y, simultáneamente, como sistema de disipación térmica para el lado frío de los módulos Peltier. De esta manera, el calor incidente eleva la temperatura del lado caliente del módulo, mientras que el fluido extrae el calor residual del lado opuesto, manteniendo así el gradiente térmico necesario para la generación de electricidad.

La eficiencia eléctrica generada depende directamente del gradiente térmico entre ambos lados del módulo, por lo que el diseño prioriza minimizar las pérdidas por conducción y maximizar el contacto térmico [9].

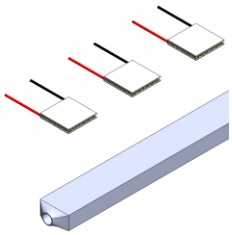


Figura 2. Propuesta del absorbedor modificado.

El diseño fue validado en el simulador y mediante un banco de pruebas experimental de módulos termoeléctricos que incluyó sensores de temperatura tipo K, multímetros para la medición voltaje y corriente generada, así como un control de flujo de calor variable para simular diferentes condiciones operativas. La validación experimental mostró una concordancia del ±5 % con los valores obtenidos por simulación computacional, confirmando la precisión del modelo térmico-eléctrico planteado [10] [11].

METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO

En este apartado se describe el procedimiento seguido para dimensionar el sistema híbrido CCP-TEG, considerando criterios ópticos, geométricos, térmicos y eléctricos. La metodología parte del análisis del recurso solar disponible en el sitio de instalación, seguido por la definición de los requerimientos térmicos y eléctricos de los módulos termoeléctricos, así como la estimación de la energía solar necesaria para cumplir con dichos requerimientos. Además, se detalla el diseño geométrico del colector cilindro parabólico, el cálculo de su área de apertura, la determinación del ángulo de borde óptimo y la evaluación del punto focal. Finalmente, se presentan las ecuaciones empleadas para calcular el calor útil disponible y se discute el proceso de validación mediante simulación óptica y trazado de rayos**.**

1. Análisis del recurso solar y potencia requerida

Se inició con un análisis del recurso solar directo, empleando datos climatológicos del sitio de estudio en Mexicali, Baja California. A partir de estos datos, se generó un histograma de frecuencias de irradiancia solar para identificar las horas y periodos del año con mayor potencial energético (Figura 3). Este análisis permitió establecer que el rango predominante de irradiancia se ubica entre 600 y 800 $\frac{W}{m^2}$ durante el horario de 8:00 a 18:00 h, lo que se consideró como base para la operación del sistema.

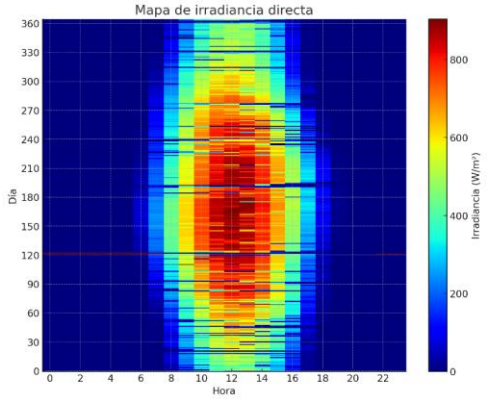


Figura 3. Frecuencia de la potencia de irradiancia en Mexicali, Baja California.

Con esta información se dimensionó el sistema en función del comportamiento térmico de los módulos termoeléctricos TEC-12706, previamente caracterizados en un banco experimental. Los resultados de estas pruebas, mostrados en la Tabla 1 y Tabla 2, indicaron que, con entradas térmicas entre 15 W y 30 W, los módulos son capaces de generar salidas eléctricas cercanas a 1 V. A partir de ello, se definió una configuración con 24 módulos conectados en arreglos para obtener salidas estándar de 12 V o 24 V.

Tabla 1. Concentrado de experimentos a diferente resistencia de carga con potencia de entrada de 15W (izquierda) y 30W (derecha).

R_load	*V_out*	*Eff*	Potencia
1.25	0.24	0.30725326	0.04608
1.6	0.28	0.3267233	0.049
2	0.33	0.36306293	0.05445
2.5	0.37	0.36512996	0.05476
3.33	0.45	0.40547569	0.06081081
5	0.57	0.4332751	0.06498
6.66	0.67	0.44942725	0.0674024
10	0.79	0.4161388	0.06241
20	0.96	0.30725326	0.04608
30	1.09	0.26406799	0.03960333

R_load	*V_out*	*Eff*	Potencia
1.25	0.21	0.11620553	0.03528
1.42	0.61	0.86311678	0.26204225
2	0.71	0.83020422	0.25205
2.5	0.83	0.90764163	0.27556
3.33	1.01	1.00901297	0.30633634
5	1.27	1.06251647	0.32258
6.66	1.45	1.03982441	0.31569069
10	1.73	0.98580369	0.29929
20	1.94	0.61982872	0.18818
30	2.15	0.50752086	0.15408333

2. Dimensionamiento del colector cilindro-parabólico (CCP)

El cálculo del área de apertura del colector basado en el análisis de la Figura 4, se tomó como base la irradiancia mínima útil de 600 $\frac{W}{m^2}$ y en la necesidad de proporcionar al menos valores de voltaje antes mencionado, por lo que se determinó el área de apertura y el calor total de entrada en el absorbedor mediante el uso de las siguientes fórmulas básicas para determinar el calor solar incidente sobre el área de apertura:

$$A_P = A_L \cdot \Delta_{PL} \cdot \Delta_{PL}^2 \qquad (1)$$

$$Q_{IN} = A_P \cdot I_B \qquad (2)$$

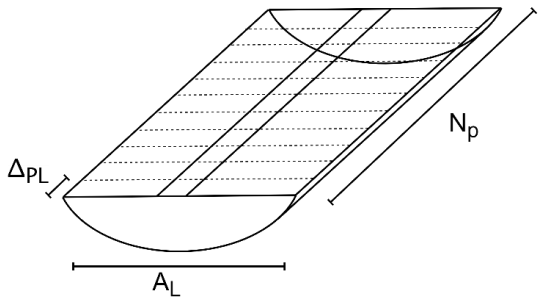


Figura 41. Esquema general para el dimensionamiento preliminar del prototipo CCP-TEG.

Donde se determinó que se tiene un calor de entrada de 23.05 W, valor con el que se pueden alcanzar voltajes de salida menores a 1v y que en su conjunto con el total de los módulos lograrían alcanzar los valores estimados de 12 a 24v.

Además, se realizaron simulaciones ópticas en MATLAB para posteriormente analizar el trazado de rayos en TracePro y determinar la altura del punto focal en función de diferentes ángulos de borde como se muestra en la Figura 5. Los resultados mostraron que, a partir de un ángulo mayor de 45°, comienzan a registrarse pérdidas significativas de rayos fuera del receptor. Este análisis permitió optimizar el diseño geométrico del colector para maximizar la concentración de energía solar.

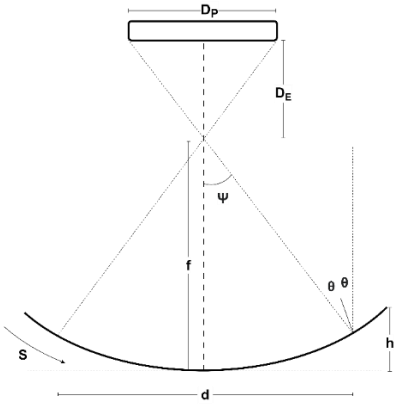


Figura 5. Análisis geométrico para la determinación de la distancia focal y el ángulo de borde.

El punto focal se define mediante la distancia de la apertura en la parábola (d) y el ángulo de apertura (ψ). La distancia focal es la medida desde el vértice de la parábola hasta el punto donde los rayos paralelos a su eje se concentran y se definen mediante la siguiente formula:

$$f = \frac{d}{4\tan(\psi)} \qquad (3)$$

Consecuentemente se calcula la distancia en la que debe estar el receptor en función del ángulo de borde con el cual por medio de una razón trigonométrica se determina su distancia:

$$D_E = \frac{\frac{D_P}{2}}{tan(\psi)} \qquad (4)$$

Además, se calcula la elevación de la parábola desde su vértice hasta su apertura máxima denominada como altura (h) y es calculada con el fin de analizar la curvatura que tendrá la superficie y así finalmente encontrar la longitud de arco y finalmente su superficie total:

$$h = \frac{d^2}{16f} \qquad (5)$$

$$S = \left(\frac{d}{2}\sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1}\right) + 2fln\left(\frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1}\right) \qquad (6)$$

Para el diseño del colector parabólico, se determinó que el ángulo de borde óptimo es 45° o menor, ya que ángulos mayores generan pérdidas significativas de los rayos solares. Este comportamiento fue identificado mediante simulaciones en TracePro, donde se evaluó el impacto de diferentes ángulos de borde sobre la trayectoria de los rayos solares como se muestra en Figura 6.

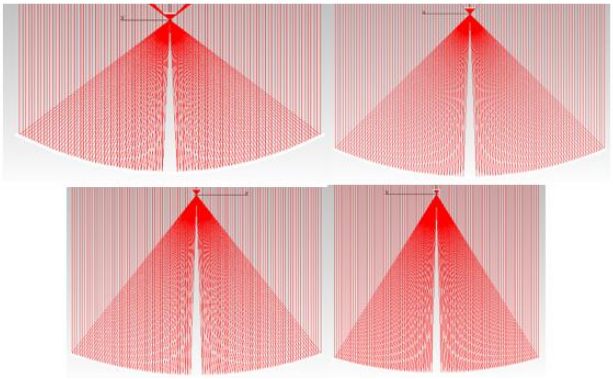


Figura 6. Análisis de trazado de rayos a diferente ángulo de borde.

El análisis mostró que, a medida que el ángulo de borde supera los 45°, una porción creciente de los rayos incidentes no es redirigida hacia el receptor, resultando en pérdidas ópticas. En contraste, ángulos iguales o menores a 45° permiten una concentración más eficiente de la radiación sobre el área útil del receptor, optimizando así el desempeño del sistema.

RESULTADOS

Los datos obtenidos durante la caracterización experimental de los módulos termoeléctricos (TEC1-12706) fueron utilizados para parametrizar y validar el modelo térmico-eléctrico del sistema híbrido. Este modelo representa la integración de un colector cilindro-parabólico de 1 m² con un absorbedor rectangular al que se acoplaron 24 módulos Peltier. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas que simulan una irradiancia de 1000 W/m², temperatura ambiente de 25 °C y fluido caloportador a 25 °C, sin presencia de viento [12]. Esta información experimental permitió simular el desempeño del sistema con una precisión del ±5 % en diferentes escenarios operativos.

Resultados térmicos

Al realizar la simulación del sistema considerando el seguimiento solar y durante la operación continua, se observó un incremento promedio en la temperatura del fluido caloportador de 6.3 °C, comparable con sistemas CCP tradicionales de similares dimensiones. La Figura 7 muestra la evolución de temperatura en el fluido, validando que el diseño de absorbedor rectangular mantiene una buena transferencia térmica pese a la integración de los módulos termoeléctricos.

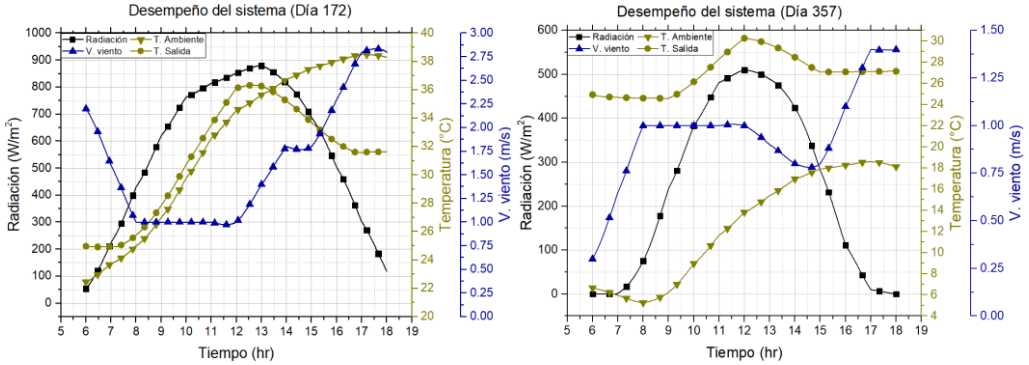


Figura 7. Salida de potencia y temperatura del sistema en el día 172 (izquierda) y día 357 (derecha).

Resultados eléctricos

En cuanto a la generación termoeléctrica, se obtuvo una potencia eléctrica máxima de 4.7 W, producto de un diferencial térmico de 38 °C entre la cara caliente y la cara fría de los módulos. Este diferencial fue generado por la concentración solar y el adecuado diseño de disipación térmica en el lado frío. La relación entre el diferencial térmico y el voltaje generado por módulo se presenta en la Figura 8.

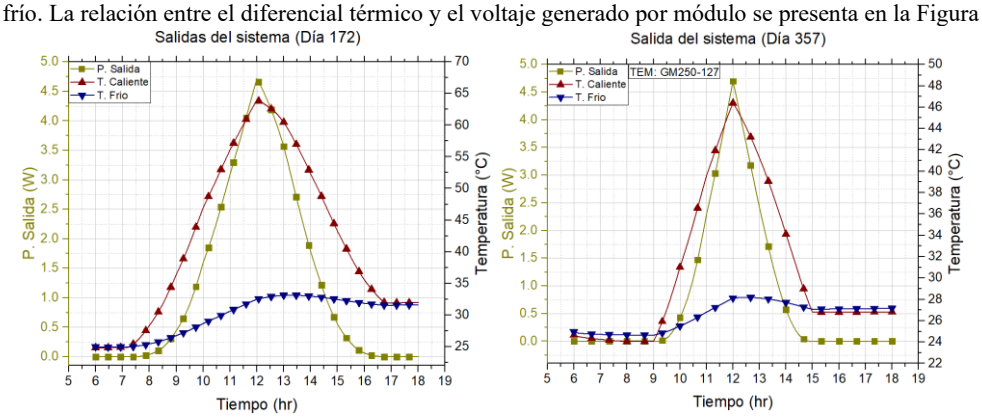


Figura 8. Salida de potencia y temperatura del sistema en el día 172 (izquierda) y día 357 (derecha).

Validación del simulador

El comportamiento térmico-eléctrico del sistema fue simulado en un entorno computacional desarrollado en MATLAB. Para representar la irradiancia solar en el modelo, se utilizó como entrada la potencia térmica equivalente generada por el banco experimental, es decir, la potencia eléctrica suministrada a la resistencia que simula el flujo de calor solar , previamente validada como representativa del comportamiento real del sistema. De este modo, el modelo asumió directamente dicho valor como calor de entrada y salida. Los resultados del simulador mostraron una desviación máxima del ±5 % respecto a los valores medidos, como se observa en la Figura 9. Estas eficiencias fueron determinadas mediante balance de energía y análisis de exergía sobre el absorbedor, considerando pérdidas por conducción,

convección y radiación [13].

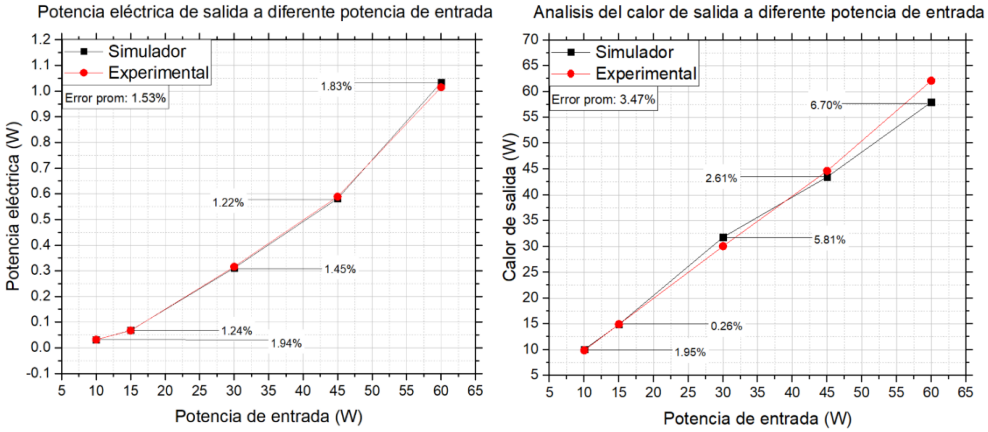


Figura 9.Validación del calor de salida y la potencia de salida a diferente potencia eléctrica de entrada.

CONCLUSIONES

La integración de módulos termoeléctricos tipo Peltier a un colector cilindro parabólico (CCP) demostró ser una solución efectiva para la cogeneración simultánea de energía térmica y eléctrica, optimizando el aprovechamiento de la radiación solar en un sistema compacto. El modelado térmico-eléctrico permitió predecir el comportamiento del sistema con una precisión del ±5 %, validando la metodología propuesta para el dimensionamiento de estos sistemas híbridos.

La configuración desarrollada alcanzó una eficiencia global del 73.38 %, destacando su potencial para aplicaciones rurales o industriales que demandan soluciones energéticas descentralizadas. Además, se observó que el desempeño termoeléctrico depende fuertemente del diferencial térmico mantenido entre el absorbedor y el disipador, confirmando la importancia del diseño térmico integral del sistema.

Este estudio sienta las bases para el desarrollo de simuladores más robustos y para futuras mejoras en la selección de materiales termoeléctricos y geometrías de absorción, encaminadas a incrementar la eficiencia eléctrica sin comprometer la eficiencia térmica del sistema.

REFERENCIAS

Becerra M.R., Mance H., Rey X.B. y Arbeláez C.G. (2015). Cambio climático: lo que está en juego.

Reyes-Caballero F., Fernández-Morales F.H. y Duarte J.E. (2016). Panorama energético, Rev. Investig. Desarro. E Innov., Vol. 7, No. 1.

Energía solar térmica en procesos industriales, Interempresas. Consultado: 7 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.interempresas.net/Autoconsumo/Articulos/358591-Energia-solar-termica-en-procesos-industriales.html

Solís A. México tiene un millón de habitantes sin acceso a electricidad, Bloomberg Línea. Consultado: 3 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.bloomberglinea.com/2022/05/18/mexico-tiene-un-millon-de-habitantes-sin-acceso-a-electricidad/

Pereña J.A.V. y Navarro H.O.O. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*.

Brooks M.J., Mills I. y Harms T.M. (2006). Performance of a parabolic trough solar collector, J. Energy South. Afr., Vol. 17, No. 3, p. 71-80.

Kalogirou S.A. (2004). Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 3, p. 231-295.

Thongsan S., Prasit B., Suriwrong T., Mensin Y. y Wansungnern W. (2017). Development of solar collector combined with thermoelectric module for solar drying technology, Energy Procedia, p. 1196-1201.

Raygoza P.J.C.C. (2021). Desalinización de agua en zonas áridas costeras, con tecnología que utiliza energía solar en forma pasiva.

Felsberger R., Buchroithner A., Gerl B. y Wegleiter H. (2020). Conversion and testing of a solar thermal parabolic trough collector for CPV-T application, Energies, Vol. 13, No. 22.

Agarwal P. et al. (2021). Experimental investigation of solar still operated with paraffin wax, peltier module and parabolic trough collector for desalination of brackish water, JETIR, Vol. 8.

Leonov V. (2011). Simulation of maximum power in the wearable thermoelectric generator with a small thermopile, Microsystem Technologies, p. 495-504.

Zhao D. y Tan G. (2014). A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications, Applied Thermal Engineering, Vol. 66, No. 1-2, p. 15-24.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ENERGÍAS RENOVABLES COMO EJE TRANSVERSAL EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR: ENFOQUE INTERDISCIPLINARIO PARA UN FUTURO SOSTENIBLE

L.G. Ceballos-Mendivil[1], R.A. Soto-Rojo[2], J.A. Baldenebro-López[3]
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Prol. A. Flores y Fuente de Poseidón S/N, Los Mochis, Sinaloa, 81223, México, Tel. 668812641, **laura.ceballos@uas.edu.mx, rody.soto@uas.edu.mx, jesus.baldenebro@uas.edu.mx.**

J.C. Luque-Ceballos
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales, Hermosillo, Sonora, 83000, México, Tel. 6622592100, **jonathan.luque@unison.mx**.

RESUMEN

La enseñanza de las energías renovables (ER) requiere trascender los límites de las ingenierías y ciencias técnicas, por lo que es necesario sean incorporadas de manera transversal en diversas disciplinas de la educación superior, favoreciendo la formación de profesionales capaces de abordar desafíos de sostenibilidad con distintos enfoques. La necesidad de integrar las ER en programas educativos con diversas áreas del conocimiento (ciencias sociales, administrativas, humanidades, entre otras), promueven una conciencia crítica sobre el impacto ambiental y social del modelo energético actual mediante el fomento de un enfoque interdisciplinario para un futuro sostenible.

En la actualidad, se presentan desafíos globales como cambio climático, pobreza y desigualdad, los cuales exigen respuestas integrales desde múltiples sectores, incluida la educación superior, estando las ER posicionadas como estrategias orientadas a la sostenibilidad y al fomento de la conciencia ambiental en la formación de profesionales universitarios hacia un futuro sostenible. La transición mundial hacia las energías limpias exige una transformación en el sector académico, enfrentando desafíos ambientales cada vez más urgentes, donde las generaciones presentes y futuras promuevan la importancia de las fuentes de energía sustentables.

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis sobre la incorporación de las ER como eje transversal en la educación superior, siendo una estrategia clave para lograr la interdisciplinariedad en los programas educativos de diversas áreas del conocimiento, abarcando la exploración de tecnologías emergentes, la promoción al respeto por el medio ambiente, el conocimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las fuentes de ER, tomando en cuenta las funciones sustantivas universitarias —educación, investigación, gestión institucional, cultura ambiental y responsabilidad social—. Por último, se plantea que la incorporación efectiva de las energías renovables en la educación superior requiere de una serie de acciones articuladas, entre las que destacan: el rediseño curricular para incluir asignaturas o módulos específicos sobre sostenibilidad energética, la capacitación continua del personal docente en temas relacionados con el desarrollo sostenible, el fortalecimiento de vínculos con el sector energético tanto público como privado, y la promoción de una cultura energética mediante la implementación de proyectos integradores orientados al diseño y aplicación de soluciones energéticas sostenibles.

Palabras claves: *energías renovables, educación superior, interdisciplinario, sostenibilidad*.

ABSTRACT

Renewable energy (RE) education must go beyond the boundaries of engineering and technical sciences. Integrating RE across diverse fields of study in higher education is essential to prepare professionals capable of addressing sustainability challenges from multiple perspectives. By incorporating RE into programs in the social, administrative, and humanities disciplines, students can gain a critical understanding of the environmental and social impacts of the current energy model. This interdisciplinary approach is key to building a sustainable future.

Today, global challenges such as climate change, poverty, and inequality demand comprehensive responses involving all sectors, including higher education. Renewable energy is not only a tool for advancing sustainability but also a catalyst for fostering environmental awareness among university graduates. The global transition toward clean energy requires academia to respond proactively to urgent environmental issues. For both current and future generations, understanding the importance of sustainable energy sources is crucial.

This paper analyzes the integration of RE as a cross-cutting theme in higher education—a strategy essential for promoting interdisciplinary approaches across a wide range of disciplines. It involves exploring emerging technologies, fostering environmental stewardship, raising awareness of the Sustainable Development Goals (SDGs), and strengthening universities' core functions: teaching, research, institutional management, environmental culture, and social responsibility. To effectively embed RE into higher education, this work proposes several coordinated actions: redesigning curricula to include specific courses or modules on energy sustainability; providing continuous professional development for academic staff in sustainability-related topics; enhancing collaboration with public and private energy sectors; and promoting an energy-conscious culture through integrative projects aimed at designing and implementing sustainable energy solutions.

Keywords: *renewable energy, higher education, interdisciplinary, sustainability.*

INTRODUCCIÓN

La transición energética es el cambio ordenado de generación de electricidad para migrar de fuentes convencionales hacia energías limpias

con sustentabilidad y la Secretaría de Energía (SENER) está comprometida con inclusión social que proteja el medio ambiente. La política de transición energética ha avanzado en diversificación al considerar distintas fuentes y tecnologías para la generación de energías limpias, lo cual fortalece la capacidad de suministrar electricidad a todos los sectores del país, bajo los principios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad, resiliencia y sustentabilidad, contribuyendo a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y refuerza la soberanía energética de la nación [1]. La transición energética constituye un pilar fundamental en las políticas públicas y los marcos normativos internacionales orientados a mitigar el cambio climático y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles aun cuando su puesta en marcha ha evidenciado algunas desigualdades estructurales, diversos proyectos energéticos en nuestro país han replicado conflictos socioambientales, principalmente por la ausencia de procesos de consulta previa y de mecanismos efectivos de participación comunitaria, por lo que la transición energética no es sólo un cambio tecnológico en la matriz energética, sino que también debe incorporar principios de justicia social y territorial [2].

La reforma constitucional del sector energético en México, implementada en 2013, facilitó la inversión privada en el ámbito eléctrico y marcó un punto de partida hacia la adopción de energías limpias. En este contexto, el papel creciente de las energías renovables introduce importantes retos en términos de flexibilidad y estabilidad para el sistema eléctrico nacional. Frente a este panorama, una de las prioridades urgentes para los responsables de política pública debe ser el establecimiento de una definición legal del almacenamiento de energía y de un diseño de un marco regulatorio claro, que permita su integración efectiva al mercado eléctrico y para ésto se requiere dirigir esfuerzos hacia el financiamiento de tecnologías emergentes y la implementación de incentivos financieros que aceleren la inversión en proyectos de almacenamiento. En el corto plazo, los objetivos de contratación pública pueden constituir una herramienta estratégica para dinamizar la creación de mercados de almacenamiento y fortalecer la transición energética del país [3].

La sostenibilidad ambiental en instituciones educativas es una preocupación para abordar desafíos globales que promuevan conciencia ambiental, adopten energías limpias y reduzcan costos [4], existiendo prejuicios que la sustentabilidad en la educación es exclusiva de ciertas disciplinas, siendo prioritario el trabajo interdisciplinario y colaborativo. Es fundamental integrar esta educación en currículos, fortaleciendo competencias de estudiantes y la formación del personal académico, articulando la investigación con la enseñanza [5].

La crisis ambiental global exige una transformación profunda en la educación superior, en donde las Instituciones de Educación Superior (IES) tienen un papel importante para encabezar los procesos formativos orientados hacia sostenibilidad. Esta transición requiere modelos educativos que integren la interdisciplinariedad como eje central, articulando saberes técnicos, sociales y ambientales para formar profesionales capaces de abordar de manera sistémica los retos de un mundo cada vez más complejo y vulnerable. Por lo tanto, las IES deben comprometerse con la inserción de las energías renovables en sus planes de estudios como eje transversal interdisciplinario, asegurando que todos los estudiantes, sin importar su disciplina, egresen con conocimientos sobre desafíos ambientales, promoviendo así el desarrollo sostenible. Este proceso implicará aspectos como la creación de nuevas carreras orientadas a las energías renovables y conocimientos sobre planificación y regulación de la producción y uso de energía, evaluación de riesgos y eficiencia energéticos, entre otras áreas emergentes. Asimismo, será fundamental revisar y actualizar los planes de estudio de programas ya existentes, así como formar los recursos humanos necesarios para cumplir con los objetivos de sostenibilidad establecidos. En este trabajo, se analizarán antecedentes nacionales e internacionales en materia de educación e investigación energética y se propondrán estrategias concretas para consolidar la formación profesional en México con miras a una transición energética justa y sostenible con el objetivo de establecer lineamientos para integrar transversalmente las ER en la educación superior, fortaleciendo el rol de las IES como agentes de cambio, abarcando sus funciones sustantivas (docencia, investigación, extensión, vinculación y gestión) para la promoción de un futuro energético más limpio, equitativo y consciente.

LINEAMIENTOS EDUCATIVOS PARA UN FUTURO SOSTENIBLE

Desde 1972, la Organización de las Naciones Unidas ha señalado la importancia de integrar el enfoque ambiental en los sistemas educativos a nivel global. Asimismo, ha impulsado que las IES asuman un rol ejemplar en materia de responsabilidad ambiental, promoviendo la participación tanto del gobierno como de la sociedad civil en la búsqueda de soluciones integrales a los problemas ecológicos. En respuesta, diversas IES mexicanas han desarrollado propuestas orientadas a integrar la sustentabilidad en sus funciones sustantivas examinando planteamientos para comprender, adaptar y socializar estos enfoques, aun cuando son evidenciadas convergencias problemáticas, objetivos poco articulados y estrategias débiles, cuyo impacto en las dinámicas universitarias ha sido limitado y, en ocasiones, solamente simbólico [6].

La Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS) se reconoce como un componente integral de una educación de calidad, plenamente alineada con el principio de aprendizaje a lo largo de la vida donde todas las instituciones educativas —desde la educación inicial hasta la educación superior— tienen la responsabilidad de abordar de manera significativa los temas vinculados al desarrollo sostenible, así como de fomentar en los estudiantes las competencias necesarias para actuar en favor de la sostenibilidad. La EDS proporciona un aprendizaje con sentido, pertinente y transformador, especialmente frente a los desafíos sociales, ambientales y económicos que enfrenta el mundo contemporáneo [7]. En Argentina, la Ley Yolanda promueve educación ambiental integral, destacando la importancia de enseñar sobre eficiencia energética y uso de ER como parte de la formación ambiental [8].

De acuerdo con la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES) [9], en las IES mexicanas se implementan estrategias orientadas a la consolidación de modelos de Universidad Sustentable, alineadas en ejes estratégicos que incluyen: formulación de planes de gestión ambiental a largo plazo, integración de políticas de eficiencia energética, optimización en el uso de recursos naturales, separación y reciclaje de residuos, así como el diseño y mantenimiento de infraestructura verde. Además, se promueve la adopción de criterios de adquisiciones sustentables, desarrollo de programas de educación y sensibilización ambiental dirigidos a la

comunidad universitaria, y la transversalización de la dimensión ambiental en los planes curriculares, garantizando la formación de competencias para la sostenibilidad. Es por ello por lo que las IES juegan un papel importante en la formación en materia ambiental para disminuir el deterioro de los ecosistemas y mejorar la calidad de vida de la sociedad [10].

La educación ambiental promueve la enseñanza de las interrelaciones del humano con la naturaleza, concientiza e influye en las costumbres insustentables de las comunidades, naciendo en los límites de las ciencias humanas y ciencias exactas, por lo que incentiva a romper paradigmas teóricos y epistemológicos disciplinares que predominan en el ámbito académico [11].

Por lo tanto, existe la necesidad de formar profesionales capaces de asumir valores y actitudes orientadas al uso racional y eficiente de la energía, en donde las IES desempeñan un papel estratégico mediante la implementación de una educación energética fundamentada en las demandas sociales y en los objetivos del modelo de desarrollo sostenible. Esta formación busca promover una actitud proactiva hacia el consumo responsable de los recursos energéticos, fomentando en los estudiantes una cultura de ahorro y eficiencia que, en el corto plazo, genere beneficios ambientales tangibles. No obstante, alcanzar este propósito implica un cambio significativo en los patrones de comportamiento, lo cual requiere un esfuerzo educativo integral y coordinado por parte de todos los actores involucrados en el proceso formativo [12]. Además, se realizan estudios para abordar la sustentabilidad en la universidad en tres dimensiones: universidad integral, universidad integrada y universidad integradora, cuyos resultados obtenidos mostraron que los avances más sólidos se tuvieron en las dos primeras dimensiones; además, se determinó que los principales desafíos radican en la dimensión referente a la universidad integradora, específicamente, en la falta de construcción de una agenda política de sustentabilidad por parte del gobierno universitario [13].

Por último, la generación de energía es uno de los pilares de la educación y de las principales licenciaturas en México, cuyo objetivo clave es abordar la generación de energía de una forma sustentable, siendo necesario establecer el marco de un programa para universidades que permita visualizar el enlace entre sustentabilidad, industria e IES con la meta de brindar bienes y servicios que presenten beneficios ambientales y económicos en pro de la sociedad [14].

¿POR QUÉ UN EJE TRANSVERSAL/INTERDISCIPLINARIO?

La interdisciplina, como eje común de la mayoría de las innovaciones curriculares tiene como objetivo sustentar la eficiencia de los programas de estudio, dejando de lado los confines que se encuentran en las soluciones técnicas de los problemas sociales, por lo que existe la necesidad de un cambio de la ambientalización curricular. Algunos docentes coinciden que la educación ambiental es transversal a los ODS debido a que la educación tiene el poder de potenciar las capacidades y las acciones hacia un mundo más sostenible. La incorporación de la sustentabilidad y el ambiente en el currículum universitario es uno de los objetivos que surgen de la educación ambiental [11].

Se han realizado propuestas para integrar transversalmente las ER en la formación, investigación y gestión universitaria, beneficiando tanto a comunidad académica como sociedad, formando profesionales críticos y comprometidos con soluciones energéticas sostenibles [15], es por ello que existe la necesidad de ampliar contenidos sobre ER más allá de la ingeniería, con enfoque integral y que fomente conciencia ambiental, uso responsable de recursos y cumplimiento de los ODS, mediante una formación interdisciplinaria [16]. Es aquí donde las universidades desempeñan un papel importante hacia un futuro sostenible, ya que abordan investigaciones científicas sobre la transición verde, permitiendo a los estudiantes adquirir diferentes habilidades y gestionar la sostenibilidad del sector actual y futuro de las ER, por lo que es necesario promover un enfoque interdisciplinario para abordar el cambio climático y las transiciones hacia las energías verdes en los planes de estudio universitarios [17]. También se han reportado estudios que ponen de relieve la necesidad de una educación interdisciplinar que no solo imparta conocimientos técnicos, sino que también inculque una comprensión y ética ambientalmente sólidas, cruciales para formar ciudadanos y profesionales que puedan navegar y moldear un futuro energético sostenible [18].

Por lo tanto, es fundamental que los futuros profesionales, independientemente de su disciplina, reciban una formación alineada con los principios de la EDS, cuyo enfoque resulta indispensable para garantizar la preparación de ciudadanos con competencias técnicas y actitudinales que les permitan contribuir de manera efectiva a la solución de problemáticas vinculadas con la sostenibilidad. Todo ello debe abordarse desde una perspectiva de educación integral, que articule conocimientos, habilidades y valores orientados a la responsabilidad social y ambiental ya que las ER requieren de una sinergia entre diversas disciplinas para lograr una transformación sostenible del sistema energético global, permitiendo un enfoque integral con soluciones viables y al mismo tiempo garantice equidad, legalidad y sostenibilidad a largo plazo.

LIMITACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Algunos factores que inciden en la sostenibilidad social están vinculados con la investigación, la conversión, la distribución y el uso eficiente de los recursos energéticos. La experiencia, las actitudes y el nivel de conciencia sobre sostenibilidad de quienes toman decisiones influyen directamente en la formulación de políticas energéticas de gran alcance, las cuales impactan tanto en los sistemas energéticos como en las opciones disponibles para los consumidores. A pesar de la relevancia de la educación en energías renovables y sostenibilidad, la presencia de estos temas en los planes de estudio continúa siendo limitada e incierta, por lo que es necesario evaluar la pertinencia y el peso curricular de estas asignaturas para orientar las estrategias educativas hacia una perspectiva más sostenible, permitiendo identificar fortalezas y áreas de mejora. Además, se requiere mayor investigación para integrar competencias profesionales transversales que fortalezcan la formación integral del estudiante y promuevan experiencias significativas en el ámbito energético. En este contexto, el diseño de herramientas de evaluación que permitan cuantificar en los programas académicos la integración de contenidos y resultados de aprendizaje vinculados con la sostenibilidad constituye un elemento clave para avanzar hacia una educación superior coherente con los desafíos energéticos globales [19].

Otra barrera presentada es la falta de concienciación y el escaso conocimiento sobre energía y tecnologías de ER en estudiantes de último grado de las facultades de ingeniería y si no se elimina este obstáculo, el mercado seguirá adoleciendo de ingenieros y técnicos con poca

formación en este campo, por lo que es importante que las instituciones gubernamentales competentes, en estrecha colaboración con las administraciones de las universidades públicas y privadas, tomen las medidas necesarias en corto plazo para corregir esta situación [20].

La problemática para la transición de las IES a la sustentabilidad se ha atribuye a varios aspectos tales como: rigidez de los modelos educativos, complejidad de la creación de planes transversales, grado de especialización de las disciplinas que convergen en la institución, falta de vinculación entre las funciones esenciales, resistencia al cambio de la comunidad y falta de visión de directivos para gestionar la sustentabilidad en los campus institucionales, aun cuando se reconocen los retos y desafíos que presentan las IES los cuales derivan las dimensiones de la universidad sustentable: estructurar una respuesta sea integral, creativa y oportuna en una política universitaria, considerando la participación multidisciplinaria [21].

Las IES en México atraviesan una etapa de transición hacia la integración de la sustentabilidad en sus planes de estudio, pero este proceso ha avanzado de forma paulatina, lo que impide, por el momento, considerar la existencia de un sistema institucional consolidado en el que todas las universidades participen activamente en este cambio. Ante esta situación, resulta imprescindible contar con elementos que acelere la incorporación efectiva de la sustentabilidad en el ámbito académico, lo cual representa un desafío no solo para las IES, sino también para los organismos gubernamentales y la sociedad en general, quienes comparten la responsabilidad de impulsar una educación orientada al desarrollo sostenible [14].

El sistema educativo mexicano enfrenta el compromiso de asumir retos que contribuyan a mitigar los impactos ambientales, reducir la pobreza, fortalecer el estado de derecho y elevar la calidad de vida. Estos objetivos, integrados de manera articulada, conforman la base para avanzar hacia un modelo educativo orientado a la sostenibilidad y para ello, es necesario realizar un análisis crítico con perspectiva histórica, que permita identificar los elementos clave y las áreas de oportunidad que definan una visión sostenible a futuro. En este sentido, una educación sostenible se concibe como aquella que es inclusiva, equitativa, igualitaria y de alta calidad, capaz de responder a los desafíos globales que enfrenta la humanidad [22].

La Figura 1 muestra algunas limitaciones y oportunidades que se presentan en la integración transversal de las ER en la educación superior.

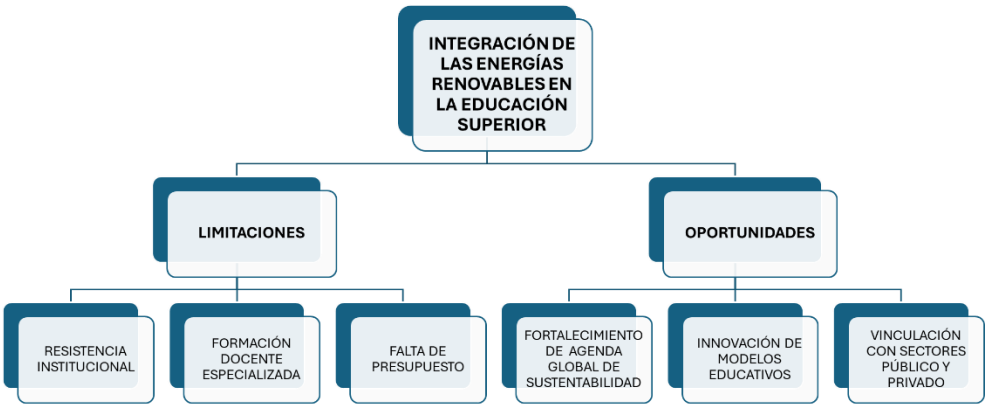


Figura 1. Limitaciones y oportunidades que se presentan en la integración transversal de las ER en la educación superior.

PROPUESTA DE DESARROLLO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

La transición hacia un sistema energético global basado en fuentes 100 % renovables constituye un componente esencial del objetivo más amplio de construir una sociedad sostenible y universal, en la que las personas convivan en equilibrio entre sí y con el entorno natural. Para avanzar hacia este modelo, es indispensable contar con una fuerza laboral calificada en energías renovables y sostenibilidad, así como con una ciudadanía informada y comprometida con el cambio. La formación en este ámbito no solo se enfoca en la preparación técnica para sectores específicos, sino que también promueve la sensibilización y el desarrollo de capacidades en personas de todas las edades y perfiles, brindando herramientas para aplicar, difundir e impulsar prácticas y estrategias que contribuyan activamente a la transformación energética necesaria.

El objetivo será analizar el desarrollo de currículos y medios pedagógicos para la enseñanza y el aprendizaje en el ámbito de la educación sobre ER, presentando que incluya la educación en energía solar en el marco de una versión actualizada de la teoría sociocultural del aprendizaje. Se presenta también un enfoque tentativo con la intención de conectar este ámbito educativo con la neurociencia educativa y la investigación contemporánea sobre creatividad [23].

Algunas acciones para establecer estos lineamientos en la integración transversal de las ER en la educación superior son:

Curricular: Incorporación de contenidos sobre ER y sustentabilidad en todos los programas académicos; diseño de asignaturas optativas y obligatorias con enfoque interdisciplinario; capacitación docente en temas de transición energética y metodologías activas.

Gestión: Implementación de sistemas de energía solar y eficiencia energética en instalaciones universitarias; creación de políticas internas de sustentabilidad y consumo responsable; establecimiento de un Comité Universitario de Sustentabilidad.

Investigación y vinculación: Fomento de proyectos de investigación aplicada en energías limpias; establecimiento de alianzas con empresas, gobiernos y comunidades; promoción de talleres y actividades de divulgación científica.

CONCLUSIONES

La integración de las ER en la educación superior representa una necesidad urgente ante desafíos ambientales, sociales y económicos actuales y su transversalización fomenta una formación pertinente, crítica y orientada al futuro, por lo que es necesario un cambio estructural en la educación superior para responder a la crisis climática con enfoques interdisciplinarios. Entre las principales limitaciones se encuentran la resistencia institucional al cambio, la falta de formación docente especializada, restricciones presupuestarias, entre otras. No obstante, también se abren importantes oportunidades, como el fortalecimiento de la agenda global de sostenibilidad, la innovación en los modelos educativos, la formación de profesionales más comprometidos con el desarrollo sustentable y una mayor vinculación con diversos sectores sociales y productivos.

Esta propuesta reconoce que la formación universitaria debe trascender los enfoques disciplinares tradicionales para adoptar una visión transversal, crítica y comprometida con la sustentabilidad, aun cuando es sabido que la aprobación de asignaturas sobre ER o ambiental en planes de estudio requiere de un proceso largo, así como tiempo para ser aprobado en las IES y que además, una vez aprobado, es necesaria la contratación de personal docente con perfil para la impartición de estos conocimientos, así como instalaciones en caso de ser requerido,. La incorporación de ER en planes de estudio, investigación, gestión institucional y vinculación social fortalece el papel de la universidad como agente de cambio en la transición energética, lo cual no solo beneficia a la comunidad académica, sino que también contribuye al desarrollo sostenible regional, nacional y mundial. Asimismo, se reafirma la importancia de formar profesionales capaces de comprender la complejidad del modelo energético actual, mediante propuestas de soluciones innovadoras y responsabilidad ambiental. La educación superior, al asumir este compromiso, se posiciona como un pilar estratégico para alcanzar los ODS y construir un futuro más justo, resiliente y sustentable. Se plantea también, dar continuidad a este estudio mediante el análisis de la percepción que tienen los egresados de distintas IES en México, con el propósito de evaluar la efectividad de la enseñanza del desarrollo sustentable en el ámbito universitario. Esta revisión permitirá identificar fortalezas, áreas de mejora y el grado de integración real de los principios de sostenibilidad en la formación profesional.

REFERENCIAS

[1] Secretaría de Energía – SENER. (2020). Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2020-2034. https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/SubsecretariaElectricidad/ConjuntosProyectosInversion/SENER_07_ProgramaDesarrolloSistemaElectricoNacional2020-2034(PRODESEN).pdf

[2] Herrera J.I. (2025). Democracia energética en México: perspectivas desde los derechos humanos, *De Jure, Revista de Investigación y Análisis*, Vol. 1, p. 180–211.

[3] Diezmartínez C.V. (2021). Clean energy transition in Mexico: Policy recommendations for the deployment of energy storage technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 135, p. 110407.

[4] Altassan A. (2023). Sustainable Integration of Solar Energy, Behavior Change, and Recycling Practices in Educational Institutions: A Holistic Framework for Environmental Conservation and Quality Education, *Sustainability*, Vol. 15, No. 20.

[5] Builes-Vélez A.E., Restrepo J., Martínez J.D. (2024). The significance of sustainability in higher education: a view to the curricular proposal at a Colombian University, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 25, No. 5, p. 943–961.

[6] Martínez-Fernández C.N. and González Gaudiano E.J. (2015). Las políticas para la sustentabilidad de las Instituciones de Educación Superior en México: entre el debate y la acción, *Revista de la Educación Superior*, Vol. 44, No. 174, p. 61–74.

[7] Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2017). Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible. París, Francia.

[8] Mora Fresca C. and Mazzini Balegno A. (2023). La educación en la transición energética. Carreras de nivel superior universitario y no universitario con temática energética dirigidas a docentes, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 27, p. 484–495.

[9] Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior *ANUIES*. (2020). Contribución de las instituciones de educación superior en México al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, México.

[10] Ruiz-González R.O. and Victorino-Ramírez L. (2020). La educación ambiental en instituciones de educación superior del estado de Chiapas, México, *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, Vol. 17, No. 3, p. 435–456.

[11] Sepúlveda Grisales P.A. (2023). Sustentabilidad y ambiente en los planes de estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México, *UNAM*, México. Tesis de Maestría.

[12] Acosta Flores E. and Maldonado González A.L. (2024). Análisis de contenido sobre Educación Ambiental Energética: un acercamiento a planes de estudio de educación superior, *Acta Universitaria*, Vol. 34, p. 1–24.

[13] Jiménez-Martínez N.M. (2021). La sustentabilidad universitaria en México: avances y desafíos, *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, Vol. 4, p. 1–12.

[14] Ramírez-Mancilla L.A., Pérez Montoya L.M., Cázares Ramírez R.I. (2023). La Sustentabilidad en las Instituciones de Educación Superior en México, ¿un desafío o una oportunidad?, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, Vol. 7, No. 2, p. 5076–5087.

[15] Sector Educación/UNESCO México. (2024). Transformar la educación para lograr el desarrollo sostenible y un futuro de paz, justicia y prosperidad. Visión y propuestas para México 2024 – 2030. https://www.unesco.org/es/fieldoffice/mexico

[16] Sovacool B. and Vera I. (2014). Electricity and education: The benefits, barriers, and recommendations for achieving the electrification of primary and secondary schools, *United Nations Department of Economic and Social Affairs*, *UNDESA*.

[17] Zacchia G., Cipri K., Cucuzzella C., Calderari G. (2022). Higher Education Interdisciplinarity: Addressing the Complexity of Sustainable Energies and the Green Economy, *Sustainability*, Vol. 14, No. 4.

[18] Loza Pedrozo S., Torres Farfán C.A., Valderrama D.A. (2024). Física y educación ambiental; encuentros posibles para la transición energética, *Avances Investigación en Ingeniería*, Vol. 21, No. 1.
[19] Mälkki H., Alanne K., Hirsto L. (2015). A method to quantify the integration of renewable energy and sustainability in energy degree programmes: A Finnish case study, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 106, p. 239–246.
[20] Alawin A.A., Rahmen T.A., Jaber J.A., Loubani S., Dalu S.A., Awad W., Dalabih A. (2016). Renewable energy education in engineering schools in Jordan: Existing courses and level of awareness of senior students, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, p. 308-318.
[21] Figueroa García E.D., Gutiérrez González M.A., Heath Moncada L.L. (2023). Modelo de Sustentabilidad para Instituciones de Educación Superior: una estrategia de autodiagnóstico para la transición a la sustentabilidad. Estudio de caso, *Revista de la Educacion Superior*, Vol. 52, No. 206, p. 87–116.
[22] Colín Mercado N.A., Llanes Soroya L., Iglesias Piña D. (2020). El sistema educativo en México, ¿visión sustentable?, *Revista CoPaLa*, Vol. 5, No. 9, p. 155–170.
[23] Ott A., Broman L. and Blum K. (2018). A pedagogical approach to solar energy education, *Solar Energy*, Vol. 173, p. 740–743.

SESIONES TÉCNICAS

Celdas y Módulo Fotovoltaicos/ Energía y medio ambiente

ID	TÍTULO	PONENTE
2218	Análisis e implementación de algoritmos MPPT en un sistema embebido con FPGA y microprocesador ARM	Víctor Sánchez Huerta
2217	Aprovechamiento de Catharanthus roseus en la síntesis de AgNPs para su potencial aplicación en celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC)	Aranxa Sánchez Bojórquez
2215	Puntos cuánticos de carbono: un enfoque sustentable a la ingeniería fotovoltaica	David Márquez Ruiz
2068	Generación eléctrica eficiente mediante paneles solares y control predictivo avanzado	Raúl Castillo Meraz

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS MPPT EN UN SISTEMA EMBEBIDO CON FPGA Y MICROPROCESADOR ARM

Víctor M. Sánchez Huerta , Juan C. Rosas Lara, Freddy I. Chan Puc
Departamento de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Av. Boulevard Bahía s/n, Chetumal, Quintana Roo, 77098, México, 9838350300 ext. 5186, vsanchez@uqroo.edu.mx,

William A. Carrillo Interian
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Instituto Tecnológico de Chetumal, Av. Insurgentes No. 330, Chetumal, Quintana Roo, 77013, México, 9838322330 ext. 131, **william.ci@chetumal.tecnm.mx**.

RESUMEN

A pesar de todas las ventajas que presenta la generación de energía fotovoltaica, la eficiencia en este tipo de sistemas es muy baja, por lo que se vuelve imprescindible la utilización de técnicas que permitan alcanzar el Máximo Punto de Potencia (MPP). Existe un gran número de algoritmos de seguimiento de máxima potencia, conocidos por sus siglas en inglés como algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracking), que varían en complejidad, cantidad de sensores requeridos, velocidad de convergencia, costo, rango de operación, capacidad para detectar máximos locales, entre otros. El objetivo de un algoritmo seguidor de punto máximo de potencia es muestrear constantemente la corriente y el voltaje de salida de un panel fotovoltaico, y actuar sobre la carga de manera de extraer la máxima potencia disponible. La utilización de un MPPT es una práctica muy recomendable, teniendo en cuenta que la eficiencia de conversión en un panel fotovoltaico es de aproximadamente entre un 15 y 17 %. En este trabajo se presenta la implementación de dos algoritmos MPPT en un sistema embebido de tiempo real. El sistema embebido está conformado con un circuito integrado de arreglo de compuertas programables de campo (FPGA, por sus siglas en inglés: Field Programmable Gate Array) y un microcrontrolador ARM. La FPGA permite la adquisición de los datos de voltaje y corriente, así como el cálculo de la potencia instantánea generados por el panel fotovoltaico en tiempo real, lo que asegura la fiabilidad de la ejecución de los algoritmos MPPT. Los algoritmos MPPT se aplican a un convertidor electrónico de potencia CD-CD del tipo elevador y se presentan los resultados experimentales de su desempeño, así como de las variaciones en los ciclos de trabajo determinados en cada uno de ellos.

ABSTRACT

Despite all the advantages of photovoltaic power generation, the efficiency of these systems is very low, making the use of techniques that allow for achieving Maximum Power Point (MPP) essential. There are a large number of maximum power tracking algorithms, known by their acronyms as MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithms, which vary in complexity, number of required sensors, convergence speed, cost, operating range, ability to detect local maxima, among others. The objective of a maximum power point tracking algorithm is to constantly sample the output current and voltage of a photovoltaic panel, and act on the load to extract the maximum available power. The use of an MPPT is a highly recommended practice, considering that the conversion efficiency of a photovoltaic panel is approximately 15% to 17%. This paper presents the implementation of two MPPT algorithms in a real-time embedded system. The embedded system consists of a field-programmable gate array (FPGA) integrated circuit and an ARM microcontroller. The FPGA allows for the acquisition of voltage and current data, as well as the calculation of the instantaneous power generated by the photovoltaic panel in real time, ensuring the reliable execution of the MPPT algorithms. The MPPT algorithms are applied to a DC-DC boost power converter, and experimental results of their performance, as well as variations in the duty cycles determined for each of them, are presented.

Palabras claves: Energía Fotovoltaica, MPPT, perturba y observa, conductancia incremental, sistema embebido, tiempo real, convertidor elevador.

1. Introducción

La energía solar fotovoltaica es la energía procedente del Sol que se convierte en energía eléctrica de forma directa, sin ninguna conversión intermedia. Esto es posible mediante arreglos fotovoltaicos, compuestos por módulos fotovoltaicos conectados entre sí [1]. La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las fuentes de energía renovable más prometedoras [2]. Sin embargo, la eficiencia de conversión de los módulos fotovoltaicos (MFV) es relativamente baja y su salida de potencia presenta una característica no lineal que depende fuertemente de las condiciones atmosféricas, como la irradiancia solar y la temperatura de la celda [3]. La relación entre el voltaje y la corriente (curva I-V) de un MFV define un único punto de máxima potencia (MPP) para un conjunto dado de condiciones operativas. Para maximizar la energía extraída, es esencial que el sistema opere continuamente en este punto.

Los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) son, por tanto, un componente crucial en los SFV. Su función es ajustar dinámicamente la impedancia de la carga vista por el MFV, generalmente a través de un convertidor de potencia de CD-CD, para forzar la operación en el MPP. Entre las numerosas técnicas de MPPT, los algoritmos de Perturbar y Observar (P&O) y Conductancia Incremental (CondInc) son los más extendidos debido a su simplicidad y efectividad.

El avance de los sistemas embebidos, que combinan procesadores de tiempo real y lógica reconfigurable (FPGA), ofrece plataformas robustas y de alta velocidad para implementar algoritmos de control complejos. Estos sistemas permiten una adquisición de datos determinística y una respuesta de control rápida, cualidades indispensables para un seguimiento eficiente del MPP.

Este artículo detalla la implementación de los algoritmos P&O y CondInc en un sistema embebido NI myRIO. Se presenta el diseño del hardware, incluyendo un convertidor elevador, y se evalúa el desempeño experimental de ambos algoritmos bajo condiciones de irradiancia variables y cambios abruptos causados por sombreado parcial, analizando las variaciones en los ciclos de trabajo y la estabilidad del sistema.

2. Materiales y métodos

En la literatura se pueden encontrar diferentes técnicas de MPPT que han sido propuestas e implementadas, que varían en complejidad, cantidad de sensores requeridos, velocidad de convergencia, costo, rango de operación, capacidad para detectar máximos locales, etc. Los métodos actualmente más utilizados de MPPT son los de perturba y observa (P&O), y conductancia incremental (CondInc) [4]. Ambos métodos garantizan rendimientos satisfactorios y requieren el uso de dos sensores, uno de voltaje, y uno de corriente. A continuación, se presenta una descripción general de su funcionamiento.

2.1 Algoritmos MPPT

Perturba y Observa (P&O). Este algoritmo introduce una pequeña perturbación periódica en el voltaje de operación del MFV (modificando el ciclo de trabajo del convertidor) y observa el cambio resultante en la potencia de salida. Si la potencia aumenta, la siguiente perturbación se realiza en la misma dirección; si disminuye, la dirección se invierte. El proceso se repite hasta que el sistema oscila alrededor del MPP. Su principal desventaja es esta oscilación inherente en estado estacionario y su posible fallo al seguir el MPP bajo condiciones de irradiancia que cambian rápidamente [5]. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 1.

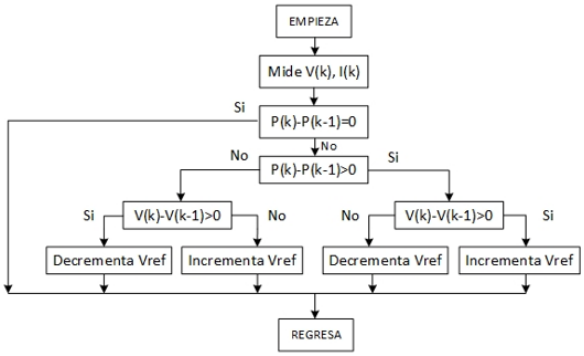


Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT P&O.

Conductancia Incremental (CondInc). El algoritmo CondInc, presenta mejoras con respecto al P&O, debido a que su respuesta frente a variaciones rápidas en las condiciones atmosféricas es mejor. Puede alcanzar y mantener el MPP sin perder mucha eficiencia y, en teoría las oscilaciones en estado permanente son eliminadas [6]. Este método se basa en el hecho de que la pendiente de la curva Potencia-Voltaje (P-V) es cero en el MPP, positiva a la izquierda y negativa a la derecha. Comparando la conductancia incremental (ΔI/ΔV) con la conductancia instantánea (-I/V), el algoritmo puede determinar la posición del punto de operación con respecto al MPP y ajustar el ciclo de trabajo en consecuencia. Teóricamente, este método elimina las oscilaciones en estado estacionario y ofrece una mejor respuesta a cambios rápidos de irradiancia [7]. Su diagrama de flujo se presenta en la Figura 2.

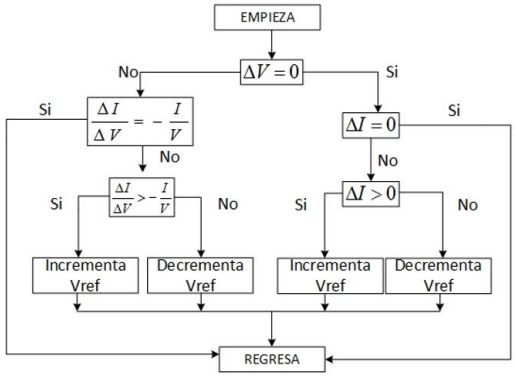


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo CondInc.

2.2 Sistema Experimental

El banco de prueba experimental utilizado en este trabajo se muestra en la Figura 3, el cual consta de un MFV, sensores de voltaje y corriente, un convertidor elevador de CD-CD, una carga eléctrica y el sistema embebido NI myRIO para el control.

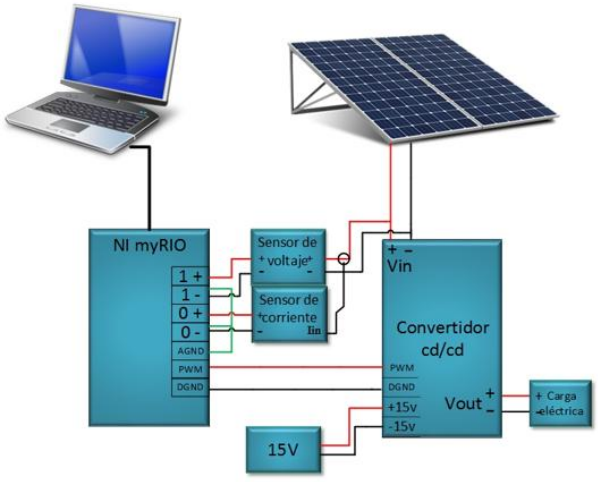


Figura 3. Esquema general del banco de pruebas experimental.

Módulo Fotovoltaico. Se utilizó un módulo policristalino Total Energie TE850 con una potencia nominal de 80 Wp. Sus características principales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del MFV TE850.

Modelo	**TE850**	**TOTAL ENERGIE**
Encapsulación	Vidrio/tedlar	
Número de celdas	36	celdas
Tamaño de celdas	125x125	mm
Potencia típica	80	Wp
Voltaje a máxima potencia	17.3	V
Corriente	4.6	A
Voltaje a circuito abierto	21.8	V
Corriente a cortocircuito	5	A
Voltaje máximo del sistema	730	V
Diodos de protección	2 by-pass	
Peso	7.8	Kg
Temperatura de uso y almacenamiento	-40 a 85	°C
Humedad relativa	0 a 100%	
Datos típicos @ STC: irradiancia solar 1000 W/m², AM 1.5, temperatura de celda 25°		
Normas: módulo certificado IEC 61215		

Sistema Embebido. El control se implementó en un dispositivo NI myRIO-1900, que integra un procesador ARM dual-core de tiempo real y una FPGA Xilinx Zynq. La adquisición de las señales de voltaje y corriente, así como el cálculo de la potencia instantánea, se realizaron en la FPGA para garantizar un procesamiento paralelo y determinístico [8]. El algoritmo MPPT se ejecutó en el procesador de tiempo real, el cual calcula el ciclo de trabajo y lo envía a la FPGA para generar la señal PWM que controla el MOSFET del convertidor elevador.

Convertidor y Sensores. Se diseñó y construyó un convertidor CD-CD elevador (boost) con una frecuencia de conmutación de 40 kHz. Para la medición de sus parámetros elèctricos, se utilizó un sensor de voltaje con aislamiento óptico (IL300) y un sensor de corriente de efecto Hall (TCPA300), asegurando el aislamiento galvánico entre la etapa de potencia y el sistema de control. La Figura 4 muestra el prototipo del convertidor elevador construido.



Figura 4. Convertidor CD-CD elevador.

2.3 Procedimiento experimental

Las pruebas experimentales se realizaron en la azotea del laboratorio de ingenierías "Ing. Luis Felipe Medina Leyva", de la Universidad Autónoma del Estado de Quintan Roo. El MFV se orientó al sur verdadero con una inclinación aproximadamente de 18°, cerca del mediodía, en un día soleado para poder la mayor cantidad de irradiancia solar. Para evaluar la respuesta dinámica de los algoritmos, se aplicó un cambio abrupto en la irradiancia cubriendo el 50% de la superficie del módulo con una sombra durante aproximadamente 1.5 minutos, para luego retirarla, como se muestra en la Figura 5. Se registraron el voltaje, la corriente, la potencia y el ciclo de trabajo durante todo el proceso para ambos algoritmos.


Figura 5. Condición de prueba con sombreado parcial del 50%.

3. Resultados y discusión.

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos para los algoritmos P&O y CondInc bajo las condiciones de prueba descritas.

3.1 Desempeño del algoritmo P&O.

A continuación, se muestra el comportamiento del voltaje, la corriente y la potencia del MFV controlado por el algoritmo P&O. La Figura 6 muestra el comportamiento de la potencia extraída del MFV, mediante el algoritmo P&O, al aplicarle un sombreado al MFV.

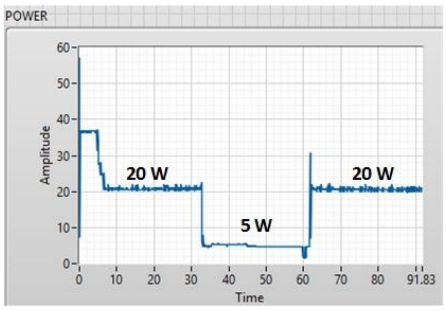
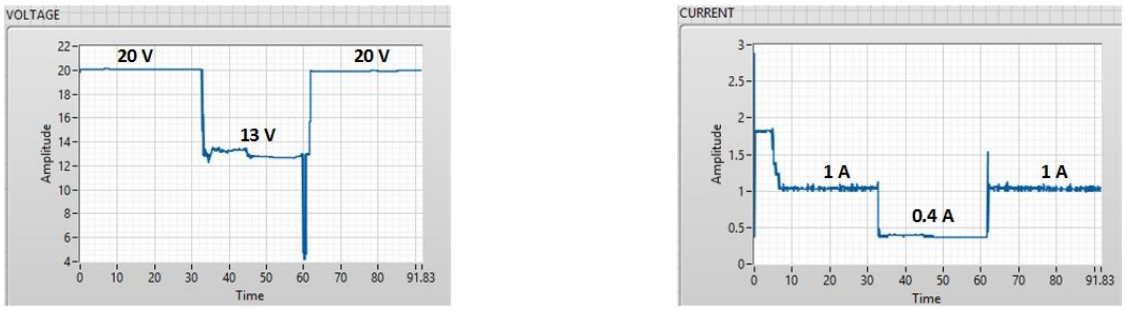


Figura 6. Potencia extraída del MFV con el algoritmo P&O.

En la Figura 6 se observa el registro de los valores alcanzados por la potencia. En la gráfica se observan valores picos transitorios al momento de aplicar los cambios repentinos de irradiancia solar mediante el sombreado del MFV, para posteriormente estabilizarse en valores de 20 W y ≈5 W. Por su parte en la Figura 7 se muestra las gráficas del voltaje y corriente obtenidas durante esta prueba.



(a) (b)

Figura 7. Comportamiento del voltaje y corriente en el MFV con el algoritmo P&O.(a) Voltaje. (b) Corriente.

Como se observa en su conjunto con las Figuras 6 y 7, inicialmente el sistema opera a una potencia cercana a los 20 W con un voltaje de 20 V. Al aplicar el sombreado (aprox. en el segundo 35), la potencia cae drásticamente a 5 W y el voltaje se estabiliza en 13 V. Al retirar la sombra (aprox. segundo 60), el sistema recupera rápidamente el punto de operación inicial. Se observan picos transitorios de voltaje y corriente durante los cambios de irradiancia, especialmente al retirar la sombra. En la Figura 8 se muestra el comportamiento del ciclo de trabajo aplicado al convertidor elevador mediante el algoritmo P&O.

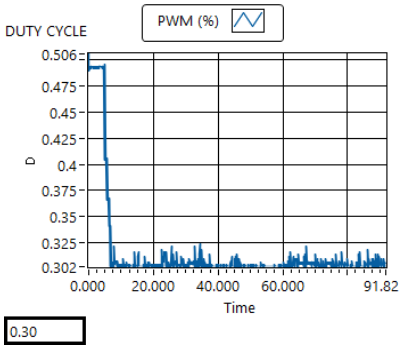
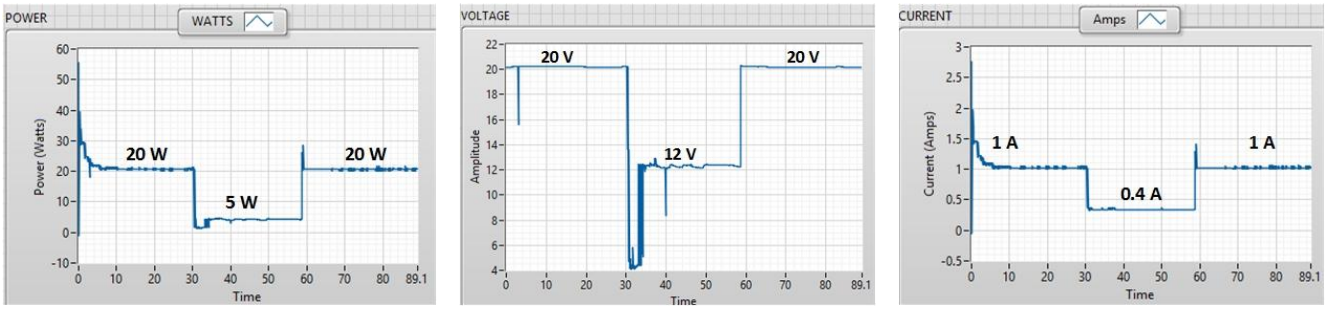


Figura 8. Comportamiento del ciclo de trabajo para el convertidor elevador con el algoritmo P&O.

Como se observa en la Figura 8, el ciclo de trabajo se mantiene estable alrededor de 0.3, cerca del límite inferior configurado, con pequeñas oscilaciones que reflejan la naturaleza del algoritmo. Hay que hacer notar que el valor mínimo de variación del ciclo de trabajo configurado para el algoritmo P&O, con base en las especificaciones del sistema embebido de la NI myRIO fue de 0.2%.

3.2 Desempeño del algoritmo CondInc.

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el algoritmo de CondInc para condiciones similares experimentales aplicadas. La Figura 9 muestra el comportamiento de la potencia, voltaje y corriente obtenidas con el algoritmo de CondInc.



(a) (b) (c)

Figura 9. Gráficas de los valores experimentales obtenidos con el algoritmo de CondInc. (a) Potencia. (b) Voltaje. (c) Corriente.

Como se observa en la Figura 9, el comportamiento en general de la potencia con el algoritmo de CondInc es similar al de P&O, estabilizándose en 20 W y 5 W. Sin embargo, se observa una diferencia notable en la respuesta del voltaje al aplicar el sombreado, ya que experimenta una caída transitoria severa hasta 4 V antes de estabilizarse en 12 V. En contraste, la transición al retirar la sombra es mucho más suave y sin picos significativos. La respuesta de la corriente es más estable en general con el algoritmo de CondInc que con el P&O.

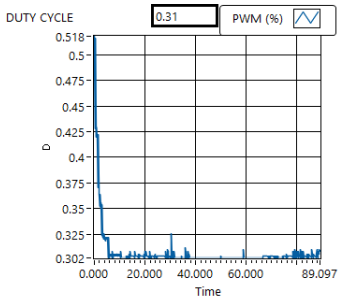


Figura 10. Comportamiento del ciclo de trabajo para el convertidor elevador con el algoritmo CondInc.

La Figura 10 muestra el comportamiento del valor determinado por el algoritmo de CondInc al ciclo de trabajo del convertidor elevador. Como se observa, el ciclo de trabajo también opera cerca del límite inferior de 0.3, pero con una variación visiblemente menor que en el caso del algoritmo P&O, lo que indica una mayor estabilidad en estado estacionario

3.3 Análisis comparativo

Con base en los resultados experimentales obtenidos se establece que ambos algoritmos demostraron ser capaces de seguir el MPP bajo cambios abruptos de irradiancia. El algoritmo P&O mostró una respuesta más errática en el voltaje al retirar la sombra, mientras que CondInc sufrió una caída más pronunciada al aplicarla. Sin embargo, en términos de estabilidad en estado estacionario, el algoritmo CondInc fue superior, como lo demuestran las menores oscilaciones en el ciclo de trabajo y la trayectoria más definida en la curva P-V. Esta estabilidad se traduce en una menor pérdida de energía por oscilaciones alrededor del MPP.

4. Conclusiones.

En este artículo se ha implementado y comparado experimentalmente el desempeño de los algoritmos MPPT P&O y Conductancia Incremental en un sistema embebido de tiempo real NI myRIO. Los resultados demuestran que la plataforma embebida es eficaz para este tipo de aplicaciones de control de electrónica de potencia, permitiendo una respuesta rápida y determinística.

Por su parte, los algoritmos MPPT implementados experimentalmente lograron ubicar exitosamente el punto de máxima potencia bajo condiciones de irradiancia variable. No obstante, el algoritmo de Conductancia Incremental exhibió un comportamiento superior en términos de estabilidad en estado estacionario, con menores oscilaciones en el ciclo de trabajo y una trayectoria de seguimiento más precisa en la curva P-V. Aunque su respuesta transitoria inicial al sombreado fue más severa, su comportamiento general fue más estable, lo que lo convierte en una opción ligeramente más robusta para aplicaciones sujetas a cambios climáticos rápidos. Futuros trabajos podrían explorar la optimización de los parámetros del algoritmo, como el tamaño del paso de perturbación, para mejorar aún más la respuesta dinámica.

5. Referencias.

[1] A. Castejón Oliva y G. Santamaría Herranz, Instalaciones solares fotovoltaicas, Editex, 2010.
[2] R. Foster, M. Ghassemi y A. Cota, Solar Energy: Renewable Energy and the Enviroment, CRC Press, 2009, p. 140.
[3] Yi-Hua, L., Chun-Liang, L., Jia-Wei, H., & Jing-Hsiau, C. (2013). Neural-network-based maximum power point tracking methods. *ScienceDirect*, 42-53
[4] Echeverria, N., Judewicz, M., Murcia, G., Strack, J., & Gonzales, S. A. (2014). *Algoritmo MPPT de Conductancia Incremental con doble cota*. Buenos Aires.
[5] Guaman, J., Oviedo, C., Tapia, L., & Rosales, A. (2014). Diseño y Construcción de un Sistema de Generación de Energía Fotovoltaica con Respaldo de Alimentación y Control Automático de Carga. *Revista Politécnica, 34*(1), 3.
[6] Pongratananukul, Nattorn, "Analysis And Simulation Tools For Solar Array Power Systems" (2005). Electronic Theses and Dissertations. 373. En: https://stars.library.ucf.edu/etd/373 (último acceso: agosto 2025).
[7] Srinivas, P., Vijaya Lakshmi, K., & Ramesh, C. (2016). Simulation of Incremental Conductance MPPT Algorithm for PV Systems using LabVIEW. *IJIREEICE, 4*, 35-36.
[8] myRIO-1900 Getting Started Guide and Specifications. En: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/myrio-1900-getting-started/resource/376047d.pdf (último acceso: agosto 2025).

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

APROVECHAMIENTO DE *Catharathus roseus* EN LA SÍNTESIS DE AgNPs PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTES (DSSC)

Aranxa Sánchez Bojórquez, Adriana Cruz Enríquez, José de J. Campos Gaxiola, Abril K. Meza Medina
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. 6688127641, e-mail: 18000134.sanchez@ms.uas.edu.mx, cruzadriana@uas.edu.mx

RESUMEN

La creciente demanda energética y la dependencia de combustibles fósiles han impulsado la búsqueda de alternativas renovables. Entre ellas, las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) destacan por su bajo costo, flexibilidad y buen desempeño en condiciones de luz difusa. Sin embargo, mejorar su eficiencia y sustentabilidad sigue siendo un reto clave.

La síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs) emerge como una alternativa sostenible y económica frente a los métodos químicos convencionales. Utilizando extractos vegetales ya que evita el uso de reactivos tóxicos, reduce costos y minimiza el impacto ambiental.

Este trabajo presenta un estudio preliminar para establecer un método económico y ecológico para la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) utilizando extractos de hojas de *Catharanthus roseus* (Rosy Periwinkle) y nitrato de plata, con el fin de evaluar su potencial aplicación en DSSC como material para mejorar la conductividad eléctrica y la absorción de luz en el fotoánodo, incrementando así la eficiencia de las celdas solares.

ABSTRACT

Growing energy demand and dependence on fossil fuels have driven the search for renewable alternatives. Among them, dye-sensitized solar cells (DSSCs) stand out for their low cost, flexibility, and good performance in scattered light conditions. However, improving their efficiency and sustainability remains a key challenge.

The green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) is emerging as a sustainable and economical alternative to conventional chemical methods. Using plant extracts avoids the use of toxic reagents, reduces costs, and minimizes environmental impact.

This work presents a preliminary study to establish an economical and environmentally friendly method for the synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) using Catharanthus roseus (Rosy Periwinkle) leaf extracts and silver nitrate. This study aims to evaluate their potential application in DSSCs as a material to improve electrical conductivity and light absorption at the photoanode, thereby increasing solar cell efficiency.

Palabras claves: Síntesis verde, *Catharanthus roseus*, celdas solares DSSC, eficiencia, impacto ambiental

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por la contaminación ambiental y el acelerado cambio climático ha generado un impacto significativo en el equilibrio del planeta. Ante esta problemática, se ha incrementado la demanda por desarrollar y mejorar tecnologías, productos y métodos eficaces que contribuyan a mitigar los efectos contaminantes y promover la sostenibilidad ambiental. En este sentido, la síntesis verde de nanopartículas metálicas surge como una alternativa prometedora y sustentable. Estas nanopartículas presentan propiedades fisicoquímicas de gran interés para la comunidad científica.

En particular, las nanopartículas de plata (Ag-NPs) han captado especial atención debido a sus destacadas características y potenciales aplicaciones en diversas áreas, tales como la biomedicina, energía solar, agricultura, tecnología y remediación ambiental (Kazemi et al. 2023). Las AgNPs presentan una amplia área superficial, lo cual les proporciona una destacada reactividad bioquímica, una notable actividad catalítica y comportamiento atómico, en comparación con partículas de mayor tamaño, pero con la misma composición química. (Rafique et al. 2017)

Las Ag-Nps están usualmente compuestas de 20 hasta 15,000 átomos y posee un diámetro menor a 100 nm. (Fahim et al. 2024). Pueden obtenerse a partir de diversas sales como el nitrato, citrato o acetato de plata. En el proceso de síntesis como se muestra en la Figura 1, un agente reductor transforma los iones Ag^{+} en átomos de plata metálica (Ag^{0}), los cuales posteriormente se agrupan y forman nanopartículas. (Nguyen et al. 2023). Son capaces de controlar su nucleación y crecimiento con distintos agentes estabilizadores y ser funcionalizadas, convirtiéndose así en moléculas con gran versatilidad. Asimismo, tienen propiedades opto-eléctricas por su composición fisicoquímica dependiente de su forma, tamaño y composición. Cabe destacar la notable aplicación por su interacción con la luz a través de la resonancia del plasmón superficial (SPR) (Fahim et al. 2024).

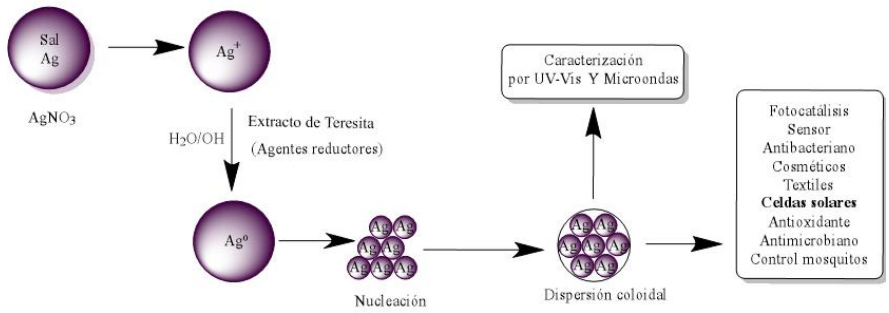


Figura 1. Proceso de síntesis y caracterización de nanopartículas de plata (AgNPs) utilizando extracto de Teresita (TLE).

Existen distintos métodos de síntesis clasificados en dos enfoques. El bottom-up implica la construcción de NPs a partir de unidades básicas como átomos o moléculas, mediante procesos como la reducción química o el autoensamblaje, lo que permite un mayor control sobre la morfología y distribución del tamaño. Por otro lado, el enfoque top-down consiste en la fragmentación de materiales a escala macroscópica mediante técnicas físicas como la molienda mecánica o la ablación láser, siendo útil para materiales difíciles de sintetizar químicamente, aunque con menor precisión estructural.

Ahora bien, uno de los métodos bottom-up comúnmente utilizado es la reducción química por su gran eficiencia. Sin embargo, durante el proceso se necesitan sustancias químicas tóxicas y peligrosas para la salud como el borohidruro de sodio o la hidrazina (Fahim et al. 2024), es un proceso con costos elevados y requiere altas medidas de seguridad. Entonces resulta más conveniente aplicar un método verde para la síntesis de NPs donde a partir del uso de extractos de plantas, semillas, hongos, bacterias (entre otros), podemos obtener ciertos agentes reductores y estabilizantes flavonoides, esteroides, saponinas y carbohidratos (Kazemi et al. 2023) que favorecen a la funcionalización de dichas, permitiéndoles aplicarlas a escalabilidad industrial. (Rafique et al. 2017)

En especial el uso de extractos de plantas posee múltiples ventajas como su gran disponibilidad, sustentabilidad al eliminar el uso de químicos tóxicos, requieren menos energía y ofrece aplicaciones más accesibles y de mayor alcance. El uso de extractos de plantas en la síntesis de nanopartículas ofrece una alternativa ecológica, accesible y eficiente frente a otros agentes biológicos como hongos, bacterias o semillas. Gracias a su rica composición de metabolitos secundarios, los extractos vegetales permiten una reducción rápida y estable de iones metálicos sin necesidad de cultivos complejos ni condiciones especiales. Esta simplicidad, junto con su bajo riesgo biológico y compatibilidad con procesos sostenibles, los convierte en una opción ideal para el desarrollo de nanomateriales verdes. (Hernández-Díaz et al. 2024)

***Catharanthus roseus* (Rosy Periwinkle).**

La planta *Catharanthus roseus* (Rosy Periwinkle) comúnmente conocida como hoja de Teresita, perteneciente a la familia *Apocynaceae*, ha sido reconocida por su uso tradicional en la medicina natural. Se trata de una especie herbácea que puede crecer como arbusto pequeño, con tallos erectos o semipostrados, y que produce látex. En regiones subtropicales, esta planta alcanza hasta un metro de altura. (Kumar Verma et al. 2017) Investigadores han encontrado que *C. roseus* contiene carbohidratos, flavonoides, saponinas y alcaloides. El compuesto químico más activo son los alcaloides con más de 400 tipos. (Mukunthan et al. 2011).

Eficiencia de celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC). Cerca del 80 % de la energía utilizada globalmente proviene de combustibles fósiles (Singh y Sachdeva 2024). El notable impacto negativo hacia nuestro ecosistema se presenta como una preocupante problemática que debe ser tratada hasta su erradicación. El uso de fuentes energéticas renovables surge como una prometedora alternativa.

Específicamente en el desarrollo fotovoltaico, se han descubierto 3 generaciones de paneles solares. Dentro de la 3ra generación, existen las celdas sensibilizadas por colorantes (DSSC). Estas tecnologías de vanguardia, capaces de convertir energía solar a electricidad, son una de las tecnologías más prometedoras para su escalabilidad industrial e inclusive su uso doméstico.

Una celda solar sensibilizada por colorante (DSSC) está compuesta por varios elementos clave: Foto ánodo (óxido metálico semiconductor depositado sobre la superficie de un sustrato de óxido conductor transparente (TCO), típicamente vidrio de óxido de estaño dopado con flúor (FTO)); colorante/sensibilizador; electrolito y contraelectrodo (típicamente vidrio FTO recubierto con platino) (Yeoh and Chan 2017). Las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) son dispositivos de bajo costo, respetables con el medio ambiente, poseen la habilidad de trabajar con bajas intensidades y está compuesta de electrodos transparentes (Mehra et al. 2020). El principio de su funcionamiento se basa en el uso de la barrera sólido líquido para separar los pares electrón hueco generados por la luz. Dicha separación es clave en la conversión de energía solar a eléctrica. (Wang et al. 2025). Existen múltiples factores que repercuten en el rendimiento y eficiencia de las DSSC, las propiedades químicas y físicas de los materiales óxido

metálicos en el fotoánodo son muy significativas. (Mehra et al. 2020). Generalmente un material poroso con alta área superficial es utilizado para tener una mayor absorción del colorante. Uno de los principales desafíos es mejorar estas propiedades, resulta importante enfocar investigaciones en el desarrollo de componentes más eficientes seguros y sostenibles.

METODOLOGÍA

Síntesis verde de nanopartículas de plata con extracto de hoja de Teresita (*Catharantus roseus*).

Síntesis verde de nanopartículas de plata con extracto de hoja de Teresita (*Catharantus roseus*).

Se seleccionaron hojas frescas de Teresita, las cuales fueron lavadas cuidadosamente con agua y jabón para eliminar cualquier suciedad superficial. Posteriormente, se cortaron en trozos pequeños y se dejaron secar al aire libre. Una vez secas, se pesaron 7 g y se colocaron en un vaso de precipitados, al que se añadieron 75 mL de agua destilada. La mezcla se calentó a 80 °C durante 20 minutos en una placa de agitación con control de temperatura.

Transcurrido el tiempo de calentamiento, la solución se dejó enfriar a temperatura ambiente y se filtró utilizando papel para asegurar la eliminación completa de los residuos sólidos. El extracto obtenido se recolectó en un vaso de precipitados obteniéndose así el extracto de hojas de Teresita.

Para la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) se prepararon soluciones de 2, 5 y 7.5 mM de nitrato de plata ($AgNO_3$) en agua. Después en una placa de agitación se añadieron 2, 4 y 8 mL del extracto y se mantuvo en agitación constante durante 1 hora y 30 minutos. Asimismo, se realizó una comparativa con la variación de la temperatura (50 y 60 °C).

RESULTADOS

La formación de nanopartículas de plata (AgNPs) fue monitoreada mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), técnica que permite detectar cambios característicos en la absorbancia asociados a la reducción de iones de plata y a la estabilización de las nanopartículas. (Kazemi et al. 2023)

En la Figura 2 se muestran los espectros de absorción del extracto de Teresita, TLE (con máximos de absorción a 308 y 322 nm) y de la síntesis preliminar de las nanopartículas de plata (AgNPs-TLE) empleando dicho extracto, se observa su máximo de absorción a 433 nm que corresponde a la banda de plasmón superficial. (Ider et al., 2016)

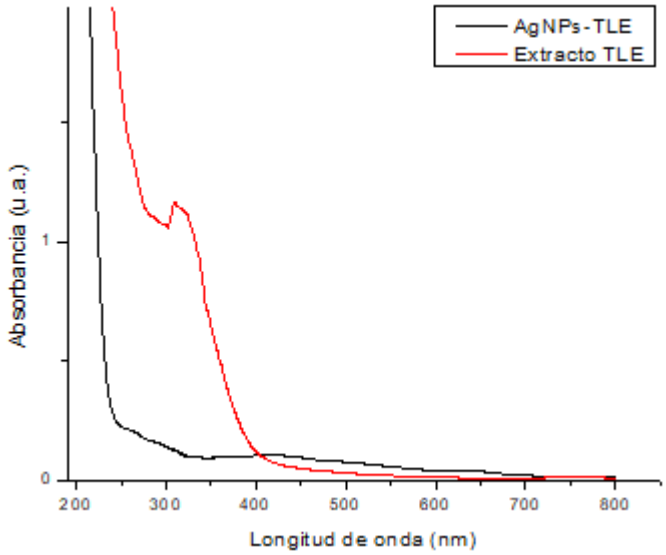


Figura 2. Espectros de absorción UV-Vis del extracto de Teresita (TLE) y de las nanopartículas sintetizadas (AgNPs-TLE) empleando una concentración de $AgNO_3$ de 5 mM.

Posterior a esto se varió la concentración de la sal de plata (2, 5 y 7.5 mM), en la Figura 3a se observa que el espectro que presenta la mayor absorbancia es el correspondiente al empleo de una concentración de 5 mM de $AgNO_3$, mientras que en el caso del espectro en el que se usó una concentración de 7.5 mM se observa que la absorbancia disminuye, esto corresponde a la precipitación de las AgNPs-TLE obtenidas a esta concentración (Figura 3b, 7.5 mM). Por lo tanto, se consideró que el mejor resultado fue de 5 mM de $AgNO_3$, en este caso el sistema presentó estabilidad debido a que no precipitaron las nanopartículas metálicas.

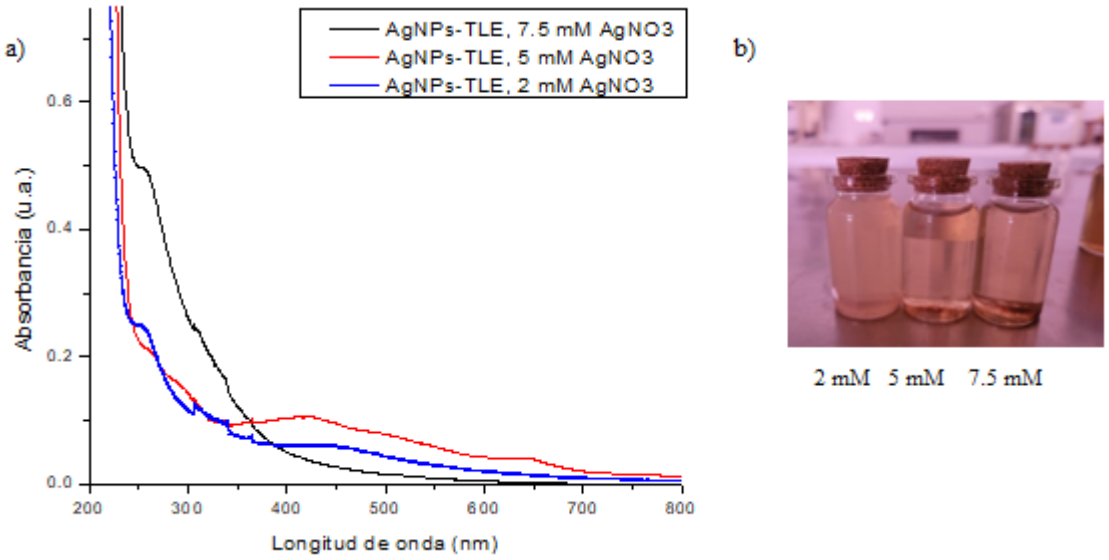


Figura 3. Comparación de la síntesis de AgNPs-TLE, empleando diferentes concentraciones de la sal AgNO3 (2, 5 y 7.5 Mm respectivamente).

La síntesis de las AgNPs-TLE se llevó a cabo a 50 y 60°C, empleando 2 y 4 mL de extracto de TLE, estos resultados se muestran en la Figura 4, se observa que la síntesis a estas dos temperaturas y empleando estos dos volúmenes del extracto, la formación de la banda de plasmón superficial a 428 nm, casi es nula (Figura 4b), sin embargo, al continuar la reacción durante más tiempo (120 min), se aprecia esta señal a 433 nm, lo cual sugiere la formación de las AgNPs-TLE. Se eligió llevar a cabo la síntesis a 50°C por el ahorro de energía, ya que en la Figura 4b se aprecia que los resultados de la síntesis a 50 y 60°C con 4 mL de extracto, presentan la misma absorbancia, lo cual indica que las nanopartículas se obtienen en ambas condiciones.

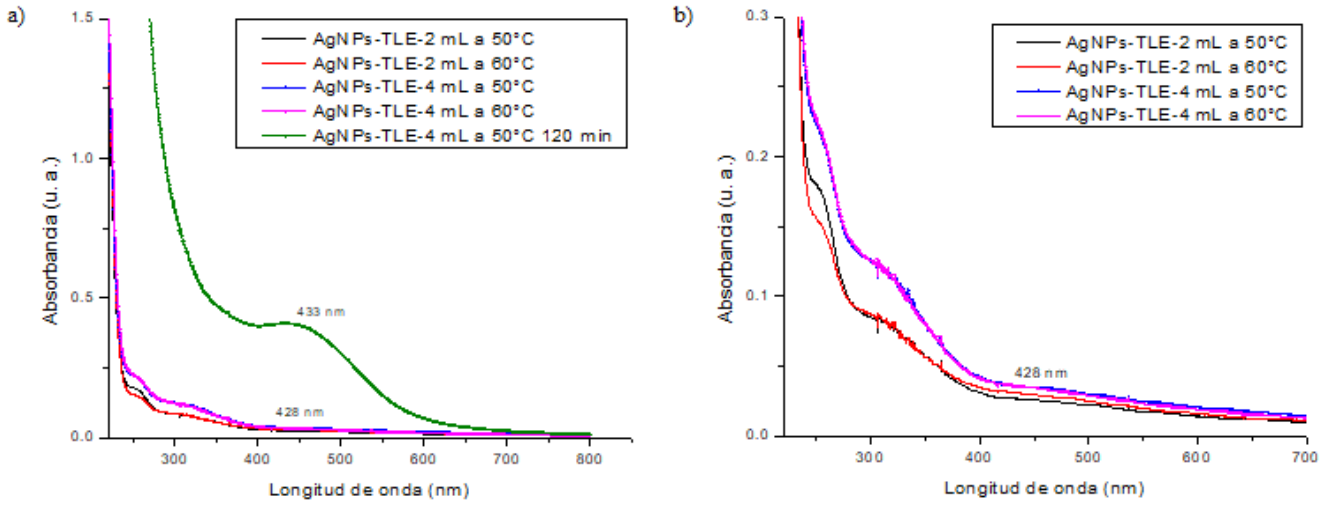


Figura 4. a) Espectros de Uv-vis de la comparación de la síntesis de AgNPs-TLE a 50 y 60 °C empleando 2 y 4 mL de extracto TLE. b) Aumento de los espectros de Uv-vis mostrados en a).

El coloide obtenido presentó una tonalidad amarillo-naranja, indicativa de la formación de nanopartículas (Figura 5).

a) b)



Figura 5. a) Extracto acuoso de TLE y b) AgNPs-TLE en medio acuoso.

Al variar la concentración del extracto, se observó un oscurecimiento progresivo en la coloración del coloide. A mayor concentración, el tono amarillo se tornó café, lo cual sugiere un aumento en el tamaño de las nanopartículas. (Amirjani et al., 2020)

Al llevar a cabo el monitoreo cinético por UV-Vis de la síntesis de AgNPs-TLE, realizando mediciones en diferentes intervalos de tiempo (Figura 6a) muestra que la absorbancia es directamente proporcional al tiempo de reacción. Este comportamiento indica un crecimiento controlado de las nanopartículas y una evolución en su actividad catalítica. (Fahim et al. 2024)

Por otro lado, la síntesis asistida por microondas, aplicada con el objetivo de reducir el tiempo de reacción y lograr un calentamiento rápido y uniforme, resultó en la formación de precipitados en la solución, lo cual sugiere una posible desestabilización del coloide bajo estas condiciones, este resultado es congruente con la baja absorbancia del espectro Uv-vis, en comparación con el resultado obtenido en solución (Figura 6b). Aunque el método por microondas ofrece ventajas en términos de eficiencia energética y velocidad, se requiere una optimización cuidadosa de los parámetros (potencia, tiempo de exposición, concentración) para evitar efectos adversos en la calidad y estabilidad de las nanopartículas sintetizadas. (Gul et al. 2025)

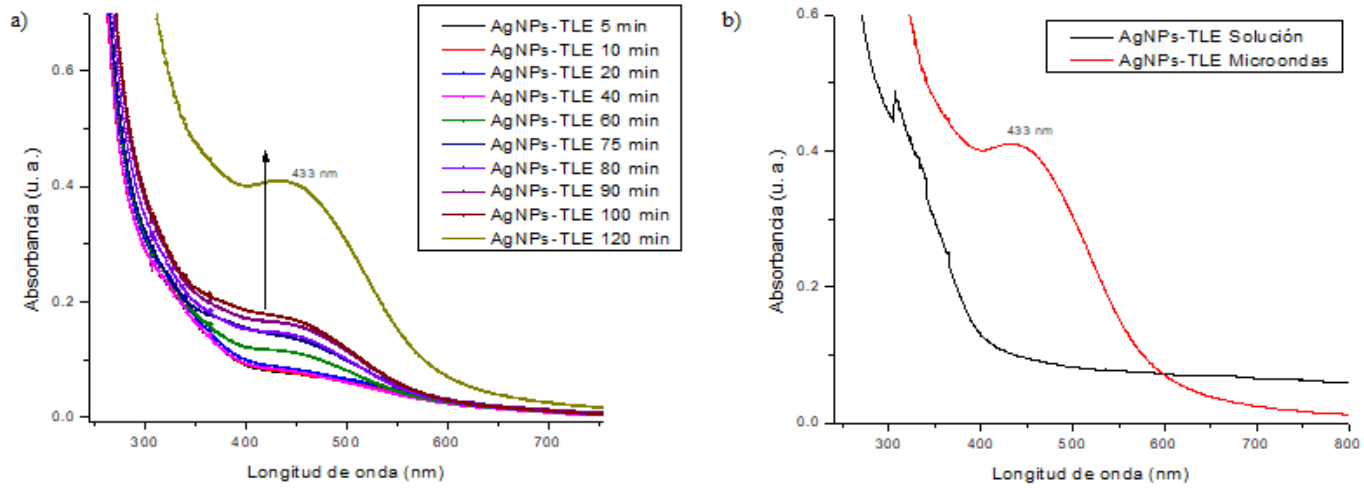


Figura 6. a) Monitoreo de la síntesis de AgNps-TLE a diferentes tiempos. b) Comparación de la síntesis en solución y asistida por microondas de las AgNPs-TLE.

Aplicaciones emergentes en DSSC

A pesar del creciente interés en la producción sustentable de nanopartículas (NPs), aún persiste la necesidad de estandarizar y optimizar las técnicas de síntesis, así como de evaluar su escalabilidad industrial y explorar nuevas aplicaciones. El método empleado, basado en el uso de extracto vegetal de *Catharanthus roseus*, representa una alternativa ecológica frente a los métodos químicos convencionales, contribuyendo al desarrollo de materiales funcionales con potencial en tecnologías solares.

Una de las propiedades más relevantes para futuras aplicaciones es la resonancia de plasmones de superficie localizada (LSPR) observada en las AgNPs obtenidas, la cual permite una eficiente absorción y dispersión de luz en el intervalo visible. Esta característica puede aprovecharse en el diseño de sensores solares para la detección de variaciones en la radiación, así como en la incorporación de capas activas (fotoánodo) en celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC), con el objetivo de mejorar la captación de luz.

Además, el crecimiento controlado y la estabilidad coloidal observados en la síntesis favorecen una interacción óptima con la luz solar, lo que podría contribuir a reducir las pérdidas por recombinación electrónica en dichos dispositivos fotovoltaicos. Estos hallazgos abren nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías solares más eficientes y sostenibles.

CONCLUSIONES

La síntesis de nanopartículas de plata mediante extracto de hoja de Teresita representa una alternativa ecológica, eficiente y sostenible frente a los métodos convencionales. Los resultados obtenidos mediante espectroscopía UV-Vis confirmaron la formación de AgNPs, evidenciada por la aparición de un pico característico de resonancia de plasmones de superficie localizada (LSPR), así como por el cambio de color en la solución coloidal. Las condiciones óptimas de síntesis (incluyendo concentración de $AgNO_3$, volumen de extracto, temperatura y tiempo de reacción) permitieron obtener nanopartículas con crecimiento controlado y buena estabilidad. Además, el uso de extractos vegetales facilita la reducción de iones metálicos sin necesidad de agentes químicos tóxicos, lo que refuerza su potencial para aplicaciones en tecnologías solares, sensores ópticos y procesos catalíticos. Estos hallazgos abren nuevas posibilidades para el desarrollo de nanomateriales funcionales dentro del marco de la química verde y su posible aplicación en celdas solares de nueva generación.

REFERENCIAS

Amirjani, A., Firouzi, F., and Haghshenas, D. F. (2020). Predicting the Size of Silver Nanoparticles from Their Optical Properties. Plasmonics, 15(4), 1077-1082.

Fahim, M., Shahzaib, A., Nishat, N., Jahan, A., Bhat, T. A., and Inam, A. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles: A comprehensive review of methods, influencing factors, and applications. JCIS Open, Elsevier B.V.

Gul, M., Kashif, M., Muhammad, S., Azizi, S., and Sun, H. (2025). Various Methods of Synthesis and Applications of Gold-Based Nanomaterials: A Detailed Review. Crystal Growth & Design.

Hernández-Díaz, M. N., Torres-Valencia, N., Miranda-Arámbula, M., Ríos-Cortés, A. M., Fernández-Luqueño, F., López-Gayou, V., and López-Valdez, F. (2024). rol de las plantas silvestres o cultivables de México en la síntesis de nanopartículas. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, 17(32), 1e–17e.

Ider, M., Abderrafi, K., and Eddahbi, (2017). A. Silver Metallic Nanoparticles with Surface Plasmon Resonance: Synthesis and Characterizations. J Clust Sci 28, 1051–1069.

Kazemi, S., Hosseingholian, A., Gohari, S. D., Feirahi, F., Moammeri, F., Mesbahian, G., Moghaddam, Z. S., and Ren, Q. (2023). Recent advances in green synthesized nanoparticles: from production to application. Materials Today Sustainability, Elsevier Ltd.

Kumar Verma, N. (2017). A brief study on Catharanthus Roseus: A review. ResearchGate.

Mehra, S., Bishnoi, S., Jaiswal, A., Jagadeeswararao, M., Srivastava, A. K., Sharma, S. N., and Vashishtha, P. (2020). A review on spectral converting nanomaterials as a photoanode layer in dye-sensitized solar cells with implementation in energy storage devices. Energy Storage, 2(2).

Mukunthan, K. S., Elumalai, E. K., Patel, T. N., and Murty, V. R. (2011). Catharanthus roseus: A natural source for the synthesis of silver nanoparticles. Asian Pac J Trop Biomed, 1(4), 270–274.

Nguyen, N. P. U., Dang, N. T., Doan, L., and Nguyen, T. T. H. (2023). Synthesis of Silver Nanoparticles: From Conventional to "Modern" Methods—A Review. Processes, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

Rafique, M., Sadaf, I., Rafique, M. S., and Tahir, M. B. (2017). A review on green synthesis of silver nanoparticles and their applications. Artif Cells Nanomed Biotechnol, Taylor and Francis Ltd.

Singh, P., and Sachdeva, A. (2024). DSSC Fundamentals and Optimization Materials: A Review. IOP Conf Ser Earth Environ Sci, Institute of Physics.

Wang, Y., Wu, W., and Ren, P. (2025). Classification, Functions, Development and Outlook of Photoanode Block Layer for Dye-Sensitized Solar Cells. Inorganics (Basel), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

Yeoh, M. E., and Chan, K. Y. (2017). Recent advances in photo-anode for dye-sensitized solar cells: a review. Int J Energy Res, John Wiley and Sons Ltd.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

PUNTOS CUÁNTICOS DE CARBONO: UN ENFOQUE SUSTENTABLE A LA INGENIERÍA FOTOVOLTAICA

David E. Márquez Ruiz, Marialy Manzanarez Torres, José de J. Campos Gaxiola, Adriana Cruz Enríquez
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. 6688127641, **davideduardomaquezruiz.24.uas@gmail.com, marialymt0403@gmail.com, gaxiolajose@uas.edu.mx, cruzadriana@uas.edu.mx**

RESUMEN

Ante la creciente demanda energética y la necesidad de soluciones sostenibles, las celdas solares han cobrado relevancia, aunque su eficiencia y costo aún son limitadas. En este contexto, los puntos cuánticos de carbono (CQDs) emergen como una alternativa prometedora, especialmente en celdas sensibilizadas por colorantes (DSSC) y celdas fotovoltaicas orgánicas (OPV), aunque aplicables para cualquier tipo de celda, donde mejoran la absorción de luz y el transporte de carga. Estos nanomateriales destacan por su baja toxicidad, bajo costo y propiedades ópticas ajustables, como la capacidad de convertir luz UV en radiación útil para la celda, incrementando su eficiencia hasta en un 20-30% según estudios recientes.

Este trabajo presenta un método sostenible y escalable para sintetizar CQDs a partir de extracto de piña (*Ananas comosus*), aprovechando residuos domésticos como fuente de carbono. Adicional a la síntesis realizada se caracterizó el material mediante espectroscopia UV-vis y Raman, donde los CQDs obtenidos muestran fotoluminiscencia ideal para aplicaciones fotovoltaicas. Su integración en DSSC no sólo optimiza el rendimiento, sino que también reduce el uso de metales pesados, alineándose con los principios de la química verde. Además, la presente investigación impulsa y fomenta la búsqueda de materiales fotovoltaicos eficientes, económicos y amigables con el ambiente, esenciales para la transición energética global.

ABSTRACT

Given the growing energy demand and the need for sustainable solutions, solar cells have gained relevance, although their efficiency and cost are still limited. In this context, carbon quantum dots (CQDs) emerge as a promising alternative, especially in dye-sensitized solar cells (DSSC) and organic photovoltaic cells (OPV), although applicable to any type of cell, where they improve light absorption and charge transport. These nanomaterials stand out for their low toxicity, low cost, and tunable optical properties, such as the ability to convert UV light into useful radiation for the cell, increasing its efficiency by up to 20–30% according to recent studies.

This research presents a sustainable and scalable method to synthesize CQDs from pineapple (*Ananas comosus*) extract, taking advantage of household waste as a carbon source. In addition to the synthesis, the material was characterized by UV–Vis and Raman spectroscopy, where the obtained CQDs showed high photoluminescence and thermal stability, ideal for photovoltaic applications. Their integration into DSSCs not only optimizes performance but also reduces the use of heavy metals, aligning with the principles of green chemistry. Furthermore, this research promotes and encourages the search for efficient, cost-effective, and environmentally friendly photovoltaic materials, essential for the global energy transition.

Palabras clave: puntos cuánticos de carbono, nanomateriales, método sostenible, química verde, materiales fotovoltaicos.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial en los últimos años ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía que permitan satisfacer las necesidades de la sociedad de manera sostenible, sin comprometer los recursos futuros. Para mitigar esta problemática, las energías renovables (ER) se han postulado como las alternativas más prometedoras debido a su bajo impacto en la huella de carbono y su potencial de adaptación a las condiciones específicas de cada comunidad. (Roldán Viloria, 2013)

Entre las diversas tecnologías que conforman las ER, aquellas que aprovechan la radiación solar han tenido la mayor repercusión, dada la cantidad de energía que pueden generar y su versatilidad. En consecuencia, a lo largo de los años, la energía solar —en particular la fotovoltaica— ha sido ampliamente estudiada con el objetivo de captar la mayor cantidad de energía posible. No obstante, hasta la fecha, esta tecnología aún presenta desventajas, entre las que destaca la baja eficiencia en la captación de energía en comparación con la radiación recibida. Es decir, los materiales utilizados en los módulos fotovoltaicos tienen limitaciones inherentes en su capacidad para absorber y transformar la energía solar en eléctrica. (Ramalingam & Indulkar, 2017)

Con el fin de superar estas limitaciones, se han estudiado diversos tipos de celdas fotovoltaicas. Entre ellas, las celdas fotovoltaicas orgánicas (OPV) destacan como una tecnología prometedora para alcanzar objetivos de desarrollo sostenible, gracias a su bajo costo de fabricación y su potencial de generación energética. Estas celdas están constituidas por películas delgadas de aproximadamente 100 nm de semiconductores orgánicos, como polímeros. Estos polímeros se componen de moléculas pequeñas como pentaceno, poli(*p*-fenilenvinileno) [PPV], ftalocianina de cobre (un pigmento orgánico azul o verde) y nanoestructuras de carbono como grafeno, fullereno o nanotubos, entre otros. (Sampaio & González, 2017)

Por otra parte, otra tecnología emergente que ha ganado atención en los últimos años debido a su versatilidad de diseño son las celdas solares

sensibilizadas por colorantes (DSSC). Se trata de un tipo de celda solar de tercera generación que, en cierta forma, imita el mecanismo de la fotosíntesis: utiliza un colorante para captar la luz solar y generar electricidad. Este tipo de celda está conformada por: un sustrato conductor transparente [comúnmente óxido de estaño dopado con flúor (FTO) u óxido de indio-estaño (ITO)], una capa de óxido semiconductor mesoporoso (usualmente TiO_2), el sensibilizador o colorante (que puede ser una molécula o nanomaterial, como los CQDs, que absorbe la luz y transfiere electrones al TiO_2), un electrolito que facilita el flujo de electrones entre el sensibilizador y el TiO_2, y un contraelectrodo (normalmente vidrio TCO recubierto con platino u otros materiales catalíticos). (Francis & Ikenna, 2021)

Ahora bien, el único requerimiento que es necesario en materia de nanomateriales utilizados en este tipo de celdas es que sean basadas en carbono. En este sentido, los puntos cuánticos de carbono (CQDs) los cuales son un tipo de nanoestructuras con tamaño en torno a los 10 nm, que debido al confinamiento cuántico de su estructura poseen niveles de energía discreto que confieren sus propiedades altamente fotoluminiscentes, representan una opción con gran potencial para mejorar sustancialmente la capacidad de absorción tanto de las OPV como de las DSSC.

¿Por qué elegir CQDs sobre otros materiales especiales de carbono?

Los CQDs resultan una opción viable como fuente de carbono en la elaboración de celdas fotovoltaicas orgánicas debido a las siguientes razones:

- En comparación con otras nanoestructuras, se obtienen fácilmente, lo que permite economizar recursos mediante síntesis rápidas y de bajo costo.
- Versatilidad en su obtención, ya que las fuentes de carbono son amplias y cada vez es más común utilizar residuos agrícolas.
- Alta solubilidad y funcionalización sencilla gracias a la presencia de grupos funcionales como hidroxilo, carboxilo o amina, lo que facilita su dispersión en agua y otros solventes, así como el acoplamiento de moléculas orgánicas, inorgánicas o biológicas.
- Exhiben fotoluminiscencia ajustable en función de su tamaño y grupos funcionales superficiales, una característica no tan directa en nanotubos de carbono (CNTs) o grafeno.

Por estas razones, los CQDs se postulan como una de las mejores opciones para su aplicación en ingeniería fotovoltaica . (Lim et al., 2015)

¿Cuál es el beneficio de usar CQDs en celdas solares?

La incorporación de CQDs en celdas solares ofrece varias ventajas importantes. En las DSSC, pueden actuar como co-sensibilizadores o modificadores del fotoánodo, mejorando la absorción de luz, la transferencia de electrones y la estabilidad del dispositivo; sin embargo, las eficiencias máximas reportadas se mantienen por debajo del 20%, alcanzando valores récord alrededor del 15%. En las celdas solares orgánicas (OPV), se incorporan como aditivos en la capa activa o en las interfases para optimizar la extracción de cargas y reducir la recombinación, incrementando sustancialmente la eficiencia, aunque sin superar el 20%. Por otro lado, en configuraciones híbridas en tándem de perovskita, los CQDs pueden integrarse como capa de transporte electrónico o intermedia, actuando como "relevos de energía" (*energy relay*) para mejorar la absorción de luz, la extracción de electrones y la estabilidad; en estos casos, sí se han logrado eficiencias superiores al 20%, alcanzando hasta un 25% en dispositivos de laboratorio. (Cheruku et al., 2023; Cui et al., 2021; Etefa et al., 2020; Koswatta et al., 2025; Lin et al., 2016)

Por lo tanto, el uso de materiales como los CQDs en diversas tecnologías fotovoltaicas constituye una opción favorable para mejorar la eficiencia energética con un bajo costo de recursos.

METODOLOGÍA PARA OBTENCION DE CQDs

Material requerido.

- *Materiales y reactivos químicos:* Cáscara de piña (*Ananas comosus*) obtenida como desecho doméstico, 2,6-diaminopiridina, agua destilada.
- *Equipo menor y cristalería:* Balanza analítica marca Santorius, termo-agitador marca Thermo, equipo de ultrasonido, pipetas de 10 mL, vasos de precipitados, matraces volumétricos, papel filtro, etc.

Infraestructura.

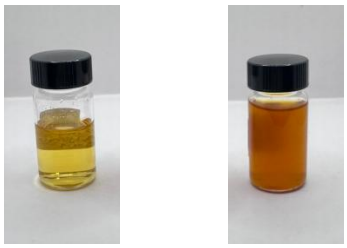
Las actividades experimentales se realizaron en el siguiente laboratorio:
Laboratorio de Química y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Mochis (FIM) en la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS).

Experimentación

Se obtuvieron dos muestras de 5 g c/u de cáscara de piña (*Ananas comosus*) previamente lavada, triturada y secada a temperatura ambiente. La primera de las muestras se depositó directamente en un recipiente de teflón, que éste a su vez se colocó en la autoclave y se cerró.

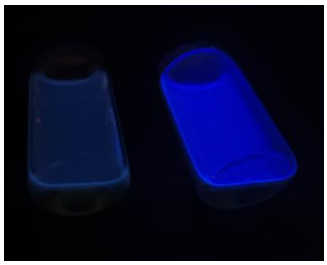
Con la segunda muestra se obtuvo un extracto agregando 30 mL de agua destilada y 5 g de cáscara manteniendo en agitación a 80°C por 30 min; obtenido el extracto se filtró y se tomó una muestra de 5 mL a los cuales se le adicionaron 10 mg de 2,6-diaminopiridina, y se depositó en un recipiente de teflón para autoclave. Ambas autoclaves se introdujeron al horno por 20 hr a 180°C.

Transcurrido el tiempo de calentamiento las autoclaves se retiraron del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se retiró el producto obtenido de la primera de ellas, el cual se depositó en un vaso de precipitados y se añadió 20 mL de agua destilada para su posterior tratamiento en ultrasonido por 20 min. Por último, las dispersiones obtenidas se filtraron. Bajo la luz visible, la dispersión presenta coloración amarillo pálido para la primera, mientras que la segunda se observa de color naranja. (Figura 1), mientras que bajo la lámpara de luz UV a una longitud de onda de 365 nm, ambas presentan luminiscencia de color azul (Figura 2).



a) b)

Figura 1. Dispersiones de CQDs obtenidos, donde: a) muestra a partir de la cáscara de piña y b) muestra que además contiene 2,6-diaminopiridina.



a) b)

Figura 2. Dispersiones de CQDs bajo luz UV (365 nm); izquierda) muestra a partir de la cáscara de piña y derecha) muestra que además contiene 2,6-diaminopiridina.

Caracterización y resultados

Caracterización por espectroscopia UV-vis.

Los CQDs sintetizados se caracterización por medio de espectroscopia UV-vis preparando dispersiones a una concentración de 10% en volumen con agua destilada.

Resultados obtenidos por espectrofotometría UV-vis.

En la Figura 3 se muestran los espectros de absorción de los CQDs obtenidos, la banda de absorción que aparece en el intervalo de 215-218 nm corresponde a las transiciones π-π^* de los enlaces C=C (red de carbonos con hibridación sp^2), mientras que las bandas de absorción que se observan alrededor de 278 nm corresponden a las transiciones n-π^* correspondiente a los grupos funcionales del tipo -COH, -NH_2 y -OH que se encuentran en el borde de la estructura que se muestra en la Figura 4. (Ding et al., 2013)

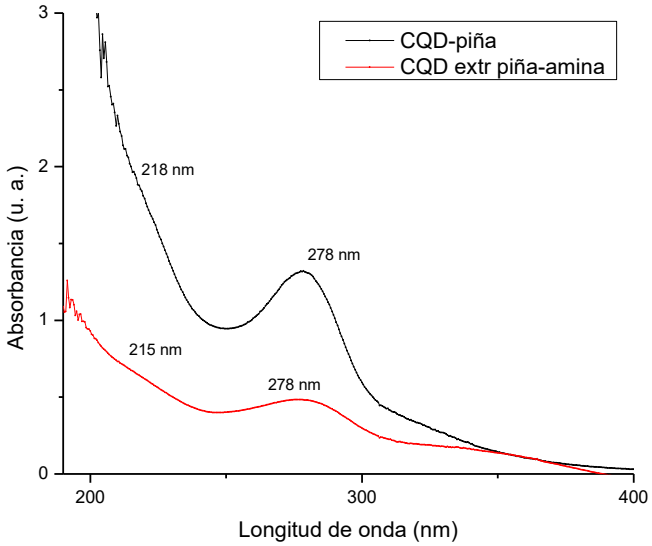


Figura 3. Comparación de absorción entre los CQD obtenidos con cáscara de piña calcinada (línea color negro) y la muestra de extracto de piña con 2,6-diaminopiridina (línea color rojo), a una concentración del 10% en agua.

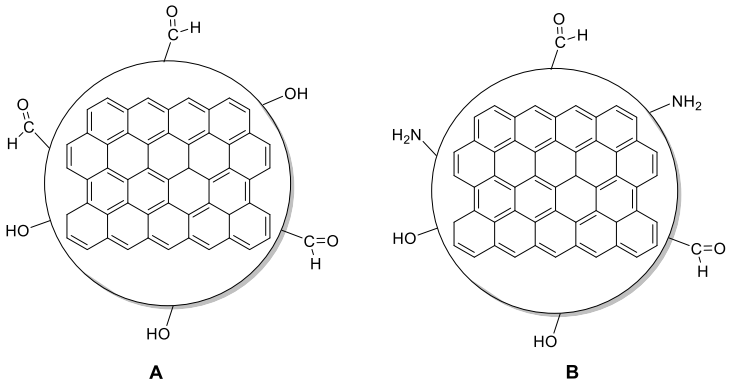


Figura 4. Estructuras propuestas para los CQDs sintetizados a partir de cáscara de piña (**A**) y cáscara de piña en combinación con 2,6-diaminopiridina **(B)**.

Caracterización por espectroscopía Raman.

Para complementar la caracterización de los CQDs obtenidos con los grupos funcionales -NH_2, se analizaron mediante espectroscopía Raman para la cual se tomaron 10 ml de la disolución, para realizar un centrifugado a 15 000 rpm por 20 min, con la finalidad de eliminar impurezas.

Resultados obtenidos por espectroscopía Raman.

El espectro Raman se muestra en la Figura 5, donde se pueden observar una banda intensa a 1340 cm^{-1} característica de la estructura tipo grafito de los CQDs.(Ding et al., 2013)

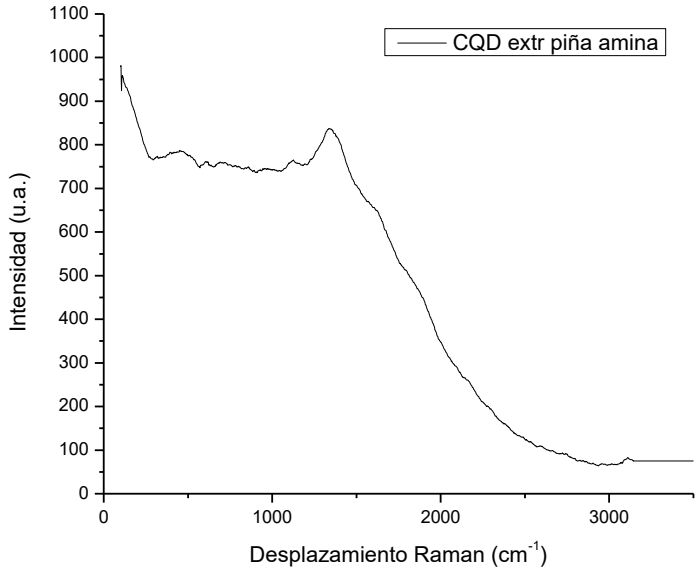


Figura 5. Espectro Raman de CQD obtenido con extracto de cáscara de piña con 2,6-diaminopiridina.

CONCLUSIÓN

Se lograron sintetizar puntos cuánticos de carbono (CQDs) mediante un método de síntesis verde sencillo y de bajo costo a partir de la cáscara de piña, que de acuerdo a sus propiedades ópticas y estructurales podrían ser consideradas para aplicarse en celdas solares con el propósito de mejorar la eficiencia de éstas, acelerando así la transición hacia un modelo energético global basado en fuentes renovables, accesibles y sostenibles.

REFERENCIAS

Cheruku, R., Kim, J. H., Krishna, V. B. M., Periyat, P., & SSSR, S. D. (2023). Photo-electrodes decorated with carbon quantum dots: Efficient dye-sensitized solar cells. *Results in Engineering*, *20*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101611

Cui, Y., Yao, H., Hong, L., Zhang, T., Tang, Y., Lin, B., Xian, K., Gao, B., An, C., Bi, P., Ma, W., & Hou, J. (2021). Organic photovoltaic cell with 17% efficiency and superior processability. *National Science Review*, *7*(7), 1239–1246. https://doi.org/10.1093/NSR/NWZ200

Ding, H., Cheng, L. W., Ma, Y. Y., Kong, J. L., & Xiong, H. M. (2013). Luminescent carbon quantum dots and their application in cell imaging. *New Journal of Chemistry*, *37*(8), 2515–2520. https://doi.org/10.1039/c3nj00366c

Etefa, H. F., Imae, T., & Yanagida, M. (2020). Enhanced Photosensitization by Carbon Dots Co-adsorbing with Dye on p-Type Semiconductor (Nickel Oxide) Solar Cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *12*(16), 18596–18608. https://doi.org/10.1021/acsami.0c02413

Francis, O. I., & Ikenna, A. (2021). Review of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSCs) Development. *Natural Science*, *13*(12), 496–509. https://doi.org/10.4236/ns.2021.1312043

Koswatta, A. C. W. W. M. N. P., Rajakaruna, Tharindu. P. B., Weerasinghe, R. W., Senevirathnage, T. U., Sarangika, H. N. M., Udawatte, C. P., Koswattage, K. R., Araki, Y., Matsushima, T., Qin, C., Adachi, C., & Sandanayaka, A. S. D. (2025). Boosting Solar Cell Efficiency: Enhancing Dye-Sensitized Solar Cell Performance with Carbon Quantum Dots and Titanium Dioxide Nanostructures from Sri Lankan Ilmenite. *ACS Omega*. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02272

Lim, S. Y., Shen, W., & Gao, Z. (2015). Carbon quantum dots and their applications. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 44, Issue 1, pp. 362–381). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/c4cs00269e

Lin, X., Yang, Y., Nian, L., Su, H., Ou, J., Yuan, Z., Xie, F., Hong, W., Yu, D., Zhang, M., Ma, Y., & Chen, X. (2016). Interfacial modification layers based on carbon dots for efficient inverted polymer solar cells exceeding 10% power conversion efficiency. *Nano Energy*, *26*, 216–223. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.011

Ramalingam, K., & Indulkar, C. (2017). Solar energy and photovoltaic technology. *Distributed Generation Systems*, 69–147.

Roldán Viloria, J. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber*. Ediciones Paraninfo, SA.

Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 74, pp. 590–601). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

GENERACIÓN ELÉCTRICA EFICIENTE MEDIANTE PANELES SOLARES Y CONTROL PREDICTIVO AVANZADO

Nimrod Vázquez Nava
Departamento de Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Antonio García Cubas #600, Celaya, Guanajuato, México, Tel. 461 61 175 75, C.P. 38010, **n.vazquez@ieee.org**

Claudia Verónica Hernández Gutiérrez
Departamento de Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Antonio García Cubas #600, Celaya, Guanajuato, México, Tel. 461 61 175 75, C.P. 38010, **claudia.hernandez@itcelaya.edu.mx**.

Raúl Castillo Meraz
Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, Av. Chapultepec #1570, San Luís Potosí, San Luís Potosí, México, Tel. 444 826 2300, C.P. 78295, **raul.castillo@uaslp.mx**

César Augusto Limones Pozos
Departamento de Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Antonio García Cubas #600, Celaya, Guanajuato, México, Tel. 461 61 175 75, C.P. 38010, **d2103013@itcelaya.edu.mx**.

Joaquín Vaquero López
Departamento de Electrónica, Universidad Rey Juan Carlos, Av. del Alcalde de Móstoles s/n, Móstoles, Madrid, España, C.P. 28933, Tel. (+34) 916655060, **joaquin.vaquero@urjc.es**.

Leonel Estrada Rojo
Departamento de Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Antonio García Cubas #600, Celaya, Guanajuato, México, Tel. 461 61 175 75, C.P. 38010, **l.estrada@itsur.edu.mx**

RESUMEN

El presente trabajo muestra una propuesta de aplicación de control avanzado orientado a Inversores Trifásicos de Tres niveles en topología de Neutro Activo Fijo (ANPC) utilizado en combinación con Paneles Solares para inyectar energía a la red eléctrica. Usualmente, estos Inversores son controlados mediante estrategias lineales clásicas o con técnicas de Control Predictivo (MPC), Control Basado en Pasividad (PBC) o por Modos Deslizantes (SMC). La importancia del diseño de un controlador adecuado para operar estos inversores sea en versión monofásica o trifásica, impacta directamente en la calidad de la energía obtenida y la eficiencia de conversión de los paneles. Este aspecto es de suma relevancia para la inyección de energía a la red eléctrica dado que, por lo general, los paneles solares comerciales aún tienen una baja eficiencia de conversión eléctrica (<30%); por tanto, se desea obtener un máximo rendimiento y eficiencia al momento de inyectar energía a la red eléctrica y esto se puede lograr mejorando la estrategia de control del inversor. Este trabajo propone un controlador basado en SMC en combinación con MPC de tipo FCS, ofreciendo una buena respuesta dinámica, tiempo de cómputo reducido y una menor dependencia de los parámetros del modelo del sistema.

ABSTRACT

This work presents a proposal for the application of advanced control oriented towards Three-Level Three-Phase Inverters with Fixed Active Neutral Point Clamped (ANPC) topology, used in combination with Solar Panels to inject energy into the electrical grid. Typically, these inverters are controlled using classical linear strategies or techniques such as Model Predictive Control (MPC), Passivity-Based Control (PBC), or Sliding Mode Control (SMC). The importance of designing an appropriate controller for operating these inverters—whether in single-phase or three-phase configuration—has a direct impact on the quality of the energy produced and the conversion efficiency of the solar panels. This aspect is highly relevant for grid-tied energy injection since most commercial solar panels still exhibit relatively low electrical conversion efficiency (<30%). Therefore, maximizing performance and efficiency during energy injection is desirable, and this can be achieved by improving the inverter's control strategy. This work proposes a controller based on SMC in combination with Finite Control Set (FCS)-type MPC, offering good dynamic response, reduced computation time, and lower dependency on system model parameters.

Palabras claves: ANPC, Control Predictivo, Control por Modos Deslizantes, Convertidores Bidireccionales, Inversor Multinivel.

INTRODUCCIÓN

En la década de los 80 del siglo XX, el aumento de cargas eléctricas críticas y sensibles demandó una red eléctrica más estable y fiable. Se comenzó a hablar del concepto actual de Calidad de Red o Power Quality (PQ) y se desarrollaron los primeros equipos de electrónica de potencia aplicados a la mejora de la PQ. Estos equipos se englobaron bajo los conceptos de Flexible AC Transmission Systems (FACTS) en las redes de transporte de energía eléctrica y de Custom Power, su equivalente para redes de distribución eléctrica [1].

Posteriormente fueron apareciendo los llamados Recursos Energéticos Distribuidos (DER, por sus siglas en inglés) como las fuentes de energía renovable, los sistemas de cogeneración, los sistemas de almacenamiento de energía e incluso el vehículo eléctrico. En este contexto un consumidor puede ser también a la vez productor de energía eléctrica. Esto implica que las redes eléctricas deben evolucionar hacia el concepto de red eléctrica inteligente o Smart Grid. Para gestionar estas redes de manera sostenible, económica y segura se debe tener en cuenta la generación, el transporte, la distribución, el consumo y a aquellos agentes que puedan ejercer como generadores o como consumidores indistintamente [2].

La propuesta más aceptada de integrar estos DER en los niveles de media tensión de las redes eléctricas son las Microrredes o Microgrids [3]. En función del tipo de DER, las microrredes pueden ser de CC, de CA o híbridas. En este contexto nace en la primera década del presente siglo el concepto de Energy Internet [4] en el que se propone un control del flujo de potencia en las redes de distribución de manera similar al flujo de información en Internet. Para implementar este concepto es necesario desarrollar un equivalente a un enrutador o router de energía que maneje el flujo de la potencia y sirva de interfaz de conexión. Un dispositivo adecuado para esta función, entre otras opciones, sería el denominado transformador de estado sólido o SST (Solid State Transformer) [5], siendo este un campo muy activo en la investigación en electrónica de potencia actual. Un SST es, en general, un convertidor electrónico de potencia bidireccional que se conecta a una red de CA de media tensión, con una etapa una intermedia de alta frecuencia y con aislamiento galvánico y que proporciona tensiones de CA y/o CC de baja tensión (BT) a su salida. En la configuración más general de un SST existe una etapa de entrada y otra de salida que son convertidores electrónicos de potencia bidireccionales CC/CA como se muestra en la figura 1.

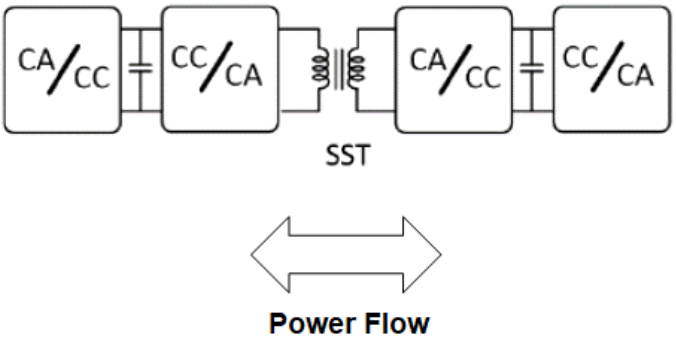


Figura 1 Configuración típica de convertidores bidireccionales con SST

Observando la configuración de la figura 1, se puede apreciar que una parte importante para gestionar la energía es el convertidor CC/CA el cual también es conocido como “Inversor Multinivel”.

Un Inversor Multinivel es un dispositivo electrónico cuya función es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador (figura 2). Estos dispositivos se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para controlar alta potencia. Además, también se utilizan para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, etcétera en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas [6].

Las topologías mas utilizadas para los inversores multinivel son:

- Inversor multinivel con neutro fijo (NPC)
- Inversor multinivel con capacitor flotante (FC)
- Inversor multinivel en cascada (CHB)
- Inversor multinivel con neutro activo fijo (ANPC)

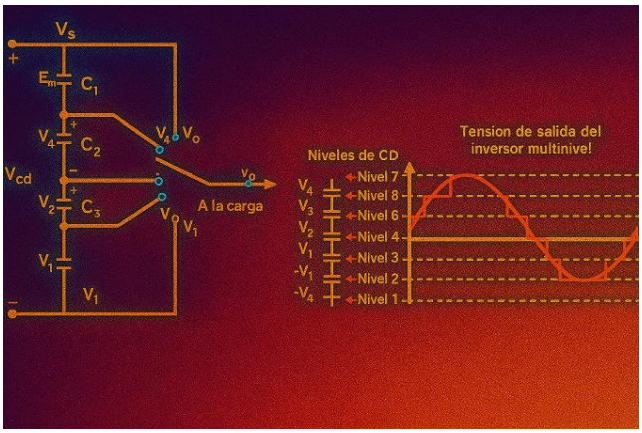


Figura 2 Esquema típico de un inversor de 7 niveles

En el presente trabajo utilizaremos una topología de tipo ANPC de 3 niveles y su control y modulación serán descritos a detalle en la siguiente sección.

MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de los convertidores bidireccionales CC/CA es necesario seleccionar 3 elementos fundamentales:

- Topología del inversor
- Estrategia de Control y modulación
- Plataforma de desarrollo para el controlador y la modulación

Topología del Inversor: Inversor de 3 niveles con neutro activo fijo (ANPC)

Los primeros reportes de esta topología datan del año 2005. Es una variante de la topología NPC anteriormente mencionada en la que se sustituyen los diodos por transistores gracias a lo cual se consigue un reparto activo de las pérdidas soslayando así uno de los inconvenientes de la topología NPC. Por otra parte, dados los niveles de tensión de CC propuestos en torno a los 1.000-1.500V y con los semiconductores actuales, una topología de 3 niveles sería suficiente, minimizándose otro de los inconvenientes de esta topología en cuanto a número de semiconductores y equilibrado de las tensiones de los condensadores de entrada, conforme a la experiencia previa.

En la figura 3 se muestra un inversor ANPC monofásico de 3 niveles.

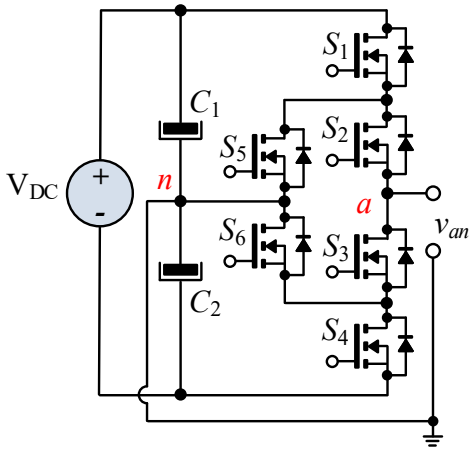


Figura 3 Inversor monofásico ANPC de 3 niveles

En el presente trabajo, será considera la versión trifásica como se muestra en la figura 4.

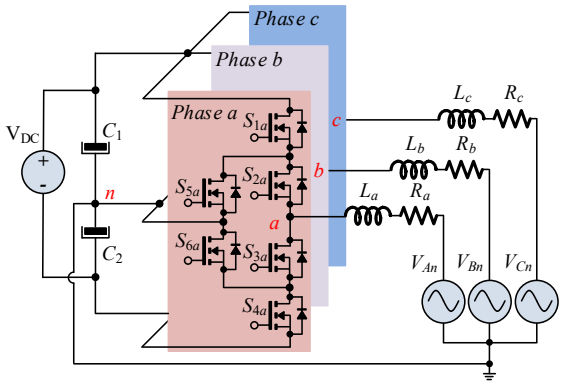


Figura 4 Inversor trifásico ANPC de 3 niveles considerado en este trabajo

Estrategia de Control y modulación: Control Predictivo de Conjunto Finito basado en Modos Deslizantes (FCS-MPC-SMC)

El Control Predictivo basado en Modelo de tipo Finito (FCS-MPC) cubre un amplio rango de controladores que han encontrado aplicación, principalmente, en Convertidores de potencia. Nace en aplicaciones industriales en la década de los 60's [8]; sin embargo, su versatilidad ha hecho que se extienda a otros campos de aplicación como, por ejemplo, la Electrónica de Potencia y los convertidores.

La principal característica del Control Predictivo es el uso de un modelo del sistema para predecir el comportamiento futuro de las variables de control. Esta información es utilizada por el controlador para obtener la salida óptima de acuerdo al criterio de optimización predefinido.

Los principios fundamentales de operación del MPC son los siguientes:

1. El uso de un modelo para predecir el comportamiento futuro de las variables en un horizonte en el tiempo.
2. Una función de coste que representa el comportamiento deseado del sistema.
3. La optimización se obtiene minimizando la función de coste.

Por otra parte, el Control por Modos Deslizantes (SMC) [9] nace en la década de los 50's en aplicaciones de ingeniería mecánica en problemas relacionados a actuadores con fricción. Sin embargo, su versatilidad en respuesta de sistemas que tienen discontinuidades ha hecho que su aplicación se extienda a una amplia variedad de sistemas como los Convertidores de Potencia.

Las principales ventajas de este método son:

- Es una estrategia robusta ante un gran número de perturbaciones e incertidumbres del modelo.
- Se necesita poca información del sistema a controlar en comparación con las técnicas de control clásico.
- La posibilidad de estabilizar algunos sistemas no lineales los cuales no pueden ser estabilizados por leyes de control clásicas en retroalimentación.

La estrategia SMC ha sido ampliamente utilizada en convertidores de potencia [10]. Esta estrategia considera una superficie deslizante con un controlador el cual forza al sistema envolverse en esta superficie y a permanecer en ella.

Plataforma de desarrollo para el controlador y la modulación

La CPU cRIO-9067 cuenta con procesador de doble núcleo de 667 MHz, 512 MB de DRAM, 1 GB de almacenamiento, FPGA Zynq-7020 y controlador CompactRIO de 8 ranuras. El cRIO-9067 es un controlador integrado, resistente y sin ventilador que puede utilizar para aplicaciones avanzadas de control y monitoreo. Este controlador diseñado por software cuenta con una FPGA, un procesador en tiempo real que ejecuta el sistema operativo NI Linux Real-Time y capacidad de interfaz de usuario integrada. Además, el cRIO-9067 cuenta con una variedad de puertos de conectividad, incluidos dos Gigabit Ethernet RJ-45 de tres velocidades, un host USB y un puerto serie RS-232. La cRIO-9067 se muestra en la figura 5.



Figura 5 La plataforma de control cRIO-9067

RESULTADOS

A continuación se muestran algunos resultados preliminares en simulación previa a la implementación, mediante el software PSIM®.

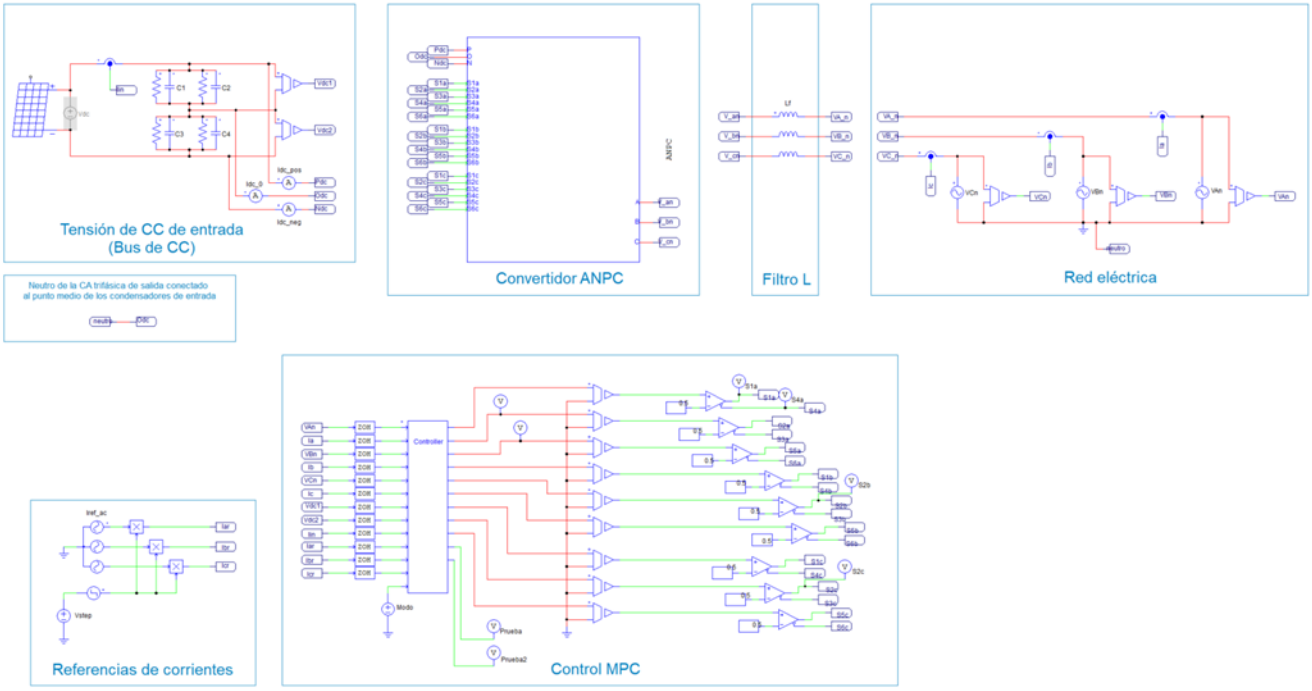


Figura 6 Esquemático completo simulado en PSIM®

En la etapa de Corriente Directa (DC) se considera un arreglo serie de paneles solares que en su conjunto proporcionan 1000VDC a una corriente de 3.92 Amperes.

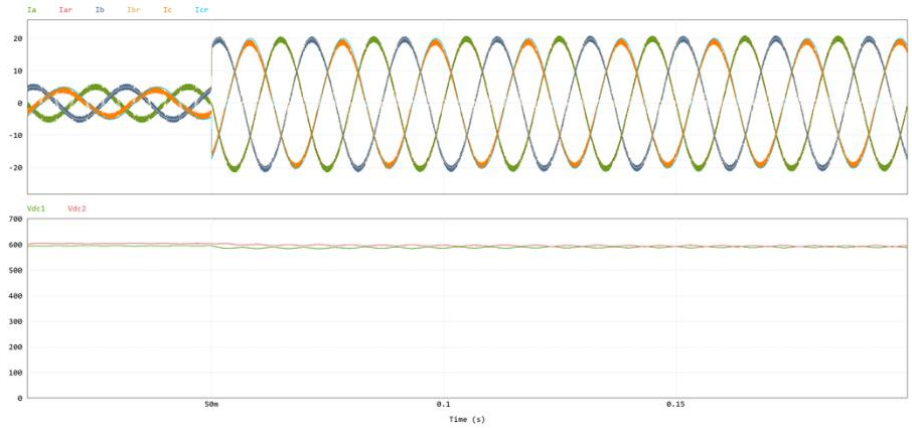


Figura 7. Evolución de los voltajes en los condensadores de entrada de CD ante un cambio brusco de las referencias de corriente

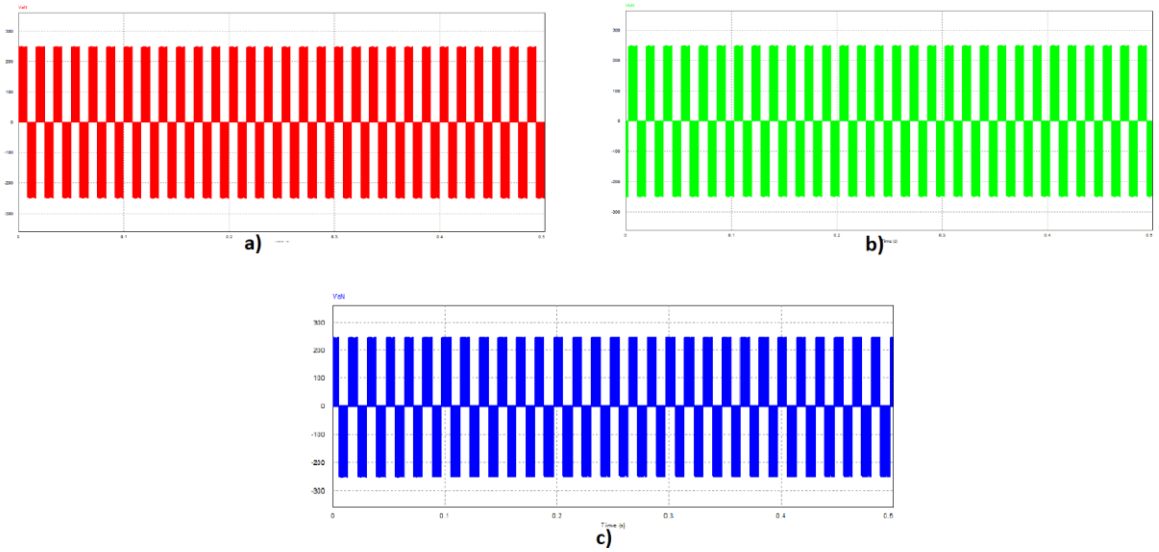


Figura 8. a) Voltaje de salida fase a, b) Voltaje de salida fase b, c) Voltaje de salida fase c

A continuación se muestra la implementación física del inversor ANPC trifásico donde se utilizaron Mosfet de SiC dada su versatilidad y eficiencia. Se utilizaron conductores basados en fibra óptica para el sensado y envío de disparos a los elementos de potencia.

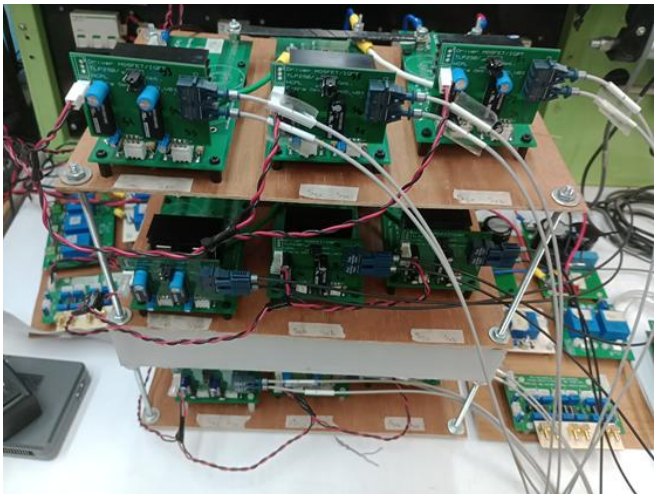


Figura 9. Inversor ANPC trifásico conectado a las diferentes tarjetas acondicionadoras

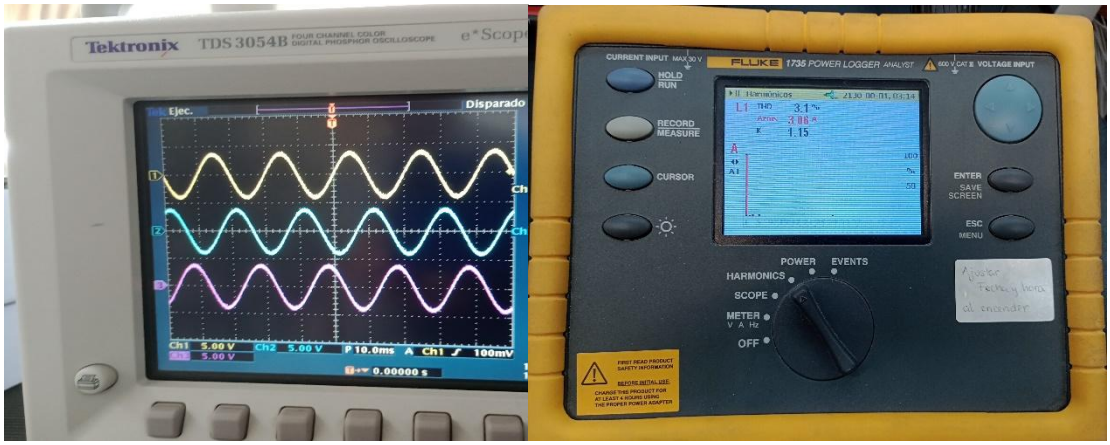


Figura 10. a) Voltajes en las 3 fases de salida del inversor; b) THD promedio (3.1%) obtenido a la salida del inversor

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró un Inversor Trifásico en topología ANPC controlado por la estrategia mixta MPC-FCS-SMC. El arreglo FV considerado fue un arreglo de paneles en serie con un voltaje total de 1000 VDC y 3.92 A de corriente.

La estrategia de control propuesta combina las ventajas del Control Predictivo y del Control por Modos Deslizantes haciendo que el inversor trifásico funcione de manera eficaz; sin embargo, la dificultad de esta estrategia radicó en el modelo matemático utilizado para desarrollar el control predictivo, la modulación mixta utilizada así como la cantidad de sensores utilizada (8 sensores LA-25NP para medir corriente y 5 sensores LV-25P para medir voltaje).

El Inversor funcionó de manera correcta ante los cambios bruscos de carga y de corriente de referencia; además, mostro un bajo THD de 3.1%.

El uso de Mosfet de Carburo de Silicio (SiC) como elemento de potencia contribuyó a obtener menores pérdidas por conmutación y una mayor eficiencia. Asimismo, estos elementos contribuyeron a facilitar el diseño del filtro a la salida y permite trabajar a frecuencias de conmutación mas elevadas, soportando un mayor rango de voltaje que los Mosfet tradicionales.

Al utilizar Mosfet de SiC así como conductores basados en fibra óptica, se redujo la Emisión Electromagnética (EMI) y el ruido en los pulsos de modulación.

REFERENCIAS

[1] Akira Nabae, Isao Takahashi, Hirofumi Akagi, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17, No. 5, Pp. 518 – 523, 1981.

[2] P. Barbosa, P. Steimer et al, “Active-Neutral-Point-Clamped (ANPC) Multilevel Converter Technology” in Proc. EPE, Sep. 2005, pp. 1–10.

[3] A. Maswood, H. Dehghani, “Advanced Multilevel Converters and Applications in Grid Integration”, Wiley, 2019, pp. 275-277.

[4] L. Estrada, N. Vazquez, J. Vaquero Lopez, C. Hernandez, J. Arau and H. Huerta, “Finite Control Set Model Predictive Control based on Sliding Mode for Bidirectional Power Inverter”. IEEE Transactions on Energy Conversion

[5] H. López, N. Vázquez, J. Rodriguez, E. Vázquez, J. Arau, and F. J. Perez-Pinal, “Analysis and implementation of a finite-control-set by using model solution-based control for three-phase VSI,” IET Power Electron., vol. 10, no. 14, pp. 1832–1840, 2017.

[6] R. P. Vieira, L. T. Martins, J. R. Massing and M. Stefanello, "Sliding Mode Controller in a Multiloop Framework for a Grid-Connected VSI With LCL Filter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 6, pp. 4714- 4723, June 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2772143.

[7] M. Saad Rafaq, S.A. Qasem Mohammed, H. Choi, and J.W. Jung, “An Improved Sliding Mode Control Technique to Mitigate Mismatched Parameter Uncertainties ofT hree-Phase Voltage Source Inverters,” IEEE Access, vol. 8, pp. 81932 - 81942, April 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990763.

[8] N. Altin, S. Ozdemir, H. Komurcugil and I. Sefa, "Sliding-Mode Control in Natural Frame with Reduced Number of Sensors for Three-Phase Grid-Tied LCL-Interfaced Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 4, pp. 2903-2913, April 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2847675.

[9] Q.-X. Guan et al., "An Extremely High Efficient Three-Level Active Neutral-Point-Clamped Converter Comprising SiC and Si Hybrid Power Stages," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 10, pp. 8341-8352, Oct. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2784821.

[10] H. Messaoud, A. Bennani-Benabdelghani, N. Mrabet-Bellaaj. “High performance Three Level ANPC Inverter with Thermal Balancing PWM Strategy for Grid Connected PV System,” in International Journal of Renewable Energy Research, Vol.8, No.4, December, 2018, doi.org/10.20508/ijrer.v8i4.8389.g7514.

Cocinas Solares, Secaderos, Destilación y Desinfección Solar/ Análisis de modelos de negocio

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2199	Estudio de factibilidad tecno-económico de sistemas termosolares para la activación de una máquina de desalinización y enfriamiento	Luis López Martínez
2195	Caracterización de una planta piloto de destilación por membrana multiefecto al vacío alimentada con energía solar térmica	Robinson Ramírez
2072	Panorama del mercado de baterías de litio en México: oportunidades, retos y perspectivas para la soberanía energética	Ricardo Alberto Rodríguez Carvajal
1760	Dimensionamiento de una fuente de alimentación en CD para un datalogger termohigrométrico aplicado a un secador solar	Jesús O. Álvarez Ruíz

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TECNO-ECONÓMICO DE SISTEMAS TERMOSOLARES PARA LA ACTIVACIÓN DE UNA MÁQUINA DE DESALINIZACIÓN Y ENFRIAMIENTO

Luis A. López Martínez, Nicolás Velázquez Limón, Saúl Islas Pereda, Cristian Casares de la Torre
Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER), Instituto de Ingeniería, Calle Normal S/N, Mexicali, Baja California, 21289, México,6861504097, **a1163174@uabc.edu.mx.**

RESUMEN

En los últimos años, se han desarrollado diversas máquinas de desalinización que destacan por su creciente eficiencia y por su capacidad de operar a temperaturas inferiores a las requeridas por los sistemas convencionales. Estas innovaciones presentan un potencial significativo frente a las tecnologías tradicionales, lo que plantea la necesidad de evaluar su desempeño al ser activadas mediante sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica, y compararlas con aquellas que requieren temperaturas convencionales. En este contexto, la presente investigación analiza la viabilidad técnica y económica de un sistema de captación y almacenamiento solar térmico diseñado para activar una máquina innovadora capaz de producir simultáneamente agua y enfriamiento. El estudio se centró en una comunidad costera integrada por 20 viviendas, cuyas condiciones específicas fueron consideradas en el diseño del sistema, evaluado mediante simulaciones en un entorno computacional especializado. El hallazgo más relevante corresponde a la comparación entre la máquina innovadora y un sistema convencional. Los resultados indican que, al requerir menor energía para su operación, la nueva máquina puede producir el mismo volumen de agua y enfriamiento utilizando un sistema solar considerablemente más compacto. El sistema convencional requiere 92.61 m² de captación solar y 10 m³ de almacenamiento térmico, mientras que la máquina de baja temperatura de activación demanda únicamente 39.69 m² de captación y 2 m³ de almacenamiento, lo que representa una reducción del 57.1 % en el área de captación y del 80 % en el volumen de almacenamiento. Desde la perspectiva económica, se obtuvo una reducción del 53 % en los costos totales. Estos resultados posicionan a esta alternativa como una solución eficiente, accesible y viable para comunidades costeras en alta vulnerabilidad hídrica y energética.

ABSTRACT

In recent years, various desalination machines have been developed, characterized by increasing efficiency and the ability to operate at temperatures lower than those required by conventional systems. These innovations present significant potential compared to traditional technologies, highlighting the need to assess their performance when powered by solar thermal energy capture and storage systems, and to compare them with those requiring conventional temperatures. In this context, the present research analyzes the technical and economic feasibility of a solar thermal capture and storage system designed to operate an innovative machine capable of simultaneously producing water and cooling. The study focused on a coastal community consisting of 20 households, whose specific conditions were considered in the system design, evaluated through simulations in a specialized computational environment. The most relevant finding corresponds to the comparison between the innovative machine and a conventional system. Results indicate that, due to its lower energy requirements, the new machine can produce the same volume of water and cooling using a considerably more compact solar system. The conventional system requires 92.61 m² of solar collector area and 10 m³ of thermal storage, whereas the low activation temperature machine requires only 39.69 m² of collector area and 2 m³ of storage, representing a 57.1% reduction in collector area and an 80% reduction in storage volume. From an economic perspective, total costs were reduced by 53%. These results position this alternative as an efficient, accessible, and viable solution for coastal communities facing high water and energy vulnerability.

Palabras claves: Almacenamiento térmico, captación solar, desalinización, enfriamiento, energía renovable.

Introducción

Los sistemas de desalinización de múltiple efecto (MED) y de destilación flash multietapa (MSF), así como los sistemas de enfriamiento por absorción, han cubierto tradicionalmente su demanda de energía térmica mediante sistemas termosolares, los cuales constituyen su principal fuente de aporte calorífico. Estos sistemas requieren, por lo general, una fuente de calor en el rango de 75 °C a 95 °C [1,2]. Los avances recientes en la eficiencia de los sistemas de desalinización han posibilitado el desarrollo de equipos capaces de producir mayores volúmenes de agua mediante operación a alto vacío, e incluso generar enfriamiento como subproducto del proceso de desalinización. No obstante, estas unidades continúan operando con fuentes de energía de temperatura convencional, lo que demanda sistemas termosolares dimensionados para suministrar energía en dicho rango térmico [3,4]. Más recientemente, en el Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) se han desarrollado y patentado —actualmente en trámite (MX/a/2025/001564 y Mx/a/2025/007161)— sistemas de desalinización y enfriamiento capaces de operar con fuentes de energía de baja temperatura (35 °C a 95 °C).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo realizar un estudio de factibilidad técnico-económica de un sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica destinado a la activación de esta máquina innovadora, capaz de producir simultáneamente agua y enfriamiento. Este análisis permitirá establecer una comparación con un sistema que utilice una fuente de energía de temperatura convencional, evaluando el potencial de esta tecnología al utilizar una fuente de energía de baja temperatura. El estudio contempla la comparación del desempeño y de los beneficios derivados de la implementación de un sistema termosolar para una máquina con requerimientos de baja temperatura frente a otra que opere con temperatura convencional.

Descripción física y operativa del sistema

Los sistemas de desalinización considerados en este estudio son el sistema de alto TBT (Top Brine Temperature, por sus siglas en inglés) y el sistema de bajo TBT. Ambos presentan la misma configuración física, la cual se muestra en la Figura 1, que ilustra el diagrama del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica acoplado a la unidad productora de agua y enfriamiento. El sistema se compone de tres secciones principales. La primera corresponde al sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, integrado por el arreglo de colectores solares (ACS), la bomba de circulación hacia los colectores (BC) y el termotanque de almacenamiento de agua caliente (TT). La segunda sección es el suministro de energía térmica a la unidad MED, que incluye el mismo termotanque, la bomba que impulsa el fluido caloportador hacia la MED (BM), una válvula de tres vías (V3VES) y el intercambiador de calor entre el suministro de energía y el sistema de desalinización (GEN). Finalmente, la tercera sección corresponde al área de producción, donde se almacena el agua y se genera enfriamiento. Esta parte está constituida por el intercambiador de calor, una válvula de tres vías (V3VR), el evaporador para la producción de enfriamiento (EVA) y el tanque de agua producto (TAP).

En ambos casos, el comportamiento fluidodinámico y de control es similar; la diferencia radica en el aspecto termodinámico, ya que operan con rangos de temperatura y cantidades de calor distintas. La operación de ambos sistemas se inicia cuando la temperatura del fluido a la salida del arreglo de colectores solares (SAC3) supera la temperatura de entrada (SAC1). Una vez cumplida esta condición, el sistema activa la bomba de los colectores, comenzando el proceso de calentamiento del fluido. Este se extrae desde la parte inferior del termotanque, circula a través del arreglo de colectores solares, donde incrementa su temperatura, y finalmente retorna a la parte superior del termotanque, favoreciendo la estratificación térmica. El proceso se interrumpe cuando se alcanza la temperatura objetivo del termotanque o cuando la temperatura de entrada al arreglo de colectores es mayor que la de salida, lo que indica una reducción de la radiación solar y provoca el apagado de la bomba. Una vez elevada la temperatura del termotanque, el sistema de control supervisa la zona superior mediante transmisores de temperatura, ya que desde esta sección se suministra calor al intercambiador. Para habilitar este suministro, la temperatura del fluido caloportador debe mantenerse dentro de un rango operativo de 78 °C a 95 °C en el caso de alto TBT y de 35 °C a 95 °C en el caso de bajo TBT. Si no se cumple esta condición, la bomba permanece inactiva. En ambos sistemas, el primer arranque de la bomba de la unidad MED exige que el termotanque alcance una temperatura mínima de 95 °C, lo que garantiza la disponibilidad de energía térmica suficiente para iniciar la operación. Tras este encendido inicial, se permite el funcionamiento de la bomba con una temperatura mínima de 80 °C para alto TBT y de 40 °C para bajo TBT, asegurando que el sistema de captación continúe elevando la temperatura del fluido, una vez que la bomba dirige el fluido caloportador por SAM2 y llega a la válvula de 3 vías, debemos de mantener una producción de agua constante, por lo que el aporte de calor al intercambiador de calor debe ser estable. Para ello, se emplea una válvula de tres vías que regula el caudal hacia el generador en función de la temperatura medida antes de su entrada. Esta válvula desvía únicamente una fracción del flujo total, garantizando un suministro térmico continuo y adecuado al rango operativo del fluido.

$$m = \frac{Q}{C_p\,(T_S - T_e)} \tag{1}$$

Se fija el valor de calor requerido por el generador (Q), el calor específico del fluido a presión constante (Cp) y la temperatura de salida deseada (Ts), mientras que la temperatura de entrada (Te) se establece dentro de alguno de los rangos operativos. Con estos datos, la única variable a determinar es el flujo másico ($\dot{m}$), el cual permite calcular la cantidad de fluido necesaria para mantener un aporte térmico constante al generador, compensando las variaciones térmicas del fluido [5]. Tras ceder calor, el fluido que ingresó al generador (FC2) se mezcla con el que no fue utilizado (SAM3) y es redirigido a una zona del termotanque con temperatura similar (SAM4), conservando la estratificación térmica. En cuanto al subsistema de almacenamiento de agua y producción de enfriamiento, se monitorea tanto el volumen acumulado como la demanda térmica. El control opera sobre el tanque de agua producto, supervisando la cantidad diaria de agua introducida, que varía según la temporada: 4 m³ en invierno y 8 m³ en verano. La bomba MED se apaga automáticamente si se cumple alguna de estas condiciones: 1) se alcanza el volumen diario permitido, 2) el tanque de agua producto está lleno, o 3) no hay temperatura suficiente para producir agua. El caudal hacia el evaporador se regula mediante una válvula de tres vías (Ap13-1), que ajusta el flujo según la demanda de enfriamiento. Parte del agua producto se desvía por la ruta R1 hacia el evaporador, mientras que el resto se dirige al tanque de agua producto a través de la línea Ap13-2. Si no se requiere enfriamiento, todo el caudal es enviado al tanque de agua producto. Finalmente, el sistema de enfriamiento depende directamente de la producción de agua: solo se genera enfriamiento mientras esté activa la producción de agua. En ausencia de esta, no habrá enfriamiento, aunque exista demanda.

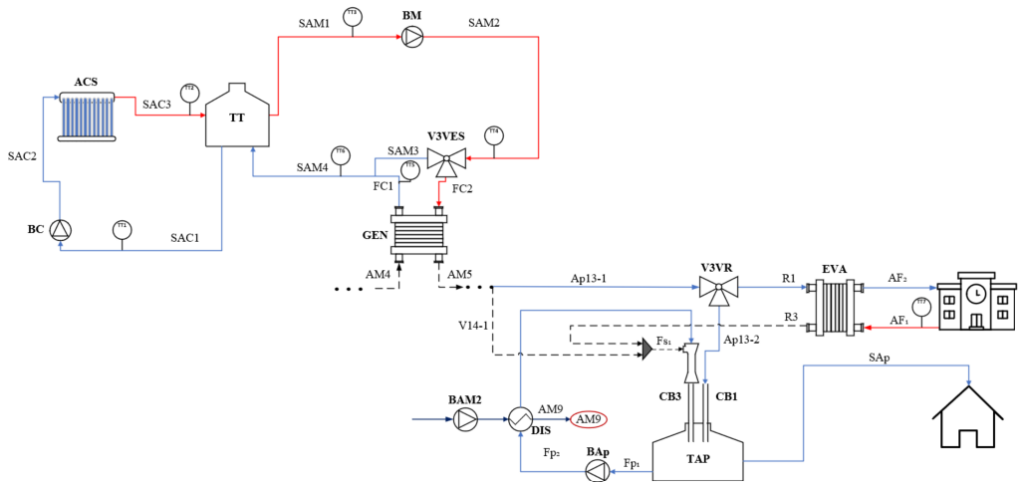


Figura 1. *Propuesta tecnológica para su posterior desarrollo en el entorno de TRNSYS.*

Metodología

Generación de simulador

Para el dimensionamiento del sistema, se seleccionó el poblado de Puertecitos, ubicado en Baja California, México, donde se identificaron los hogares sin acceso a agua potable y una escuela primaria que requiere suministro de enfriamiento para sus aulas. La estimación de la demanda se realizó mediante encuestas aplicadas. Con base en estos datos, se definió que el sistema debe ser capaz de producir simultáneamente agua y enfriamiento durante el verano, siendo esta la condición más exigente. Para la obtención del archivo climatológico en este proyecto se utilizó **Meteonorm**, generando el archivo correspondiente a la localidad de estudio a partir de su latitud y longitud. Con la información previa, se desarrolló el simulador en **TRNSYS**. La captura de parámetros para cada uno de los componentes se constituye como una de las últimas etapas para la generación del simulador, y permite reunir la información necesaria para estimar un valor inicial del volumen del termotanque.

Con estos datos, se aplicó la ecuación de calor sensible, adaptada para considerar el volumen en lugar de la masa mediante la relación volumen, densidad y masa [5]. El despeje del volumen produce la siguiente expresión:

$$V_{TT} = \frac{Q}{(\rho * Cp * \Delta T)} \tag{2}$$

Dado que la demanda de calor en verano es mayor que en invierno, se seleccionó el valor de Q correspondiente a cada caso para dimensionar el sistema bajo condiciones más exigentes. El cálculo resultante arrojó volúmenes de 12 m³ para el caso convencional y 3 m³ para el caso de baja temperatura.

Simulación

A partir de la generación del simulador, se implementó un procedimiento iterativo para ambos casos de estudio (alto y bajo TBT). El proceso general inicia verificando si la temperatura de salida de los colectores solares alcanza, al menos, el valor mínimo requerido para cada caso (75 °C o 35 °C), condición indispensable para el funcionamiento del subsistema térmico. Si no se cumple este requisito, se incrementa en una unidad el número de colectores en serie y se repite la simulación, iterando hasta alcanzar la temperatura mínima establecida. Una vez satisfecha esta condición, se comprueba que la temperatura de salida no supere los 95 °C, límite máximo para el correcto funcionamiento del sistema. Si se sobrepasa este valor, se reduce en uno el número de colectores en serie y se vuelve a simular, asegurando que se mantenga la temperatura mínima necesaria. Posteriormente, se verifica que la temperatura del termotanque permanezca dentro del rango operativo definido para cada configuración, de acuerdo con los requerimientos térmicos del sistema. Si la temperatura simulada es inferior a dicho rango, se incrementa el número de series de colectores para aportar mayor energía térmica. Este ajuste se repite hasta que el termotanque alcance el intervalo de operación deseado. Finalmente, se evalúa la conveniencia de modificar el volumen del termotanque, incrementándolo o reduciéndolo según los resultados obtenidos y el criterio del investigador. Si no se requieren cambios adicionales, se concluye esta fase y se procede a seleccionar la configuración más adecuada entre las opciones analizadas.

Análisis e interpretación de resultados

Una vez obtenidos resultados satisfactorios en las simulaciones, o al identificar múltiples configuraciones que cumplen con los criterios establecidos, se procede a seleccionar aquellas propuestas que satisfacen varios requisitos fundamentales. En primer lugar, debe garantizarse el cumplimiento total de la producción de agua durante las semanas en las que se dispone de radiación solar ideal, tanto en invierno como en verano, así como la producción de enfriamiento durante la semana con radiación solar óptima en verano. Además, se busca minimizar el número de colectores solares empleados y reducir al máximo el volumen del termotanque. En este apartado se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los arreglos de captación seleccionados: por un lado, el sistema MED de alto vacío con alto TBT y, por otro, el sistema MED de alto vacío con bajo TBT. Finalmente, se analizan las diferencias clave entre ambas configuraciones y se discute cuál representa una mayor ventaja operativa en función del desempeño observado.

Sistema termosolar: Caso de alto TBT

Durante la simulación se evaluaron distintos sistemas capaces de cubrir la demanda térmica en dos semanas seleccionadas con condiciones de radiación solar óptima. El objetivo fue identificar el arreglo de captación y almacenamiento de energía solar térmica más eficiente, priorizando el menor tamaño posible. Aunque inicialmente se consideró un termotanque de 9 m³, este resultó insuficiente en ciertos escenarios, por lo que se optó por uno de 10 m³. La configuración óptima se compone de tres colectores en serie y siete ramas en paralelo (21 colectores en total), junto con un termotanque de 10 m³. Este arreglo asegura el cumplimiento total de los requerimientos de agua y enfriamiento, incluso durante la semana de verano con mayor demanda energética, en la que el sistema mantiene una operación continua de 8 horas diarias. La temperatura del termotanque permanece dentro del rango requerido para garantizar la producción, lo que permite cubrir la demanda durante los días hábiles y almacenar el volumen necesario para el fin de semana, tal como se muestra en la **Figura 2**.

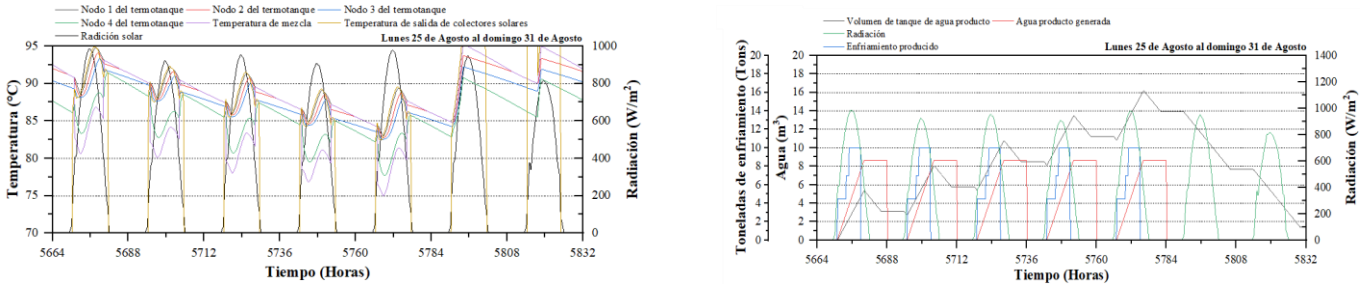


Figura 2. *Desempeño térmico y productivo del sistema de temperatura convencional durante semana de verano.*

Sistema termosolar: Caso de bajo TBT

El estudio se llevó a cabo de forma análoga al realizado para la máquina de temperatura convencional, identificándose diversos arreglos de sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica capaces de activar la máquina de bajo TBT y satisfacer la demanda de calor en ambas semanas de análisis, caracterizadas por contar con radiación solar ideal durante toda su duración. Como resultado, la producción de agua y enfriamiento se cubre al 100% en ambas semanas. Para la configuración más adecuada, se determinó que el sistema debe contar con tres colectores en serie y tres series en paralelo (nueve colectores en total), junto con un termotanque de 2 m³. Este arreglo optimiza el funcionamiento del sistema de captación y almacenamiento. La semana de verano representa la condición más exigente, ya que en ella se deben cumplir simultáneamente los requerimientos de agua y enfriamiento. En este escenario, el sistema es capaz de suministrar la demanda de calor requerida por el generador; sin embargo, el análisis de la temperatura en el termotanque muestra que esta disminuye durante el día y no logra recuperarse, manteniéndose esta tendencia a lo largo de los cinco días evaluados. A pesar de ello, al emplear un mayor rango de operación, el sistema no presenta dificultades para cumplir con toda la producción requerida durante la semana. Esto se evidencia tanto en la producción de agua como en la de enfriamiento, las cuales alcanzan el 100% de lo demandado, demostrando que el sistema mantiene su capacidad operativa incluso con la disminución de temperatura. Ambos comportamientos se ilustran en la **Figura 3**.

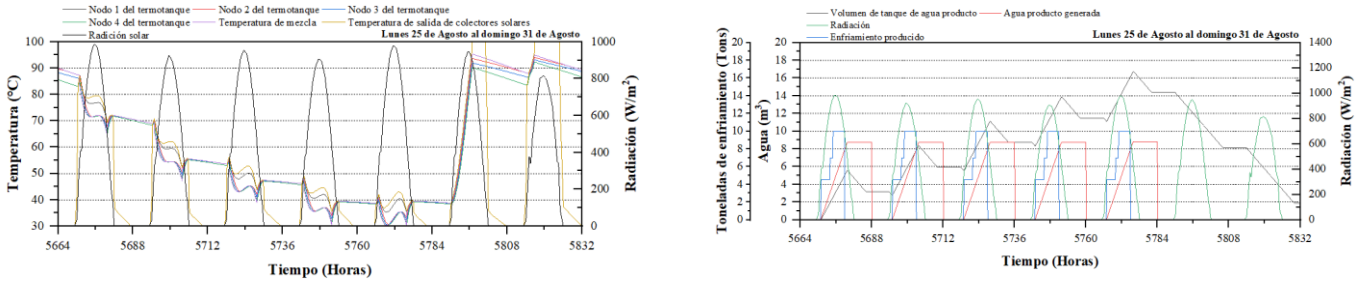


Figura 3. *Desempeño térmico y productivo del sistema de temperatura convencional durante semana de verano.*

Comparativa de sistemas termosolares

En la **Tabla 1** se presenta una comparación directa entre ambas propuestas. Desde el punto de vista térmico, el sistema de bajo TBT muestra una eficiencia superior, reflejada en una reducción del 37,5 % en el requerimiento térmico, un valor ya considerable. Esta ventaja repercute directamente en el dimensionamiento del sistema de captación y almacenamiento, posibilitando reducciones del 57 % y 80 % en sus respectivos tamaños. Si bien ambos sistemas cumplen adecuadamente con la demanda de agua y enfriamiento, el uso de la máquina de bajo TBT evidencia un mejor desempeño global. En cuanto al flujo requerido para el suministro de energía térmica desde el termotanque hacia el generador, este se mantiene constante en 1,2 kg/s para ambas configuraciones. No obstante, se observó una mejora significativa en el flujo necesario para el sistema de captación solar, con una disminución del 57 %, lo que implica una reducción equivalente en los costos operativos asociados al funcionamiento de la bomba de los colectores.

Tabla 1. *Comparación ATBT vs. BTBT: Eficiencia, infraestructura y desempeño.*

Comparación			
	ATBT	**BTBT**	**Δ%**
Potencia de demanda	40 kW	25 kW	37.50
Temperatura mínima de activación	78 °C	35 °C	55.13
Área de captación	92.61 m²	39.69 m²	57.14
Volumen de tanque	10 m³	2 m³	80.00
Flujo de colectores	1.85 kg/s	0.79 kg/s	57.14
Flujo máximo del fluido caloportador hacia la MED	1.2 kg/s	1.2 kg/s	**0.00**

Estudio Económico

El estudio económico basado en los resultados técnicos previamente analizados. A partir de estos, se evaluaron los costos asociados a la implementación del sistema de captación y almacenamiento de energía térmica para las dos configuraciones de máquina [6,7]. La estimación de costos se realizó mediante una búsqueda exhaustiva de información en internet, seleccionando componentes acordes con las condiciones operativas del sistema, especialmente por las altas temperaturas que este puede alcanzar. Para el equipo de calor auxiliar se eligió un modelo que funciona con diésel, por ser una alternativa más práctica frente al gas LP o natural, que implicarían infraestructura adicional y un incremento considerable en el costo del sistema. La búsqueda de precios se enfocó en proveedores y sitios especializados en equipos térmicos que cumplieran con las especificaciones técnicas requeridas, mientras que, en el caso de accesorios menores, como tuberías y conexiones, la selección se basó principalmente en el cumplimiento de las dimensiones necesarias para su correcta integración.

Estudio económico del sistema termosolar – caso de alto TBT

La **Tabla 2** presenta los costos asociados a cada uno de los equipos principales, así como su contribución individual al total de la inversión, lo que permite visualizar con detalle el impacto económico de cada componente dentro del sistema. La mayoría de las cantidades necesarias ya habían sido definidas durante el proceso de selección de la configuración; no obstante, fue preciso estimar adicionalmente la cantidad de tuberías requeridas, así como el material de aislamiento tanto para las tuberías como para el termotanque. En ambos casos, las cantidades se expresaron en metros lineales, lo que facilitó el cálculo de sus respectivos costos unitarios. Además, la tabla incluye los costos anuales de operación, el valor presente neto (VPN) y el costo nivelado del agua, proporcionando una visión integral del análisis económico.

Tabla 2. *Evaluación Económica del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de temperatura convencional.*

Cantidad	**Equipo y Accesorios**	**Precio Unitario**	**Total**
21	Colector Solar	$ 12,000	$252,000.00
10	Termotanque	$13,186.80	$131,868.00
2	Bomba	$13,250.71	$26,501.42
150	Tubería	$ 62.50	$9,375.00
150	Aislamiento térmico	$591.72	$88,758.00
6	Aislamiento termotanque	$3,168.48	$19,010.88
1	Equipo auxiliar	$75,000.00	$75,000.00
1	Válvula de 3 vías	$27,425.88	$27,425.88
36	Válvula	$70.50	$2,538.00
1	Costos de instalación	30% del total	$189,743.15
Total			$822,220.33
Costos anuales			$73,095.55
VPN			$1,539,883.23 pesos
Costo nivelado del agua			$88.46 pesos/m^3 = 4.56 USD/m^3

Estudio económico del sistema termosolar – caso de bajo TBT

Para el estudio económico basado en la configuración de la máquina con baja temperatura de operación, se emplea el arreglo seleccionado conforme a los criterios técnicos previamente establecidos. En esta etapa, se identifica una reducción tanto en el número de colectores solares como en la capacidad de almacenamiento térmico requerida, lo que implica, al menos en principio, una disminución en la inversión inicial del sistema. En primera instancia, se determina el monto de inversión necesario para la implementación de dicha configuración. La **Tabla 3**

presenta el desglose de los costos de inversión inicial asociados a cada uno de los equipos y componentes; asimismo, se incluyen los costos anuales de operación, el valor presente neto (VPN) y el costo nivelado del agua. Esta información permite identificar con claridad el peso económico relativo de cada elemento dentro del sistema y, a su vez, destacar el potencial del uso de un sistema termosolar frente a uno de alta temperatura de operación (alto TBT).

Tabla 3. *Evaluación Económica del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de baja temperatura.*

Cantidad	Equipo y Accesorios	Precio Unitario	Total
9	Colector Solar	$ 12,000	$108,000.00
2	Termotanque	$13,186.80	$26,373.60
2	Bomba	$13,250.71	$26,501.42
65	Tubería	$ 62.50	$4,062.50
65	Aislamiento térmico	$591.72	$38,461.80
2	Aislamiento termotanque	$3,168.48	$6,336.96
1	Equipo auxiliar	$75,000.00	$75,000.00
1	Válvula de 3 vías	$27,425.88	$27,425.88
23	Válvula	$70.50	$1,621.50
1	Costos de instalación	30% del total	$94,135.10
Total			$407,918.76
Costos anuales			$32,551.34
VPN			$727,512.61pesos
Costo nivelado del agua			$41,79 pesos/$m^3$ = 2.15 USD/m^3

Conclusiones

Tras analizar los sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica destinados a la activación de unidades de producción simultánea de agua y enfriamiento, con el objetivo de determinar la mayor viabilidad técnico-económica, se identificó un elevado potencial en la unidad que opera a alto vacío y baja temperatura. El sistema termosolar implementado en esta configuración presenta mejoras sustanciales respecto a la unidad convencional de alta temperatura, y la comparación entre ambas alternativas permite cuantificar con precisión el impacto relativo en su desempeño. Los resultados demuestran que la configuración de baja temperatura es la opción más favorable, destacando en la mayoría de los indicadores evaluados gracias a su mayor eficiencia energética. En términos de diseño, la configuración de baja temperatura requiere un 57.14 % menos de superficie de captación solar, lo que reduce considerablemente la inversión inicial asociada a los colectores, y un 80 % menos de volumen de termotanque, disminuyendo así los costos del sistema de almacenamiento térmico. Esta reducción de superficie implica también un 57.14 % menos de caudal en los colectores, lo que disminuye el consumo energético de bombeo y optimiza la eficiencia operativa. Durante un año completo de simulación, el sistema de baja temperatura cubrió hasta el 88 % de la demanda térmica total, requiriendo solo un 12 % de aporte auxiliar. Este desempeño se explica, en parte, por el incremento del rango operativo de la unidad, que pasa de 75–95 °C en el sistema convencional a 35–95 °C en el de baja temperatura, lo que representa un aumento del 55 %. Este mayor rango reduce sustancialmente los requerimientos de captación y almacenamiento y otorga mayor autonomía: si el termotanque se encuentra a su temperatura máxima y no existe radiación solar, el sistema de baja temperatura puede operar durante más horas que el de alta temperatura antes de requerir aporte térmico externo. Aunque la configuración seleccionada entrega un menor volumen anual de agua y enfriamiento, el análisis económico confirma su ventaja, con un ahorro promedio del 53.81 % respecto al sistema de temperatura convencional. En síntesis, la unidad de baja temperatura presenta un alto potencial de operación con sistemas solares térmicos alimentados por fuentes de baja temperatura y, gracias a su diseño compacto, puede implementarse en entornos con recursos energéticos limitados, reduciendo significativamente los costos de instalación y operación y consolidando a los sistemas solares térmicos como una alternativa viable y sostenible para la producción de agua y enfriamiento en localidades aisladas o con infraestructura restringida.

Referencias

[1] P. Palenzuela, D.-C. Alarcón-Padilla, and G. Zaragoza, “Large-scale solar desalination by combination with CSP: Techno-economic analysis of different options for the Mediterranean Sea and the Arabian Gulf,” Desalination, vol. 366, pp. 130–138, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.desal.2014.12.037.

[2] M. D. Stuber et al., “Pilot demonstration of concentrated solar-powered desalination of subsurface agricultural drainage water and other brackish groundwater sources,” Desalination, vol. 355, pp. 186–196, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.desal.2014.10.037.

[3] S. E. Aly, “A study of a new thermal vapor compression/multi-effect stack (TVC/MES) low temperature distillation system,” Desalination, vol. 103, no. 3, pp. 257–263, Dec. 1995, doi: 10.1016/0011-9164(95)00078-x.

[4] R. López-Zavala et al., “Novel desalination system that uses product water to generate cooling through a barometric ejector-condenser,” Energy, vol. 276, p. 127536, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127536.

[5] Y. A. Çengel, Termodinámica. 2012.

[6] J. A. Qadourah, “Energy and economic potential for photovoltaic systems installed on the rooftop of apartment buildings in Jordan,” Results in Engineering, vol. 16, p. 100642, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100642.

Se reconoce el uso de herramientas de inteligencia artificial para la traducción y corrección de estilo del presente documento.

XLIX ENERGIA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM CUERNAVACA, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

CARACTERIZACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO DE DESTILACIÓN POR MEMBRANA MULTIEFECTO AL VACÍO ALIMENTADA CON ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Robinson Ramírez, Alejandro Bueso, Guillermo Zaragoza, Alba Ruiz-Aguirre, Juan A. Andrés-Mañas.
Plataforma Solar de Almería, CIEMAT, Ctra. de Senés, km 4.5, Almería, 04200, España.
robinson.ramirez@psa.es

RESUMEN

El incremento en la demanda de agua, impulsado por la producción agrícola e industrial, ha suscitado la búsqueda de alternativas para suplir las necesidades hídricas actuales. Por esta razón, la desalación de agua de mar se ha consolidado como una de las alternativas más fiables para garantizar el suministro de agua. Entre las tecnologías emergentes, los sistemas de desalación térmica se presentan como una opción sostenible para la producción de agua. Particularmente, la Destilación por Membranas (MD, *Membrane Distillatiton*) ha demostrado ser eficiente al operar con aguas salobres y con energía de baja temperaturas. En este trabajo, se caracterizó el funcionamiento de una unidad de Destilación por Membrana Multi-Efecto al Vacío (VMEMD, *Vacuum Multi-Effect Membrane Distillation*) alimentada con energía solar, para desarrollar un modelo que permita predecir y encontrar las condiciones óptimas de operación que maximicen la producción y la eficiencia térmica del sistema. Para la caracterización del sistema, se empleó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), implementando un Diseño Compuesto Central (DCC) para determinar la cantidad de experimentos requeridos para el desarrollo del modelo. Se consideraron como variables de entrada; la temperatura del evaporador y el caudal de alimentación. Por otro lado, se analizaron como parámetros de respuesta; la producción de destilado, la Tasa de Recuperación (RR, *Recovery Ratio*) y el Consumo Específico de Energía Térmica (STEC, *Specific Thermal Energy Consumption)*. Los resultados indican que la temperatura a la entrada del evaporador genera una variación superior al 30% en todas las variables de respuesta. El flujo de destilado pasó de producir 4.1 $Lh^{-1}m^{-2}$ con una temperatura de 60 ºC a una producción de 10.8 $Lh^{-1}m^{-2}$ con una temperatura de 80 ºC y un caudal de 100 Lh^{-1}. El *STEC* pasó de consumir 410 $kWhm^{-3}$ con una temperatura de 60 ºC a un consumo de 270 $kWhm^{-3}$ con una temperatura de 80 ºC y un caudal de 100 Lh^{-1} y el *RR* pasó del 28% con una temperatura de 60 ºC a un 70% con una temperatura de 80 ºC y un caudal de 100 Lh^{-1}

ABSTRACT

The increase in the demand for water, driven by agricultural and industrial production, has led to the search for alternatives to meet current water needs. For this reason, seawater desalination has established itself as one of the most reliable alternatives to guarantee water supply. Among the emerging technologies, thermal desalination systems are presented as a sustainable option for water production. In particular, Membrane Distillation (MD) has proven to be efficient in operating with brackish water and low-temperature energy. In this work, the operation of a *Vacuum Multi-Effect Membrane Distillation* (VMEMD) unit powered by solar energy was characterized, to develop a model that allows predicting and finding the optimal operating conditions that maximize the production and thermal efficiency of the system. For the characterization of the system, the Response Surface Methodology (MSR) was used, implementing a Central Composite Design (CCD) to determine the number of experiments required for the development of the model. The following variables were considered as input variables; the evaporator temperature and the feed flow. On the other hand, the following were analyzed as response parameters; distillate production, Recovery Ratio (RR*) and* Specific Thermal Energy Consumption *(STEC).* The results indicate that the temperature at the evaporator inlet generates a variation of more than 30% in all response variables. The distillate flow went from producing 4.1 $Lh^{-1}m^{-2}$ at a temperature of 60 ºC to a production of 10.8 $Lh^{-1}m^{-2}$ at a temperature of 80 ºC and a flow rate of 100 Lh^{-1}. The *STEC* went from consuming 410 $kWhm^{-3}$ at a temperature of 60 ºC to a consumption of 270 $kWhm^{-3}$ at a temperature of 80 ºC and a flow rate of 100 Lh^{-1} and the *RR* went from 28% with a temperature of 60 ºC to 70% at a temperature of 80 ºC with a flow rate of 100 Lh^{-1}

Keywords: *Solar desalination, brine concentration, solar energy, multi-effect distillation, membrane distillation.*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico, los procesos de producción y el uso indiscriminado de los recursos hídricos han causado que la demanda de agua aumente en comparación a décadas anteriores [1]. Este efecto, sumado al cambio climático, ha ocasionado una reducción en las reservas naturales de agua dulce (se conoce que el 96.5% del agua en el planeta contiene alta salinidad, por lo cual, solo el 3.5% es agua dulce y solo el 0.75% es apta para consumo humano). Esto, unido a la tendencia actual de aumento en el consumo de agua, provoca que se estime un déficit del 40% en el suministro de agua dulce para 2050 [2]. Por esta razón, se están buscando soluciones a la escasez hídrica, enfocándose en la transición energética y promoviendo el desarrollo sostenible [1].

En este escenario, la desalinización de agua se presenta como una opción atractiva para suplir las necesidades de agua dulce a nivel doméstico e industrial. Específicamente, la Osmosis Inversa (OI) representa alrededor del 83% de la capacidad instalada de desalación a nivel mundial [2, 3]. Sin embargo, estos procesos de desalinización suelen tener una relación de producción de alrededor del 50% y, adicionalmente, suelen consumir energía eléctrica de fuentes no renovables. Por lo cual, es esencial que el incremento en la capacidad instalada de desalación esté acompañado del uso de fuentes de energía renovables, como la energía solar, para hacer que los procesos sean sostenibles [4]. Por esta razón, se deben buscar sistemas de producción de agua alimentados con energía renovable que puedan maximizar la producción de permeado y minimizar las descargas de salmueras. Es ahí que, la desalación solar térmica, surge como una alternativa para desalar agua en zonas de difícil acceso o aisladas, ya que puede procesar agua salobre con fuentes de energía térmica de baja temperatura, contribuyendo a la transición energética y minimizando la dependencia de fuentes de energía no renovable [5, 6]. En la actualidad, hay ciertos sectores de la población que vive en zonas con alto estrés hídrico y que son de difícil acceso, por lo cual, deben recurrir al racionamiento con sistemas de almacenamiento de agua o depender de sistemas de producción que usan fuentes de energía contaminantes. No obstante, estas zonas usualmente están ubicadas en regiones con alta radiación solar y cercanas al mar, lo cual, permite el uso de la energía solar como fuente de energía para el proceso de desalinización.

Los sistemas de Destilación Multiefecto (MED, *Multi-Effect Distillation*) suponen una alternativa demostrada para suplir la necesidad de agua dulce en zonas de difícil acceso y que no requieren alto caudal, ya que pueden adaptarse a sistemas de pequeña escala y su principal fuente de energía es calor de baja entalpia (los sistemas MED se basan en la recuperación del calor latente del vapor durante la condensación en efectos consecutivos, aumentando el factor de concentración y la eficiencia energética del proceso) [6, 7]. Asimismo, otra de las tecnologías prometedoras es la Destilación por Membrana (MD, *Membrane Destillation*) que utiliza una membrana microporosa e hidrofóbica por cuyos poros solo son transportadas las moléculas de vapor, mientras que los compuestos no volátiles, como la sal y otros minerales, permanecen en el agua líquida rechazada (la fuerza impulsora del proceso es la diferencia de presión de vapor entre ambos lados de la membrana a causa de un gradiente de temperatura) [8].

El propósito de esta investigación es caracterizar el funcionamiento de una planta piloto VMEMD aplicando la metodología de Superficie de Respuesta (RSM, *Response Surface Methodology*) para determinar la producción de destilado, el STEC y el RR bajo diferentes condiciones de operación alimentada con un campo de captadores solares planos y generar un modelo matemático que permita predecir el funcionamiento del sistema.

METODOLOGÍA

En este trabajo de investigación, la principal fuente de datos se obtuvo a partir de las diferentes pruebas experimentales ejecutadas con la planta piloto VMEMD (Figura 1) y que se encuentra ubicada en la Plataforma Solar de Almería (PSA, https://www.psa.es/en).



Figura 1. *Vistas de la planta piloto de MD con configuración VMEMD: a la izquierda se muestra la vista lateral donde se pueden apreciar la mayoría de los componentes del sistema, especialmente, el módulo de MD en la parte central superior. En la imagen de la izquierda se tiene una vista trasera en la que se observan los tanques de almacenamiento de destilado, drenaje y salmuera ordenados de izquierda a derecha respectivamente.*

El proceso en la planta piloto (Figura 2) comienza en el tanque de alimentación (B_1) de agua de mar, de allí, va a la cámara de evaporación (B_2) donde se le aporta calor. Cuando el nivel de agua líquida en la cámara de evaporación está en el mínimo, las válvulas que conectan con el tanque de alimentación se abren hasta llenarlo (cuando el nivel está en el máximo, las válvulas se cierran). Posteriormente, el agua de alimentación en B_2 se calienta a contracorriente en el intercambiador de calor (I_1) con un fluido de mayor temperatura procedente del tanque de almacenamiento térmico (A_1) y a su vez, del campo solar (C_1). Seguidamente, pasa al módulo de MD (compuesto por cuatro etapas y un condensador ($E_{1\text{-}4\ y\ C}$)) donde el vapor generado en B_2, a presión de vacío, fluye en serie a través de las cuatro etapas y, tanto la presión como la temperatura del vapor, disminuyen gradualmente en cada etapa. En esta configuración, el calor latente de la evaporación es recuperado durante el proceso de condensación. La salmuera generada y el destilado obtenido se almacenan en los tanques B_3 y B_4, respectivamente (B_5 y B_9 son tanques de drenaje). Por último, el sistema de refrigeración está compuesto por dos circuitos, uno interno y otro externo, con el interno se condensa el vapor generado en la última etapa y el externo se utiliza para enfriar la fuente interna, para ello se tiene un sistema compuesto por el intercambiador de calor (I_2) y un mar artificial (B_7) (es un sistema de tres tanques conectados en serie, con un volumen total de 300 m^3 de agua de mar real) [9].

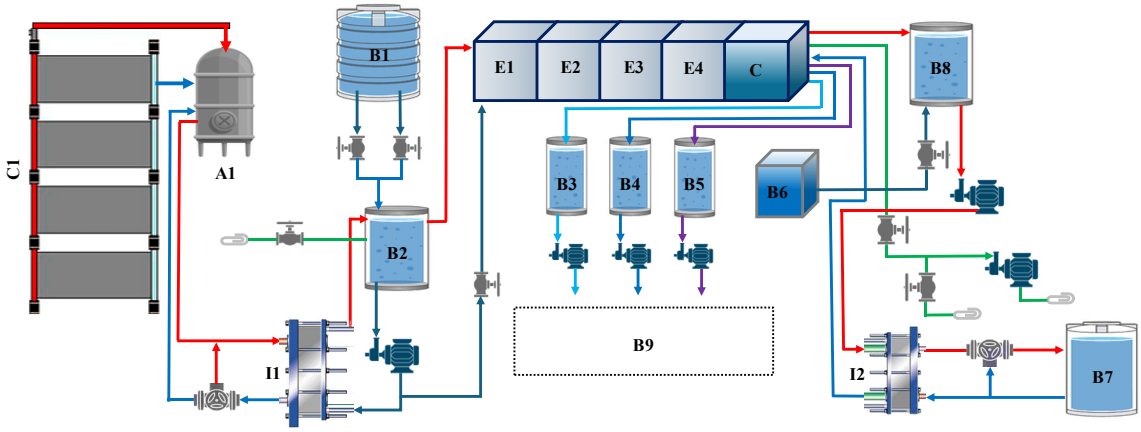


Figura 2. *Esquema de funcionamiento del sistema de MD estudiado. Las líneas rojas indican fluido caliente, las líneas azules indican fluido frio, las líneas verdes indican flujo de aire.*

Diseño del plan experimental

Para determinar el plan experimental, se usó un Diseño Compuesto Central (DCC) acoplado a un RSM, la cual, se basa en ajustar un modelo empírico a datos experimentales utilizando técnicas matemáticas y estadísticas con el objetivo de adaptar la respuesta del sistema a una función polinómica lineal o cuadrática según las condiciones de operación del sistema (el modelo obtenido sirve para predecir la respuesta bajo un rango de condiciones de operación) [10]. Asimismo, para realizar cualquier análisis utilizando esta metodología, es necesario implementar un diseño experimental que se ajuste a la caracterización que se desea obtener. En este caso, se ha utilizado el DCC teniendo en cuenta las entradas del sistema a estudiar y su rango de operación. Para las pruebas experimentales, se preparó agua con una concentración de sal de 35 gL^{-1} utilizando sales marinas refinadas. Del mismo modo, se mantuvieron las condiciones de funcionamiento en estado estacionario para garantizar que los resultados obtenidos sean repetibles (cada experimento se realizó durante 30 minutos, descartando los primeros 10 minutos, tiempo esperado a que se estabilice el sistema). Se realizaron un total de 30 pruebas experimentales, modificando la temperatura a la salida del intercambiador de calor y el caudal de alimentación de acuerdo con los parámetros mínimo y máximo establecidos en el diseño experimental (Tabla 1). De las 30 pruebas ejecutadas, 22 fueron datos de entrenamiento que se usaron para construir el modelo matemático y, las pruebas restantes, fueron para obtener datos de validación.

Tabla 1. *Parámetros de entrada del sistema para el modelo RSM.*

Variable	descripción	Mínimo	Medio	Máximo	Unidad
F_{hx}	Caudal del agua de alimentación (F2001)	100	125	150	Lh^{-1}
$T_{hx,out}$	Temperatura de salida del intercambiador de calor (T1102)	60	70	80	ºC

En cuanto a los parámetros de salida, se utilizaron los indicadores clave de desempeño (KPI, *Key Performance Indicators*) que son métricas utilizadas para cuantificar la eficiencia y la productividad de un proceso [10]. En este caso, el primer KPI es la producción de destilado (P_{Flux}) que se define como el caudal volumétrico de destilado producido por el módulo MD entre la superficie de la membrana (Ec. 1). El segundo KPI es el STEC que se define como la cantidad de energía térmica externa suministrada al sistema para producir un metro cúbico de destilado (Ec. 2). Por último, el RR que se define como la tasa de recuperación de destilado, es decir la cantidad de producción de destilado con respecto a la cantidad de agua tratada (Ec. 3) [11].

$$P_{Flux} = \frac{\dot{F}_{dest}}{A_m} \quad (1) \qquad STEC = \frac{\dot{Q}_{ext}}{\dot{F}_{des}} \quad (2) \qquad RR = \frac{\dot{F}_{dest}}{\dot{F}_{alim}} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde, $\dot{F}_{dest}$ es el caudal del destilado en Lh^{-1} y A_m es el área de la membrana en m^2, $\dot{Q}_{ext}$ es la potencia térmica suministrada al sistema en kW, $\dot{m}_{dest}$ es el flujo volumétrico del destilado producido en m^3s^{-1} y $\dot{F}_{alim}$ es el flujo volumétrico del agua de alimentación en m^3s^{-1}.

RESULTADOS

Haciendo uso de los datos experimentales obtenidos, se aplicó la técnica RSM en Matlab para obtener los modelos de las variables de salida (P_{Flux}, *STEC y RR)* respecto de las variables de entrada ($T_{hx,out}$ y F_{hx}). Posterior al cálculo de los coeficientes de regresión para cada parámetro de salida (Tabla 2), se usaron los datos del P-valor para determinar qué coeficientes del modelo son estadísticamente significativos. Para ello, el modelo recalcula los valores de los coeficientes y toma los que tienen un P-valor menor a 0,05 para garantizar que, las variables de entrada y su interacción en el modelo, tienen un efecto significativo en las variables de respuesta con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 2. *Coeficientes de regresión lineal y su valor de ajuste calculados para cada parámetro de salida.*

Parámetro	P_{Flux} ($Lh^{-1}m^{-2}$)		*STEC* ($kWhm^{-3}$)		*RR* (%)	
	Coeficiente	P-valor	Coeficiente	P-valor	Coeficiente	P-valor
Constante	7.5276	0.0000	303.7292	0.0000	38.6047	0.0000
$F_{hx}n$	-	-	-	-	-8.2732	0.0000
$T_{hx,out}n$	3.2899	0.0000	-58.0676	0.0000	17.6045	0.0000
${F_{hx}}^2n$	-	-	-	-	1.5784	0.0415
$F_{hx}n \cdot T_{hx,out}n$	-	-	13.5698	0.0158	-4.4097	0.0000
${T_{hx,out}}^2n$	-	-	40.2821	0.0000	-	-

Posterior al cálculo y selección de los coeficientes, se obtuvieron las ecuaciones matemáticas simplificadas que describen las superficies de respuesta para cada uno de los parámetros de respuesta y que determinan el comportamiento del sistema (Ec. 4-6).

$$\boldsymbol{P_{Flux}} = 7.5276 + 3.2899 \cdot T_{hx,out}n \quad \text{(Ec. 4)}$$

$$\boldsymbol{STEC} = 303.7292 - 58.0676 \cdot T_{hx,out}n + 13.5698 \cdot F_{hx}n \cdot T_{hx,out}n + 40.28213 \cdot {T_{hx,out}}^2n \quad \text{(Ec. 5)}$$

$$\boldsymbol{RR} = 38.6047 - 8.2732 \cdot F_{hx}n + 17.6045 \cdot T_{hx,out}n + 1.5784 \cdot {F_{hx}}^2n - 4.4097 \cdot F_{hx}n \cdot T_{hx,out}n \quad \text{(Ec. 6)}$$

Donde, $T_{hx,out}n$ es el valor de la temperatura normalizada a la entrada del evaporador y $F_{hx}n$ es el valor del caudal normalizado (se normalizan para ajustar todos los valores a una escala en común y poder comparar resultados, otorgándoles un valor entre 0 y 1).

En este caso las métricas de regresión lineal R^2 y R^2 ajustado para el modelo matemático calculado y su correspondiente validación marcan valores de 0.995 y 0.993 para el caso de P_{flux}, de 0.961 y 0.939 para el caso del *STEC* y de 0.994 y 0.99 para el caso del *RR*.
Por otro lado, se observa que la linealización del modelo para el *STEC* tiene una dispersión mayor en comparación a los demás parámetros, fenómeno que puede atribuir a que los datos tomados experimentalmente pueden presentar variaciones por diversas circunstancias que no pueden ser controladas, además de que, al ser una variable indirecta asociada a una expresión matemática, se generan datos con cierto grado de dispersión [11].

Por último, en la Figura 3 se tienen las tres superficies de respuesta generadas para analizar el comportamiento del sistema y los efectos significativos de F_{hx} y de $T_{hx,out}$ en cada uno de los parámetros de respuesta.

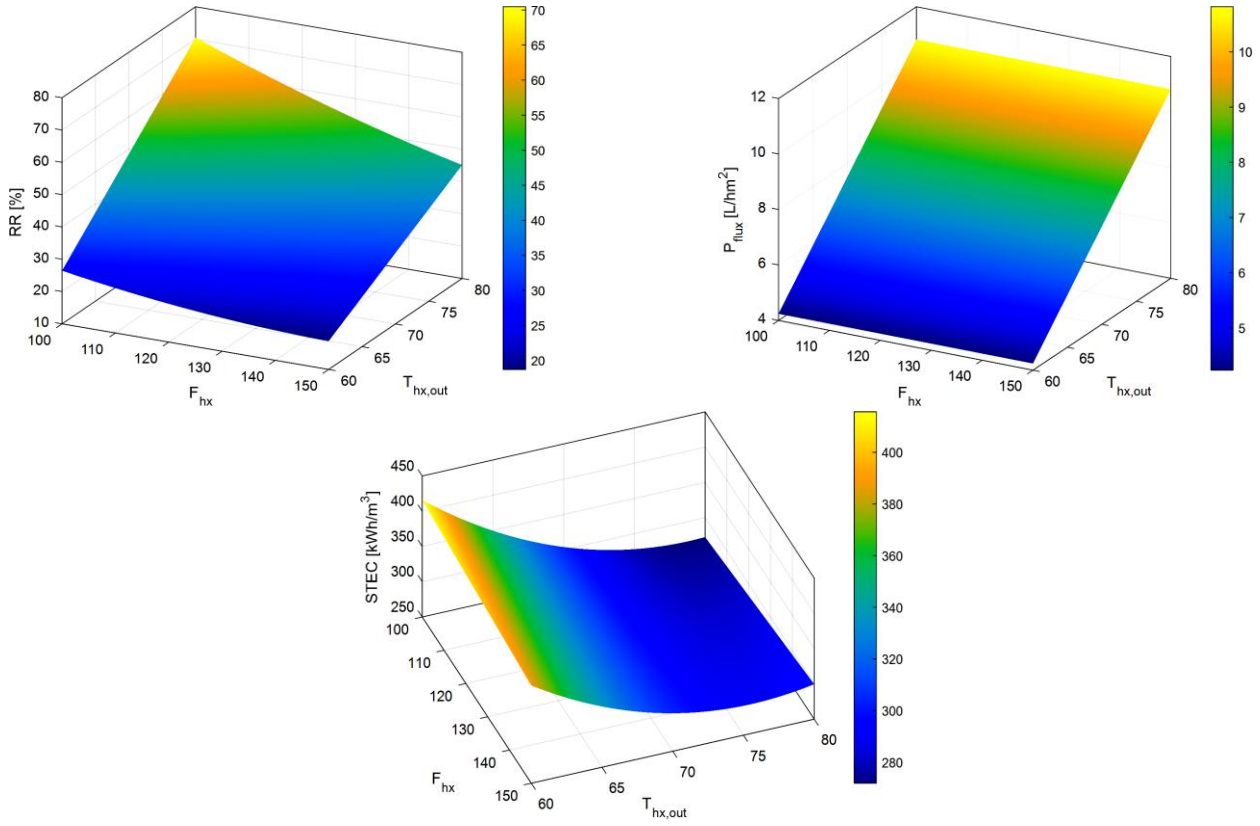


Figura 3. *Superficie de respuesta del modelo RSM: en la parte superior izquierda el RR, en la parte superior derecha el P_{flux} y en la parte inferior el STEC.*

La superficie del *RR* (figura superior izquierda) muestra que este parámetro pasa del 28% con una temperatura de 60 ºC y un caudal de 100 Lh^{-1} a un valor del 70% con una temperatura de 80 ºC y un caudal de 100 Lh^{-1}, siendo estos puntos el mínimo y el máximo respectivamente. Esto significa un aumento de 55.55%. De igual manera se puede notar que el punto máximo se da cuando el caudal es mínimo y la temperatura es la máxima. Esto se debe a que el fluido gana más energía y, por lo tanto, se genera más vapor y, en consecuencia, más destilado [11].

En la superficie de respuesta del P_{Flux} (figura superior derecha) se puede observar que el aumento en la temperatura $T_{hx,out}$ se traduce en un aumento en la producción de destilado debido a que, la diferencia de temperatura entre ambas superficies de la membrana (lado frío y caliente) genera una diferencia de presión de vapor. Por esta razón, se puede concluir que el parámetro $T_{hx,out}$ se considera la variable operativa más importante en función del caudal de destilado. Un análisis más detallado de la superficie muestra que, la producción de destilado pasa de 4.1 $Lh^{-1}m^{-2}$ con una temperatura $T_{hx,out}$ de 60 ºC a un destilado 10.8 $Lh^{-1}m^{-2}$ con una temperatura $T_{hx,out}$ de 80 ºC lo que representa un aumento del 62% de la producción de destilado [10].

La superficie de respuesta del *STEC* (figura inferior) muestra que el aumento en la temperatura $T_{hx,out}$ se traduce en una disminución en el consumo de energía térmica debido a que, cuanto mayor sea el gradiente de temperatura en el módulo de la membrana, mayor será el caudal de destilado del sistema, por lo tanto, un *STEC* menor. Por otro lado, un aumento en el caudal F_{hx} significa un ligero aumento en el *STEC*. Por otro lado, se observa que este disminuye de 410 $kWhm^{-3}$ a una temperatura de 60 ºC y un caudal de 100 Lh^{-1} a un valor de 270 $kWhm^{-3}$ con una temperatura de 80 ºC con el mismo caudal. De igual manera, pasa de 390 $kWhm^{-3}$ con una temperatura de 60 ºC y un caudal de 150 Lh^{-1} a un valor de 300 $kWhm^{-3}$ con una temperatura de 80 ºC y el mismo caudal. Esto representa una disminución del 34.15% y del 23.08% respectivamente.

CONCLUSIONES

Posterior al análisis de los resultados, se puede concluir que la temperatura a la entrada del evaporador $T_{hx,out}$ es la variable operativa de mayor influencia del sistema (en función de las respuestas estudiadas), alcanzando un incremento superior al 30% en todos los parámetros de salida (P_{Flux}, *STEC, GOR y RR*), logrando los mejores resultados al aumentar la temperatura de consigna de 60 ºC a 80 ºC. En el caso de P_{Flux}, la producción de destilado pasa de 4.1 $Lh^{-1}m^{-2}$ con una temperatura de 60 ºC a producir 10.8 $Lh^{-1}m^{-2}$ con una temperatura de 80 ºC (aumentó un 62%). El *STEC* por su parte, paso de un consumo de energía de 410 kWh/m^3 con una temperatura de 60 ºC a un consumo de 270 kWh/m^3 con una temperatura de 80 ºC (disminuyó 34.15%). Por último, el *RR* pasa del 20% con una temperatura de 60 ºC a un valor del 45% con una temperatura de 80 ºC (aumentó un 55.56%).

Asimismo, se demostró que el DCC empleado para analizar el comportamiento de un sistema con dos entradas en conjuntos con RSM es una metodología experimental adecuada para estudiar este tipo de sistemas y desarrollar los modelos matemáticos necesarios para caracterizar el comportamiento de módulos MD con valores de desviación inferiores al 5%. Adicionalmente, se ha demostrado que la configuración MED en combinación con la MD tiene un factor de concentración más alto en comparación a otros sistemas de desalación por evaporación, garantizando mayor cantidad y mejor calidad del destilado.

Por otro lado, se demostró que la energía necesaria para este tipo de desalinizadores puede ser suministrada completamente con captadores solares planos con temperaturas inferiores a los 90 ºC (energía solar térmica de baja temperatura). No obstante, se recomienda realizar pruebas experimentales en entornos de producción reales y realizar un análisis económico detallado para determinar la viabilidad de este tipo de plantas MD.

REFERENCIAS.

[1] Armir S., & Morteza A. (2018). Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, 275-291. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065

[2] Tashtoush B., Alyahya W., Al Ghadi M., Al-Omari J. & Morosuk T. (2023). Renewable energy integration in water desalination: State of the art review and comparative analysis. Applied Energy, 352, 121950. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121950

[3] Belmehdi F., Otmani S. & Taha-Janan M. (2023). Global trends of solar desalination research: A bibliometric analysis during 2010 – 2021 and focus on Morocco. Desalination, 555, 116490. https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116490

[4] Drioli E., Ali A. & Macedonio F. (2015). Membrane distillation: recent developments and perspectives. Desalination, 356, 56–84. https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.028

[5] Jiménez M. & Arriagada M. (2019). Estudio de factores estratégicos claves para la impulsión y desalinización de agua en proyectos mineros de la Región de Antofagasta, Chile. Tesis, Universidad Andrés Bello. http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/14424

[6] Asaduzzaman F., Nahin T., Rashid M. & Hasanuzzama M. (2022). Chapter 9 - Solar water desalination system. Technologies for Solar Thermal Energy, 267-291. doi.org/10.1016/B978-0-12-823959-9.00007-6

[7] Ramilo L., Gomez de Soler S. & Coppari, N. (2003). Process technologies for water desalination. Annual Meeting of the Argentine Association of Nuclear Technology, AATN. INIS-AR-C-333

[8] Deshmukh A., Boo C., Karanikola V, Lin S., Straub A., Tong T., Warsinger D. & Elimelech M. (2018). Membrane distillation at the water-energy nexus: limits, opportunities, and challenges. Energy Environmental Science, 11, 1177. https://doi.org/10.1039/c8ee00291f

[9] Andrés J., Ruiz A., Acién G. & Zaragoza G. (2018). Assessment of a pilot system for seawater desalination based on vacuum multi-effect membrane distillation with enhanced heat recovery. Desalination, 443 (1), 110-121. https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.05.025

[10] Gil J.D., Ruiz A., Roca L., Zaragoza G. & Berenguel M. (2018). Prediction models to analyse the performance of a commercial-scale membrane distillation unit for desalting brines from RO plants. Desalination, 445, 15-28. doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.022

[11] Andrés-Mañas J., Requena I., Ruiz-Aguirre A. & Zaragoza G. (2022). Performance modelling and optimization of three vacuum-enhanced membrane distillation modules for upscaled solar seawater desalination. Separation and Purification Technology, 287, 120396. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120396

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

PANORAMA DEL MERCADO DE BATERÍAS DE LITIO EN MÉXICO: OPORTUNIDADES, RETOS Y PERSPECTIVAS PARA LA SOBERANÍA ENERGÉTICA

Ricardo Alberto Rodríguez Carvajal, Paula C. Isiordia-Lachica
Maestría en Gestión e Innovación Tecnológica, División de Ciencias Exactas y Naturales, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, col Noria alta, Guanajuato, Gto., C.P. 36050, México, rodriguez.ricardo@ugto.mx, pc.isiordia@ugto.mx .

Rafael García Gutiérrez
Departamento de Investigación en Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Blvd. Luis Encinas y Rosales, s/n, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México, rgarcia@difus.uson.mx

RESUMEN

El mercado de baterías de litio en México se encuentra en una fase incipiente pero estratégica, dada la creciente demanda global de tecnologías limpias y la relevancia del litio como insumo clave para la transición energética. México posee reservas de litio, particularmente en el estado de Sonora, lo cual ha suscitado interés tanto del sector público como privado por desarrollar una industria nacional que abarque desde la extracción hasta la manufactura de baterías. La indagación de mercado en este contexto se vuelve crucial para identificar oportunidades de inversión, áreas de innovación tecnológica y la viabilidad de establecer cadenas de valor integradas en el país (IEA, 2022; García & Paredes, 2021).

En términos de demanda, el mercado mexicano refleja una tendencia ascendente influenciada por la electrificación del transporte, el almacenamiento de energía renovable y el crecimiento de la industria electrónica. De acuerdo con datos de Statista (2023), se proyecta que el valor del mercado de baterías de litio en México crecerá a una tasa compuesta anual del 8.3% entre 2023 y 2030. No obstante, la mayor parte de la oferta proviene de importaciones, lo que genera una dependencia tecnológica significativa. La indagación de mercado permite evaluar los sectores con mayor absorción tecnológica y los incentivos requeridos para fortalecer capacidades locales, tanto en manufactura como en investigación y desarrollo (R&D).

Uno de los principales desafíos identificados es la falta de infraestructura productiva y de políticas industriales coherentes que promuevan el desarrollo de toda la cadena de valor, desde la minería hasta el reciclaje de baterías. El reciente decreto de nacionalización del litio, mediante la creación de LitioMx, representa un intento de asegurar el control estatal sobre este recurso estratégico. Sin embargo, su implementación ha sido criticada por falta de claridad operativa y de alianzas público-privadas eficientes (Rodríguez & López, 2023). La indagación de mercado puede ser instrumental para delimitar modelos de gobernanza y esquemas de colaboración entre sectores que maximicen el potencial económico del litio sin comprometer la sostenibilidad ambiental ni los derechos de las comunidades.

Asimismo, existe una ventana de oportunidad para insertar a México en las cadenas globales de suministro de baterías, especialmente como socio estratégico de América del Norte. La relocalización de empresas (nearshoring) debido a tensiones geopolíticas entre Estados Unidos y China abre espacios para que México se posicione como plataforma de producción regional. Sin embargo, esta posibilidad depende de la capacidad nacional para atraer inversión extranjera directa (IED), mejorar la competitividad logística y formar talento especializado. Estudios recientes subrayan la necesidad de establecer consorcios tecnológicos y programas de formación dual para capitalizar la demanda de habilidades en química avanzada, nanotecnología y automatización (González, 2024; CEPAL, 2023).

En conclusión, la indagación de mercado sobre baterías de litio en México no sólo permite mapear tendencias de consumo y oferta, sino que ofrece insumos críticos para el diseño de políticas públicas y estrategias empresariales. La articulación entre recursos naturales, capacidad productiva, conocimiento científico y marcos regulatorios adecuados determinará si México puede consolidarse como actor relevante en la transición energética global. Este esfuerzo requiere enfoques multidisciplinarios que integren economía, ingeniería, geopolítica y sostenibilidad, y que garanticen beneficios tangibles para la sociedad mexicana en el corto y largo plazo.

ABSTRACT

He lithium battery market in Mexico is in an early yet strategic phase, given the growing global demand for clean technologies and the relevance of lithium as a key input for the energy transition. Mexico possesses lithium reserves, particularly in the state of Sonora, which has sparked interest from both the public and private sectors in developing a national industry that spans from extraction to battery manufacturing. Market research in this context becomes crucial for identifying investment opportunities, areas of technological innovation, and the feasibility of establishing integrated value chains within the country (IEA, 2022; García & Paredes, 2021).

In terms of demand, the Mexican market shows an upward trend driven by the electrification of transportation, renewable energy storage, and the growth of the electronics industry. According to Statista (2023), the value of the lithium battery market in Mexico is projected to grow at a compound annual rate of 8.3% between 2023 and 2030. However, most of the supply comes from imports, generating significant technological dependence. Market research helps assess the sectors with the highest technological absorption and the incentives needed to strengthen local capabilities in both manufacturing and research and development (R&D).

One of the main challenges identified is the lack of production infrastructure and coherent industrial policies that promote the development of the entire value chain, from mining to battery recycling. The recent lithium nationalization decree, through the creation of LitioMx, represents an attempt to secure state control over this strategic resource. However, its implementation has been criticized for lacking

operational clarity and effective public–private partnerships (Rodríguez & López, 2023). Market research can be instrumental in defining governance models and collaboration frameworks between sectors that maximize the economic potential of lithium without compromising environmental sustainability or community rights.

Additionally, there is a window of opportunity to position Mexico within global battery supply chains, especially as a strategic partner for North America. The relocation of companies (nearshoring) due to geopolitical tensions between the United States and China creates space for Mexico to position itself as a regional production platform. However, this possibility depends on the nation's capacity to attract foreign direct investment (FDI), improve logistical competitiveness, and develop specialized talent. Recent studies emphasize the need to establish technology consortia and dual training programs to capitalize on the demand for skills in advanced chemistry, nanotechnology, and automation (González, 2024; ECLAC, 2023).

In conclusion, market research on lithium batteries in Mexico not only enables the mapping of consumption and supply trends but also provides critical inputs for the design of public policies and business strategies. The articulation between natural resources, productive capacity, scientific knowledge, and adequate regulatory frameworks will determine whether Mexico can consolidate itself as a relevant player in the global energy transition. This effort requires multidisciplinary approaches that integrate economics, engineering, geopolitics, and sustainability, ensuring tangible benefits for Mexican society in both the short and long term.

Palabras claves: Por favor incluya de cinco a diez palabras clave al final del *abstract*.

Introducción: La Transición Energética y el Rol Central de las Baterías de Iones de Litio

La transición hacia una economía global baja en carbono ha posicionado a la tecnología de baterías de iones de litio como un pilar fundamental. Estas baterías son la tecnología habilitadora clave para la descarbonización de dos de los sectores más críticos de la economía mundial: el transporte, a través de la masificación de los vehículos eléctricos (EV), y el sector eléctrico, mediante los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS, por sus siglas en inglés) que permiten estabilizar las redes eléctricas y maximizar el aprovechamiento de fuentes renovables intermitentes como la solar y la eólica (Deloitte, s.f.). La creciente demanda de baterías no es simplemente una tendencia de mercado, sino un cambio estructural profundo en el paradigma energético global, impulsado por imperativos climáticos y políticas gubernamentales en todo el mundo. Sin embargo, esta revolución tecnológica descansa sobre una base industrial frágil y geográficamente concentrada.

La cadena de suministro de las baterías de iones de litio, desde la extracción del mineral hasta la fabricación de la celda final, está dominada por un número limitado de actores y países. China, en particular, ha establecido un control casi hegemónico sobre las etapas intermedias de la cadena, como el refinamiento de minerales críticos y la producción de componentes clave como cátodos y ánodos. Esta dependencia ha generado una creciente preocupación geopolítica en las naciones occidentales, que perciben esta concentración como un riesgo significativo para su seguridad energética y económica. Como respuesta, países como Estados Unidos y los miembros de la Unión Europea han comenzado a implementar políticas industriales ambiciosas, como la Ley de Reducción de la Inflación (IRA), con el objetivo explícito de diversificar y regionalizar la cadena de suministro, fomentando la producción local y en países aliados.

En este escenario de reconfiguración geopolítica, México se encuentra en una posición única. Dotado de vastos yacimientos de litio, una de las industrias automotrices más consolidadas del mundo y una ubicación estratégica como socio del T-MEC, el país tiene el potencial de convertirse en un nodo crucial en la emergente cadena de suministro de baterías de América del Norte. No obstante, la realización de este potencial está supeditada a la superación de dos desafíos monumentales: los obstáculos técnicos asociados a la extracción de litio de sus depósitos de arcilla, una vía aún no probada a escala comercial, y las profundas contradicciones políticas derivadas de su reciente giro hacia el nacionalismo de recursos, que genera incertidumbre para la inversión extranjera indispensable..

Panorama del Mercado Global de Baterías de Iones de Litio

Crecimiento Exponencial y Proyecciones Económicas

El mercado global de baterías de iones de litio está experimentando una expansión sin precedentes. Las proyecciones indican que el valor del mercado crecerá de aproximadamente 113.61 mil millones de USD en 2025 a 304.22 mil millones de USD para 2030, lo que representa una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 21.77% (Mordor Intelligence, 2025a). Otras estimaciones corroboran esta tendencia, con CAGRs consistentemente proyectadas en torno al 20%. Este rápido crecimiento subraya la importancia crítica de la tecnología en la economía global.

Los principales impulsores de esta demanda son dos sectores en plena transformación:

- **Vehículos Eléctricos (EVs):** El sector automotriz es el motor dominante, representando el 55% del mercado de baterías en 2024 (Mordor Intelligence, 2025a). La demanda de baterías para EVs alcanzó los 750 GWh en 2023, un aumento del 40% en comparación con 2022 (Knowledge Sourcing Intelligence LLP, 2024). Este auge es alimentado por mandatos gubernamentales, la disminución de los precios de los paquetes de baterías (que cayeron un 14% en 2023) y una creciente aceptación por parte de los consumidores.

- **Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS):** Aunque más pequeño en tamaño absoluto, el segmento de almacenamiento estacionario es el de más rápido crecimiento, con una CAGR proyectada del 28.9% hasta 2030 (Mordor Intelligence, 2025a). Los BESS son indispensables para estabilizar las redes eléctricas a medida que integran una mayor proporción de energías renovables intermitentes, y la capacidad instalada a nivel mundial se está duplicando rápidamente (Deloitte, s.f.).

Regionalmente, la zona de Asia-Pacífico, liderada por China, domina tanto la producción como el consumo, con una cuota de mercado del 55% en 2024 (Mordor Intelligence, 2025a). Sin embargo, Europa y América del Norte están invirtiendo agresivamente para expandir su capacidad de fabricación local, buscando reducir los riesgos de la cadena de suministro y satisfacer la creciente demanda interna (Mordor Intelligence, 2025a).

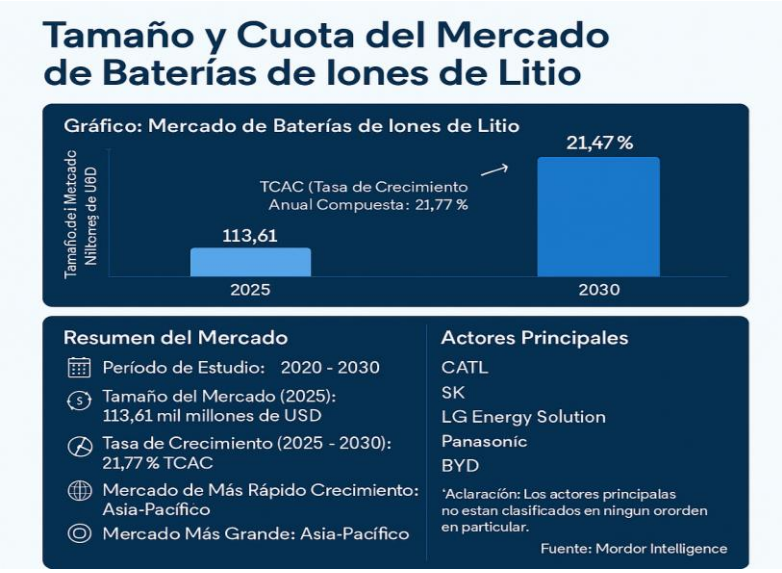


Figura 1: Proyección del Crecimiento del Mercado Global de Baterías de Iones de Litio (2025-2030) Fuente: Elaboración propia con datos de Mordor Intelligence (2025).10

Dinámicas de la Cadena de Suministro Global: Una Estructura Concentrada La cadena de valor de las baterías de litio es muy compleja y global. Según la Australian Trade and Investment Commission (2018), se divide en tres grandes etapas (International Energy Agency, 2024b): exploración/minería (*upstream*), refinación/componentes (*midstream*) y ensamblaje/distribución (*downstream*), seguidas de un ciclo de reciclaje.

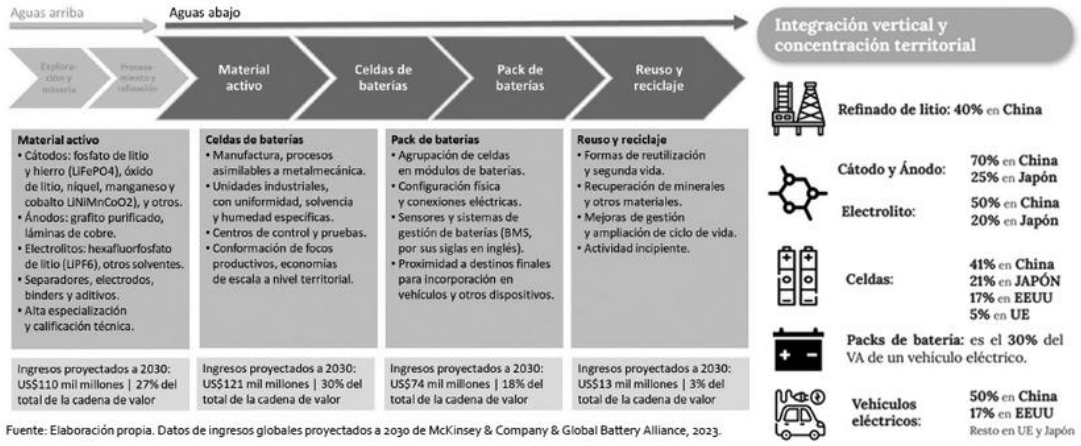


Figura 2. Diagrama de la cadena de valor de las baterías de litio. En la parte superior se detallan las etapas clave (exploración, refinación,

ensamblaje y reciclaje) y en la parte derecha se indica la concentración geográfica de cada segmento. Por ejemplo, China lidera la refinación del litio y la producción de cátodos/ánodos, mientras que en montaje de celdas destaca también el sudeste asiático y Estados Unidos[7][8].

1. ***Upstream* (Extracción de Materias Primas):** La minería de litio está concentrada en pocos países. En 2023, Australia fue el principal productor mundial con el 51.0% de la producción total, extraído de minas de roca dura (espodumena), seguido por Chile con el 25.9%, obtenido de salmueras (Natural Resources Canada, 2025). El llamado "Triángulo del Litio", compuesto por Chile, Argentina y Bolivia, alberga las mayores reservas de litio del mundo, principalmente en salares (Natural Resources Canada, 2025). Esta concentración en la fuente crea una dependencia crítica para el resto del mundo.

2. ***Midstream* (Procesamiento y Manufactura):** Esta es la etapa de mayor dominio chino. China controla aproximadamente el 60% de la capacidad mundial de refinamiento de litio, el 70% de la producción de cátodos y el 85% de la producción de ánodos (Bhutada, 2023). Esta posición le otorga una influencia desproporcionada sobre toda la cadena de valor. Las principales empresas fabricantes de baterías son predominantemente asiáticas, incluyendo gigantes como CATL y BYD (China), LG Energy Solution y Samsung SDI (Corea del Sur), y Panasonic (Japón). En la fabricación de componentes, empresas como Ningbo Shanshan y Resonac Holdings son actores clave en el suministro de ánodos.

3. ***Downstream* (Integración y Uso Final):** En esta etapa, los fabricantes de vehículos eléctricos y sistemas BESS, como Tesla, Volkswagen o Fluence, integran los paquetes de baterías en sus productos finales. Existe una tendencia creciente por parte de estas empresas a asegurar sus cadenas de suministro mediante acuerdos directos con mineras y fabricantes de celdas, así como a co-localizar las plantas de baterías con las de ensamblaje de vehículos para reducir costos logísticos y riesgos.

Tabla 1: Principales Países Productores y con Mayores Reservas de Litio (2023)

País	Producción Minera (Toneladas)	Producción (% del Total Mundial)	Reservas (Toneladas)	Reservas (% del Total Mundial)
Australia	74,700	51.0%	6,200,000	22.4%
Chile	38,000	25.9%	9,300,000	33.6%
China	22,600	15.4%	3,000,000	10.8%
Argentina	6,500	4.5%	3,600,000	13.0%
Brasil	2,630	1.8%	390,000	1.4%
Canadá	520	0.4%	930,000	3.4%
Total Mundial	**146,450**	**100.0%**	**27,690,000**	**100.0%**

Fuente: Elaboración propia con datos de Natural Resources Canada (2025).[16]

Tendencias Tecnológicas y Ambientales

El mercado no solo crece en volumen, sino que también evoluciona rápidamente en términos de tecnología y sostenibilidad.

La Batalla de las Químicas: LFP vs. NMC: El mercado está marcado por una bifurcación tecnológica entre dos químicas de cátodo principales: fosfato de hierro y litio (LFP) y níquel, manganeso y cobalto (NMC).

1. **NMC:** Tradicionalmente ha sido la química dominante, con un 60% del mercado en 2022, debido a su mayor densidad energética (200-280 Wh/kg), que permite una mayor autonomía en los EVs de gama alta (McKinsey & Company, 2024). Sin embargo, su costo es más elevado (100-140 USD/kWh) y su dependencia del cobalto, a menudo extraído en condiciones socialmente controvertidas, plantea desafíos éticos y de suministro (PatentPC, s.f.).

2. **LFP:** Está ganando cuota de mercado a un ritmo acelerado, proyectándose que alimentará el 60% de los EVs de nivel de entrada para 2030 (PatentPC, s.f.). Sus ventajas son un menor costo (80-100 USD/kWh), una mayor seguridad (su umbral de fuga térmica es de 270°C frente a los 210°C del NMC) y una vida útil mucho más larga (3,000-7,000 ciclos frente a 1,500-2,500 del NMC) (PatentPC, s.f.). Su principal desventaja es una menor densidad energética (160-190 Wh/kg), aunque las innovaciones tecnológicas están cerrando esta brecha (McKinsey & Company, 2024).

La competencia entre LFP y NMC trasciende lo técnico; tiene implicaciones geopolíticas y económicas. El auge de la tecnología LFP, liderada por empresas chinas como CATL, reduce la dependencia del cobalto y el níquel, metales con cadenas de suministro volátiles. Esto no solo disminuye los costos y democratiza el acceso a los EVs, sino que también otorga a China una ventaja competitiva estratégica en el segmento de mercado masivo, desafiando el dominio histórico de los fabricantes occidentales en la industria automotriz.

Tabla 2: Comparativa de Químicas de Batería: LFP vs. NMC

Métrica	LFP (Fosfato de Hierro y Litio)	NMC (Níquel, Manganeso y Cobalto)
Densidad Energética	160–190 Wh/kg	200–280 Wh/kg
Ciclos de Vida	3,000–7,000 ciclos	1,500–2,500 ciclos
Costo por kWh	80–100 USD	100–140 USD
Temperatura de Fuga Térmica	~270°C (Más segura)	~210°C (Menos segura)

Fuente: Elaboración propia con datos de PatentPC (n.d.), McKinsey & Company (2024), Battery Swap Cabinet (n.d.).[22]

Análisis del Ciclo de Vida Ambiental:

- **Impacto de la Extracción:** La minería de litio tiene una huella ambiental considerable. La extracción a partir de salmueras, común en Sudamérica, consume enormes volúmenes de agua (aproximadamente 2 millones de litros por tonelada de litio), lo que amenaza ecosistemas frágiles en regiones áridas. La minería de roca dura es intensiva en energía y genera grandes cantidades de residuos (relaves).

- **Beneficios del Reciclaje:** El reciclaje de baterías emerge como una solución clave para mitigar estos impactos. Los procesos avanzados pueden recuperar más del 95% de los metales críticos como el litio, níquel y cobalto. En comparación con la minería de materiales vírgenes, el reciclaje puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre un 58% y un 81%, el uso de agua entre un 72% y un 88%, y el consumo de energía entre un 77% y un 89% (Stanford University, 2025). Esto no solo crea una economía circular, sino que también mejora la seguridad de los recursos y reduce drásticamente la huella ambiental total de las baterías.

El marcado contraste entre los impactos de la minería virgen y los beneficios del reciclaje está creando un poderoso imperativo económico y regulatorio para desarrollar una economía circular de baterías. A medida que las primeras flotas de EVs lleguen al final de su vida útil, se creará una nueva y masiva "mina urbana" de baterías usadas. Las naciones que logren construir la infraestructura de reciclaje más eficiente y escalable

obtendrán una ventaja competitiva decisiva, asegurando un suministro doméstico de minerales críticos y desvinculando sus industrias de los riesgos geopolíticos asociados a la extracción primaria. A largo plazo, los líderes en la carrera de las baterías podrían no ser aquellos con las mayores reservas geológicas, sino aquellos con los ecosistemas de reciclaje más avanzados.

El Potencial de México en la Cadena de Valor del Litio

Recursos, Desafíos Geológicos y el Marco Regulatorio

México cuenta con recursos de litio significativos, estimados en 1.7 millones de toneladas, lo que lo sitúa entre los diez primeros países del mundo. El yacimiento más grande conocido se encuentra en el estado de Sonora y es un depósito masivo alojado en arcillas. Sin embargo, este potencial se enfrenta a un desafío geológico fundamental: la extracción de litio a partir de arcillas no ha sido probada a escala comercial en ninguna parte del mundo y su viabilidad económica es incierta. El proceso es tecnológicamente complejo, requiriendo métodos potencialmente costosos e intensivos en energía, como la calcinación y la lixiviación con ácidos, y la baja concentración de litio en el mineral (tan solo 0.001% por tonelada) representa un obstáculo formidable para la rentabilidad.

A este desafío técnico se suma un complejo panorama regulatorio. En abril de 2022, el gobierno mexicano reformó la Ley Minera para nacionalizar la exploración y explotación del litio, declarándolo un mineral estratégico y de utilidad pública (SFA (Oxford), 2023). Esta reforma condujo a la creación de la empresa estatal Litio para México (LitioMx), encargada de gestionar toda la cadena de valor del litio. La ley estipula que LitioMx deberá mantener una participación mayoritaria (al menos el 51%) en cualquier proyecto conjunto, lo que ha generado una considerable incertidumbre entre los inversores privados y extranjeros. Aunque el gobierno ha declarado que las concesiones existentes serán respetadas, esta afirmación ha sido puesta en duda por acciones como la cancelación de las concesiones del proyecto Sonora de la empresa china Ganfeng Lithium, lo que ha derivado en un proceso de arbitraje internacional y ha enfriado el interés de otros potenciales inversores.

Análisis del Mercado Potencial en México: Doble Motor de Demanda Interna

A pesar de los desafíos en el *upstream*, México presenta un enorme potencial en el *downstream* gracias a dos potentes motores de demanda interna.

Sector Automotriz y Vehículos Eléctricos (EVs): México es una potencia mundial en la fabricación de automóviles, siendo el séptimo mayor productor de vehículos. El mercado de EVs en el país está preparado para un crecimiento explosivo, con proyecciones que estiman un aumento de 0.69 mil millones de USD en 2025 a 4.11 mil millones de USD para 2029, lo que implica una CAGR del 56.07% (Mordor Intelligence, 2025b). Grandes fabricantes como General Motors, Ford y BMW ya están produciendo o planean producir EVs en México, lo que crea una demanda local masiva y creciente de baterías.

Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS): El mercado mexicano de BESS también está en una trayectoria de rápida expansión. Se proyecta que crecerá de 3.1 mil millones de USD en 2025 a 9.8 mil millones de USD para 2031, con una CAGR del 21.5% (Mobility Foresights, 2024). Este crecimiento está impulsado por la necesidad de estabilizar la red eléctrica nacional, integrar proyectos de energía renovable, gestionar los picos de demanda para clientes industriales y mejorar la resiliencia energética del país. El propio gobierno planea instalar más de 2.2 GW de capacidad de almacenamiento para 2030.

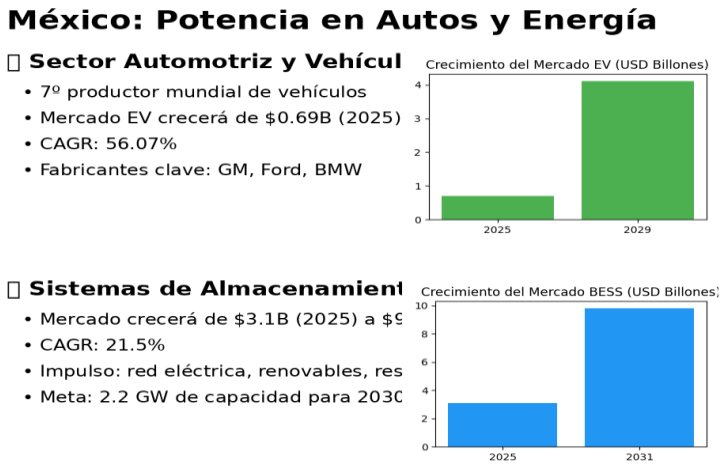


Figura 2: Mercados Potenciales en México: Proyecciones de Crecimiento para Vehículos Eléctricos y BESS (2025-2031) Fuente: Elaboración propia con datos de Mordor Intelligence (2025) y Mobility Foresights (2024).53

La Oportunidad Geopolítica: T-MEC y la Ley de Reducción de la Inflación (IRA) de EE. UU.

La posición de México se ve fortalecida por un entorno geopolítico excepcionalmente favorable, definido por dos políticas clave de su principal socio comercial, Estados Unidos.

El T-MEC impone reglas de origen más estrictas para el sector automotriz, exigiendo que hasta un 75% del contenido de los vehículos y sus partes esenciales (como las baterías) sea de origen norteamericano para calificar para el comercio libre de aranceles. Esta disposición incentiva fuertemente la localización de toda la cadena de suministro automotriz dentro de América del Norte. Por otra parte la IRA de 2022 de EE. UU. ofrece un crédito fiscal de hasta 7,500 USD a los consumidores por la compra de EVs, pero sujeto a estrictos requisitos de abastecimiento. Para ser elegible, el ensamblaje final del vehículo debe realizarse en América del Norte. Además, un porcentaje creciente del valor de los minerales críticos de la batería debe ser extraído o procesado en EE. UU. o en un país con un acuerdo de libre comercio (como México), y un porcentaje del valor de los componentes de la batería debe ser fabricado o ensamblado en América del Norte (U.S. Department of the Treasury, 2023).

La combinación de estas dos políticas crea un poderoso "efecto de atracción" (*pull factor*) para que la fabricación de baterías y EVs se instale en México. Las empresas pueden aprovechar los costos laborales competitivos y el ecosistema manufacturero ya establecido en México para cumplir con las reglas de contenido norteamericano, permitiendo que sus productos accedan al lucrativo mercado estadounidense libres de aranceles y con subsidios al consumidor (SFA (Oxford), 2023). Esta tendencia de *nearshoring* ya es una realidad, con miles de millones de dólares en inversiones relacionadas con la electromovilidad anunciadas en el país.

Esta situación crea lo que puede denominarse la "paradoja de la política mexicana del litio". Por un lado, las políticas industriales de EE. UU. (IRA y T-MEC) generan el incentivo externo más potente imaginable para desarrollar una cadena de suministro de baterías en México. Por otro lado, la política interna de México (la nacionalización del litio) crea un importante elemento disuasorio para la inversión extranjera y las alianzas tecnológicas que son absolutamente esenciales para superar su principal obstáculo: la compleja geología de sus yacimientos de arcilla. México no puede exigir simultáneamente control mayoritario y riesgo mínimo a sus socios, mientras carece de la tecnología propia para des-riesgar la inversión inicial.

Ante esta paradoja, el camino más viable e inmediato para México no es una estrategia lineal "de la mina al mercado", sino una estrategia bifurcada. Dada la incertidumbre y los largos plazos del desarrollo minero, México debería centrarse en capitalizar las oportunidades inmediatas en las etapas intermedias y finales de la cadena de valor. Al aprovechar los incentivos del T-MEC y la IRA, el país puede consolidarse como un centro de manufactura de componentes, ensamblaje de paquetes de baterías y producción de EVs, utilizando inicialmente materiales y celdas importadas (por ejemplo, de socios comerciales como Chile). Este enfoque construiría un mercado doméstico, generaría empleos, desarrollaría una fuerza laboral calificada y posicionaría al país para integrar sus propios recursos de litio en el futuro, una vez que la tecnología de extracción sea comercialmente viable.

Análisis Estratégico y Recomendaciones

Para transformar su potencial geológico y geográfico en una realidad económica, México debe adoptar un enfoque estratégico pragmático que Para transformar su potencial geológico y geográfico en una realidad económica, México debe adoptar un enfoque estratégico pragmático que aborde sus desafíos internos y capitalice las oportunidades externas. Se proponen las siguientes recomendaciones:

1. **Navegar la Paradoja Regulatoria con Flexibilidad:** Es imperativo que el gobierno mexicano, a través de LitioMx, desarrolle modelos de asociación más flexibles que puedan atraer la inversión y la tecnología necesarias. Esto podría incluir la cesión del control operativo a socios con experiencia probada (incluso si el Estado mantiene una participación mayoritaria), la creación de Zonas Económicas Especiales con incentivos fiscales y marcos legales claros para proyectos de litio, o la negociación de contratos de riesgo compartido que distribuyan de manera más equitativa las cargas del desarrollo tecnológico (SFA (Oxford), 2023).

2. **Priorizar una Estrategia "Downstream-First":** México debe enfocar sus esfuerzos a corto y mediano plazo en consolidar su posición en las etapas intermedias y finales de la cadena de valor. La política industrial debe orientarse agresivamente a atraer inversiones para plantas de ensamblaje de baterías y manufactura de vehículos eléctricos. Este enfoque aprovecha las fortalezas existentes del país en el sector automotriz y capitaliza los vientos de cola geopolíticos inmediatos, generando valor económico y empleos mientras se resuelve el desafío del *upstream*.

3. **Fomentar la Innovación Tecnológica Nacional:** Se recomienda la creación de un consorcio nacional de investigación y desarrollo, liderado por LitioMx en colaboración con universidades mexicanas y empresas tecnológicas internacionales. El objetivo exclusivo

de este consorcio sería resolver los desafíos técnicos y económicos de la extracción de litio a partir de arcillas. Este esfuerzo podría financiarse parcialmente con los ingresos generados por el crecimiento de las industrias *downstream* de EVs y BESS.

4. **Construir una Cadena de Valor Sostenible y Circular:** México tiene la oportunidad de diseñar su industria de baterías con la sostenibilidad como eje central desde el principio. Es crucial desarrollar un marco regulatorio y la infraestructura necesaria para el reciclaje de baterías. Posicionarse como un líder en la producción de baterías sostenibles y de bajo impacto ambiental dentro de América del Norte no solo se alinea con las tendencias globales de ESG, sino que podría convertirse en una ventaja competitiva clave a largo plazo.

5.

Conclusión

México se encuentra en una encrucijada histórica, con una oportunidad generacional para posicionarse como un actor central en la transición energética de América del Norte. Su vasto potencial se deriva de una confluencia única de factores: reservas significativas de litio, una base manufacturera de clase mundial y una posición privilegiada dentro del bloque comercial del T-MEC, una ventaja ahora magnificada por los incentivos de la Ley de Reducción de la Inflación de Estados Unidos.

Sin embargo, este potencial está lejos de ser una certeza. Se enfrenta a desafíos formidables, principalmente la incertidumbre tecnológica y económica de sus recursos geológicos de arcilla, y las barreras autoimpuestas de un entorno regulatorio rígido que disuade la inversión privada. El éxito de México no estará predeterminado por la riqueza de su subsuelo, sino por la sabiduría de sus políticas públicas.

Para convertir el potencial del litio de una curiosidad geológica a un motor de prosperidad económica, se requiere una estrategia nacional pragmática, flexible y con visión de futuro. Un enfoque que equilibre la soberanía nacional con las realidades del capital global y la tecnología, que priorice las fortalezas inmediatas en la manufactura mientras invierte en la innovación a largo plazo, y que integre la sostenibilidad como un pilar fundamental, será esencial. La elección que México haga en los próximos años definirá su rol en la economía energética del siglo XXI.

Referencias Americas Market Intelligence. (2022). *Mexico's nationalization of lithium: 3 opportunities for players across the value chain*. https://americasmi.com/insights/mexico-nationalization-of-lithium-opportunities/

Bhutada, G. (2023, 23 de enero). *This chart shows which countries produce the most lithium*. World Economic Forum. https://www.weforum.org/stories/2023/01/chart-countries-produce-lithium-world/

Deloitte. (s.f.). *Global energy storage: The renewable energy storage markets poised for rapid growth*. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://www.deloitte.com/us/en/Industries/energy/articles/global-energy-storage-renewable-energy-storage.html

Grand View Research. (2024). *Lithium-ion battery market size, share & trends analysis report*. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lithium-ion-battery-market

Gu, H., Chen, X., Chen, S., He, E., & Yin, Z. (2024). Lithium extraction from lithium-bearing clay minerals by calcination-leaching method. *Minerals*, *14*(3), 248. https://doi.org/10.3390/min14030248

International Energy Agency. (2024a). *Global EV Outlook 2024: Trends in electric vehicle batteries*. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-batteries

International Energy Agency. (2024b). *Global supply chains of EV batteries*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/961cfc6c-6a8c-42bb-a3ef-57f3657b7aca/GlobalSupplyChainsofEVBatteries.pdf

Knowledge Sourcing Intelligence LLP. (2024). *Lithium-ion battery market - Forecasts from 2025 to 2030*. Research and Markets. https://www.researchandmarkets.com/reports/4801808/lithium-ion-battery-market-forecasts-from-2025

McKinsey & Company. (2024, 15 de febrero). *The battery chemistries powering the future of electric vehicles*. https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-battery-chemistries-powering-the-future-of-electric-vehicles

Mobility Foresights. (2024). *Mexico battery energy storage systems market*. https://mobilityforesights.com/product/mexico-battery-energy-storage-systems-market

Mordor Intelligence. (2025a). *Lithium-ion battery market - Size, share, trends, & forecasts (2025 - 2030)*. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/lithium-ion-battery-market

Mordor Intelligence. (2025b). *Mexico electric car market - Size, share, trends, & forecasts (2025 - 2029)*. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/mexico-electric-car-market

Natural Resources Canada. (2025, 12 de marzo). *Lithium facts*. https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/lithium-facts

PatentPC. (s.f.). *LFP vs. NMC batteries: Market growth and performance comparisons stats*. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://patentpc.com/blog/lfp-vs-nmc-batteries-market-growth-and-performance-comparisons-stats

SFA (Oxford). (2023, 2 de marzo). *Mexico's lithium nationalisation: Public-private joint ventures sought to lead lithium value chain development*. https://www.sfa-oxford.com/market-news-and-insights/sfa-mexico-s-lithium-nationalisation/

Stanford University. (2025, enero). *Recycling lithium-ion batteries cuts emissions and strengthens supply chain*. Stanford News. https://news.stanford.edu/stories/2025/01/recycling-lithium-ion-batteries-cuts-emissions-and-strengthens-supply-chain

Torres-López, A. D., Ruiz-Femenia, R., & Ponce-Ortega, J. M. (2025). Techno-economic and environmental assessment of the lithium supply chain in Mexico. *Processes*, *13*(4), 1116. https://doi.org/10.3390/pr13041116

U.S. Department of the Treasury. (2023, 31 de marzo). *Treasury releases proposed guidance on new clean vehicle credit to lower costs for consumers, build U.S. industrial base, strengthen supply chains*. https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy1379

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

DIMENSIONAMIENTO DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN EN CD PARA UN DATALOGGER TERMOHIGROMÉTRICO APLICADO A UN SECADOR SOLAR

Set J. Castillo Avila 1, Jesús O. Álvarez Ruíz 2, José Hernández Rodríguez 3, Freddy I. Chan Puc 5.
División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UQROO), 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, josherna@uqroo.edu.mx, freddy@uqroo.edu,mx.

Guillermo Becerra-Núñez 4.
División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Secihti – UQROO, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019, México, 3121327097, guillermobecerran@gmail.com.

RESUMEN

El presente trabajo describe el dimensionamiento de una fuente en Corriente Directa (CD) basada en un Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFVA), con respaldo de baterías recargables para tres días de autonomía. La fuente alimenta el circuito de un datalogger termohigrométrico que tiene la funcionalidad de monitorear vía remota, a través de una aplicación web las variables de: temperatura, humedad y masa. El circuito que conforma el datalogger está constituido por un microcontrolador ESP32, diversos sensores para medir las variables mencionadas, además de un módulo reloj para conservar la fecha y hora en caso de que la energía se vea interrumpida, todos los elementos demandan una corriente de 0.2 A, a una tensión de 5 V. Con ello se busca un mayor control y reducir costos en el proceso de secado dentro de un secador solar, aplicable a zonas rurales de la península de Yucatán.

El datalogger se alimentará de un SFVA conformado por un Arreglo Fotovoltaico de un Módulo con una potencia máxima de 10 W; un Controlador de Carga Waveshare, modelo D, voltaje de entrada de 6 – 24 VCD; y tres Baterías Recargables modelo 18650, tipo Li-Ion de 3500 mAh a 3.7V. El dimensionamiento del SFVA se realiza con base al método Watt-Hora. Es importante destacar que, la alimentación a través de un SFVA persigue autonomía energética y sostenibilidad en el monitoreo remoto de un secador solar, haciendo uso de una fuente de energía renovable. Aunado a lo anterior, el sistema es probado de manera preliminar en condiciones reales, presentado un comportamiento esperando en el ciclo carga-descarga de las baterías.

ABSTRACT

This work describes the sizing of a Direct Current (DC) power supply based on a Stand-Alone Photovoltaic System (SAPV), with rechargeable battery backup for three days of autonomy. The power supply feeds the circuit of a thermo-hygrometric datalogger, which has the functionality of remotely monitoring, via a web application, the variables of temperature, humidity, and mass.The datalogger circuit consists of an ESP32 microcontroller, various sensors to measure the aforementioned variables, as well as a real-time clock module to maintain date and time in case of power interruption. All components draw a current of 0.2 A at a voltage of 5 V. The aim is to achieve greater control and reduce costs in the drying process of a solar dryer, applicable to rural areas of the Yucatán Peninsula.

The datalogger will be powered by an SAPV composed of a Photovoltaic Array of one module with a maximum power of 10 W, a Waveshare Charge Controller, model D, with an input voltage of 6–24 VDC, and three 18650 Li-Ion rechargeable batteries rated at 3500 mAh and 3.7 V. The SAPV sizing is carried out using the Watt-Hour method. It is important to highlight that powering the system through an SAPV aims to achieve energy autonomy and sustainability in the remote monitoring of a solar dryer, by using a renewable energy source. In addition, the system is preliminarily tested under real conditions, showing the expected behavior in the charge-discharge cycle of the batteries.

Palabras claves: fuente de CD, Sistema Fotovoltaico Autónomo, Datalogger, Controlador de Carga, Energía Renovable.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de registro de datos, conocidos como Datalogger, son sistemas que permiten realizar de manera automática la captura, almacenamiento y transmisión de datos de variables física como: temperatura, humedad, masa, entre otras. Estos sistemas, para poder desarrollar sus funciones requieren de una fuente de alimentación eléctrica, la cual puede ser convencional o no. Una de estas posibles fuentes de alimentación eléctrica es la energía solar fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica se aprovecha por medio de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV), los cuales pueden ser autónomos (off grid) o interconectados a la red (on grid) con o sin almacenamiento de energía, y a través de ellos se lleva a cabo la conversión de la radiación solar en energía eléctrica. Los SFV tiene múltiples aplicaciones desde alimentar una bomba de agua doméstica hasta generar la energía eléctrica para una planta industrial. Por lo cual, el presente trabajo tiene el objetivo de dimensionar un Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFVA) que alimentará un Datalogger, para el registro datos de temperatura, humedad y masa en un secador solar. Con ello se pretende dar mayor autonomía en el monitorio del cambio de las variables en el interior de la cámara de secado del secador, y de esta manera promover el uso intensivo de las fuentes de energía limpias y renovables como la solar térmica y solar fotovoltaica.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente forma: en la sección **antecedentes**, se describen de manera general algunos de los trabajos realizados sobre diseño y dimensionamiento de SFV para diversas aplicaciones. Posteriormente en la sección de **metodología**, se describen el proceso de dimensionamiento del SFVA, objeto de la presente propuesta. En la sección de **resultados** se presenta los datos obtenidos en las mediciones de voltaje y corriente de la prueba preliminar realizada. Por último, se presenta la sección de **conclusiones** y **trabajos futuros**.

ANTECEDENTES

En la actualidad, los SFV son altamente demandados para suplir las necesidades energéticas domésticas, comerciales e industriales. Ejemplo de ello, son los diversos trabajos reportados en diseño y dimensionamiento de SFV autónomos e interconectados a la red. Entre ellos se encuentra el trabajo realizado por Angulo y González [1], donde se desarrolla el dimensionamiento de un sistema de generación eléctrica fotovoltaica para abastecer un sistema de iluminación, analizando diferentes aspectos como la ubicación geográfica, la demanda energética y los costos asociados al diseño del sistema, concluyendo que el sistema es viable para abastecer la demanda energética del sistema de iluminación. Otro de los trabajos reportados, es el presentado por Alarcón [2], en el cual se plasma el diseño de una planta renovable híbrida: fotovoltaica, eólica y un sistema de almacenamiento. Además, en este trabajo se propone el use de un modelo matemático para optimizar la inversión en los distintos componentes de la planta híbrida, lo cual proporciona las capacidades óptimas de los componentes que conforman dicha planta, entre otras cosas. Un tercer trabajo es el desarrollado por Martínez-Peralta y otros [3], en este trabajo se presenta el diseño de un SFVA para alimentar las cargas eléctricas de una vivienda unifamiliar en una zona rural de la parroquia Vuelta Larga, del cantón Esmeraldas, provincia de Esmeraldas, en Ecuador, en este trabajo se ha hecho el uso del programa Pvsyst. Un cuarto trabajo, es el reportado por Ladrón [4], en el cual se presenta el diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica aislada para suplir de energía eléctrica a poblados indígenas de colombianos de la selva amazónica, con el objetivo de alimentar dispositivo de potabilización de agua.

Por otro lado, hay múltiples trabajos que se enfocan en utilizar y evaluar el uso de sistemas térmicos y fotovoltaicos dese del punto de vista de secado solar y aplicaciones térmicas, en los últimos años las investigaciones de [5-10] mezclan los sistemas fotovoltaicos con térmicos para obtener mejoras como en el presente estudio.

Como se puede notar en los casos [1-4], los Sistemas Fotovoltaicos son diseñados para suplir la energía eléctrica en el ámbito residencial, como en su gran mayoría. Sin embargo, para el caso aquí tratado, la energía generada por el SFV será utilizada para una aplicación muy específica, alimentar un Datalogger, logrando así un sistema con la mayor autonomía posible utilizando una fuente de energía limpia y renovable (energía solar fotovoltaica).

METODOLOGÍA

En el desarrollo del presente trabajo, el primer paso realizado fue determinar la cantidad de energía demanda por el Datalogger. Posteriormente, se dimensionó el tamaño del Arreglo Fotovoltaico (AFV) es decir la cantidad y capacidad de los Módulos Fotovoltaicos (MFVs). Una vez realizado lo anterior, se dimensionó el tamaño del banco de baterías en función de los días de autonomía. Y por último se seleccionó el controlador de carga con base los parámetros eléctricos de salida del SFVA y de alimentación de la carga y banco de baterías.

Dimensionamiento del SFVA

Para tener el dimensionamiento del SFVA, es necesario determinar los siguiente: la Demanda Energética al día de las cargas, en este caso la energía que consume en un día el Datalogger; en función de lo anterior se estima la cantidad de MFVs necesarios para generar dicha demanda de energía por día; y por último se estima el tamaño del Banco de Baterías, considerando los días de autonomía que se hayan planteado.

La estimación de la Demanda Energética al día (DE_d) del datalogger, medido en Wh (Watt-hora), se realiza aplicando la siguiente ecuación (1):

$$DE_d = V_d \cdot I_d \cdot H_d \qquad (1)$$

Donde
V_d: voltaje de operación del datalogger, en Volt.
I_d: corriente demanda por el datalogger, en Ampere.
H_d: tiempo de operación al día del datalogger, en horas.

Para estimar la Cantidad de Módulos Fotovoltaicos (C_{MFV}) necesarios para suplir la demanda DE_d, se aplica la siguiente ecuación (2):

$$C_{MFV} = \frac{DE_d * F_s}{P_m \cdot HSP \cdot \eta_w \cdot \eta_c \cdot \eta_i \cdot \eta_b \cdot \eta_T} \qquad (2)$$

Donde
F_s: factor de sobredimensionamiento (10%).
P_m: potencian máxima del módulo baja condiciones STC, en Watt.
HSP: recurso solar disponible, en Horas Solares Pico.
η_w: eficiencia por el cableado (97%).

η_c: eficiencia por el controlador de carga (97%).
η_i: eficiencia por el inversor (100%).
η_b: eficiencia global en baterías (85%).
η_T: eficiencia por efecto de la temperatura (90%).

El Tamaño del Banco de Baterías (T_{BB}) en Ah (Ampere-hora), se estima utilizando la ecuación (3):

$$T_{BB} = \frac{DE_d \cdot A_u}{V_{nB} \cdot f_u \cdot f_i} \qquad (3)$$

Donde
A_u: tiempo de autonomía del sistema, en días.
V_{nB}: voltaje nominal del banco de baterías.
f_u: factor de uso de la batería (0.8).
f_i: factor de incremento en la capacidad debido a una razón de descarga más lenta (1.05).

Aplicación

Para el desarrollo de las ecuaciones anteriores, se estableció lo siguiente:

- MFV de la marca BP Solar y modelo SX10, (ver Figura 1), con una potencia máxima (P_m) de 10 W, un voltaje a máxima potencia (Vm) de 16.8 V, una corriente a máxima potencia (Im) de 0.29 A, un voltaje a circuito abierto (Voc) de 21 V y una corriente de corto circuito (Isc) de 0.65 A en condiciones STC (por sus siglas en inglés).
- 11 horas de operación al día del secador.
- 3 días de autonomía del sistema.
- Batería de litio recargable, modelo 18650, de 3.7 V y capacidad de 3500 mAh.
- Datalogger con alimentación de 5 V y 0.2 A, en CD.
- Recurso solar para la península de Yucatán de 5 HSP.



Figura 1-Módulo Fotovoltaico SX10 en operación.

Con base a la ecuación (1) se determina la demanda energética (***DE$_d$***) del Datalogger:

$$DE_d = (5V)(0.2A)(11\,h/día) = 11\,Wh/día$$

De la ecuación (2) se determina la cantidad de MFVs (***C$_{MFV}$***) necesarios para satisfacer la demanda energética:

$$C_{MFV} = \frac{(11\,Wh/día)(1.1)}{(10W)(5HSP)(0.97)(0.97)(1)(0.85)(0.90)} = 0.34MFV \approx 1MFV$$

El tamaño del banco de baterías (***T$_{BB}$***) se determina por la ecuación (3).

$$T_{BB} = \frac{(11\,Wh/día)(3día)}{(3.7V)(0.8)(1.05)} = 10.62Ah$$

Con base a los cálculos anteriores, se determinaron los siguientes elementos de SFVA:

- Un MFV con las características arriba descritas.
- Un Controlador de Carga (Módulo de Gestión de Energía Solar), marca Waveshare, modelo D, voltaje de entrada de 6 – 24 VDC, con una salida regulada de 5 VDC/3 A (ver Figura 2).
- Tres baterías de 3.7 V CD, con una capacidad de 3500 mAh y en conexión en paralelo, para tener un respaldo energético de 10.5 Ah (ver Figura 3).

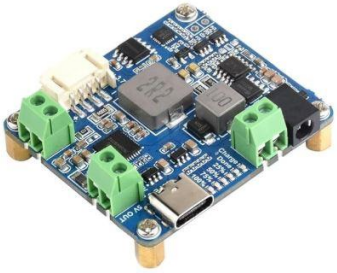




Figura 2-Controlador de carga modelo D marca Waveshare.

Figura 3-Baterias de ion-litio 18650.

En la Figura 4, se puede observar el esquema de conexión del SFVA dimensionado anteriormente:

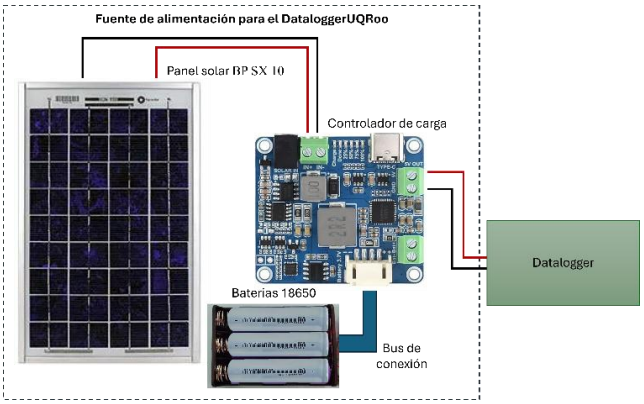


Figura 4- Esquema de conexión del sistema de alimentación.

RESULTADOS

Para evaluar el desempeño del sistema de alimentación, se realizaron mediciones de corriente y voltaje en corriente directa sobre el arreglo de tres baterías de 3.7 V, modelo 18650 y conectadas en paralelo, con el fin de analizar su comportamiento durante los procesos de carga y descarga. Este análisis permite probar el sistema dimensionado anteriormente.

La medición de corriente se efectuó mediante el sensor de efecto Hall ACS7125A (mostrado en la Figura 5), cuya salida se calcula empleando la ecuación (4).

$$I = \frac{Vsensor - 2.5}{sensibilidad} \qquad (4)$$

Donde:

$Vsensor$**:** Voltaje de salida del sensor.

$sensibilidad$**:** Para este modelo según el fabricante 185 mV/A.

El convertidor analógico-digital (ADC) ADS1115 (Figura 6) se empleó para medir la tensión de las baterías ya que la tarjeta ESP32 utilizada para registrar voltaje y corriente solo logra medir hasta un máximo de 3.3 V, mientras que las baterías de ion-litio alcanzan hasta ~4.2 V cuando están completamente cargadas, lo que impide su medición directa. El ADS1115 admite hasta 5 V de entrada y ofrece resolución de 12 bits. Su salida es un entero con signo en 16 bits, donde un bit indica el signo y los 15 restantes representan el valor (0 a 32 767). Con una referencia de ±6.144 V, el valor 32 767 equivale a 6.144 V. Así mismo, la resolución del ADS1115 se obtiene mediante la ecuación (5).

$$\boldsymbol{Resolución = \frac{6.144V}{32767} = 0.0001875V = 0.18750mV} \qquad (5)$$

Calculada la resolución del ADC el voltaje en las baterías se obtiene con la ecuación (6).

$$\boldsymbol{VoltajeBateria = \frac{(SalidaADC)(0.1875mV)}{1000}} \qquad (6)$$





Figura 5- Sensor de corriente ACS7125A

Figura 6- Convertidor A/D ADS1115.

Utilizando el convertidor A/D ADS1115 para la medición de voltaje, se llevó a cabo un experimento con el fin de analizar el comportamiento de carga y descarga de baterías de ion-litio durante un período aproximado de 12 horas. El muestreo se realizó con una frecuencia promedio de cinco minutos. El intervalo de observación comenzó el 12 de agosto a las 13:27:07 horas y finalizó el 13 de agosto a las 01:18:49 horas.

En la Figura 7 se presenta la curva de voltaje registrada, en la cual se identifica el proceso de carga de las baterías, cuyo voltaje de carga se aproxima a 4.2 V, suministrado por el módulo solar modelo SX10. El controlador de carga, modelo D de la marca Waveshare, regula la transferencia de energía desde el módulo fotovoltaico hacia las baterías y el sistema de adquisición de datos (datalogger).

El voltaje inicial registrado fue de 4.04 V, con ligeras oscilaciones entre 4.02 y 4.12 V a lo largo de la tarde. Estas variaciones corresponden a la regulación de voltaje del controlador de carga, que mantiene el nivel cercano al máximo de seguridad para baterías de ion-litio (≈4.2 V) mientras el panel solar entrega energía. El patrón de fluctuaciones es consistente con la intermitencia natural de la irradiancia solar (paso de nubes, ángulo de incidencia), especialmente con un panel de baja potencia como el de 10 W.

Entre las 18:00 y 19:00 h se observa el final del aporte de energía solar. El voltaje deja de presentar oscilaciones de carga y empieza un descenso sostenido. El último valor estable antes del descenso prolongado se sitúa alrededor de 4.00–4.01 V.

La fase de descarga comienza aproximadamente a las 19:00 hrs del día 12, a partir de este momento, las baterías alimentan exclusivamente la carga (datalogger). El voltaje disminuye de manera progresiva, con una pendiente suave y constante, pasando de 4.00 V a 3.81 V al final del registro. El valor final de 3.81 V aún está por encima del umbral de descarga profunda para celdas de ion-litio (≈3.0 V), lo que implica que las baterías no llegaron a un estado crítico durante el periodo medido.

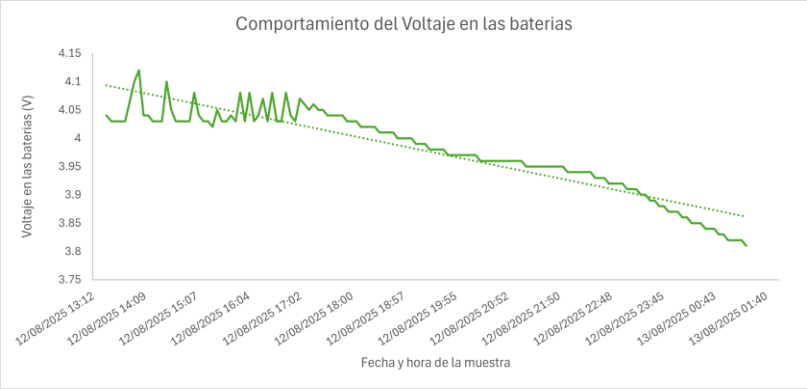


Figura 7- Comportamiento de voltaje en las baterías en un periodo de 12 Hrs.

La corriente se midió en el mismo periodo mencionado con el sensor ACS7125A, los datos obtenidos revelan que cuando la corriente es negativa el AFV está cargando las baterías (durante el día), durante la noche la corriente es positiva porque las baterías alimentan el datalogger, (ver Figura 8). Las variaciones de corriente durante el día se deben a la intermitencia natural de la irradiancia solar.

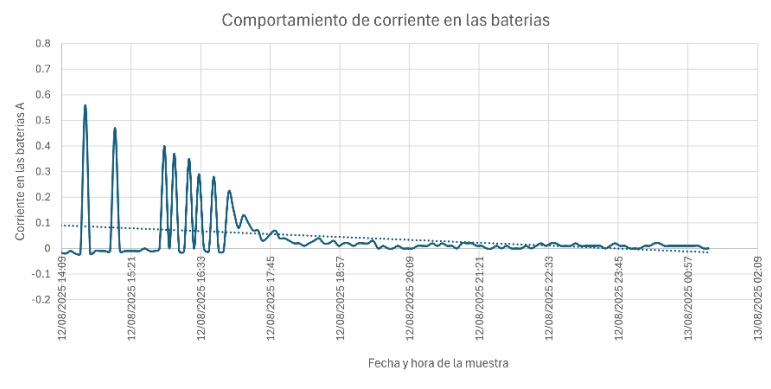


Figura 8- Comportamiento de la corriente en las baterías en un periodo de 12 Hrs.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe el procedimiento del dimensionamiento de la fuente para el sistema de adquisición de datos (datalogger) que consta de un SFVA con respaldo de baterías tipo Li-Ion, además del controlador de carga. El sistema consta de un Módulo FV de 10 W, tres Baterías de 3500 mAh a 3.7V conectadas en paralelo, y un controlador de carga con voltaje de entrada de 6 – 24 VDC, y una salida regulada de 5 VDC/3 A. Lo anterior a partir de la demanda energética de 11 Wh/día, ya que se estableció la operación del secador durante 11 horas en el día y se espera que la autonomía se mantenga durante 3 días.

Las pruebas preliminares muestran un desempeño adecuado que se ilustra en las gráficas de los resultados donde se presenta el comportamiento del voltaje y la corriente medidos en las baterías, durante el proceso de carga – descarga en el transcurso del día que hay sol y solo descarga durante la noche. La integración entre el sistema de monitoreo y el secador solar queda como trabajo futuro, así como los experimentos en condiciones reales del secado de productos, con el sistema de monitoreo. Además, no se ha comprobado si el banco de baterías en condiciones reales proporciona los tres días de autonomía.

REFERENCIAS

[1] R. J. Angulo Guerrero y W. J. González Santana, «Dimensionamiento de generación eléctrica fotovoltaica para abastecer un sistema de iluminación,» *Revista de Ingeniería y sus Alcances,* pp. 265 - 273, 2023.

[2] V. L. Alarcon Merino, *Diseño de una planta híbrida renovable con almacenamiento,* 2023.

[3] A. J. Martínez-Peralta, B. F. Chere-Quiñónez, J. L. Guzmán-López, T. J. Orobio-Arboleda y E. L. Valencia-Bautista, «Diseño de una instalación solar fotovoltaica para el suministro de energía eléctrica de una vivienda unifilar en la parroquia rural Vuelta Larga del cantón Esmeraldas,» *Dominio de las Ciencias,* vol. 8, nº 1, pp. 887 - 908, 2022.

[4] J. Alvarado Ladrón de Guevara, «DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA INSTALACIÓN DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA,» 2018.

[5] JA. Zarei, M. Liravi, M. Babaie Rabiee, M. Ghodrat, A Novel, eco-friendly combined solar cooling and heating system, powered by hybrid Photovoltaic thermal (PVT) collector for domestic application, Energy Convers. Manag., 222 (April) (2020), Article 113198, 10.1016/j.enconman.2020.113198.

[6] M. Al-Hrari, İ. Ceylan, K. Nakoa, A. Ergün, Concentrated photovoltaic and thermal system application for fresh water production, Appl. Therm. Eng., 171 (February) (2020), 10.1016/j.applthermaleng.2020.115054.

[7] A. Sharma, S. Masoumi, D. Gedefaw, S. O'Shaughnessy, D. Baran, A. Pakdel, Flexible solar and thermal energy conversion devices: organic photovoltaics (OPVs), organic thermoelectric generators (OTEGs) and hybrid PV-TEG systems, Appl. Mater. Today, 29 (August) (2022), Article 101614, 10.1016/j.apmt.2022.101614.

[8] M. Alktranee, M.A. Shehab, Z. Németh, P. Bencs, K. Hernadi, Effect of zirconium oxide nanofluid on the behaviour of photovoltaic–thermal system: an experimental study, Energy Rep., 9 (2023), pp. 1265-1277, 10.1016/j.egyr.2022.12.065.

[9] S. Al-Enezi, A. Al-Ghandoor, M. Aziz, Experimental study of a photovoltaic/thermal (PV/T) system for a greenhouse cooling application, Renew. Energy, 33 (11) (2008), pp. 2318-2326.

[10] E. Hamdan, M. Al-Hussein, Experimental study of a photovoltaic/thermal (PV/T) system applied to greenhouses, Sol. Energy, 83 (6) (2009), pp. 1071-1077.

SESIONES TÉCNICAS

Solar Térmica de Alta Temperatura/ Edificios Bioclimáticos/ Sustentabilidad energética

ID	TÍTULO	PONENTE
2226	Algoritmo de diseño de campo de mini heliostatos con distribución biomimética con óptica secundaria basado en scripts en software libre Tonatiuh	Cuitláhuac Iriarte Cornejo
2137	Estudio del impacto del cambio climático en estrategias de eficiencia energética de edificios residenciales verticales	Carlos A. Espino-Reyes
1651	Automatización del proceso de calibración óptica de heliostatos basada en el método de perfilometría por proyección de franjas	Carlos A. Sánchez-Ortega
1648	El litio: un diagnóstico general	Yolanda Mexicalxóchitl García Beltrán

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ALGORITMO DE DISEÑO DE CAMPO DE MINI HELIÓSTATOS CON DISTRIBUCIÓN BIOMIMÉTICA CON ÓPTICA SECUNDARIA BASADO EN SCRIPTS EN SOFWARE LIBRE TONATIUH

Cuitláhuac Iriarte Cornejo, Resty L. Durán Montaño, Víctor M. Maytorena Soria,
Jesús F. Hinojosa Palafox, Saúl F. Moreno Velázquez
Facultad Interdisciplinaria de Ingeniería, Universidad de Sonora (UNISON), Blvd. Rosales y Luis Encinas, Hermosillo, CP 83000, Sonora, México, 662 2592136, **cuitlahuac.iriarte@unison.mx**

RESUMEN

El presente trabajo muestra el diseño de un campo de mini helióstatos en configuración biomimética, para un receptor tubular diseñado para calentar nitrógeno hasta 850K. Se presenta el algoritmo de diseño basado en proceso iterativo mediante scripts en software libre de trazado de rayos Tonatiuth, donde se analiza un campo de 1021 helióstatos para seleccionar los helióstatos más eficientes, se logró obtener una temperatura de salida de 850K con un campo de 170 helióstatos, pero con gradientes térmicos muy elevados, por lo que opta por el diseño de una óptica secundaria a la que se redirige un 40% de la potencia recibida a la parte posterior del tubo receptor. Con esta modificación se logra que los gradientes térmicos se reduzcan de 44.17K/mm a 40.94 K/mm en la cara frontal. Se reduce el campo de helióstatos a 119 helióstatos con una eficiencia óptica de 65.25% y se aplica una óptica secundaria en posición V en cada tubo receptor, para tener total aproximado de 4.25 kW de potencia en el tubo receptor. Los resultados del diseño de esta óptica secundaria se presentan con estudio paramétrico de posición.

ABSTRACT

This work presents the design of a mini-heliostat field in a biomimetic configuration for a tubular receiver designed to heat nitrogen up to 850 K. A design algorithm based on an iterative process is presented, implemented through scripts using the open-source ray tracing software Tonatiuh. A field of 1,021 heliostats was analyzed to select the most efficient ones. A target outlet temperature of 850 K was achieved using 170 heliostats; however, this resulted in very high thermal gradients. To address this, a secondary optical system was designed to redirect 40% of the received power to the rear side of the receiver tube. With this modification, thermal gradients on the front face were reduced from 5.4 K/mm to 4.4 K/mm. The heliostat field was reduced to 119 heliostats, achieving an optical efficiency of 65.25%, and a secondary V-shaped optical system was applied to each receiver tube, resulting in a total power of approximately 4.25 kW on the receiver tube. The results of the secondary optics design are also presented, including a parametric position study.

Palabras claves: Campo de heliostatos, eficiencia óptica, trazado de rayos.

INTRODUCCIÓN

Los requerimientos energéticos de la población mundial han ido en aumento, actualmente los combustibles fósiles proveen aproximadamente 80% de esta energía (Raimi et al., 2003), que contribuye en gran medida a problemas ambientales y genera gases de efecto invernadero. Se esperaba que, con el uso de nuevas tecnologías como los semiconductores en iluminación y entretenimiento, así como la electromovilidad pudieran modificar estas tendencias a la alza, sin embargo el uso de nuevas tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA), donde entrenar un solo modelo grande de IA es equivalente a la emisión de gases de efecto invernadero de cinco vehículos en toda su vida útil y además, el manejo de los centros de IA contribuye del 2.5% al 3.7% de las emisiones de estos mismos gases (Mu et al., 2025). Uno de los esfuerzos para reducción del uso de combustibles fósiles es el uso plantas de concentración solar de potencia (CSP), una de estas tecnologías es la de Torre Central que utiliza un campo de helióstatos que redirigen la luz de sol a un punto focal llamado receptor, generando alta temperatura que puede ser utilizada para la generación de energía eléctrica, transformación y reciclamiento de materiales así como para la producción de combustibles solares renovables (Behar et al., 2013) mediante procesos termoquímicos.

Uno de estos procesos para generación de combustibles solares es el de pirólisis rápida (Mayotena et al., 2023), donde la exposición de materia orgánica a altas temperaturas (850°K) dentro de un reactor con baja oxigenación y en un tiempo muy corto de exposición, es capaz de producir Gas de síntesis, Carbón activado y Alquitrán, denominados combustibles solares renovables.

Barberena et Al. (2016) realizaron una revisión exhaustiva de los algoritmos de distribución de campos de heliostatos y concluyeron que los distintos métodos ofrecen eficiencias de campo solar comparables. Zhang et al. (2016) desarrollaron un código mejorado que integra técnicas de mapeo plano y trazado de rayos, comparando distribuciones radiales escalonadas y espirales biomiméticas. Sus resultados indicaron que la configuración en espiral superó al diseño radial en campos situados en el hemisferio norte.

La generación de modelos para predicción del desempeño campos de helióstatos, se suelen validar con software de trazado de rayos (Roger et Al., 2025) El software libre Tonatiuh con licencia publica GNU (GPL por sus siglas en inglés) (Blanco et Al. 2010), se ha utilizado para validar diferentes modelos como el radial escalonado y espiral biomimético (Mutuberria et Al., 2015).

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este estudio se diseña y analiza un campo de helióstatos que cuenta con una distribución biomimética, concentrando la energía solar en un receptor multi-tubular en configuración vertical de 2X2 metros y tubos de 2.54 mm de diámetro, cada tubo calienta en su interior gas de nitrógeno como fluido de trabajo, el nitrógeno entra por la parte superior y tiene su salida en la parte inferior de cada tubo, con las características

necesarias de temperatura y velocidad de flujo para abastecer un reactor de lecho fluidizado. La figura 1 muestra un esquema general del campo de helióstatos, el receptor multitubular y la óptica secundaria(OS).

Los requerimientos energéticos para alcanzar la temperatura y flujo másico de salida adecuados para el N_2, se presentan en el trabajo realizado por Maytorena et al. (2023), que son de 850 °K y 0.0071 kg/s respectivamente; estos requerimientos se logran con una potencia de 4.2 kW en cada tubo del receptor.

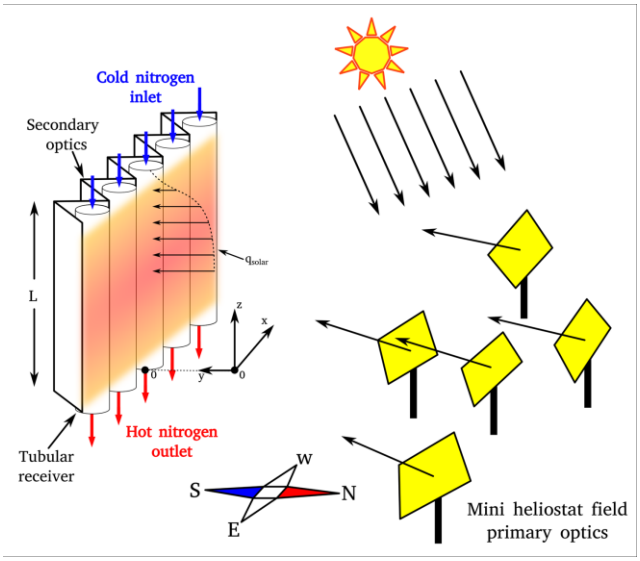


Figura 1. Esquema general del receptor con óptica secundaria (OS) y campo de helióstatos

DISEÑO DEL CAMPO HELIÓSTATOS CON DISTRIBUCIÓN BIOMIMÉTICA

Se diseña un campo de mini helióstatos con distribución biomimética, para la localidad de Hermosillo, Sonora, México (LAT: 29° 04' 52", LON: -110° 57' 47"), con dirección Norte para receptor plano, con helióstatos cuadrados planos con dimensiones de 1.43X1.43m, conforme a las ecuaciones 1 y 2.

$$\theta_j = 2\pi\varphi^{-2}j \tag{1}$$

$$r_j = aj^b \tag{2}$$

Donde (r_j, θ_j) es la coordenada polar del j-ésimo helióstato y φ es una constante equivalente a la relación áurea (Noone et Al. 2012) o relación dorada que se calcula con $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$, las constantes "a" y "b" son los factores proporcional y exponencial que nos permite controlar la densidad del campo de helióstatos, para nuestro caso son a=0.75 y b= 0.6, con lo que aseguramos que ningún helióstato colisionará con su vecino.

Se genera un campo lo suficientemente grande, para receptor plano o de cavidad se puede eliminar los helióstatos del semicírculo que no se utiliza en concentración, dependiendo de la latitud del diseño se puede restringir a un ángulo de apertura del campo y reducir aún más el campo inicial de evaluación, en nuestro caso se seleccionaron 1021 heliostatos.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE CAMPO DE HELIÓSTATOS CON TRAZADO DE RAYOS EN TONATIUH

Utilizando scripts en software libre Tonatiuh (GPL) se generan los helióstatos iniciales en las posiciones calculadas. A las superficies de reflexión solo es necesario aplicar atenuaciones que dependen de la posición del helióstato, como es el caso de la atenuación atmosférica (η_{aa}) mostrada en la ecuación 3, que depende de la distancia del punto focal de cada helióstato (d_{rec}), esta atenuación se aplica a la superficie reflectiva de cada helióstato de forma individual, que en nuestro proceso se aplicó al final de las simulaciones de evaluación.

Tabla 1

Temporada	Declinación (grados)	Día aproximado
Solsticio de Invierno	-23.5	21 de Diciembre
Equinoccio de primavera	0	21 de Marzo
Solsticio de Verano	23.5	21 de Junio
Inter Inverno y Equinoccio	-11.75	18 de Febrero
Inter Equinoccio y Verano	11.75	20 de Abril

$$\eta_{aa} = 0.99321 - 0.000117 d_{rec} + 1.97 \cdot 10^{-8} d_{rec}^2, d_{rec} \leq 1000m \quad (3)$$

$$H_n = Sun_{rise} + (Sun_{set} - Sun_{rise}) \frac{n}{N+1} \quad (4)$$
$$donde: n = 1 \ldots N$$

Mediante scripts en Tonatiuh se implementa el algoritmo de evaluación representado en el diagrama de flujo de la figura 2, inicialmente se deshabilitan todas las superficies reflectivas como primera etapa de reflexión con el fin de que TONATIUH se enfoque solo al helióstato a inspeccionar, después a todas las superficies se les aplica "reflectividad=0", para evitar reflexiones secundarias que puedan llegar al receptor, acto seguido se selecciona el enésimo(n) helióstato verificando no superar el número total de helióstatos y se habilita como área de reflexión inicial, así como "reflectividad = 1" en su espejo, todos los helióstatos de alrededor se utilizarán para sombrear y bloquear los rayos solares, se ejecutan todas las simulaciones para los días seleccionados mostrados en la tabla 1, y las horas del día obtenidas con base en la ecuación 4 con N=9, utilizando el algoritmo Solar Position Algorithm (SPA) (Reda y Andreas 2004) para los cálculos de posición solar, se realizaron 45 simulaciones con 150,000 rayos para cada helióstato, que se guardan en archivo binario para ser procesadas en el software libre Octave (GPL), a continuación se deshabilita el helióstato n seleccionado y se aplica "reflectividad = 0" al espejo, para continuar con el siguiente helióstato (n++). En total se realizaron 45,945 simulaciones, que se procesan en software Octave, y se calcula cada una de las potencias interceptadas por el receptor, se aplica la atenuación atmosférica y se obtiene un promedio de la aportación de potencia de cada helióstato.

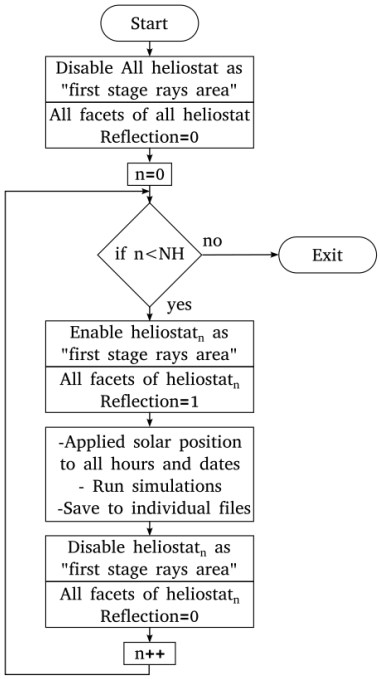


Figura 2. Diagrama de flujo de algoritmo evaluación de aportación energética individual

La figura 3, nos muestra la distribución biomimética del campo primario de helióstatos, donde el color rojo indica un helióstato una gran aportación energética anual y el azul una aportación menor en comparación con sus helióstatos vecinos, acto seguido se ordenan los helióstatos de mayor a menor aportación energética y se seleccionan los primeros helióstatos hasta alcanzar la potencia requerida de 4.2 kW para el calentamiento del Nitrógeno. Quedando un total de 170 helióstatos, con un área de espejos de 347.6m², distribuidos en una extensión de terreno total de 1001.3 m² que corresponde al polígono exterior en figura 5. Este campo desarrolla un flux máximo de 123 kW/m², con una eficiencia óptica del campo de 63.28% que se calcula mediante simulaciones con base a la ecuación 5, igualmente en la figura 5 se puede apreciar la distribución final de este campo, abarcando la totalidad de helióstatos rojos y azules.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Pr_i}{Pc}}{n} \qquad \begin{cases} \eta \rightarrow Eficiencia\ óptica \\ Pr_i \rightarrow Potencia\ Instantantanea\ Interceptada \\ Pc \rightarrow Potencia\ Captada\ por\ Campo \\ n \rightarrow Número\ de\ simulaciones \end{cases} \quad (5)$$

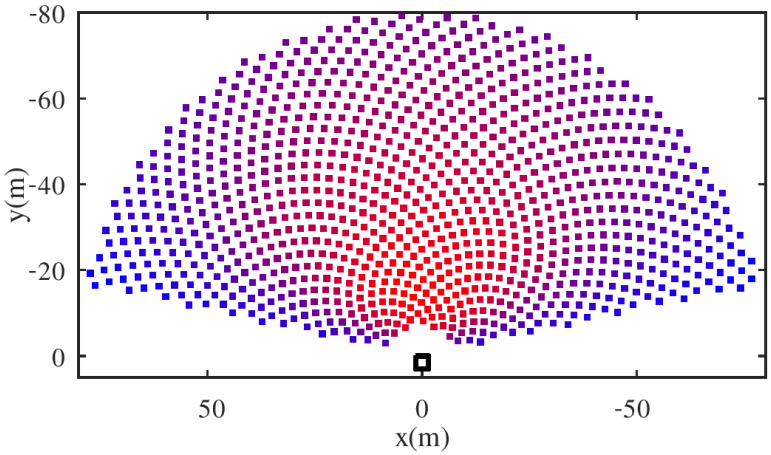


Figura 3. Campo de helióstatos con distribución biomimética primario

INCLUSIÓN DE ÓPTICA SECUNDARIA (OS)

Con el uso de dinámica de fluidos computacionales (CFD) (Fluent) se encuentra que en la pared de la parte central de los tubos de receptor(z=1m) se tienen gradientes térmicos de 44.17K/mm, y sobrepasan los límites de las especificaciones del material, por lo que se propone el uso de una óptica secundaria (OS) que distribuya el flux entre la parte frontal y la parte posterior del tubo receptor. Este trabajo se enfoca en los requerimientos ópticos del diseño dejando fuera el proceso de análisis de CFD debido a la extensión del mismo.

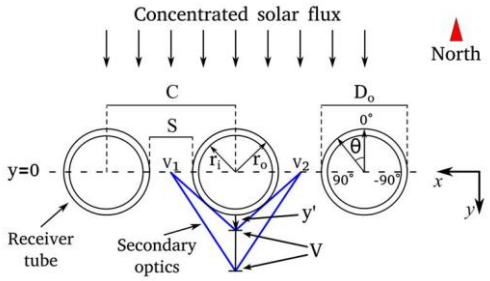


Figura 4. Propuesta de separación entre tubos y OS vista superior

Mediante CFD se comprobó que redistribuyendo un 40% del flux total hacia la parte posterior del tubo, los gradientes se reducen a valores tolerables por el material, La figura 4 muestra la disposición de los tubos con una separación (S) de 0.01138m entre tubos, con un diámetro (D) de 0.0254m, quedando una distancia (C) de 0.0368m de centro a centro, también se agrega una OS en forma "V", donde los extremos V1 y V2 se encuentran al centro de la separación en y=0, mientras que el vértice V se utiliza para hacer un estudio paramétrico, empezando en V igual al valor de y'=0.0176 mm que es donde la OS es tangencial tubo receptor. Para el receptor de 2X2m se consideraron inicialmente 76 tubos de 1 pulgada, pero con esta separación se redujo el receptor a 54 tubos idénticos.

Como los requerimientos energéticos son fijos (4.2kW) al introducir una OS se debe reducir la cantidad de flux en la parte frontal del receptor, igualmente de forma iterativa se encuentra que con 119 helióstatos se alcanzan los requerimientos energéticos en el tubo receptor. La figura 5a muestra la distribución final del campo con óptica secundaria cuadros rojos. con un área de espejos de 243.3m², distribuidos en una extensión de terreno total de 661.5 m² que corresponde al polígono interior de la figura 5a. Este campo desarrolla un flux máximo de 88.89 kW/m^2, con una eficiencia óptica del campo de 65.25% que se calcula mediante simulaciones con base a la ecuación 5.

Se realizaron simulaciones en Tonatiuh de los 119 helióstatos, con un receptor de 2x2 plano con el fin de evitar la distorsión del flux por el receptor multitubular, se incluye una reflectividad de 0.88, una desviación estándar de pendiente y especular de 2 mrad, modelo solar tipo Pillbox, pérdidas por atenuación atmosférica ecuación 3, bloqueo y sombreado, además se realizaron con DNI promedio de 897 W/m², 982 W/m² y 965 W/m² para las horas seleccionadas (Maytorena et al. 2024), en las temporadas de solsticio de verano, invierno y equinoccios respectivamente. Estas simulaciones se realizaron con 100 millones de rayos. La figura 5b muestra la distribución del flux en el receptor, las columnas de gráficos representan de izquierda a derecha el solsticio de invierno, equinoccios y solsticio de verano. Se puede apreciar que el

flux se mantiene muy uniforme durante las horas de operación de 9 a 15 horas durante los equinoccios y verano, y de 10 a 14 en el solsticio de invierno, el flux máximo de 88.89 kW/m² se alcanza al medio día solar del solsticio de invierno.

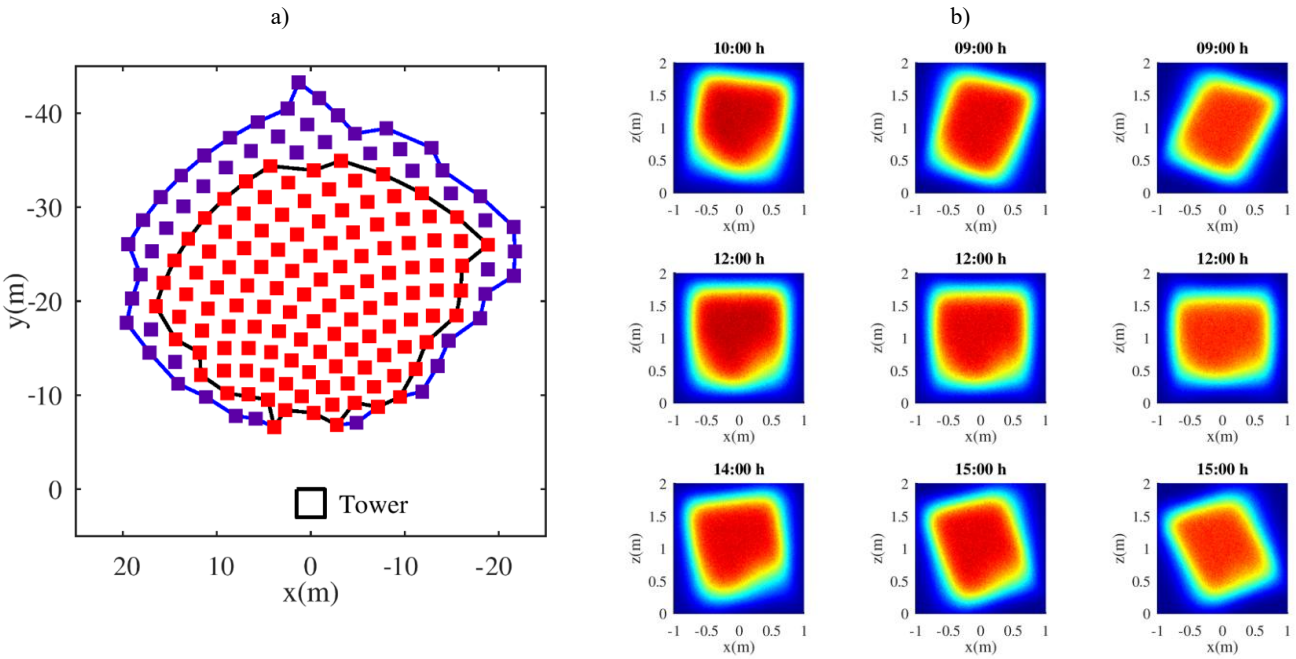


Figura 5 a) Resultado de los campos de helióstatos sin OS y con OS, b) Distribución de flux en receptor 2X2m plano, 119 Heliostatos

.

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE ÓPTICA SECUNDARIA

Se realiza un estudio modificando la distancia del vértice "V" (Figura 4), empezando en y'=0.0176 mm, esta primera simulación se etiqueta V=0 y se avanza cada 2 mm hasta llegar a las 20 mm en dirección del eje y. Estas simulaciones tienen los mismos parámetros anteriores, solo que se utilizaron 1,000 millones de rayos en cada simulación.

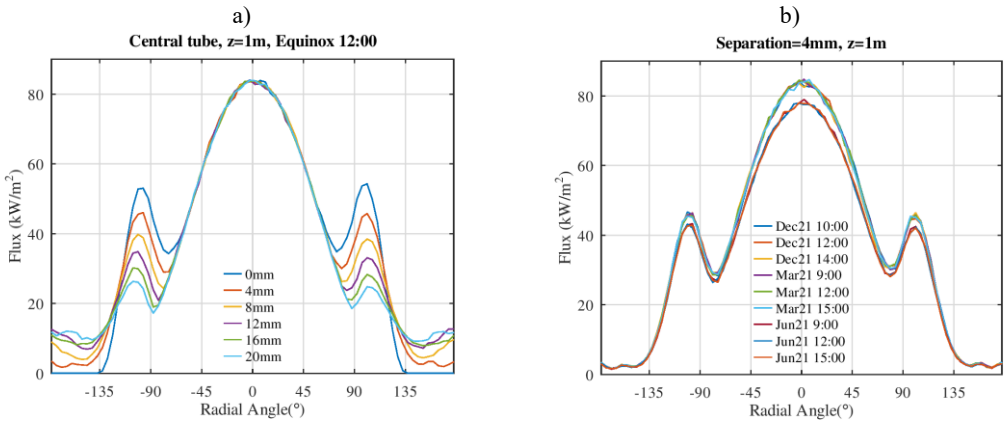


Figura 6. Perfil de flux radial en tubo central con óptica secundaria a) estudio paramétrico, b) variación anual

La figura 6a muestran los perfiles transversales en el tubo central a una altura de z=1m, donde 0 grados es la parte frontal del tubo ± 180 grados es la parte posterior del tubo. Se puede apreciar como el flux se va distribuyendo de la zona frontal (desde -90 hasta 90) hacia la zona posterior (menor a -90 y mayor a +90) conforme se modifica el vértice V. A la distancia de 20mm se puede apreciar como el flux frontal incidente entre los tubos ya no aporta flux a zona posterior de tubo receptor, es decir a 20mm toda la radiación entre los tubos del receptor (40% en nuestro caso) ya se encuentra en la parte posterior del tubo.

En la figura 6b se muestra que existe muy poca variación en el flux incidente en la periferia del tubo, se muestra el perfil radial para diferentes horas del día y diferentes épocas del año, lo que nos garantiza la operación continua del sistema dentro del rango de horas simuladas y prácticamente para cualquier temporada del año.

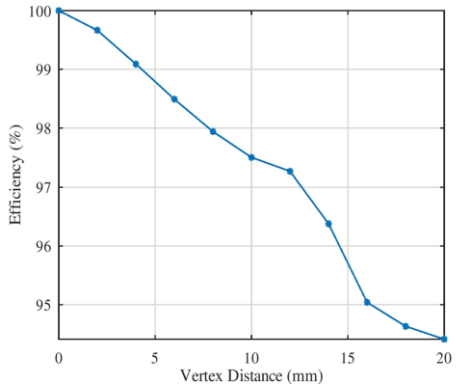


Figura 7. Eficiencia de potencia en el tubo receptor con óptica secundaria

En la figura 7 se muestra la eficiencia óptica de la OS, se puede apreciar como al incrementar la posición del vértice V se tiene una pérdida de potencia en el tubo receptor, esto se debe a las reflexiones internas de la OS ya que en cada reflexión se pierde un 12% de energía (reflectividad 0.88). Se puede apreciar que entre 12 y 16 mm se tiene un mayor cambio de pendiente, esto se debe a que una mayor cantidad de flux no alcanza a impactar al receptor y escapa del mismo. En V=0 se toma como referencia (eficiencia de 100%), ya que todo el flux impacta en el tubo receptor, tanto el flux frontal como el reflejado en la OS con 1 sola reflexión.
Un estudio paramétrico posterior de CFD, demuestra que a partir de V=4 mm, se reduce el gradiente máximo a 41.2 K/mm y es posible operar el sistema. Y el caso óptimo en disminución de gradiente se encuentra en V= 12 mm con 40.94 K/mm.

CONCLUSIONES

El uso de scripts en Tonatiuh demuestra ser una herramienta poderosa para el análisis de campos de helióstatos, con esta información se obtiene el diseño de un campo óptimo, con la seguridad de tener datos confiables debido a la validación del uso de trazado de rayos como herramienta de validación. En este caso se utilizó para un campo con distribución biomimética, pero esta metodología puede ser utilizada para cualquier distribución de campo o diseño de helióstato.

En el diseño de campos solares, es fundamental considerar los requerimientos energéticos del proceso térmico que tendrá lugar en el receptor, ya que esta información constituye el principal parámetro de entrada para el diseño. Esto evidencia que, como paso previo indispensable, debe realizarse un estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD) del proceso, a fin de garantizar una integración eficiente entre el campo de helióstatos y el receptor.

REFERENCIAS

Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K., 2013. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. Renewable and sustainable energy reviews 23, 12–39.
Blanco, M. J., Mutuberria, A., & Martinez, D. (2010). Experimental validation of Tonatiuh using the Plataforma Solar de Almería secondary concentrator test campaign data. In 16th annual SolarPACES symposium.
Maytorena, V.M., Hinojosa, J.F., Iriarte-Cornejo, C., Orozco, D.A., 2023. Biomass solar fast pyrolysis with a biomimetic mini heliostat field and thermal receiver for nitrogen heating. Energy Convers Manag 291, 117307. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117307
Mu, H., Lu, Y., Lepre, C., Lightfoot, C., Smiley, C., & Crenshaw, R. (2025). *Artificial Intelligence and its Carbon Footprint*. 31–35. Scopus. https://doi.org/10.1109/SIEDS65500.2025.11021149
Mutuberria, A., Pascual, J., Guisado, M. V, Mallor, F., 2015. Comparison of heliostat field layout design methodologies and impact on power plant efficiency. Energy Procedia 69, 1360–1370.
Noone, C.J., Torrilhon, M., Mitsos, A., 2012. Heliostat field optimization: A new computationally efficient model and biomimetic layout. Solar Energy 86, 792–803.
Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R.G., Prest, B.C., Bergman, A., 2023. Global energy outlook 2023: sowing the seeds of an energy transition. Resources for the future 1, 1–44.
Reda, I., Andreas, A., 2004. Solar position algorithm for solar radiation applications. Solar energy 76, 577–589.
Röger, M., Schlichting, T., Herrmann, J., Happich, C., Nieffer, D., Weinrebe, G., Hilger, P., Macke, A., Blume, K., & Gross, F. (2025). Developments towards the heliostat field performance testing guideline. *Solar Energy*, *298*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113730
Zhang, M., Yang, L., Xu, C., Du, X., 2016. An efficient code to optimize the heliostat field and comparisons between the biomimetic spiral and staggered layout. Renew Energy 87, 720–730. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.015

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESTRATEGIAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS RESIDENCIALES VERTICALES

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
SECIHTI, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Calle CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, Durango 34147, México, **norma.rodriguez@cimav.edu.mx**.

RESUMEN
Los edificios generan un 34% de las emisiones de CO_2 relacionadas con el uso de energía, por lo que representan un sector indispensable para implementar estrategias de eficiencia energética con el fin de reducir su consumo de energía. Al seleccionar estrategias, es usual considerar las condiciones climáticas actuales que posee el sitio; sin embargo, estas características son propensas a cambiar en el futuro cercano debido a los efectos del cambio climático. En el presente estudio se analizó el desempeño energético de un edificio residencial vertical (multifamiliar) en la ciudad de Durango; se utilizó un modelo de clima contemporáneo y los escenarios de cambio climático a través de las Trayectorias de Concentración Representativas RCP 4.5 y RCP 8.5. De igual forma, para evaluar el posible impacto de este fenómeno en las estrategias de eficiencia energética, se evaluó la implementación en el edificio de dos estrategias de ahorro de energía (aislamiento térmico y sombreado de ventanas) bajo condiciones climáticas contemporáneas y se estudió el cambio al considerar los escenarios futuros. Se determinó que, en el clima templado de Durango, el edificio base bajo escenarios de cambio climático presenta consumos hasta 26% más bajos que en el clima contemporáneo debido a la disminución de energía para calefacción. Así mismo se determinó la importancia de considerar el efecto del cambio climático en la aplicación de este tipo de estrategias, en este caso el aislamiento térmico permite obtener ahorros significativos de energía para acondicionamiento de aire en el clima contemporáneo (36%), pero al cambiar el clima genera un aumento de en el consumo de energía para enfriamiento del 313% (RCP 4.5).

ABSTRACT
Buildings generate 34% of energy-related CO_2 emissions worldwide, making them a crucial sector for the implementation of energy efficiency strategies aimed at reducing energy consumption. When designing such strategies, the current climatic conditions of the site are usually considered; however, these conditions are likely to change in the future due to the effects of climate change. This study analyses the energy performance of a vertical residential building in the city of Durango, Mexico. A contemporary climate model and future climate change scenarios were used based on Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 and RCP 8.5. In order to assess the potential impact of climate change on energy efficiency strategies, the implementation of two energy-saving strategies in the building (thermal insulation and window shading) was evaluated under contemporary climatic conditions, and the change in performance was analyzed under future scenarios. It was found that, due to Durango's temperate climate, the base building under future climate change scenarios presents consumption up to 26% lower than under the contemporary climate due to the reduction in energy for heating. The study shows that it is important to consider the effect of climate change on the application of energy efficiency strategies. In this case in particular, thermal insulation generates energy savings under the contemporary climate (36%). However, with climate change, although overall consumption remains lower than the initial value, there is an increase in the energy consumption for cooling of 313% (RCP 4.5), which must be taken into consideration.

Palabras claves: simulación dinámica, vivienda multifamiliar, resiliencia, modelado energético, modelado energético.

INTRODUCCIÓN
El sector de los edificios es uno de los más importantes al considerar estrategias de mitigación del cambio climático, ya que este sector representa un 34% de las emisiones de CO_2 relacionadas con el uso de energía. Como consecuencia, muchos edificios han sido sujetos a una serie de acciones que tienen como objetivo la descarbonización del sector. Una prueba de ello es el crecimiento del mercado de las certificaciones verdes, el cual en el año 2023 alcanzó un 20% para edificios comerciales nuevos en los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. A pesar de los esfuerzos, los resultados de estas medidas en una escala global siguen sin cumplir con las metas establecidas en el Acuerdo de París, ya que al evaluar las emisiones de CO_2 del sector desde el año 2015 se observa un aumento del 5.4%, contrario a la reducción del 2.5% que se buscaba. Ante esta situación se reconoce la necesidad de fortalecer los estándares de construcción locales y regionales, así como los requerimientos de desempeño energético (UN Environment Programme & Global Alliance for Buildings and Construction, 2025).

Dentro del sector de los edificios, los edificios residenciales representan la mayor parte de las emisiones de CO2, con un porcentaje del 15% de las emisiones mundiales (contabilizando emisiones directas e indirectas) contra un 10% de los edificios no residenciales en el año 2023. En México, hasta 2024 se contaba con 3,009,435 viviendas registradas en el Registro Único de Vivienda, de las cuales solo un 27% corresponde a viviendas de tipo vertical (Registro Único de Vivienda, 2025); sin embargo, el interés en la construcción de este tipo de viviendas ha aumentado en años recientes debido a los beneficios potenciales que pueden aportar a las problemáticas presentes en zonas urbanas. Uno de estos problemas es el crecimiento descontrolado de las ciudades, el cual llevó a muchas ciudades en países en desarrollo a

aumentar su superficie urbana 3.5 veces entre los años 1990 y 2015, mientras que su población solamente se duplicó durante el mismo periodo de tiempo. Ante esta problemática y alineado con las metas del objetivo 11 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible, la Nueva Agenda Urbana de la ONU reconoce el beneficio del desarrollo urbano compacto, de alta densidad y bien planificado. (United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2020)). En México también se ha reconocido la ventaja de las ciudades compactas, por lo que, como parte de las metas nacionales referentes al ODS 11 se estableció que para el año 2030 por lo menos dos tercios de las viviendas nuevas construidas en zonas urbanas sigan criterios de desarrollo vertical (Laboratorio Nacional de Políticas Públicas et al., 2020).

El desarrollo de vivienda sostenible implica, entre otras cosas, la implementación de estrategias de eficiencia energética; sin embargo, normalmente estos sistemas son diseñados considerando solamente condiciones climáticas contemporáneas estimadas a partir de datos históricos, sin tomar en cuenta posibles cambios futuros en el clima. Estos cambios pueden llegar a ser considerables, un ejemplo es el descrito por Dartevelle et al. en un estudio en el cual simularon el confort térmico de una vivienda de consumo de energía casi nulo (nZEB) en Bélgica; región donde actualmente los esfuerzos se enfocan en reducir el consumo de energía de calefacción durante el invierno. Sin embargo, al estudiar el comportamiento del edificio con modelos climáticos futuros se determinó que con el diseño actual del edificio sería necesario, en el futuro, aplicar medidas adicionales para evitar el uso de aire acondicionado para enfriamiento de espacios (Dartevelle et al., 2022). Considerando esto, el presente plantea la siguiente pregunta de investigación: "¿es posible que las estrategias actuales de eficiencia energética resulten perjudiciales para el consumo de energía del edificio al cambiar el clima en el futuro?".

METODOLOGÍA

Con el objetivo de evaluar el cambio en el desempeño de estrategias pasivas de ahorro de energía, aplicadas a edificios residenciales, al considerar escenarios de cambio climático se decidió evaluar mediante simulación dinámica el consumo de energía para acondicionamiento de aire de un edificio de referencia y posteriormente comparar la diferencia en el consumo al considerar: a) estrategias pasivas de ahorro de energía y b) condiciones climáticas futuras. Para este estudio, el sitio y las condiciones climáticas de interés son los de la ciudad de Durango, Durango; las cuales corresponden a las de un clima BSk (semiárido frío) según la clasificación Köppen-Geiger.

Edificio de referencia

Para este estudio se utilizó como edificio de referencia un edificio vertical residencial multifamiliar. El edificio en cuestión corresponde a un edificio hipotético de 16 viviendas, en el cual la planta baja corresponde a usos comerciales y posteriormente cuenta con cuatro niveles de cuatro viviendas en cada uno de ellos. De las cuatro viviendas de cada nivel, dos de ellas cuentan con dos dormitorios y las otras dos cuentan con tres dormitorios. Cada vivienda del edificio tiene una superficie total de 80.82 m^2 (13.25 m x 6.10 m) y una altura de 2.7 m. La diferencia principal entre las viviendas de dos y tres dormitorios es la reducción del tamaño de la cocina-comedor en la vivienda de tres dormitorios para dar lugar al dormitorio adicional.

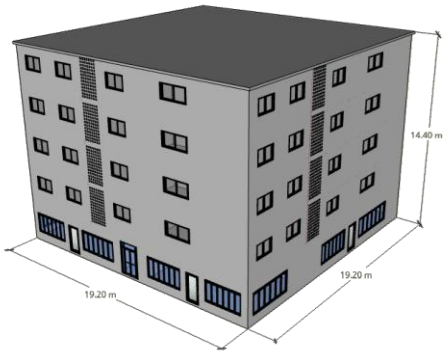


Figura 1. Edificio de referencia

Los muros del edificio se componen de bloques de concreto sin aislamiento térmico. El techo y los entrepisos se componen de un sistema de vigueta y bovedilla. El edificio cuenta con ventanas de cristal sencillo de 5 mm y utiliza pintura blanca tanto en muros internos como externos. Se considera que el edificio cuenta con un sistema de tipo minisplit el cual se activa cuando la temperatura interior se encuentra fuera del rango de confort térmico (21.7°C – 28.3°C) y cuando se considera que hay personas dentro de las viviendas con base en un perfil de ocupación (tabla 1). Aun cuando los datos de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) muestran que en el estado de Durango el 91%, 89% y 56% de las viviendas no cuentan con calefacción, sistema de aire acondicionado o ventilador, respectivamente (INEGI et al., 2018).

Tabla 1. Perfil de ocupación del edificio

Días / horario	00:00 - 06:00	07:00	08:00 - 15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
L-V	x x ... x x	x	...		x	x x	x x	x x	x x	x x	x x
S-D	x x ... x x	x x	x x ... x x				x x	x x	x x	x x	x x

Leyenda: x Climatización necesaria; Horas de sueño; Actividades domésticas; Actividades laborales; Actividades no domésticas

Estrategias de eficiencia energética

Para cumplir con el objetivo planteado, se seleccionaron dos estrategias pasivas: 1) aislamiento térmico en los muros que componen la envolvente del edificio; 2) estructura de sombreado sobre las ventanas del edificio. Ambas estrategias fueron agregadas al edificio de referencia en TRNSYS y su efecto se estudió al ser aplicadas tanto de forma individual como en conjunto.

Para el aislamiento térmico se seleccionaron placas de poliestireno extruido, con una conductividad térmica de 0.0259W/mK y un grosor de una pulgada. Este aislamiento solo se consideró en los muros de las viviendas que coinciden con la envolvente del edificio y no en los muros que dividen las habitaciones dentro de las viviendas y del edificio, esto al considerar de interés principal el efecto entre el aire exterior y el aire en el interior de las viviendas.

Respecto a los elementos de sombreado, estos corresponden a estructuras de concreto perpendiculares a las ventanas y colocadas por encima de las mismas; una única estructura cubre todas las ventanas de la misma orientación y nivel contando con una saliente de 60 cm. El objetivo de esta estructura es bloquear la radiación solar disminuyendo las ganancias de calor (Architecture 2030, 2023).

Escenarios climáticos

En este estudio se decidió estudiar tres escenarios climáticos: 1) condiciones climáticas contemporáneas (obtenidas mediante datos históricos), 2) condiciones climáticas considerando una trayectoria de concentración representativa (RCP) 4.5 al año 2050 y 3) condiciones climáticas considerando una RCP 8.5 al año 2050. Estas trayectorias fueron seleccionadas al considerarse representativas de un escenario moderado y un escenario pesimista de cambio climático, condiciones en las cuales se puede considerar de mayor interés comprender y adaptarse a los cambios drásticos del clima. Además, estas dos concentraciones son las más utilizadas en estudios que utilizan este tipo de modelos futuros (Duan et al., 2025).

Para la obtención de los datos meteorológicos se utilizó el programa Meteonorm 8®, seleccionando la ciudad de Durango (24.0° N, -104.7° E, 1,890 m) como sitio de interés y exportando los datos en formato TMY2 para su posterior incorporación en el programa TRNSYS 18®. En la figura 2 se muestra la temperatura ambiente de los tres escenarios climáticos considerados. La temperatura promedio de la ciudad de Durango bajo las condiciones contemporáneas es de 18.5°C, mientras que en 2050 con un RCP de 4.5 es de 20.3°C y con un RCP de 8.5 es de 20.5°C.

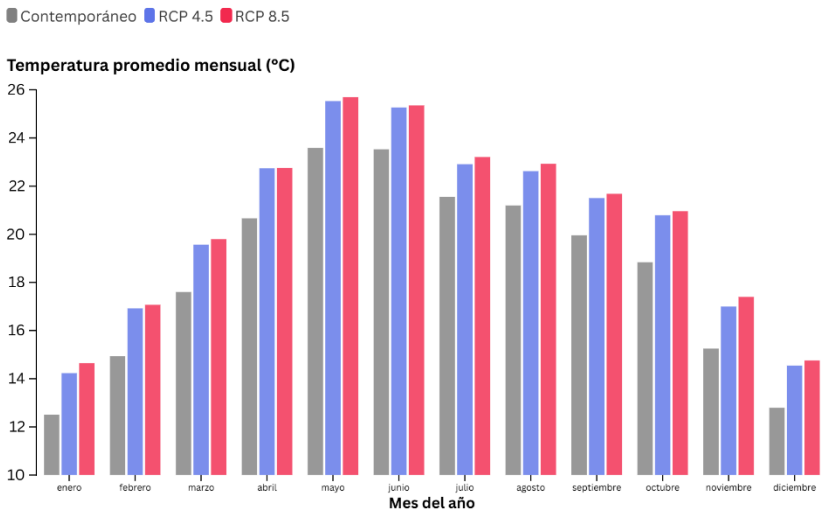


Figura 2. Temperatura promedio mensual para los diferentes escenarios climáticos

Simulación

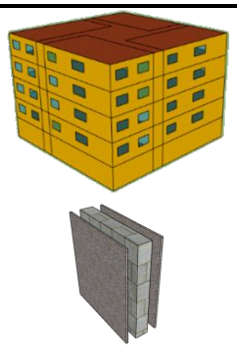
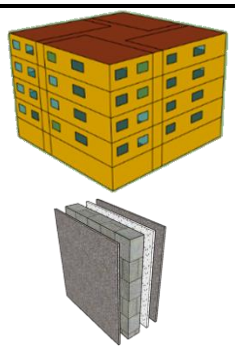
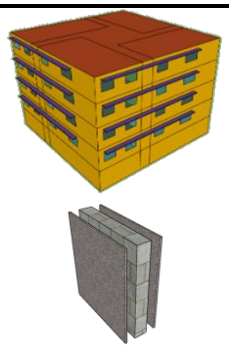
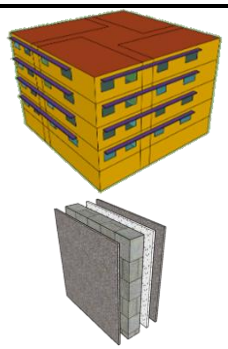
El edificio de referencia y sus tres variantes (con aislamiento térmico, con sombreado y con ambas estrategias) fueron modelados para su implementación y simulación en TRNSYS 18. En primer lugar, el edificio se modeló en Sketchup 8® utilizando la extensión de TRNSYS 18 ® para la definición de zonas térmicas. Cada edificio cuenta con 25 zonas térmicas, 16 de las cuales corresponden a cada una de las viviendas, cuatro más corresponden los accesos centrales para cada nivel de vivienda y las cinco zonas restantes corresponden la planta baja comercial; en esta etapa fueron incorporados los elementos de sombreados de la estrategia de eficiencia energética utilizando los elementos de sombreado de la extensión de TRNSYS 18®.

Posteriormente, utilizando el complemento TRNBuild se definen las características termo físicas y ópticas de los elementos constructivos de los edificios (sin y con sombreado). Las características de estos elementos se muestran a mayor detalle en la Tabla 2. Es en esta etapa donde se incorpora la estrategia correspondiente al aislamiento térmico.

Tabla 2. Propiedades de los materiales de los muros de la envolvente

Material	Conductividad k (W / m K)	Densidad ρ (kg / m^3)	Calor específico Cp (J / kg K)	Absortividad α	Emisividad ε	Referencias
Pintura blanca (exterior)	0.127	1270	1000	0.26	0.9	(González et al., 2017; Yunus A. Cengel, 2015)
Mortero	0.700	1600	850	-	-	(Rodriguez-Muñoz, 2020)
Poliestireno expandido	0.035	25	1400	-	-	(Integrated Environmental Solutions Limited, 2014)
Bloque de concreto	0.877	1400	1000	-	-	(Integrated Environmental Solutions Limited, 2014; Pérez et al., 2011)
Yeso	0.420	1200	837	-	-	(Integrated Environmental Solutions Limited, 2014)
Pintura blanca (interior)	0.127	1270	1000	0.26	0.9	(González et al., 2017; Yunus A. Cengel, 2015)

Tabla 3. Edificios analizados

Edificio base	Edificio con aislamiento	Edificio con sombreado	Edificio con sombreado y aislamiento
			

RESULTADOS

Al observar el consumo de energía en el escenario contemporáneo, es posible observar que en el escenario base el consumo de energía para acondicionamiento está compuesto mayormente por calefacción (93.6%). Bajo estas condiciones climáticas, la estrategia de eficiencia energética que presenta el mayor ahorro de energía es la aplicación de aislamiento térmico, con una reducción total del 36.5%. Esta reducción se obtiene al disminuir el consumo de calefacción de 17,072 kWh/año a 9,416 kWh/año (-44.8%), aun cuando la aplicación de esta estrategia implica un aumento en el consumo por enfriamiento, pasando de 1,169 kWh/año a 2,174 kWh/año (+86%). Por el contrario, la aplicación del sombreado genera un aumento general del consumo de energía del edificio del 5.55%, al aumentar el consumo de calefacción de 17,072 kWh/año a 18,354 kWh/año (+7.5%), aun cuando el consumo de enfriamiento se reduce de 1,169 kWh/año a 900 kWh/año (-23%).

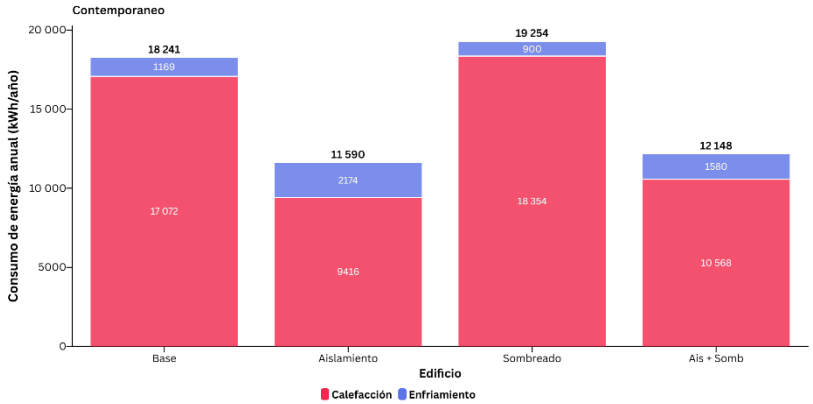


Figura 3. Consumo de energía bajo condiciones climáticas contemporáneas (figura elaborada en flourish: https://flourish.studio/)

En el edificio base bajo la RCP 4.5 se puede observar una reducción significativa del consumo general de energía, al pasar de 18,241 kWh/año a 13,899 kWh/año (-23.8%) en comparación con el clima contemporáneo. Esta reducción es causada por la disminución del

consumo de calefacción del 36.31% entre ambos escenarios, aun cuando el enfriamiento presentó un aumento del 158.53%. Bajo estas condiciones, la aplicación de aislamiento térmico sigue generando una reducción del consumo de energía con respecto al edificio base, sin embargo, en esta proyección la reducción es de solo el 23.7%. Con esta estrategia, el consumo de calefacción se reduce de 10,872 kWh/año a 5,777 kWh/año (-46.9%) y el de enfriamiento aumenta de 3,072 kWh/año a 4,830 kWh/año (+57.2%).

En la misma RCP 4.5 se puede observar que al aplicar los elementos de sombreado se presenta un aumento en el consumo general de energía incrementando de 13,899 kWh/año a 14,152 kWh/año (+1.82) en comparación con el edificio base, al aumentar el consumo de calefacción de 10,872 kWh/año a 11,715 kWh año (7.7%), mientras que el enfriamiento disminuyó de 3,027 kWh/año a 2,437 kWh/año (-19.5%). Finalmente, resaltar que bajo estas condiciones la combinación de ambas estrategias produce el menor consumo de energía para el acondicionamiento de 10.262 kWh/año.

En los escenarios bajo la RCP 8.5 al año 2050 se puede observar un comportamiento similar a los de la trayectoria anterior, donde la diferencia es propia de un clima más cálido. Así entonces, el edificio base tiene un consumo 3.5% menor que el edificio base de la RCP 4.5, esto debido a la disminución de energía para calefacción (-6.4%) pese al aumento en el consumo para enfriamiento (+7%).

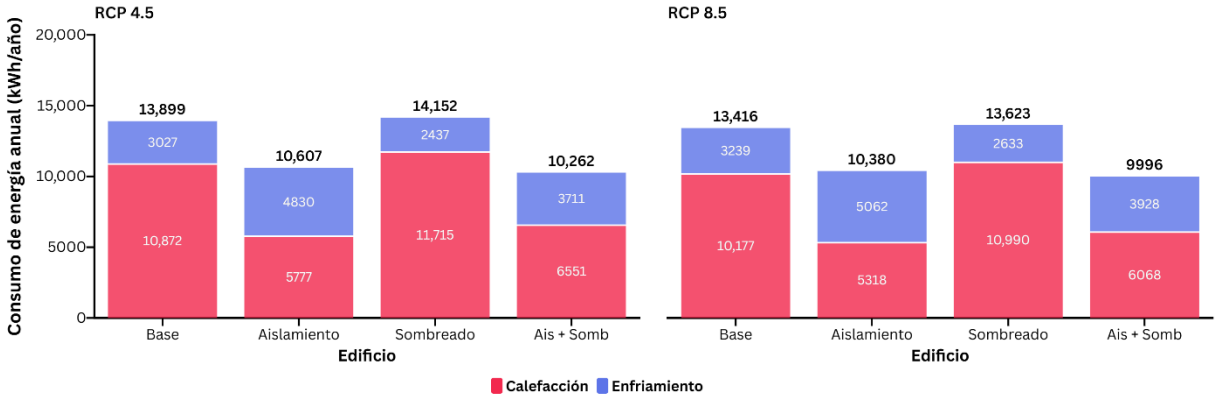


Figura 4. Consumo de energía bajo RCP 4.5 y 8.5 (figura elaborada en flourish: https://flourish.studio/)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Al observar el comportamiento del edificio bajo condiciones climáticas contemporáneas y compararlas con condiciones RCP 4.5 y RCP 8.5 al año 2050, se puede observar una disminución en el consumo de energía por acondicionamiento de aire. Esto se debe principalmente a que la ciudad de Durango se caracteriza por poseer un clima templado con temperaturas bajas durante una parte considerable del año, por lo que al aumentar la temperatura ambiente disminuye considerablemente la demanda de energía para calefacción. De manera general, el edificio base bajo las RCP 4.5 y 8.5 presentó una disminución con respecto al clima contemporáneo del 23.8% y 26.4% respectivamente. De manera individual, la calefacción disminuyó un 36.3% (RCP4.5) y 40.4% (RCP8.5), mientras que el consumo de energía para enfriamiento se incrementó un 158.9% (RCP4.5) y 177% (RCP8.5).

La aplicación de aislamiento térmico en la envolvente del edificio produce el mayor ahorro de energía en el clima contemporáneo, con una reducción del 36.5%, debido a la reducción del consumo para calefacción, aun cuando su aplicación eleva el consumo para enfriamiento. Bajo la RCP 4.5 la aplicación del aislamiento sigue teniendo una reducción significativa del consumo general de energía del 23.7% y del 22.6% para la RCP 8.5, pese a los cambios producidos en la temperatura ambiente y la proporción calefacción-enfriamiento. En ambas RCP, el edificio que genera el menor consumo de energía es el que incorpora tanto el aislamiento de la envolvente como los elementos de sombreado, ya que al incrementarse el consumo de energía para enfriamiento resulta benéfica la reducción de las ganancias térmicas a través de las ventanas.

Respecto a estas estrategias de eficiencia energética la pregunta de investigación plantea la posibilidad de que implementarlas pueda ser perjudiciales para el edificio en el futuro al cambiar el clima, sin embargo, al considerar el consumo de energía tanto para calefacción como para enfriamiento lo que se observa es una reducción en el consumo de energía provocado por el aumento de la temperatura ambiental.

La estrategia del aislamiento tiene, en el clima contemporáneo, una eficacia para reducir la calefacción del 44.8%, mientras que en el clima con RCP 4.5 tiene una eficacia de 46.9%, en ambos casos considerando que la aplicación de la estrategia es bajo las mismas condiciones climáticas que el edificio base. Si se considera el consumo inicial como el del edificio base en condiciones contemporáneas, y se considera que se implementa el aislamiento, pero el clima cambia en el futuro y se toma como el consumo final el del edificio con aislamiento bajo RCP 4.5, entonces se tendría una eficacia del 66.2%. Sin embargo, de manera contraria, al hacer este análisis para el consumo de enfriamiento se puede observar que es perjudicial al aumentarlo en un 86% para el clima contemporáneo y en un 59.6% para el RCP 4.5; mientras que al considerar su aplicación pasando del clima contemporáneo al RCP 4.5 se observa un aumento del 313%.

Si bien el consumo de energía para acondicionamiento de aire del edificio disminuye en la simulación bajo las RCP abordadas en este estudio, es necesario considerar que el edificio presenta un control de temperatura ideal que se rige por el rango de confort y el perfil de ocupación; sin embargo, en la práctica diversos factores, como la pobreza energética o costumbres locales, pueden ocasionar que una

vivienda no haga uso de calefacción y o enfriamiento.

En el caso del estado de Durango datos de la ENCEVI muestran que la mayoría de los hogares actualmente no cuentan con sistemas de calefacción, siendo mayor el porcentaje de hogares que cuentan con aire acondicionado y ventiladores, por lo que en la práctica dichas viviendas pueden ser más sensibles al aumento de requerimiento de enfriamiento que a la disminución de calefacción. Los posibles cambios en el comportamiento de las estrategias de eficiencia energética pueden crear la necesidad de planificar la incorporación de estrategias complementarias en el futuro, como ocurre en los edificios del presente estudio. Si bien es importante resaltar que las RCP no corresponden a una predicción certera del clima, dada la gran cantidad de factores que intervienen, otorgan una visión de un posible panorama futuro, que si bien debe tomarse con prudencia puede brindar información importante sobre el comportamiento de los edificios ante estos posibles cambios. También resalta la importancia de considerar la importancia no solo de los aspectos técnicos, sino también del contexto social y económico al tratar de estimar el consumo de energía en las viviendas del futuro ante el cambio climático.

REFERENCIAS

Architecture 2030. (2023, May 30). 2030 Palette - Building. http://www.2030palette.org/building/

Dartevelle, O., Altomonte, S., Masy, G., Mlecnik, E., & van Moeseke, G. (2022). Indoor Summer Thermal Comfort in a Changing Climate: The Case of a Nearly Zero Energy House in Wallonia (Belgium). Energies, 15(7), 2410. https://doi.org/10.3390/en15072410

Duan, Z., de Wilde, P., Attia, S., & Zuo, J. (2025). Challenges in predicting the impact of climate change on thermal building performance through simulation: A systematic review. Applied Energy, 382, 125331. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125331

UN Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction. (2025). Not just another brick in the wall: The solutions exist - Scaling them will build on progress and cut emissions fast. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/47214

González, M. H., Rodríguez-Muñoz, N. A., Romero-Pérez, C. K., Escobedo-Bretado, J. A., Martín-Domínguez, I. R., & Nájera-Trejo, M. (2017). Comparación de datos climáticos utilizados en simulaciones dinámicas de sistemas termicos en cuatro ciudades de Durango, México. Publicaciones de La Semana Nacional de Energía Solar, 3(3), 156–162. http://www.anes.org/cms/memorias.php

INEGI, CONUEE, & SENER. (2018). Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI) 2018. In Subsistema de Información Demográfica y Social. https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/#documentacion

Integrated Environmental Solutions Limited. (2014). Apache-Tables: User Guide. https://www.iesve.com/downloads/help/Thermal/ApacheTables.pdf

Laboratorio Nacional de Políticas Públicas, Citibanamex, Centro de Investigación y Docencia Económicas, Centro Mario Molina, & Instituto Mexicano para la Competitividad. (2020). Índice de Ciudades Sostenibles - resultados. Índice de Ciudades Sostenibles - Resultados. https://ics.lnpp.mx/#resultados

Pérez, J. B., Cabanillas, R. E., Hinojosa, J. F., & Borbón, A. C. (2011). Estudio Numérico de la Resistencia Térmica en Muros de Bloques de Concreto Hueco con Aislamiento Térmico. Informacion Tecnologica, 22(3), 27–38. https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000300005

Registro Único de Vivienda. (2025, January). Información estratégica/ cifras básicas RUV. http://portal.ruv.org.mx/index.php/cifras-basicas-ruv/

Rodriguez-Muñoz, N. A. (2020). Evaluation of the thermal performance of construction systems to reduce the energy consumption in buildings: A case study in a cold semi-arid climate. Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal, 30. https://doi.org/https://doi.org/10.15174/au.2020.2941

United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). (2020). World cities report 2020 the value of sustainable urbanization. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf

Yunus A. Cengel, A. J. G. (2015). Heat and mass transfer fundamentals & applications (Fifth). McGraw-Hill.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN ÓPTICA DE HELIOSTATOS BASADA EN EL MÉTODO DE PERFILOMETRÍA POR PROYECCIÓN DE FRANJAS

Carlos A. Sánchez-Ortega, Guillermo Cuamea-Cruz, Cuitláhuac Iriarte-Cornejo, Rodolfo Peón-Anaya
Facultad Interdisciplinaria de Ingeniería, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México. **a214204203@unison.mx, guillermo.cuamea@unison.mx, cuitlahuac.iriarte@unison.mx, rodolfo.peonanaya@unison.mx.**

Claudio A. Estrada Gasca
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, C.P. 62580, México. **cestrada@ier.unam.mx**

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema automatizado para la caracterización óptica de heliostatos operativos en la Plataforma Solar de Hermosillo. Su implementación busca reducir significativamente el tiempo y recursos requeridos durante el proceso de evaluación y calibración de superficies reflectantes en los helióstatos. El sistema propuesto se basa en el método de perfilometría por proyección de franjas, adaptado a una arquitectura de control modular y empleando un dispositivo Raspberry Pi 4 como unidad central. Este último, se encarga de coordinar la proyección secuencial de patrones sinusoidales, la captura de imágenes reflejadas y su procesamiento digital para la recuperación de fase de las franjas. A partir de esta información, se realiza la reconstrucción de vectores tridimensionales entre un blanco lambertiano en la torre central y la superficie del heliostato a evaluar. Dichos vectores permiten estimar la orientación angular de cada faceta, y posteriormente compararla con un modelo ideal de geometría esférica. La implementación del sistema propuesto se realizó emulando las prácticas manuales de calibración, observándose una reducción en el tiempo total de evaluación; pasando de 2.5 horas a poco más de 2 minutos por heliostato. Además de aumentar la eficiencia y minimizar la intervención por parte del personal para la evaluación óptica, este procedimiento estandarizado facilita la trazabilidad de los datos y la implementación de estrategias de monitoreo y mantenimiento en plantas solares de torre central. Adicionalmente, los resultados obtenidos permiten visualizar el uso de esta herramienta para la caracterización óptica de helióstatos independientemente del tipo y tamaño de su superficie reflectiva.

Palabras clave: *Automatización, calibración óptica, perfilometría por proyección de franjas, heliostatos, energía solar de concentración.*

ABSTRACT

This work presents the development of an automated system for the optical characterization of operational heliostats at the Hermosillo Solar Platform. Its implementation aims to significantly reduce the required time and resources for the evaluation and calibration of heliostats' reflective surfaces. The proposed system is based on the fringe projection profilometry method, coupled to a modular control architecture and using a Raspberry Pi 4 as the central unit. The latter is in charge of coordinating the sequential projection of sinusoidal patterns, capturing of the reflected images and their digital processing required for the fringes' phase retrieval. From this information, three-dimensional vectors are reconstructed between a lambertian target on the central tower and the heliostat's surface under evaluation. These vectors allow estimating the angular orientation of each facet and later compare it with respect to an ideal model of spherical geometry. The implementation of the proposed system was performed emulating manual calibration practices, observing a reduction of the total evaluation time; going from 2.5 hours to slightly over 2 minutes per heliostat. In addition to increasing the efficiency and minimizing the personnel intervention in the optical evaluation, this standardized procedure facilitates data traceability and the implementation of monitoring and maintenance strategies in solar tower plants. Additionally, the results obtained in this work, allow envisioning the use of this tool for the optical characterization of heliostats, regardless of the size and type of their reflective surface.

Keywords: *Automation, optical calibration, fringe projection profilometry, heliostats, concentrating solar power.*

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha consolidado como una de las alternativas más sostenibles para enfrentar los retos energéticos actuales, destacando por su disponibilidad, bajo impacto ambiental y viabilidad tecnológica (Cock, 2018). Entre las distintas estrategias de aprovechamiento, los sistemas de concentración solar (CSP, por sus siglas en inglés) ofrecen un elevado rendimiento en la conversión de radiación solar en energía térmica o eléctrica (Mubashar, Khan y Khan, 2021). En este tipo de instalaciones, los heliostatos desempeñan un papel esencial al reflejar la radiación solar hacia un receptor fijo, por lo que su evaluación periódica resulta clave para preservar un desempeño óptico eficiente. Entre las técnicas empleadas para esta tarea, la perfilometría por proyección de franjas destaca por su alta sensibilidad para detectar desviaciones y deformaciones en superficies reflectantes; posicionándose como una opción idónea para su aplicación en entornos de concentración solar (Pargmann et al., 2024). Si bien en la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH) el método más empleado para la calibración óptica ha sido el de cámara–objetivo, también se han realizado pruebas y aplicaciones puntuales mediante el método de perfilometría por proyección de franjas para la evaluación óptica de los heliostatos.

Esta técnica ha permitido analizar las superficies reflectantes (compuestas de múltiples facetas) y detectar desviaciones angulares o variaciones locales que puedan afectar su desempeño (Iriarte, 2020). No obstante, la ejecución manual de este procedimiento ha requerido de una inversión considerable de tiempo y coordinación operativa, lo que ha incentivado al desarrollo de herramientas que permitan automatizar este proceso (Pargmann et al., 2024). Adicionalmente, en literatura reciente se expresa un interés creciente por sistemas que integren adquisición óptica, procesamiento digital y análisis automático, para caracterizar componentes en instalaciones solares (Kashif Ali y Song Jifeng, 2024). En particular, el método de perfilometría por proyección de franjas ha sido implementado con éxito en diversos contextos, sobresaliendo por su capacidad para obtener información precisa sin interferir con la operación de los sistemas (Krauth et al., 2024).

En este contexto, en este trabajo se presenta un sistema automatizado para la evaluación óptica de heliostatos mediante perfilometría por proyección de franjas, combinada con una arquitectura modular de control, el cual emplea un dispositivo Raspberry Pi 4 como unidad central. En dicho sistema, la proyección de patrones, captura y procesamiento de imágenes, así como la reconstrucción tridimensional de la superficie reflectiva se realiza de manera automatizada, lo que permite su evaluación y calibración de manera eficiente, con mínima intervención por parte del personal.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del sistema se llevó a cabo en tres etapas: identificación de necesidades, diseño del sistema de adquisición y control, e implementación en campo. Cada una integró actividades específicas para cubrir los aspectos técnicos, operativos y de validación, avanzando de forma progresiva hasta su integración final (Figura 1).

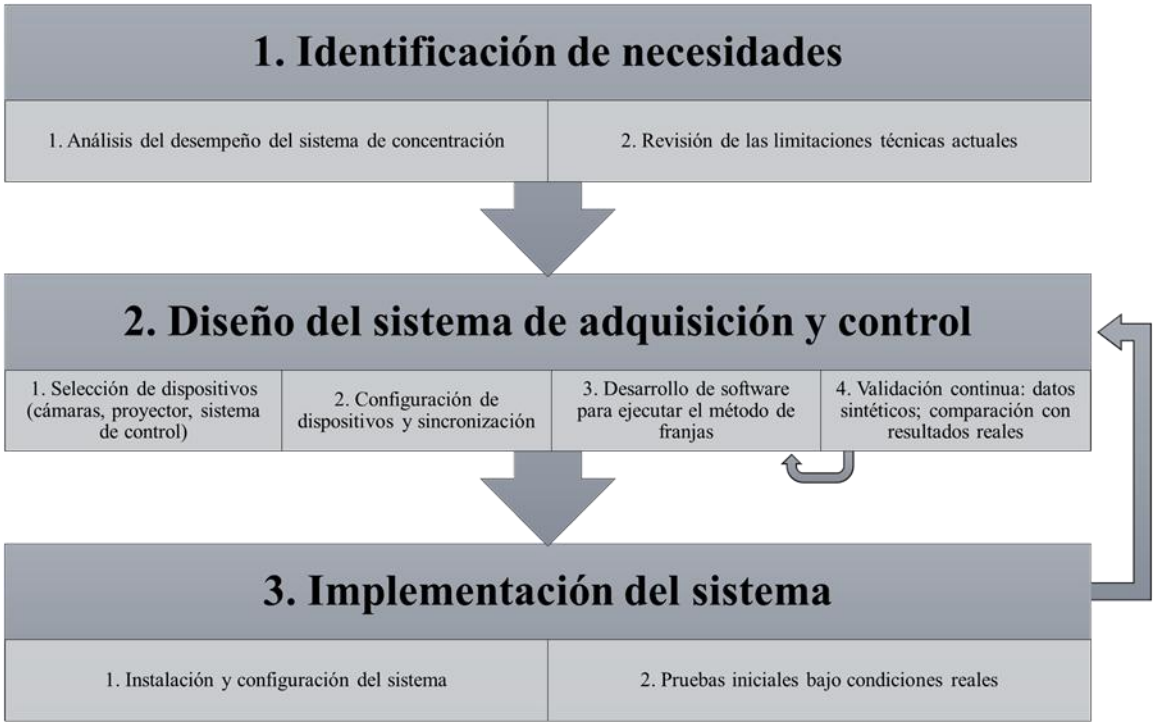


Figura 1. Diagrama de flujo: Metodología para el sistema de adquisición y control.

2.1. Identificación de necesidades

La primera etapa consistió en una evaluación visual de los heliostatos en el campo experimental de torre central de la PSH, registrando aspectos generales de alineación, calidad del enfoque y uniformidad del reflejo sobre el blanco lambertiano. A partir de esta observación y de la experiencia previa en pruebas con perfilometría por proyección de franjas, se optó por su aplicación como la técnica para la caracterización óptica de las superficies reflectivas. Es importante mencionar que las evaluaciones fueron diseñadas para realizase en horario nocturno, generar información detallada de cada faceta bajo un procedimiento estandarizado y no interferir en los horarios de operación de la planta.

2.2. Sistema de adquisición y control

El diseño del sistema de adquisición y control constituyó el eje central para automatizar el proceso de calibración óptica basado en el método de perfilometría por proyección de franjas. Su función principal fue la de integrar en un mismo entorno, la proyección secuencial

de patrones, la captura de imágenes reflejadas por las facetas del heliostato y el procesamiento digital necesario para evaluar su estado geométrico. Para ello, se implementó una arquitectura modular empleando un dispositivo Raspberry Pi 4, para coordinar la operación de los distintos dispositivos involucrados y ejecutar de forma secuencial cada una de las etapas del proceso de evaluación.

En la práctica, este sistema está esencialmente compuesto por:

- Un dispositivo Raspberry Pi 4: que actúa como unidad de procesamiento central, ejecutando los scripts de control y sincronización durante todo el proceso de evaluación.
- Un proyector digital de 5,000 lúmenes: encargado de plasmar franjas sinusoidales de alta resolución con orientación vertical y horizontal sobre un blanco lambertiano en la torre central.
- Dos cámaras Raspberry CSI: provistas de lentes telescópicas para capturar a detalle las franjas proyectadas sobre el blanco lambertiano a través del reflejo de las facetas en los helióstatos.

La configuración espacial se diseñó para preservar la coherencia geométrica del sistema. De esta manera, el dispositivo Raspberry Pi y la cámara principal se ubicaron en la cima de la torre, con vista directa al campo de helióstatos, mientras que el proyector se colocó frente a la torre apuntando hacia el blanco lambertiano.

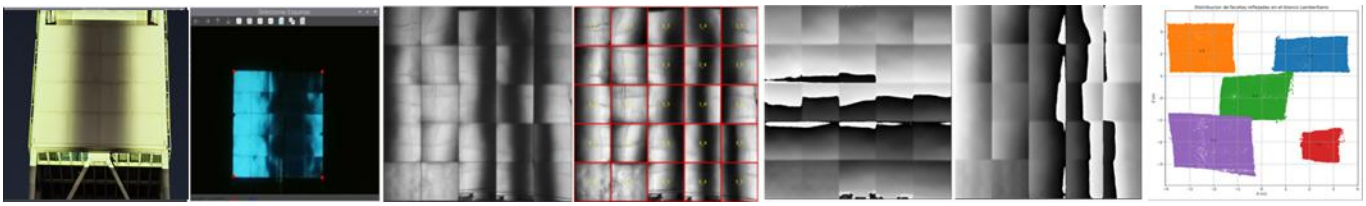
2.3. Perfilometría por proyección de franjas y validación del sistema modular automatizado

El software de control fue desarrollado en lenguaje de programación Python, siguiendo una estructura modular y compuesta por seis etapas:

1. Proyección y captura: franjas sinusoidales de fase conocida son proyectadas sobre el blanco lambertiano y las imágenes reflejadas se capturan y corrigen geométricamente mediante una transformación por homografía. Esta corrección parte de una selección manual de esquinas que define la región proyectada; permitiendo una normalización de perspectiva que estandariza todas las capturas (Figura 2a).
2. Preprocesamiento de imágenes: mejora de contraste, reducción de ruido y segmentación de imágenes. Este último, basado en coordenadas predefinidas para la separación de cada faceta, manteniendo sus proporciones físicas reales (Figura 2b).
3. Recuperación de fase: utilizando las imágenes capturadas con diferentes fases (0, $\pi/2$, π, $3\pi/2$), el mapa de fase es calculado mediante el método de cuatro pasos, recuperando el perfil óptico de cada faceta, empleando la siguiente formula:

$$\varphi(x,y) = tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right)$$

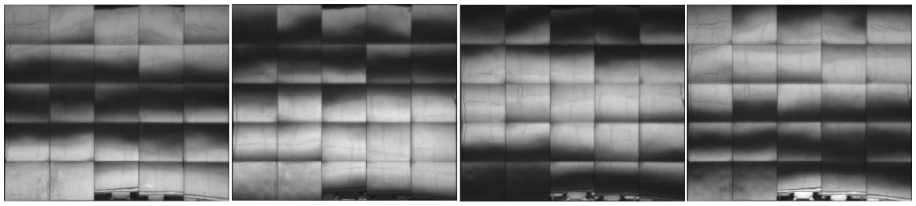
   Donde I_1, I_2, I_3, I_4 son las intensidades de cada pixel en las imágenes capturadas (Figura 2b) y φ es la fase recuperada para cada pixel de la faceta o mapa de fase (Figura 2c).
4. Conversión a coordenadas tridimensionales: los mapas de fase son transformados en coordenadas físicas (x, y=0, z), representando la geometría proyectada de las facetas sobre el blanco lambertiano. A partir de estos datos, se generan mallas para cada faceta con sus correspondientes coordenadas (u, v) de faceta y (x, z) en blanco lambertiano, que son almacenadas para un análisis posterior (Figura 2d).
5. Cálculo de normales: la normal por píxel y la normal promedio para cada faceta son calculadas. Esto se realiza mediante el análisis del vector de reflexión entre el blanco y la cámara, partiendo de una faceta de referencia. Las normales se reorientan mediante una rotación propagada, alineando todo el conjunto con respecto al eje cenital.
6. Análisis de alineación: un modelo esférico ideal es construido con base en una configuración óptima teórica y se compara contra los datos reales. Para cada faceta, la desviación angular es estimada y se genera un reporte con los resultados para su evaluación.



(a) (b) (c) (d)

Figura 2. Método de perfilometría por proyección de franjas y validación del sistema modular automatizado.

Cabe resaltar que, durante el desarrollo del sistema modular, se implementó una estrategia de doble validación para asegurar la fiabilidad de cada etapa antes de su integración global. En primer lugar, se emplearon capturas previamente validadas mediante el método manual, sirviendo como referencia para contrastar los resultados del nuevo sistema (Figura 3). Paralelamente, se introdujeron datos sintéticos con comportamiento ideal predecible, lo que permitió anticipar los resultados esperados en cada módulo. De esta manera, solo si ambos criterios se cumplían (coincidencia con los resultados reales previos y consistencia con el comportamiento ideal) se daba por superada la etapa correspondiente. En caso de detectarse discrepancias posteriores, el flujo de ejecución retrocedía al módulo implicado para su ajuste, asegurando así un proceso iterativo de depuración y validación.



(a) (b) (c) (d)

Figura 3. Capturas de referencia obtenidas previamente mediante método manual (Iriarte, 2020).

Como complemento a este proceso de validación, se verificó que los resultados finales generados por el sistema automatizado fueran consistentes con los resultados obtenidos mediante el método manual. Para ello, se compararon las desviaciones angulares calculadas por el nuevo sistema con los valores de referencia disponibles. Los resultados obtenidos mostraron una alta concordancia entre ambas metodologías, lo cual respalda la fidelidad del sistema propuesto para la caracterización óptica de las facetas (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación entre desviaciones calculadas y valores de referencia.

	Desviación mRad	
Faceta	Calculado	Referencia
1_1	3.486	3.025
1_2	2.864	2.656
1_3	1.381	1.866
1_4	1.686	2.183
1_5	1.866	1.576
2_1	1.998	2.273
2_2	3.028	3.136
2_3	2.698	2.549
2_4	4.624	4.777
2_5	1.873	2.446
3_1	2.554	2.858
3_2	4.147	4.324
3_3	0	0
3_4	2.222	2.249
3_5	3.92	4.035
4_1	3.548	3.701
4_2	3.225	3.551
4_3	3.923	3.899
4_4	5.944	5.893
4_5	3.189	3.299
5_1	2.843	2.699
5_2	0.842	0.338
5_3	4.053	4.638
5_4	5.494	5.735
5_5	4.582	4.408

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de campo bajo condiciones reales y ejecutadas durante la noche con el propósito de eliminar la interferencia de la luz solar. Esta condición permitió proyectar con claridad los patrones de franjas y capturar reflejos con un mayor contraste. Estas pruebas se enfocaron en validar la funcionalidad del sistema completo y en condiciones operativas reales; permitiendo evaluar su estabilidad, capacidad de sincronización y respuesta ante los elementos del entorno físico del campo solar (Figura 4).

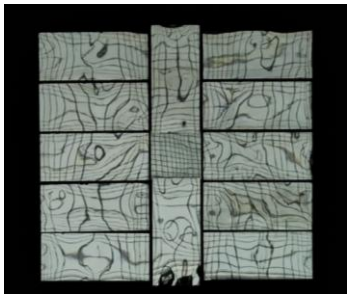


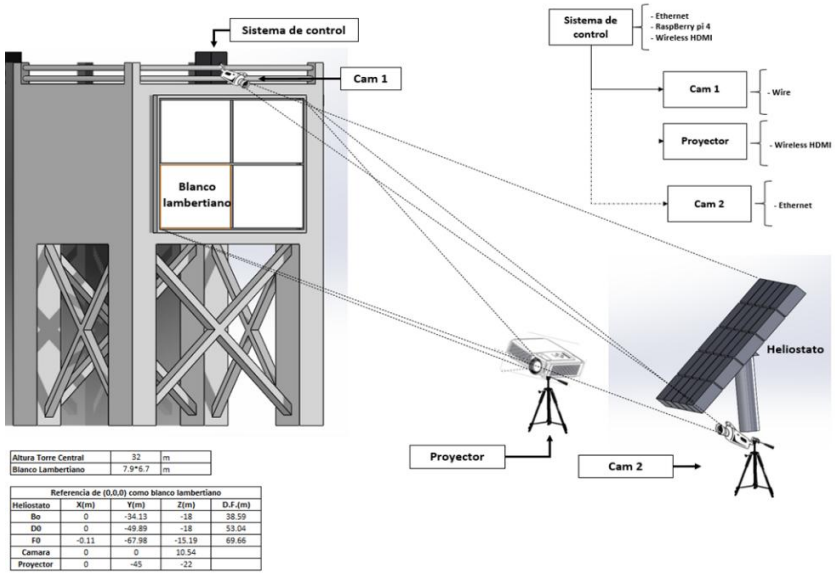
Figura 4. Captura nocturna de helióstato con patrón de calibración de pantalla.

3. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA EN CAMPO

Concluida la validación numérica y funcional del sistema bajo condiciones controladas, se procedió a su implementación operativa en la PSH con el propósito de verificar su desempeño integral en un entorno real. Esta fase permitió evaluar la integración física de los dispositivos, así como observar la operación sincronizada de los distintos módulos en condiciones similares a las de su aplicación final.

La implementación física del sistema en campo consistió esencialmente en la instalación de tres componentes: un módulo de control, un equipo de proyección y dos cámaras. Tal como se muestra en la Figura 5, el dispositivo Raspberry Pi 4, la unidad encargada del control

general, se colocó en la parte superior de la torre central, a 10.54 m sobre el plano del blanco lambertiano. Junto a este dispositivo se colocó la cámara principal (cámara 1), responsable de capturar las imágenes reflejadas por el helióstato a evaluar. Paralelamente, un proyector digital de 5,000 lúmenes se instaló frente a la torre central. Este se elevó aproximadamente un metro sobre el suelo y se apuntó hacia el blanco, realizando los ajustes necesarios para obtener una proyección homogénea de patrones sobre el blanco lambertiano. Finalmente, una segunda cámara (cámara 2) fue posicionada cercana al proyector para supervisar visualmente la proyección durante las pruebas. La localización y las coordenadas relativas de los distintos dispositivos utilizados se muestran en la Figura 5.



Altura Torre Central	32	m
Blanco Lambertiano	7.9*6.7	m

Referencia de (0,0,0) como blanco lambertiano				
Heliostato	X(m)	Y(m)	Z(m)	D.F.(m)
Bo	0	-34.13	-18	38.59
D0	0	-49.89	-18	53.04
F0	-0.11	-67.98	-15.19	69.66
Camara	0	0	10.54	
Proyector	0	-45	-22	

Figura 5. Distribución y localización de los distintos dispositivos del sistema implementado en la PSH.

4. RESULTADOS

Una vez verificado el funcionamiento de cada módulo, se procedió a realizar la evaluación óptica de heliostatos operativos en la PSH haciendo trabajar al sistema de manera automatizada. Es decir, ejecutando secuencialmente sus 6 etapas: proyección y captura de patrones, correcciones de imagen y segmentación, recuperación de fase, transformación espacial, cálculo de normales y análisis comparativo con un modelo esférico ideal.

Con el fin de evaluar tanto el sistema completo como su versatilidad, se optó por evaluar un helióstato con facetas concentradoras. La superficie reflectiva de este helióstato está compuesta de 13 facetas rectangulares semi cóncavas, dispuestas en una configuración simétrica en torno al eje central. Adicionalmente, cada faceta posee dimensiones físicas de 2.6 m × 1.15 m y están orientadas para concentrar la radiación solar reflejada sobre el blanco lambertiano. Es importante mencionar que, como parte del proceso de evaluación óptica se emplearon ocho patrones de franjas distintos, se generaron mapas de fase vertical y horizontal y se calcularon las desviaciones angulares individuales para cada faceta (Figura 6).

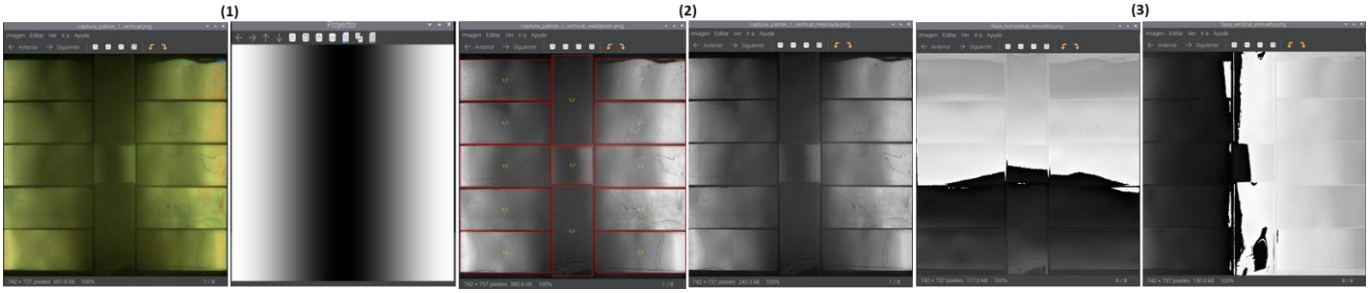


Figura 6. Caracterización óptica de heliostato con facetas concentradoras, indicando las 6 etapas del sistema automatizado.

Los resultados obtenidos reflejan la capacidad del sistema para estimar la orientación relativa de cada faceta. Para facilitar la visualización de las desviaciones angulares de cada faceta, estas se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Desviación angular en heliostato con facetas concentradoras

Faceta	Normales heliostato			Normales ideales			Desviación
	x_h	y_h	z_h	x_i	y_i	z_i	mrad
1_1	-0.042808	0.028904	0.998665	-0.036826	0.045212	0.998298	**17.374**
1_2	-0.00005	0.022775	0.999741	0	0.032136	0.999484	**9.365**
1_3	0.045481	0.028021	0.998572	0.036826	0.045212	0.998298	**19.249**
2_1	-0.042938	0.015042	0.998964	-0.03684	0.022615	0.999065	**9.723**
2_3	0.045014	0.014683	0.998878	0.03684	0.022615	0.999065	**11.391**
3_1	-0.042729	-0.002393	0.999084	-0.036845	0	0.999321	**6.357**
3_2	0	0	1	0	0	1	**0**
3_3	0.044372	-0.001676	0.999014	0.036845	0	0.999321	**7.718**
4_1	-0.043317	-0.016398	0.998927	-0.03684	-0.022615	0.999065	**8.979**
4_3	0.045264	-0.016739	0.998835	0.03684	-0.022615	0.999065	**10.273**
5_1	-0.044897	-0.032604	0.998459	-0.036826	-0.045212	0.998298	**14.971**
5_2	-0.000678	-0.023447	0.999725	0	-0.032136	0.999484	**8.719**
5_3	0.042974	-0.032835	0.998536	0.036826	-0.045212	0.998298	**13.822**

Como puede observarse, los valores muestran una distribución angular variable entre facetas, siendo la central (3_2) el punto de referencia para la alineación general. La magnitud de los errores observados permite identificar claramente aquellas superficies que presentan mayor desviación respecto al modelo ideal, lo que facilita la toma de decisiones para ajustes de calibración posteriores.

5. CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo se logró el diseño, construcción, implementación y validación de un sistema capaz de ejecutar de manera autónoma el proceso completo de evaluación óptica de helióstatos basado en el método de perfilometría por proyección de franjas.

En términos operativos, la ejecución de proceso completo de evaluación óptica para un heliostato, desde la proyección de patrones hasta el cálculo de métricas finales, se realizó en aproximadamente 2.4 minutos y con la intervención de únicamente dos operadores. En contraste, el método manual habitual requiere 2.5 horas de trabajo por heliostato y la participación de al menos tres personas. Este significativo aumento en eficiencia promete enormes ahorros de tiempo, esfuerzo y recursos para la calibración óptica en plantas termo solares de torre central que cuentan con un número significativo de helióstatos.

Adicionalmente, la automatización del proceso completo de caracterización óptica minimiza la posibilidad de errores de calibración, al mismo tiempo de facilitar la trazabilidad de datos, el monitoreo y la implementación oportuna de estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo. Por otra parte, su diseño modular y su desempeño validado lo posicionan como una herramienta confiable y versátil para la evaluación y calibración óptica de helióstatos, independientemente del tipo y tamaño de su superficie reflectiva.

Es importante mencionar que, aunque aún no se dispone de mediciones externas para comparar los resultados obtenidos, particularmente para el caso de un helióstato con facetas semi cóncavas, la validación del sistema a través de datos sintéticos y capturas de referencia, permite sustentar su confiabilidad.

6. BIBLIOGRAFÍA.

Cock Martínez, F., 2018. Diseño mecánico de un helióstato modular. [en línea] León, Guanajuato, México. Disponible en: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/641/1/17354.pdf> [Accedido 27 febrero 2024].

Iriarte Cornejo, C., 2020. Evaluación teórica y experimental del efecto de los errores de pendientes y canteo en heliostatos concertadores sobre la distribución del flujo solar concentrado. [Tesis] Universidad de Sonora. Disponible en: <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/20.500.12984/6147/1/Iriartecornejocuitlahuacd.pdf> [Accedido 27 febrero 2024].

Kashif Ali y Song Jifeng, 2024. Research on Image Analysis and Correction System of Heliostat Spot Quality. Applied Solar Energy, 60(1), pp.66-82. https://doi.org/10.3103/S0003701X24700038.

Krauth, J.J., Happich, C., Algner, N., Broda, R., Kämpgen, A., Schnerring, A., Ulmer, S. y Röger, M., 2024. HelioPoint – A Fast Airborne Calibration Method for Heliostat Fields. Journal of Solar Energy Engineering, 146(6). https://doi.org/10.1115/1.4065868.

Mubashar, M., Khan, G.M. y Khan, R., 2021. Landslide Prediction Using Long Short Term Memory(LSTM)Neural Network on time series data in Pakistan. En: 2021 International Conference on Artificial Intelligence (ICAI). IEEE. pp.175-181. https://doi.org/10.1109/ICAI52203.2021.9445236.

Pargmann, M., Ebert, J., Kesselheim, S., Maldonado Quinto, D. y Pitz-Paal, R., 2024. In Situ Enhancement of Heliostat Calibration Using Differentiable Ray Tracing and Artificial Intelligence. SolarPACES Conference Proceedings, 1. https://doi.org/10.52825/solarpaces.v1i.642.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

EL LITIO. UN DIAGNÓSTICO GENERAL.

Yolanda Mexicalxóchitl García Beltrán
Programa de Energía, El Colegio de México, Carretera Picacho-Ajusco 20, Tlalpan, Ciudad de México, 14110, México,55 5449 3000, **ymgb1988@gmail.com**

RESUMEN

En este trabajo se expone el camino que ha tomado la transición energética a partir del crecimiento de tecnologías menos contaminantes en las últimas décadas, y cómo dicha transición se ha transformado a través del tiempo. Hoy en día los minerales estratégicos, específicamente el litio, son elementos que han ampliado el debate. Así, en primera instancia se ofrece una perspectiva global de las energías renovables para, posteriormente, centrarnos en el caso mexicano y en la demanda creciente de litio en nuestro país y en el mundo. Por último, se analizan los casos de aquellos grandes productores de este mineral en América Latina (Chile y Argentina) y de los países que contienen importantes reservas de este recurso para reflexionar sobre la situación de México.

Se concluye que, a pesar de la producción creciente, la explotación de litio es incipiente en la región y que, además, aunque los Estados han jugado un papel central al nacionalizarlo o intentar involucrarse en su cadena productiva, su alcance es limitado; en Chile la Estrategia Nacional de Litio impulsada por el presidente Gabriel Boric está por consumarse, dejando pendiente la creación de una empresa estatal de litio, en Argentina la inconformidad social ante los proyectos litíferos crece cada vez más y en México se percibe muy lejana su extracción. Caso aparte, se encuentra Bolivia, que a pesar de contar con los mayores recursos de litio en el mundo, ha sido incapaz de extraerlo a gran escala. Por ello, cerramos este estudio proponiendo el concepto *nacionalización frágil.*

ABSTRACT

This paper presents the path taken by the energy transition with the growth of cleaner technologies in recent decades, and how this transition has transformed over time. Today, strategic minerals, specifically lithium, are elements that have broadened the debate. Thus, it first offers a global perspective on renewable energy and then focuses on the Mexican case and the growing demand for lithium in our country and worldwide. Finally, it analyzes the cases of major producers of this mineral in Latin America (Chile and Argentina) and the countries with significant reserves of this resource to reflect on the situation in Mexico.

It concludes that, despite increasing production, lithium exploitation is incipient in the region and that, furthermore, although states have played a central role by nationalizing it or attempting to become involved in its production chain, their scope is limited. In Chile, the National Lithium Strategy promoted by President Gabriel Boric is about to be finalized, leaving the creation of a state-owned lithium company pending. In Argentina, social discontent regarding lithium projects is growing, and in Mexico, extraction is perceived as a distant prospect. Bolivia is a separate case, which, despite having the largest lithium resources in the world, has been unable to extract it on a large scale. Therefore, we conclude this study by proposing the concept of *fragile nationalization*.

Palabras claves: energía y sociedad, extractivismo, problemas socioambientales, litio y transición energética.

INTRODUCCIÓN

El litio se ha posicionado en los últimos años como un mineral estratégico, sobre todo para la transición energética y las promesas de un futuro sustentable con menos emisiones contaminantes. Actualmente, pocos países concentran su extracción, encabezando la lista Australia con 55,300 toneladas, seguida de Chile con 28,300 y China con 14,000. Sin embargo, al hablar de las reservas probadas, América Latina destaca notablemente, pues Bolivia posee 21 millones de toneladas, ubicándose como el país con la mayor disponibilidad del mundo. Asimismo, Argentina concentra 19 millones de toneladas y Chile 9.8. México, por su parte, ocupa el décimo lugar con una cantidad de 1.7 millones de toneladas de acuerdo a datos ofrecidos por el Sistema Geológico de Estados Unidos.

Empero, ha sido precisamente la extracción el principal obstáculo para la región, al requerir de grandes montos de inversión y procesos complejos. México, hasta ahora, no ha logrado iniciar su producción, aunque cuenta con 36 concesiones otorgadas a privados, las cuales fueron asignadas durante los gobiernos de Felipe Calderón Hinojosa y Enrique Peña Nieto, es decir, del 2006 al 2018. No obstante, la mayoría de dichas concesiones se encuentran en una fase incipiente y de mera especulación financiera, teniendo solamente tres compañías avances sustanciales: Bacanora Lithium, Organimax y One World Lithium, las cuales realizan actividades de exploración.

En México, al igual que en Bolivia y Chile, el litio ha sido nacionalizado, por lo que se busca que los Estados tengan el control del mismo y que, aunque sea posible establecer alianzas con el sector privado para su extracción, el gobierno tenga una importante participación. Más aún, como consta en declaraciones públicas emitidas por figuras públicas en los tres países, la coparticipación en los procesos que conforman la cadena de valor del litio (la transformación de la materia prima en productos finales) es deseable. Empero, Latinoamérica se enfrenta a un panorama complejo debido a limitaciones técnicas y de capital, así como a la geopolítica que rige el mercado. Por lo tanto, este trabajo busca exponer, de manera sintética, la situación del sector litífero en Argentina, Bolivia, Chile y México.

Como se ha expuesto, el tema resulta fundamental y relevante desde perspectivas ambientales, políticas, económicas y sociales, en el plano nacional y en el global.

Argentina: la apertura al sector privado y el coste ambiental. Como ya se mencionaba, Argentina ocupa hoy el cuarto puesto a nivel global como productor de litio. Sin embargo, el desarrollo del sector ha sido rápido y se espera que para el 2035 se posicione como el segundo, rebasando a su vecino, Chile. Hacia 1999, el país aportaba solamente el 0.1% del litio mundial, contribuyendo actualmente con el 7%, luego de que experimentara un crecimiento del 45.67% en su producción durante el 2023. En total, se estima que Argentina cuenta con 117.1 millones de toneladas de litio, lo que representa el 20.9% del total global (Ministerio de Economía, 2024). Las reservas de litio se encuentran al norte argentino, concentrándose en tres provincias: Catamarca, Salta y Jujuy, donde se encuentran diversos salares que permiten la extracción de litio por técnicas tradicionales de evaporación , destacando el Salar del Hombre Muerto y el Salar de Cauchari-Olaroz, los cuales comenzaron a ser explorados en los 80, entrado en operación en 1998 el primer proyecto llamado "Fénix", que suministraba litio a la compañía Sony, ello después de que en 1991 el gobierno de Carlos Menen lo concesionara a Minera del Altiplano, filial de la estadounidense Livent Corp. Actualmente en la región hay 50 proyectos en distintos niveles de avance, estando en etapa productiva: Fénix, Cauchari Olaroz, Olaroz, Centenario Ratones, Sal de Oro y Mariana. Cabe destacar que Argentina tiene una serie de características que la hacen atractiva para los inversionistas. En primer lugar, es una República Federal, lo que quiere decir que las provincias tienen la capacidad y el derecho de tomar sus propias decisiones, incluyendo en gran medida aquellas respectivas a litio. Además, a diferencia de lo que ocurre en Chile, Bolivia y México, el litio es concesionable. Por otro lado, los temas socioambientales han sido dejados de lado en la agenda pública para enfocarse en el desarrollo de nuevas instalaciones mineras, lo que se reflejaba en los incentivos fiscales gozados por éstas.

La minería, incluida la de litio, está regulada en Argentina por la Constitución Nacional de 1994, el Código de Minería de 1887 y la Ley de Inversiones Mineras de 1993, además de leyes ambientales y fiscales, tanto a nivel nacional como provincial. Así, de acuerdo con la Constitución, son las provincias las que tienen la facultad de celebrar contratos de exploración y explotación. Del mismo modo, son las provincias las encargadas de realizar las Consultas Indígenas y las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA), a pesar de que el gobierno federal es quien establece estándares mínimos de regulación ambiental que son aplicables a todo el país. Esto puede resultar problemático pues, en principio, las provincias reciben las afectaciones ecológicas y se enfrentan a grandes retos administrativos a cambio de ganancias marginales ya que la Ley de Inversiones Mineras dicta que les corresponde el 3% por concepto de regalías a cambio de las concesiones otorgadas, tomando como referencia el "valor boca de mina", es decir, el valor del mineral extraído antes de pasar por cualquier proceso de transformación.

En adición, el interés en recibir mayores inversiones en litio ha llevado a cambios políticos a nivel regional, como mostró lo ocurrido en el año 2023 en Jujuy, cuando se llevó a cabo una reforma a la constitucional provincial que despertó el descontento de la población que se volcó a las calles para protestar. Especialmente, los pueblos originarios mostraron su preocupación ya que no fueron tomados en cuenta en la elaboración del documento ni en su contenido y porque algunos artículos propuestos facilitaban los desalojos y las expropiaciones de aquellos que no contarán con títulos de propiedad, algo que es usual en las comunidades originarias. Además, denunciaron que se dejaba de lado toda protección a los humedales y salares en un afán por facilitar la llegada de nuevas actividades mineras. Los opositores a los cambios constitucionales fueron fuertemente reprimidos y, finalmente, estos fueron aprobados con algunas reestructuraciones.

El Código de Minería detalla los procedimientos respecto a la adquisición, explotación, transferencia y cierre de una mina, además de otorgar de forma permanente la propiedad del subsuelo a los que "descubran" yacimientos mineros, quienes a su vez pueden comercializarla. El Grupo de Estudios de Geopolítica y Bienes Comunes (GyBC), colectivo que analiza temas socioecológicos, llama la atención sobre los beneficios fiscales de los que goza la minería en Argentina, los cuales incluyen: la garantía de estabilidad fiscal por un período de 30 años, la condonación de pagos locales provinciales, reintegros del 1.5% del valor del litio a punto de ser exportado, la facilidad para acceder a recursos hídricos y para trasladar a otros países litio sin procesar, reduciendo así su costo y excluyendo a Argentina dela cadena de valor (Grupo de Estudios de Geopolítica y Bienes Comunes, 2023).

Incluso, los incentivos son hoy mayores luego de que, en agosto de 2024, la canciller de argentina Diana Mondino firmara un acuerdo con Estados Unidos para fomentar las inversiones en minerales críticos y de que, en octubre de ese año, fueran publicados los reglamentos del Régimen de Incentivo para Grandes Inversiones (RIGI), que privilegia inversiones en petróleo, gas, minería y energías renovables, entre otros sectores, siempre y cuando esta sea mayor a los 200 millones de dólares. El RIGI, entre otras cosas, permite a las empresas importar máquinas e insumos sin pagar aranceles y les permite obtener saldos fiscales a favor en un plazo no mayor a tres meses (Gobierno de Argentina, 2024). Su implementación ha resultado polémica ya que, en opinión de algunos expertos, fomenta la competencia desleal al no priorizar ni tomar en cuenta a los proveedores locales.

La política del presidente Javier Milei está visiblemente enfocada a una apertura comercial cada vez mayor, como lo ha expresado abiertamente en reuniones sostenidas con múltiples empresarios, como el CEO de Río Tinto, Jakob Stausholm. No obstante, el tema socioambiental continúa siendo preocupante y se gesta una, cada vez más, profunda resistencia de las comunidades indígenas kollas y atacameñas, quienes ven vulnerados sus derechos y bienes naturales. Incluso, en octubre de 2024 denunciaron que el río Trapiche, en el Salar del Hombre Muerto, se secaba como consecuencia de las actividades del proyecto Fénix interponiendo un proceso legal ante la Corte Provincial que llevó a su suspensión y la de nuevas autorizaciones para proyectos en la misma zona, siendo reactivado posteriormente por Río Tinto.

Bolivia: la presencia del Estado y la conflictividad política. En Bolivia las mayores reservas de litio se encuentran en el Salar de Uyuni, localizado en la provincia Daniel Campos del departamento de Potosí, y en la provincia Ladislao Cabrera del departamento de Oruro. Este lugar, ha sido considerado el que concentra los mayores recursos de litio en el mundo estimando 21 millones de toneladas métricas de este metal en sus más de 10,500 km2. En la Ley No 719, decretada en febrero de 1985, "se declara de necesidad nacional, la exploración,

explotación, beneficio y comercialización de los recursos minerales metálicos y no metálicos, yacentes en la Cuenca Evaporítica del Gran Salar de Uyuni, ubicados en el Departamento de Potosí" (Honorable Congreso Nacional, 1985, s/p). Desde ese momento comienza a gestarse entre la sociedad, las organizaciones ciudadanas y las instituciones, la idea de que el litio debe de ser de propiedad nacional, oponiéndose a licitaciones donde participen extranjeras. Además, se funda el Complejo Industrial de Recursos Evaporíticos del Salar de Uyuni (CIRESU). El CIRESU, debido a cuestiones de rentabilidad y facilidad, decide negociar con la compañía estadounidense Lithium Corporation of America (LITHCO), para crear una empresa mixta, idea que se enfrentó a la oposición de las autoridades y habitantes de Potosí al no hacerse público el contrato. Finalmente, debido a la presión mediática y social, el entonces presidente Jaime Paz Zamora anunció en mayo de 1990 la nulidad del contrato, y en su lugar llamó a una licitación pública para para elegir a la empresa que se haría cargo de la explotación del Salar de Uyuni.

Dicha licitación ocurriría en abril de 1991, recibiéndose tres propuestas: la de la estadounidense FMC Corporation (antes LITHCO), la de la chilena SOQUIMICH y la de la boliviana COPLA Ltda, resultando ganadora FMC, lo que representó el segundo intento de LITHCO por participar en la extracción de litio en Bolivia y llevó a la firma de un nuevo contrato en 1992. De esta forma, se formaliza una colaboración entre el Estado boliviano y FMC bajo los siguientes términos: una participación estatal mayoritaria del 56.9%), una tasa interna de retorno para FMC de al menos el 20%, el pago de impuestos correspondientes al 30% por ganancias netas, así como un impuesto complementario del 2.5% sobre ventas netas. Empero, un año después el Estado boliviano decidió aumentar el impuesto al valor agregado del 10 al 13%, por lo que la compañía abandonó el proyecto y terminó instalándose en Argentina.

Finalmente, en abril de 2008, fue publicado el Decreto Supremo No 29496 que declaró los recursos evaporíticos del Salar de Uyuni como prioridad nacional e instruyó a la COMIBOL a crear una instancia responsable para su industrialización, quedando así completamente en manos del Estado (Gobierno de Bolivia, 2008). En el 2017 se crearía la dependencia Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), encargada de "realizar las actividades de toda de la cadena productiva: prospección, exploración, explotación, beneficio o concentración, instalación, implementación, puesta en marcha, operación y administración de recursos evaporíticos, complejos de química inorgánica, industrialización y comercialización" (Gobierno de Bolivia, 2017). Un punto destacable de fundación de YLB sería la apertura a los contratos de asociación con empresas privadas, siempre y cuando se conservara la participación mayoritaria del Estado.

En diciembre de 2018, YLB y la alemana ACI Systems suscribieron un acuerdo que creaba una empresa conjunta para continuar los planes de desarrollo de la industria del litio, lo cual provocó protestas en la provincia de Potosí, especialmente por parte de la organización política indígena Comité Cívico Potosinista, al considerarlo "entreguista", situación que llevó a su abrogación y, en noviembre de 2019, Evo Morales renunció a la presidencia en medio de acusaciones de fraude electoral. Más adelante, en entrevistas otorgadas a diversos medios de comunicación, el ex mandatario vinculó su salida del país con intereses estadounidenses y privados por apoderarse del litio boliviano. A partir del 2020 el nuevo gobierno encabezado por Luis Arce buscó redefinir la estrategia de industrialización de litio y en 2023 inauguró una planta industrial de carbonato de litio que estimaba producir hasta de 15,000 toneladas. A pesar de ello, para junio de 2025 está por alcanzar apenas 3,500 toneladas debido a que la producción de litio boliviano continúa estancada. Un poco más adelante, en febrero de 2024, el gobierno boliviano lanzó una convocatoria para atraer a empresas interesadas en la industrialización y extracción del litio, estableciendo acuerdos finalmente con la rusa Uranium One Group (con quien firmó un contrato en septiembre de 2024) y con la china Hong Kong CBC Investment Limited (en noviembre de 2024). No obstante, aunque se establece que YLB sigue siendo propietaria del recurso, ambos contratos han enfrentado múltiples cuestionamientos por parte de la sociedad civil, organizaciones indígenas y campesinas, académicos y figuras políticas debido a que fueron suscritos de manera previa a la realización de una Consulta Indígena y a una Evaluación de Impacto Ambiental, además de considerárseles inequitativos debido a que el país asume la mayor parte de los riesgos y las empresas los beneficios.

Posteriormente, un juzgado ordenó la suspensión del tratamiento legislativo de dos contratos para la industrialización de litio gestionados por el Gobierno del presidente de Bolivia, Luis Arce, con empresas de Rusia y China como resultado de una acción popular presentada por la Central Única Provincial de Comunidades Originarias del municipio de Nor Lípez, colindante al Salar de Uyuni. Finalmente, la discusión se reanudó y a solo unos días de las elecciones presidenciales de 2025, la comisión de la Cámara de Diputados aprobó también el contrato con la rusa Uranium One Group en una tensión política creciente de frente al cambio de gobierno, pues algunos diputados aseguraron haber sido víctimas de presiones para retomar el tema de los contratos de litio con empresas transnacionales e, incluso, haber sido retenidos por la fuerza en un intento de Arce por lograr su aprobación antes del término de su gestión.

Chile: Ejemplo de mediación, ¿un ejemplo a replicar? Chile se posiciona actualmente como el segundo productor de litio en el mundo ya que concentra una serie de salares ricos en este recurso, los cuales suman al menos 59 distribuidos en una extensión de 53,000 km2. Éstos se ubican al norte del país, sobre todo en las regiones de Atacama y Antofagasta, destacando los salares de Atacama y Maricunga. La región, agrupa cuencas endorreicas formadas por la desecación de lagos que permiten que el agua permanezca de forma subterránea. El descubrimiento de litio ocurrió en 1962 cuando la empresa estadounidense Anaconda exploraba el Salar de Atacama en búsqueda de agua, encontrando agua salada rica en litio, potasio, magnesio y boro, lo que daría pie a que el Ministerio de Minería realizará, en 1969, un análisis más profundo del salar. Del mismo modo, durante la década de los 70, la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), se encargaría de diversos estudios en la zona. Posteriormente, al constatarse una presencia importante de litio, la CORFO solicitó y obtuvo 59,820 pertenencias mineras en el Salar de Atacama, conservando hasta la actualidad 32,768 de ellas. Además, firmó un convenio con la compañía norteamericana Foote Minerals Company para llevar a cabo actividades de exploración y estudios de factibilidad en el Salar de Atacama, acuerdo que daría paso a la creación de la Sociedad Chilena de Litio (SCL) con un 45% propiedad de CORFO y un 55% de Foote Minerals. Empero, ante la imposibilidad de otorgar recursos económicos para este proyecto, la CORFO le otorgó a la minera estadounidense su posesión y posteriormente le vendería su participación, quedando Foote Minerals Company con el 100% de la propiedad de SCL.

Sin duda, un parteaguas en la historia del litio en Chile se daría en octubre de 1979 cuando se promulgó el Decreto Ley 2886 que lo declaró como un recurso exclusivo del Estado no concesionable debido a que se le consideró un material de interés nuclear, proporcionándole a la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), su titularidad (Gobierno de Chile, 1979). Al año siguiente se erigiría una nueva Constitución Nacional que, a su vez, llevaría a modificar el Código Minero, estableciendo que el derecho de explotación del litio es otorgable por medio de: 1) Empresas estatales, 2) Concesiones administrativas (anteriores a 1979) y 3) Contratos Especiales de Operación de Litio (CEOL), concedidos por medio de convocatorias y procesos públicos (Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina, 2019). Poco después, en 1983, la CORFO convoca a una licitación para desarrollar proyectos de extracción de sales potásicas, ácido bórico y litio en el Salar de Atacama, resultando ganadoras la estadounidense Amax Exploration y la chilena Molymet, cuya asociación dio lugar a la Sociedad Minera Salar de Atacama S.A (MINSAL). En conjunto, MINSAL, SLC y CORFO sentarían los precedentes de los dos proyectos de extracción de litio activos hoy en día en Chile. En 1989, mientras la SCL cubría el 20% de la demanda mundial de litio, la MINSAL finalizaba los estudios de factibilidad de su proyecto y cuatro años después Amax decidía vender su participación a Amsalar Inc, sentando el inicio de algunos cambios importantes para el contexto chileno, pues Amsalar y Molymet terminaron por vender su participación a la compañía SQM, quien se hizo del 75% del proyecto inicialmente, comprando poco después el 25% perteneciente a CORFO, convirtiéndose en la dueña absoluta de la MINSAL, que pasó así a manos privadas.

Por otro lado, la iniciativa de Foote Minerals sufrió diversas transformaciones, pues en 1998 se asoció con la compañía alemana Chemetall que, a su vez, sería comprada por la estadounidense Rockwood Holding, lo que abrió la puerta para que, finalmente, en el 2015 la norteamericana Albemarle comprara la totalidad del proyecto. De esta manera, se explica que, desde la iniciativa privada, Albermarle y SQM operan actualmente en el Salar de Atacama y dirigen los dos únicos procesos operativos de extracción de litio en Chile, lo que contrasta con el hecho de que el país "tiene una de las mayores reservas de litio del mundo, las que representan en la actualidad entre el 36% y el 40% del total global estimado" (Gobierno de Chile, 2023, p. 9). En general, SQM y Albemarle han expandido sus operaciones en los últimos años pues, por ejemplo, en 2017 esta última inauguró la Planta II que duplicó su capacidad de producción, y en 2022 consumó la Planta III que le permitió superar las 85,000 toneladas de carbonato de litio anuales. Precisamente entre 2021 y 2022, el litio alcanzó el precio más alto en la historia, al posicionarse en 82,225 dólares por tonelada, lo que generó un mayor interés por parte del sector privado.

En 2023 Gabriel Boric, el nuevo presidente, presentó la "Estrategia Nacional de Litio" en un intento por reformular la extracción de litio en diversos ámbitos. La Estrategia contempla: implementar un nuevo modelo de asociación público-privada y utilizar las ganancias obtenidas en inversiones sociales y tecnológicas buscando la incorporación de Chile a la cadena de valor del litio, la creación del Instituto Tecnológico y de Investigación Público de Litio y Salares y de una Empresa Nacional del Litio, analizar los salares para conocer su diversidad y viabilidad de aprovechamiento, instituyendo una Red de Salares Protegidos libre de actividades mineras y fomentar el diálogo con las comunidades y pueblos originarios respetando el derecho a la consulta.

Aunque este plan buscó integrar diversos ámbitos que permitieran consolidar y reforzar una industria litífera en el país, ha tenido éxitos y fracasos, entre otras cosas porque desde finales de 2022 el precio del litio experimentó una caída que se prolongó. Ésta se debió principalmente a un exceso de oferta de litio en el mercado y un crecimiento moderado de la demanda, menor a lo previsto. Aunque hubo un repunte temporal a principios de 2025, la tendencia general ha sido la misma

México: la nacionalización de un recurso etéreo. En México, desde la década de 1990 se identificaron depósitos de litio, aunque sin explotación a gran escala. Este recurso estaba regulado como cualquier otro mineral dentro de la Ley Minera de 1992, por lo que se entregaban concesiones privadas, principalmente a empresas trasnacionales, pues el Estado no lo consideraba un recurso estratégico exclusivo de la nación, a diferencia del petróleo o la electricidad, lo que significaba que compañías extranjeras podían explotar el litio mexicano bajo concesiones de minería metálica, sin una política nacional específica.

Formalmente, la historia del litio en México inició en 1992, cuando el geólogo Martín Vidal trabajaba para la multinacional Río Tinto buscando boratos, lo que lo llevó a explorar arcillas en Sonora, las cuales resultaron ricas en litio. Sin embargo, a la compañía no le interesó este recurso, por lo que Vidal y su compañero de trabajo, Rodrigo Calles, crearon una consultoría y lograron obtener cuatro concesiones mineras: El Sauz, Buenavista, La Ventana y San Gabriel. Posteriormente, Vidal negociaría con Bacanora Minerals, una empresa canadiense. Para conseguir financiamiento, el proyecto sería inscrito en mercados bursátiles de varias partes del mundo y durante varios años el mismo Vidal continuó trabajando como geólogo al servicio de Bacanora, cobrando al menos 3.8 millones de dólares (Sánchez y González, 2022).

Durante los siguientes años, el proyecto logró recaudar una parte importante de recursos económicos, producto de las altas expectativas que generó y de la importante cantidad de litio que, se creía, contenía el yacimiento. Posteriormente, el 30 de noviembre de 2017, Vidal renunció a Bacanora, aunque continuó ofreciéndole asesoramiento y consultoría a la compañía. De acuerdo con Sánchez y González (2022), durante ese período Bacanora se benefició económicamente basándose en la especulación pues, a pesar de que no tenía nada concreto más que meras especulaciones, eso le permitió incrementar sus ganancias. Además, falsificó información al afirmar que contaba con concesiones que sumaban más de 100,000 hectáreas cuando en realidad la Secretaría de Economía solo le autorizó el 13% de esa superficie y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), únicamente dio su visto bueno para manipular 472 hectáreas. A pesar de ello, entre el 2015 y el 2016 se llevarían a cabo las mayores operaciones en la zona, ubicada en la zona serrana del estado, cerca del poblado de Bacadéhuachi.

Cabe mencionar que a diferencia de lo que ocurría en Chile, Argentina y Bolivia en esa época, en México la extracción de litio era aún incipiente, por lo que no se contaba (ni se sigue contando) con infraestructura industrial ni una estrategia clara para aprovechar el mineral. Además, el litio mexicano está principalmente en arcillas, un tipo de depósito cuya explotación es más compleja y costosa que la

de salmueras por lo que, en ese momento, el litio estaba concesionado a empresas privadas con poca intervención estatal y sin explotación comercial significativa. En el 2014, Bacanora Minerals se asoció con la canadiense Rare Earth Minerals (hoy Cadence Minerals) y en el 2018 con la china Ganfeng Lithium, una de las empresas mineras más importantes en el mundo, cambiando su nombre a Bacanora Lithium.

Poco después la presencia de litio en Sonora se hizo mediática, conociéndose mundialmente su potencial, ya que la revista Mining Technology estimó en 243 millones de toneladas las reservas considerándolas, erróneamente, como el yacimiento más grande del mundo. Además, se descubrieron indicios de depósitos en Baja California, Zacatecas, San Luis Potosí y otras regiones. Finalmente, en el 2021, Ganfeng decidió comprar la totalidad del proyecto y dio a conocer datos ambiciosos sobre la cantidad de carbonato de litio que se podría generar en el futuro. Incluso, argumentó contar con un método de procesamiento exitoso para separar el litio de las arcillas en su planta piloto ubicada en Hermosillo, Sonora. A pesar de eso, diversos especialistas han señalado que las reservas mexicanas podrían no ser tan accesibles como se ha difundido. El geólogo Carlos Muñiz (2022) advierte que, hasta ahora, no existen pruebas industriales exitosas de extracción de litio en arcillas a gran escala. Esto coloca a México en una situación incierta: posee un recurso potencialmente estratégico, pero aún sin tecnología propia para explotarlo de manera rentable y sustentable.

El 20 de abril de 2022 se aprobó la reforma a la Ley Minera que declaró al litio como patrimonio de la nación y de uso exclusivo del Estado. Esta medida respondió al interés del gobierno mexicano de blindar el recurso ante las empresas transnacionales y asegurar la soberanía sobre un mineral estratégico. Ese mismo año se creó la empresa estatal Litio para México (LitioMx), dependiente de la Secretaría de Energía, con el objetivo de coordinar la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento del litio, nombrándose a Pablo Taddei como su director. La decisión del gobierno dividió opiniones. Por un lado, sectores nacionalistas aplaudieron la medida como un acto de soberanía, comparable con la expropiación petrolera de 1938. Por otro lado, críticos argumentan que el Estado carece de recursos técnicos, financieros y humanos para desarrollar la industria del litio sin colaboración privada. Como resultado de estos cambios, en septiembre de 2023, la Dirección General de Minas del gobierno mexicano canceló nueve concesiones pertenecientes a Bacanora Lithium, argumentando que la empresa no cumplió con los compromisos mínimos de inversión previamente establecidos por lo que la compañía presentó un amparo ante el Juzgado Décimo Primero de Distrito en Hermosillo, el cual fue rechazado. Posteriormente, solicitó revisión ante el Segundo Tribunal Colegiado en Materias Penal y Administrativa, pero esa petición también fue desestimada. En consecuencia, en junio de 2024, Ganfeng Lithium, junto con sus unidades Bacanora Lithium Limited y Sonora Lithium Ltd., presentó una demanda de arbitraje ante el Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (CIADI) del Banco Mundial por la cancelación de las concesiones y por posibles violaciones a tratados bilaterales de inversión entre México, China y Reino Unido, solicitando una compensación por daños, intereses y costos del arbitraje. Las empresas alegan que las cancelaciones son arbitrarias y violan tanto la legislación interna como el derecho internacional, argumentando que las concesiones fueron otorgadas antes de la reforma a la Ley Minera, por lo que deberían estar protegidas. Por su parte, el gobierno afirma que la cancelación fue válida, ya que las empresas no cumplieron con los requisitos de inversión estipulados. Además, se sostiene que las nuevas reformas constitucionales que nacionalizan el litio tienen prioridad.

Conclusiones. La experiencia comparada en América Latina muestra distintos caminos: Bolivia ha intentado imponer un modelo estatista enfrentado dificultades por su modelo, principalmente por motivaciones políticas. Incluso cuando ha intentado abrirse a las inversiones privadas, esto ha resultado infructuoso por los mismos factores. Chile ha tenido una postura más conciliadora pues, a pesar de que nacionalizó el litio hace varias décadas, los proyectos que operan hoy en día son privados y se busca la expansión en acuerdos comerciales. Empero, hasta ahora tampoco ha podido materializar sus estrategias. Por su parte, Argentina se ha abocado a la completa participación de la industria privada, lo que ha demostrado tener ciertas desventajas ambientales e incluso (y contradictoriamente), financieras. Por último, México deberá decidir qué modelo seguir, equilibrando el control estatal con la posibilidad de atraer inversiones estratégicas bajo condiciones claras de beneficio nacional.

La comparación muestra que Chile y Argentina han logrado posicionarse como productores mundiales, aunque con modelos distintos (Chile con mayor control estatal, Argentina con liberalismo provincial). Bolivia posee las mayores reservas, pero su modelo estatista ha tenido resultados modestos por falta de tecnología. México, por su parte, se encuentra en una etapa incipiente: apuesta por un modelo soberanista, pero enfrenta la dificultad técnica de extraer litio de arcillas y la ausencia de infraestructura industrial. El reto común para los cuatro países es cómo convertir el litio en motor de desarrollo integral y no solo en recurso de exportación. La clave está en avanzar hacia la industrialización, la innovación tecnológica y la participación justa de las comunidades locales.

A partir de ello, podría problematizarse el papel del Estado en torno a la industria litífera en América Latina, pues es claro que su participación resulta fundamental: su intervención define el modelo de gestión, la participación en la renta, la soberanía sobre el recurso y el grado de especialización que puede alcanzarse. El papel del Estado en la extracción del litio en América Latina oscila entre dos polos: modelos estatistas (Bolivia y México) que buscan soberanía plena pero enfrentan retos técnicos y financieros, y modelos liberalizados (Argentina y, en menor medida, Chile) que han avanzado en producción pero con escasa captura de renta nacional y fuertes conflictos sociales.

El desafío para los Estados latinoamericanos es trascender la lógica extractivista. El litio no debería limitarse a ser materia prima de exportación, sino convertirse en palanca para la industrialización, el desarrollo tecnológico y la transición energética justa. Para ello, los Estados deben combinar soberanía, alianzas estratégicas y políticas de innovación científica, al mismo tiempo que garantizan los derechos de las comunidades locales y la protección ambiental. En síntesis: el papel del Estado es decisivo para que el litio no se convierta en un nuevo enclave dependiente, sino en una oportunidad histórica de desarrollo sustentable.

REFERENCIAS

Azamar, A. (2022). *Litio en América Latina. Demanda global contra daño socioambiental.* México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Azamar, A y Téllez, I. (2022) *Minería en México: Panorama ambiental, social y económico.* México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Díaz, M. (2018). El litio, su minería y sus efectos en *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, 14, pp. 86-89.

Fornillo, B. (2019). *Litio en Sudamérica. Geopolítica, energía y territorios*. Argentina: El Colectivo-CLACSO.

Fornillo, B y Gamba, M. (2019). Industria, ciencia y política en el Triángulo del Litio en *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 58 (20), pp. 1-32.

Fornillo, B. (2023). Las fronteras latinoamericanas del litio en *Nueva Sociedad,* 306,pp. 1-20.

Gobierno de Argentina. (1993). *Código de minería.* Buenos Aires: Honorable congreso de la nación argentina.

Gobierno de Bolivia. (2008). *Decreto Supremo Nº 29644.* Bolivia: Gaceta Oficial de Bolivia.

Gobierno de Bolivia. (2017). *Ley N.º 928. Crea la empresa pública nacional estratégica Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB)*. Bolivia: Gaceta Oficial de Bolivia.

Gobierno de Chile. (1979). *Decreto Ley 2886.* Santiago: Gobierno de Chile.

Gobierno de Chile. (2023). *Estrategia nacional de litio: por Chile y su gente.* Santiago: Gobierno de Chile.

Gobierno de México. (2023). *Ley de minería.* Ciudad de México: Cámara de Diputados.

Gobierno de México. (2024). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.* Ciudad de México: Gobierno de México.

Grupo de Estudios de Geopolítica y Bienes Comunes. (2023). Acumulación por desfosilización, falsa agenda de transición energética. Veinticinco años de explotación de litio en Argentina en Azamar, A. (2022). *Litio en América Latina. Demanda global contra daño socioambiental.* México: Universidad Autónoma Metropolitana, pp. 117-160.

Kazimierski, M. y Argento, M. (2021). Más allá del petróleo. En el umbral de la acumulación por desfosilización en *Relaciones Internacionales*, 30 (61), pp. 209-231.

Ministerio de Economía. (2024). *Minería: litio.* Argentina: Ministerio de Economía.

Montenegro, J.C (2018). El modelo de industrialización del litio en Bolivia en *Revista de Ciencias Sociales* (34), pp.69-82.

Mora, F. de J. (2023). *La construcción social del litio en Sonora y México: cronología de su creación*. México: Universidad de Sonora.

Muñiz, C. (2022). "Desafíos de la extracción de litio en arcillas mexicanas". Revista Geológica de México, 78(2).

Núñez, V. (2022). *La batalla por el litio en México.* México: EntreTejas.

Sánchez, S y González, J. (2022). Sueños y mentiras en la fiebre del litio en *N+ Focus.* 12 de septiembre. Consultado en: https://investigaciones.nmas.com.mx/suenos-y-mentiras-en-la-fiebre-del-litio/

Secretaría de Minería. (2021). *Informe litio.* Buenos Aires: Ministerio de Desarrollo Productivo.

Valdez, M. Cabanillas, A y Patiño, X. (2023). Perspectivas de la extracción de litio en México y sus impactos socioambientales en *Revista de Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*. 12, pp. 83-98.

SESIONES TÉCNICAS

Eficiencia energética/ Captadores y Acumulación Térmica

ID	TÍTULO	PONENTE
2009	Termosifones enfriadores para acondicionamiento ambiental	José L. Fernández Zayas
2204	Envolvente arquitectónica y aprovechamiento de la energía solar para granjas verticales en la ZMVM	Gilberto Ortiz Romero
2138	Análisis económico por la implementación de sistemas de generación distribuida fotovoltaica en tarifas GDMTH	Andrés Salazar Texco

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

TERMOSIFONES ENFRIADORES PARA ACONDICIONAMIENTO AMBIENTAL

José L. Fernández Zayas
Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria 04510 México D.F.
Tel 55 5623 3600 ext 3606. Email JFernandezZ@iingen.unam.mx

Norberto Chargoy del Valle
Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria 04510 México D.F.
Tel 55 5623 3600 ext 3612. Email NChargoyV@iingen.unam.mx

RESUMEN

Se propone un sistema simple de termosifón para enfriar un líquido refrigerante en climas cálidos, donde el aire acondicionado eléctrico es caro o inexistente. Un radiador infrarrojo de placa plana se conecta en un circuito cerrado sobre un tanque de agua con aislamiento térmico, de modo que el agua más caliente fluya naturalmente al radiador durante la noche, almacenando agua fría en el tanque, que funciona como viga enfriadora (*chill beam*). Este sistema podría ser un alivio para quienes viven en climas cálidos y calurosos. Un análisis de parámetros, basado en un modelo matemático calibrado experimentalmente, revela que este dispositivo puede aliviar las temporadas de calor con ventaja económica y técnica. El sistema de refrigeración propuesto se puede integrar fácilmente en viviendas de bajos ingresos, según un esquema que se describe al final.

ABSTRACT

A simple thermosiphon system is proposed for cooling a refrigerant liquid in hot climates where electric air conditioning is expensive or nonexistent. A flat-plate infrared heater is connected in a closed circuit over a thermally insulated water tank, so that the warmer water flows naturally to the cooler at night, storing cold water in the tank, which functions as a chill beam. This system could provide relief for those living in hot, sweltering climates. A parameter analysis, based on an experimentally calibrated mathematical model, reveals that this device can alleviate hot seasons with economic and technical advantages. The proposed cooling system can be easily integrated into low-income housing, according to a scheme described at the end.

Palabras clave
Refrigerador por termosifón, confort pasivo, refrigeración por convección natural, confort sostenible, clima cálido
Keywords
Thermosiphon cooler, passive comfort, natural convection cooling, sustainable comfort, hot climate

INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se presenta el concepto de refrigeración ambiental por termosifón, que idealmente debiera emplearse junto con un buen aislamiento de las viviendas en el clima cálido del noroeste de México, donde las facturas de electricidad por aire acondicionado son elevadas, a pesar del enorme subsidio de CFE. El precio de la electricidad en México se encuentra entre los más bajos del mundo [1] y varía entre US$0.05 y US$0.20 por kWh para diversas tarifas y temporadas. En el estudio presente se emplean estadísticas y datos reportados por la agencia oficial mexicana respectiva. Si bien no es fácil conocer el verdadero costo de la electricidad, el cual no es publicado, y la estructura tarifaria de CFE incluye una larga lista de atenciones políticas y de fomento al desarrollo, no parece que estos costos están muy lejos de la realidad comercial, como se verá enseguida. El costo real no se publica, pero si se eliminan los subsidios, se puede estimar en un promedio de US$0.25 [2, 3]. Se emplea una conversión peso dólar de 20 por uno. De este modo, los costos del aire acondicionado pueden fluctuar entre US$0.06 y US$0.88 por hora [4]. La tarifa mexicana está fijada en alrededor de US$0.05 por kWh. Las viviendas económicas en el noroeste de México consumen entre 900 y 1440 vatios por hora [5], lo que puede redondearse a 8 kWh por día, en promedio, solo para aire acondicionado. Si se opera durante ocho meses al año, la cifra llega a ser de unos 1.920 kWh al año, o 480 dólares estadounidenses al año, en su mayor parte subsidio gubernamental independientemente de la tarifa que se aplique.

Esa cifra es mayor que la de instalar un enfriador termosifón adecuado en esa región [6]. La comparación de costos real probablemente también sea válida para muchos otros países y economías, lo que podría impulsar una transición positiva hacia una arquitectura de confort más sostenible, donde la fuerza de gravedad que mueve el refrigerante en los enfriadores termosifón desplaza el consumo de electricidad. Se trata de fomentar la arquitectura pasiva.

Se han realizado varios esfuerzos para emplear un número creciente de técnicas pasivas para evitar el exceso de aire acondicionado. Por ejemplo, [7] muestra que las intervenciones de refrigeración pasiva más eficaces para el modelo con ventilación natural incluyen la aplicación de aislamiento de techos y dispositivos de sombreado, que en conjunto reducen significativamente las cargas de aire acondicionado en Nigeria. Autores que analizan maneras de ahorrar energía en aire acondicionado en otras regiones, como algunos países de Oriente Medio, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Omán, Palestina y Catar, también se quejan de la falta de medidas pasivas adecuadas para afrontar el calor [8]. La ausencia de una práctica arquitectónica adecuada en México ha sido ilustrada por Lucero [9].

También se han observado ahorros económicos gracias a la eficiencia energética en Canadá [10], en todas las zonas climáticas de California y en las zonas climáticas cálidas de EE. UU. (ASHRAE) [11], así como en los Emiratos Árabes Unidos [12], entre otros lugares.

El valor de producir agua fría de forma sostenible ha demostrado ser económicamente atractivo incluso en el clima europeo [13]. Este hecho ha impulsado una intensa investigación sobre equipos y materiales en los países desarrollados [14]. Se han estudiado los beneficios de refrigeración de superficies urbanas con películas de refrigeración radiativa de alta reflectancia solar y alta emitancia térmica [15, 16, 17].

Sin embargo, la necesidad insatisfecha de aire acondicionado (AC) en los países en desarrollo suele provocar una grave incomodidad y, ocasionalmente, diversas enfermedades. El resultado neto es una pérdida de capacidad productiva, lo que puede explicar la pérdida de productividad del país, como lo ilustra [18] en Ghana. De hecho, algunos países como México proporcionan aire acondicionado a solo una quinta parte de su población en regiones cálidas y secas, lo que suele explicarse por la incapacidad económica [19] de una población mayoritariamente pobre. La energía necesaria para satisfacer estas necesidades, incluso si los precios de la electricidad pudieran bajar sustancialmente, no está disponible en las regiones de interés, y se necesitaría una gran cantidad de nueva generación de energía eléctrica, así como sistemas adecuados de transmisión y distribución. Esto no es una buena idea en un país, como México, que depende casi por completo de tecnologías de combustión de carbono [20].

Por otro lado, una amplia investigación ha demostrado que los enfoques pasivos y otros sistemas sostenibles pueden mejorar la comodidad sin recurrir a los equipos de aire acondicionado tradicionales [21]. Tras una cuidadosa evaluación de las necesidades de refrigeración en climas tropicales, existen diversas estrategias disponibles que requieren poca o ninguna energía externa, como la inducción de flujo pasivo, el uso extensivo de aislamiento adecuado en techos y paredes, un sellado adecuado para evitar que el aire caliente externo se filtre en las viviendas e incluso el uso de equipos de transferencia de calor para transformar la temperatura del aire externo en aire frío adecuado, recuperando el calor del aire de ventilación, necesario para controlar la acumulación de CO2 [22, 23]. Tras revisar la literatura comercial sobre refrigeración pasiva, es evidente que gran parte de los nuevos recursos y materiales, incluidas las ventanas y puertas herméticas, provienen de los avances de los países ricos para reducir las necesidades de calefacción, no de acondicionamiento ambiental.

DISEÑO DEL TERMOSIFÓN ENFRIADOR

Las bases científicas fundamentales presentadas en [6] definen al termosifón de enfriamiento. Este aparato es muy similar a un calentador termosifónico solar de agua. Sin embargo, en el termosifón enfriador el dispositivo de almacenamiento se encuentra debajo del radiador de placa plana. Al conectarse mediante tuberías ascendentes, el agua más caliente del sistema fluye hacia la placa plana. A diferencia de un calentador solar, si la placa plana se calienta durante el día, el agua no fluye hacia el tanque de almacenamiento. Sin embargo, el agua caliente que entra al colector de placa plana se enfría durante la noche gracias a la radiación infrarroja del cielo. Asimismo, se han desarrollado superficies selectivas de muy baja absorbancia a la radiación solar y de alta emitancia en el rango infrarrojo. Este efecto ha demostrado ser muy efectivo en el noroeste mexicano, donde las noches suelen ser despejadas. La radiación térmica puede generar suficiente potencia para disipar cantidades significativas de calor en las viviendas. De hecho, el enfriamiento nocturno puede sustituir por completo al aire acondicionado convencional, ahorrando así toda la electricidad que consume este aparato. En el modo de enfriamiento por termosifón, el tanque de almacenamiento puede ser sustituido por una viga fría dentro de una vivienda, como se propone en la Figura 1. Esta Figura ilustra una operación nocturna típica en verano, cuando el calentador radiante superior emite radiación infrarroja al cielo, enfriando efectivamente la viga fría dentro de la vivienda.

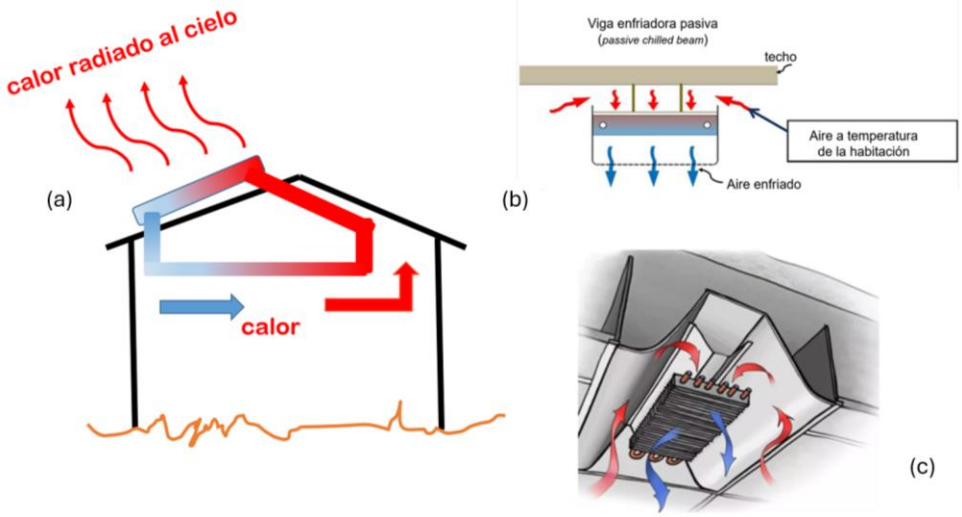


Fig 1. Funcionamiento básico del termosifón enfriador (a), detalle del flujo en la viga fría o enfriadora (b) y esquema de una viga fría integrada por un radiador de tubos aletados (c).

MÉTODO DE CÁLCULO

Una vivienda típica, equipada con un enfriador termosifónico pasivo, como el que se muestra en la Fig. 1, se refrigera en el noroeste de México. Las ecuaciones analíticas empleadas, además de las descritas en [6], se han publicado en [24] y [25]. El sistema analítico da como resultado un modelo matemático presentado en [6], donde se emplearon datos experimentales para su validación. El modelo requiere la estimación de datos iniciales para la viga de enfriamiento, el fluido de trabajo (etanol en este caso) y la temperatura ambiente, y calcula la temperatura ambiente mediante las ecuaciones conocidas, que interpolan la temperatura ambiente mínima una hora antes del amanecer y la temperatura ambiente máxima dos horas después del mediodía. Estas temperaturas ambiente extremas se obtienen de los informes meteorológicos disponibles para la mayor parte del mundo. El modelo está programado para comenzar los cálculos a la medianoche y continuar en cada intervalo de tiempo acordado hasta 24 h después. Cuando los cálculos se repiten varias veces, hasta que las temperaturas de la viga de enfriamiento y la temperatura ambiente al final del día coincidan con las indicadas al principio, se consideran apropiadas para el resto del análisis. Los detalles del funcionamiento del modelo y los valores principales de las constantes se discuten enseguida.

Los datos ambientales de este ejemplo son obtenidos para La Paz, BCS, al noroeste de México, un típico día de verano, el 30 de julio, con aproximadamente temperaturas máximas y mínimas de 36 °C y 30 °C en los horarios indicados. Para este ejercicio, la temperatura inicial de la viga fría fue de 10,5 °C, la del enfriador radiante de 9 °C y la temperatura ambiente de 18,5 °C. La vivienda analizada tenía una superficie de 18 m^2 y una altura de 3,5 m. Por lo tanto, el volumen de aire fue de 63 m^3. El área de radiación del cielo se tomó como 12 m^2 después de varias iteraciones. El calor producido por los dos habitantes se estimó en 80 W cada uno, y los cambios de aire interior se variaron con el fin de obtener varias soluciones para varias cargas de calor. El calor conducido al interior desde el techo y las paredes no se calculó explícitamente porque se encontró que los flujos de calor resultantes eran pequeños en comparación con el calor humano y los cambios de aire. De hecho, al inspeccionar algunas instalaciones, se verificó que las fugas de flujo de aire en los edificios superan con creces cualquier otra carga de calor.

La viga de enfriamiento se calculó como un conjunto de 20 tubos de caldera (pared delgada) de 0,05 m de diámetro y 4 m de largo, unidos en ambos extremos por un colector y colocados en posición horizontal a unos 10 cm del techo interior de la sala, ligeramente inclinados para que el fluido más caliente del interior fluyera preferentemente hacia arriba, hacia el termosifón, que se coloca sobre el techo, ligeramente inclinado para facilitar la circulación del líquido. El colector superior alimentaría el termosifón de refrigeración en su extremo superior, de modo que el fluido más frío fluya de vuelta a la viga de enfriamiento en su colector inferior (Fig.1).

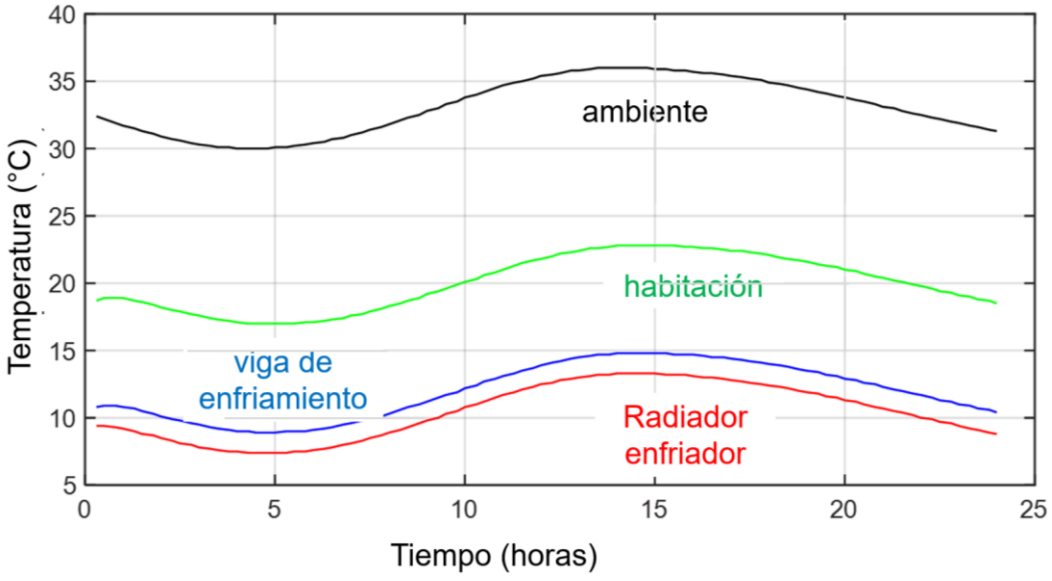


Fig 2. Evolución de las temperaturas para el caso del 30 de julio en La Paz, BCS.

La evolución de las temperaturas principales se aprecia en la Fig 2. La temperatura al interior de la habitación es generalmente unos 13°C menos caliente que el ambiente, aún tras considerar los cambios de aire señalados y la aportación de calor de los ocupantes.

Como ilustra la Fig. 2, el gradiente efectivo de radiación térmica desde el enfriador termosifónico hacia el cielo es de suma importancia. Como se mencionó anteriormente, se debe optimizar la radiación térmica del termosifón de enfriamiento, que depende de materiales capaces

de emitir alta radiación infrarroja incluso bajo calor solar. Afortunadamente, ya existen varias técnicas emergentes para lograr esta función. A medida que la adquisición de energía sostenible cobra impulso, ha aumentado el apoyo global a las nuevas tecnologías y el interés en las nuevas técnicas de control pasivo [26]. La llegada de nuevas superficies de control de radiación asistidas por inteligencia artificial se ha vuelto muy popular, por lo que la investigación científica y tecnológica está en auge. Las aplicaciones tradicionales de la energía solar, como la destilación directa de agua, también están recibiendo mayor atención. Con la ventaja de la radiación térmica avanzada, la adquisición de agua potable se vuelve más accesible y económica [27].

CONCLUSIONES

El presente trabajo ilustra el gran potencial de los enfriadores por termosifón para proporcionar temperaturas de confort en el noroeste mexicano, donde la temperatura ambiente es excesiva durante la mayor parte del año. Esta situación se presenta en muchas otras partes del país, así como en muchos otros países ubicados en o cerca de la zona tropical. La creciente presión demográfica en estas regiones ha resultado en la adopción de enfriadores de refrigeración convencionales de baja eficiencia, a menudo consistentes en aires acondicionados de segunda mano que consumen una gran cantidad de electricidad. El proveedor nacional de electricidad, controlado por el gobierno, ha implementado un complejo conjunto de subsidios y tarifas que no incentivan la mejora energética. Por lo tanto, se pone en peligro el cumplimiento de los objetivos globales de sostenibilidad.

El termosifón de refrigeración que se propone, que consiste en un radiador térmico infrarrojo nocturno acoplado directamente a una viga de enfriamiento en la habitación, es totalmente factible para los técnicos locales y requiere materiales fácilmente disponibles en la mayoría de las localidades de la región. Por lo tanto, su implementación debería ser sencilla. Sin embargo, se debe promover un mayor estudio de materiales y recubrimientos avanzados de radiación térmica para que la opción del termosifón de refrigeración sea cada vez más atractiva.

REFERENCIAS

1. https://worldpopulationreview.com/country-rankings/cost-of-electricity-by-country, consultado el 15 de enero 2025.

2. Precios promedio de electricidad doméstica en México desde diciembre de 2020 hasta diciembre de 2023. https://www.statista.com/statistics/1372387/household-electricity-price-mexico/

3. Enerdata. Mexico energy report. https://www.enerdata.net/estore/country-profiles/mexico.html, consultado el 15 de enero 2025.

4. Air conditioning energy costs, https://energyusecalculator.com/electricity_airconditioner.htm

5. Inspire Clean Energy, https://inspirecleanenergy.com/sustainable_energy,

6. Porta et al (2020) Thermosiphon radiation capacity modelling for the cooling of dwellings, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 21, October 2020, https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100724

7. Adaji, M.U., Adekunle, T.O., Watkins, R., (2020) Overheating and passive cooling interventions on low-income residential houses in Abuja, Nigeria. 11th Windsor Conference: Resilient Comfort, WINDSOR 2020 - Proceedings, pp. 710-739. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85184995075&partnerID=40&md5=2ee7ce4e33ee883bdefd664c845f0560

8. Yusta-García, F., Semidor, C., Bruneau, D. (2017) Passive architecture in very hot climate: A simple and flexible bioclimatic approach for architects Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive, PLEA 2017, https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85080904784&partnerID=40&md5=aac943cee06d588c1a9c4e313ec23750

9. Jorge Lucero-Álvarez (2016) The Effects of Roof and Wall Insulation on the Energy Costs of Low Income Housing in Mexico. Sustainability https://doi.org/10.3390/su8070590

10. Baba, F.M., Ge, H. (2019) Effect of climate change and extreme weather events on the thermal conditions of Canadian multi-unit residential buildings ASHRAE Transactions, 125 https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85095411765&partnerID=40&md5=2954e129f4d6f9ece2aa1c6792f2f851

11. Pablo J. Rosado, Ronnen Levinson (2019) Potential benefits of cool walls on residential and commercial buildings across California and the United States: Conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants, Energy and Buildings, 199, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.028.

12. Mohamad Kharseh; Kadhim AlAmara; Fayez Moutassem; Wlla Mhairat; Ahmad Sakhrieh (2022) Prioritize the Right Renovation Measures in Cooling-Dominated Environments. International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications, ICECTA, doi: 10.1109/ICECTA57148.2022.9990315

13. Mohammad Rezvanpour and Yuxiang Chen (2023) Space Cooling Energy Potential of Domestic Cold Water before Household Consumption in Cold-Climate Regions. *Buildings*, 13(6), 1491; https://doi.org/10.3390/buildings13061491

14. K. Dharmasastha, Ziwen Zhong, Jianlei Niu, Haobin Liang (2023) A comprehensive review of cover-shield-assisted radiant cooling system. Energy and Buildings 291, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113121

15. David J. Sailor, Gina Fagliarone, Tim Hebrink, Deepak Amaripadath (2025) Field evaluation of the efficacy of passive radiative cooling infrastructure: A case study in Phoenix Arizona. Building and Environment https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112226

16. Salmaan Craig, David Harrison, Andrew Cripps & Daniel Knott (2008) BioTRIZ Suggests Radiative Cooling of Buildings Can Be Done Passively by Changing the Structure of Roof Insulation to Let Longwave Infrared Pass. Journal of Bionic Engineering 5 https://doi.org/10.1016/S1672-6529(08)60007-4

17. Roñen Levinson, Hashem Akbari, Joseph C. Reilly (2007) Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. Building and Environment 42, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.005

18. K.F. Mosner-Ansong, D. Duah, S. Amos-Abanyie, A.I. Baffoe-Ashun (2024) Energy efficiency awareness and assertiveness in Sub-Saharan Africa households: The case of Ghana. https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101415

19. Reddit (2025) A world map showing air conditioning statistics showed that only 16% of Mexican households are air-conditioned. https://www.reddit.com/r/mexico/comments/grnt8b/a_world_map_showing_air_conditioning_statistics/?rdt=42508#:~:text=M%C3%A9xico%20as%20a%20country%20is,I%20live%20in%20Chihuahua's%20desert.

20. Muhammad Imam Adli, Mauricio Hernandez, Dalia Patino-Echeverri (2024) Estimating unserved residential space-cooling needs without assuming arbitrary indoor set point temperatures: The case of Mexico. https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101379.

21. M. Jiménez Torres, Alexis Pérez-Fargallo, O. May Tzuc, L. Ricalde Castellanos, A. Bassam, M. Flota-Banuelos, Carlos Rubio-Bellido (2024) Energy poverty under 2M indicator: Feasibility of decrease by using passive techniques in residential buildings of Southeast Mexico. Energy and Buildings 23, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114761.

22. Hua Du, Qi Han, Jun Sun, Bauke de Vries (2024) Analysing interventions for energy-efficient appliances and heating & cooling systems adoption: An agent-based model. Energy for Sustainable Development 80. https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101449.

23. Adams Rackes, Ana Paula Melo, Roberto Lamberts (2016) Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. Applied Energy 174. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.081.

24. Víctor Hugo Hernández Gómez, David Morillón Gálvez (2013) Analytical model for double skin roofs, Applied Thermal Engineering 60. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.057

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA Y APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR PARA GRANJAS VERTICALES EN LA ZMVM

Gilberto Ortiz Romero
José Diego Morales Ramírez
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura UNAM, Cto. de los Posgrados S/N, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México. Email: gil.ortiz7.arq@gmail.com, josediego.morales@gmail.com.

RESUMEN

El alto consumo energético de las Granjas Verticales (GV) se expresa en mayor porcentaje en la iluminación artificial. En la Zona Metropolitana y Valle de México (ZMVM) el recurso de luz natural es significativo y con mayores niveles que en otros países con GV implementadas. Este estudio analiza el potencial del aprovechamiento de luz natural en la ZMVM, cuidando el confort térmico para el crecimiento de cultivos de lechuga. Se desarrolló un prototipo de simulación en 3d y obtener temperatura bulbo seco interior (°C), humedad relativa interior (%) y UDI (% horas iluminancia dentro de confort) para obtener horas dentro de confort para los meses de marzo y junio. Mediante un archivo .epw (Energy Plus Weather) obtenido por interpolación estadística, se realizaron simulaciones en Energy Plus y Radiance por medio de Ladybug Tools. Los datos obtenidos de temperatura y humedad relativa se compararon con datos reales medidos en una ubicación propuesta dentro de la ZMVM para obtener mediante una regresión lineal, ecuación de ajuste para tener datos de simulación más confiables. Un louver ubicado en fachada sur del prototipo reduce en un 87.54% la radiación directa en la GV; reduciendo únicamente en un 10% el UDI durante todo el año. Para el mes de marzo, el louver incrementa en un 36.87% las horas dentro de confort térmico. Para el mes de junio, el louver no provoca cambios en las horas con confort térmico al ubicarse el sol al norte (en la ZMVM).

ABSTRACT

High energy consumption of Vertical Farms (VF) is primarily associated with artificial lighting. In the Mexico City Metropolitan Area (ZMVM), natural daylight availability is significant and at higher levels compared to other countries where VFs have been implemented. This study analyzes the potential of daylight utilization in the ZMVM while maintaining thermal comfort for lettuce cultivation. A 3D simulation prototype was developed to obtain indoor dry-bulb temperature (°C), indoor relative humidity (%), and UDI (Useful Daylight Illuminance, % of hours within the comfort range), to determine comfort hours for the months of March and June. Using an EnergyPlus Weather (.epw) file generated through statistical interpolation, simulations were carried out in EnergyPlus and Radiance via Ladybug Tools. The simulated temperature and relative humidity data were compared with real measurements taken at a proposed site within the ZMVM. A linear regression adjustment equation was derived to achieve more reliable simulation data. A louver installed on the southern façade of the prototype reduced direct solar radiation by 87.54% in the VF, while decreasing UDI by only 10% over the year. In March, the louver increased thermal comfort hours by 36.87%. In June, no significant change in thermal comfort hours was observed due to the solar position being predominantly to the north (in the ZMVM).

Palabras claves: **Consumo energético; Confort; Repisa; Evapotranspiración; Granja Vertical.**

INTRODUCCIÓN

Granjas Verticales (GV) y las grandes ciudades

Para el año 2050, se estima que 7 de cada 10 personas habitarán en las ciudades. Actualmente las ciudades se han convertido en grandes consumidoras de alimentos sin producirlos. El 70% del agua disponible en el mundo se destina para la agricultura a campo abierto, en México se utiliza el 76% del agua disponible. Las GV se han convertido en una de las opciones que las ciudades tienen para satisfacer la suficiencia alimentaria que requieren en grandes ciudades en Japón, Singapur, norte de Europa y Estados Unidos. En la Zona Metropolitana y Valle de México (ZMVM) se han medido niveles de mayor radiación (W/m2, 29 a 51%) y de iluminancia (lux, 16 a 47%) en comparación con ciudades que ya han implementado con éxito GV.

GV. Ventajas y desventajas

Estudios e infraestructura ya implementada ha demostrado que las GV pueden tener grandes ahorros de agua (más del doble para cultivos como la lechuga), sin necesidad de fertilizantes ni pesticidas que ocasionan el mayor impacto ambiental de la agricultura como actividad.

La mayor desventaja de las GV es su consumo energético, particularmente para los sistemas lumínicos artificiales. Benis, Reinhardt et Ferrao

(2017) estiman que una GV totalmente hermética (con sistemas de aire acondicionado e iluminación artificial) puede consumir 11 veces más energía (kWh/m2) que un invernadero y 3 veces más energía que una GV que aproveche la luz natural como recurso para el crecimiento de plantas para consumo humano.

GV. Luz natural y artificial para crecimiento de lechuga

Las GV herméticas poseen sistemas lumínicos artificiales que funcionan de acuerdo con las necesidades de fotoperiodo (hrs) de la planta que se quiera cultivar. Algunos estudios indican que es factible complementar con luz artificial cuando los niveles de luz natural no sean suficientes para el crecimiento de la planta con 220µmol/m2s. Otros estudios indican un rango necesario de 100 a 400 µmol/m2s, con riesgos de quemadura en la planta superando este valor.

Variantes de lechuga y jitomate son los cultivos que presentan facilidades para el crecimiento en GV. Benis, Reinhardt Ferrao (2017) indican un rango de confort de temperatura de 17 a 28°C. Ward, Jans-Singh, Choudhary y Ruchi (2018) mencionan que para el crecimiento de lechuga se requiere un espacio interior con rangos de temperatura de 20 a 25°C y 60 a 80% de humedad relativa. Gavhane et al (2023) usaron el rango de 20.1+/- 3.3°C, 69.6+/-7.6% de humedad relativa y un PPDF (Densidad de Flujo Fotónico Fotosintético) de 200 µmol/m^2s, que equivalen a 10,800 lux. (1 µmol/m^2s ≈54lux). Boros et al (2023) indican que los rangos para el crecimiento de lechuga están diferenciados en 2 etapas: para etapas tempranas delimitan la temperatura a un rango de 18 a 22°C, 85 a 95% de humedad relativa y 50 a 100 µmol/m^2s (2,700 a 10,800 lux); para etapas posteriores delimitan los rangos a 18 a 25°C, 60 a 80% de humedad relativa y 100 a 300 µmol/m^2s (5,800 a 16, 200 lux). Eaton, Shelford, Cole y Mattson (2023) con sistemas HVAC programaron los equipos HVAC para calefacción y refrigeración en 19 y 24°C y manteniendo temperatura en un rango de 50 a 85% de humedad relativa.

Objetivo de las GV para el crecimiento de plantas en espacios interiores

El problema para eficientar el funcionamiento de una GV lo resumen Kreuger, Meeuws y Meeuws (2018): Maximizar el uso de la luz, disminuyendo la radiación directa: evitar la evapotranspiración innecesaria, que es un gasto energético de la planta que puede usar para actividades más productivas como es la generación de micronutrientes, crecimiento y floración. Con este principio se propone un louver en fachada del prototipo en un ventanal orientado a fachada sur, que permita maximizar la luz natural indirecta y minimizando la radiación directa de la planta para evitar la evapotranspiración innecesaria. De manera indirecta al tener menor radiación directa al interior, se presentará disminución de la temperatura al interior.

METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS

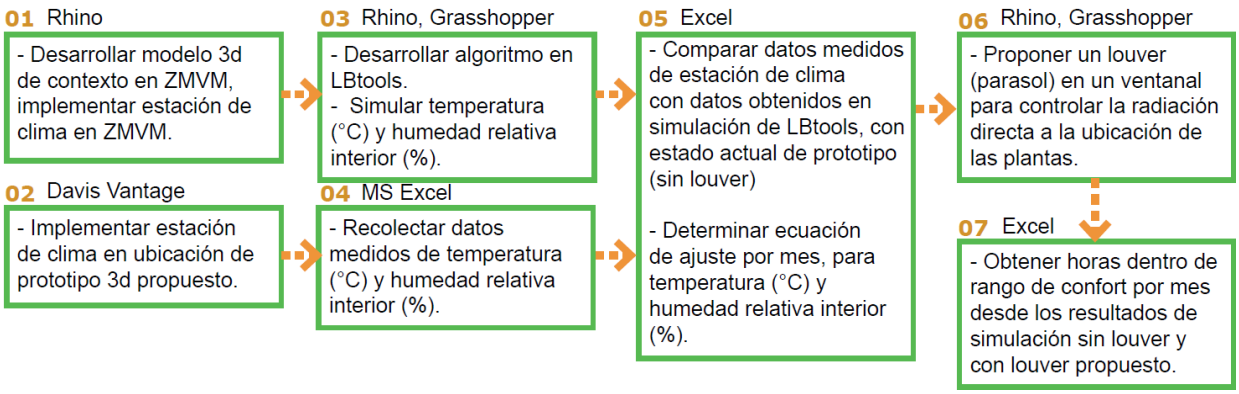
Se propone desarrollar un prototipo 3d con ubicación en la Ciudad de México (CDMX), que forma parte de la ZMVM. En este prototipo 3d se calcularán temperatura interior (°C), humedad relativa interior (%) y el índice UDI (iluminancia útil de luz natural, % horas dentro de rango de confort). Debido a que la ubicación del prototipo está dentro de un contexto urbano y sin vegetación se genera un microclima, por lo que se instalará una estación de clima mca. Davis Vantage Vue para obtener una ecuación de ajuste mediante una regresión lineal de los datos obtenidos de simulación.

El modelo se desarrollará en el programa Rhino 6, para modelar el prototipo propuesto. Mediante los plug-in Grasshopper y Ladybug Tools (LBtools) se creará un algoritmo de cálculo en el que se introducirán las geometrías, propiedades físico-ópticas de elementos constructivos, ubicación y datos de clima para obtener las variables mencionadas (°C, % y UDI). El plug-in de LBtools posee herramientas para traducir la información a programas como Energy Plus (E+) y Radiance (RAD), que son programas con desarrollo de más de 25 años y probados en numerosos estudios y proyectos de investigación.

Al tener los datos ajustados mediante ecuación de ajuste de temperatura interior (°C), humedad relativa interior (%) y UDI (% horas dentro de rango de confort), se obtendrán las horas en las que no es necesario el funcionamiento de equipos de HVAC o sistemas de iluminación artificial. La definición de horas de confort se determinará teniendo de referencia los siguientes rangos de confort:

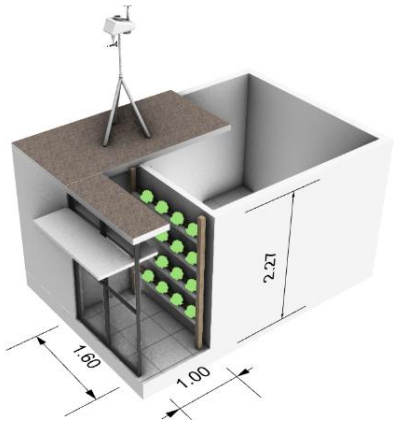
- Temperatura bulbo seco (°C) interior: entre 20 a 25°C.
- Humedad relativa (%) interior: entre 50 a 70%.
- UDI: con niveles de iluminancia entre 2,000 a 20,000 lux.

Las simulaciones de cálculo en Lbtools pueden llegar a exigir un alto recurso de cómputo y tiempo. Benis, Reinhardt y Ferrao (2017) recomiendan realizar simulaciones para 4 días clave del año: 21 de marzo (equinnoccio), 21 de junio (solsticio de verano), 21 de septiembre (equinoccio) y 21 de diciembre (solsticio de invierno). Para el presente trabajo se han monitoreado datos de clima para el mes de marzo y junio de 2025 para obtener la ecuación de ajuste.



1) Diagrama de metodología.

El prototipo propuesto se ubica en la ZMVM, al sur de la CDMX en coordenadas latitud 19° 21′ y longitud -99° 07′. Es un espacio existente de 1.60m (ancho) x 1.00m (profundidad) x 2.27m (alto) con un ventanal de 1.60m (ancho) x 1.00m (profundidad) orientado al sur. Se instaló la estación de clima en la azotea. Es espacio está totalmente cubierto por la losa, en el diagrama se corta por fines ilustrativos.

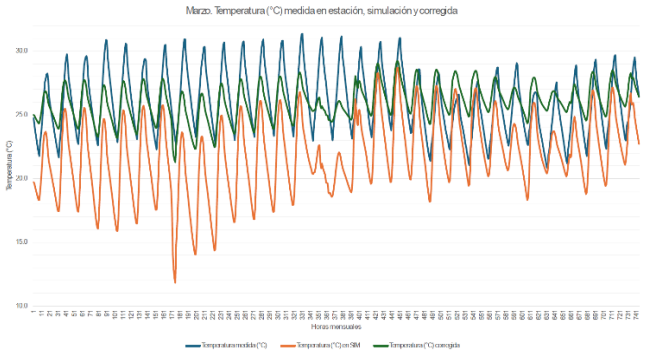


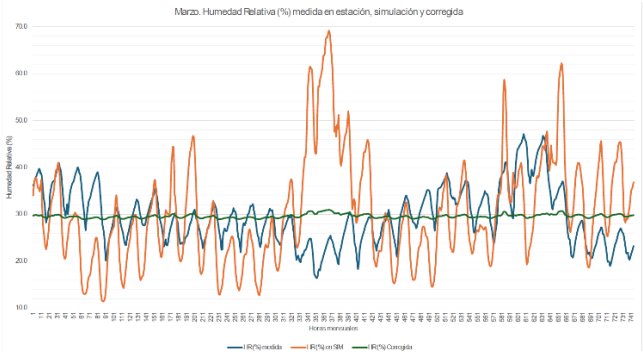
2) Prototipo propuesto

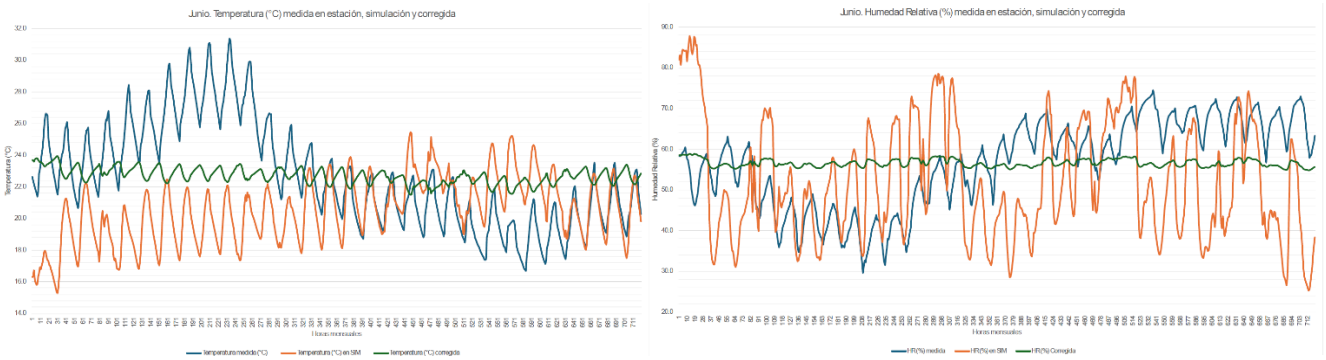
RESULTADOS

Determinar ecuaciones de ajuste mediante regresión lineal

Se obtuvieron ecuaciones para acercar lo más posible los datos de simulación en LBtools con respecto a los datos medidos en la estación de clima Davis Vantage Vue. Las ecuaciones se obtuvieron con el fin de utilizarlas para ajustar resultados de simulación implementando el louver en el modelo 3d. Se realizaron tablas con datos horarios de temperatura (°C) y humedad relativa (%) al interior del prototipo para los meses de Marzo y Junio.







3) Marzo y junio. Gráficas horarias con datos de temperatura (°C) y humedad rel. (%) interior. Medida, simulada y corregida. Datos en azul son medidos, en naranja son datos de simulación y en verde datos ajustado con ecuación.

Las ecuaciones de ajuste resultaron:

- Marzo, temperatura bulbo seco (°C) interior: y=0.47x+15.71
- Marzo, humedad relativa (%) interior: y=0.03x+28.51
- Junio, temperatura bulbo seco (°C) interior: y=-0.24x+27.60
- Junio, humedad relativa (%) interior: y=0.06x+53.17

Integración de louver en ventanal

Para determinar la utilidad de tener un louver horizontal en el prototipo 3d propuesto, se realizó una simulación para determinar las horas con radiación directa en las plantas y el UDI. Esto es debido a que es posible eficientar los niveles de iluminancia al interior del prototipo, sin tener radiación directa en las plantas que activen procesos de evapotranspiración innecesarios o evitar quemaduras en la planta. En el entorno de simulación se generó una red de 41 sensores de iluminancia para calcular el UDI y las horas totales con radiación directa. Se encontró que con un louver con dimensiones de 30cm de ancho al interior y 60cm de ancho al exterior se reducen las horas de radiación directa.

AÑO	UDI (horas)	rad directa (horas)
sin louver	6952	8768
con louver	6261	1093

en red de 41 sensores

Resumen de resultados de simulación para Marzo y Junio

Los datos de simulación se ajustaron a las ecuaciones mencionadas en la sección anterior, para obtener temperatura interior(°C) y humedad relativa (%) con la integración del louver con el fin de determinar su efecto en la temperatura, horas de radiación directa y UDI. Las simulaciones para el mes de marzo y junio presentan los siguientes resultados:

dentro rango de confort (horas)

MARZO	Temp (°C)	Hum. Rel (%)	UDI
sin louver	179	0	27.9
con louver	245	0	24.5

dentro rango de confort (horas)

JUNIO	Temp (°C)	Hum. Rel (%)	UDI
sin louver	720	720	26.1
con louver	720	720	21.2

Para el mes de marzo se tienen 384hrs totales con luz natural, y para el mes de junio se tienen 394hrs. Estos datos totales se obtuvieron del archivo .epw (Energy Plus Weather) generado por interpolación estadística en Meteonorm 8. El criterio fue seleccionar las horas con datos

diferentes de cero para la radiación horizontal global (W/m^2).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Ecuaciones de ajuste

Para el mes de marzo, existe una tendencia en el algoritmo de simulación de indicar mediciones menores de temperatura y que se ajusta a lo largo de los 744 días del mes, en un rango menor medido con respecto a las mediciones reales.

	Temp_°C Davis	Temp_°C SIM	Temp Corregida
Media	26.0	21.8	26.0
Desv. Estándar	2.384917972	2.944269871	1.385736961
Min	20.8	11.8	21.3
Max	31.4	28.7	29.2
P25	24.075	19.8119565	25.04150413
P75	27.8	23.926573	26.97807123

En cuanto a humedad relativa (%), la variación es significativa en la parte intermedia de los datos de simulación y sobretodo defieren los niveles generales de los datos medidos. Esto causa una ecuación equilibrada, absorbiendo los altos rangos de los datos medidos y de simulación.

	HR_% Davis	HR_% SIM	Temp Corregida
Media	29.6	30.6	29.6
Desv. Estándar	6.066001691	11.422154	0.404402705
Min	16.4	11.4	28.9
Max	47.2	69.2	31.0
P25	25.05	22.48435325	29.31171921
P75	33.375	37.385855	29.83930863

Para el mes de junio, la variación de datos medidos y simulados tanto de temperatura (°C) como humedad rel. (%) genera ecuaciones equilibradas de rango limitado, en comparación con los rangos de los datos medidos y simulados.

	Temp_°C Davis	Temp_°C SIM	Temp Corregida
Media	22.7	20.5	22.7
Desv. Estándar	3.282419718	2.040779549	0.4898042
Min	16.7	15.3	21.5
Max	31.4	25.5	23.9
P25	20.15	19.00020725	22.3353491
P75	24.975	21.9616235	23.04444661

	Temp_°C Davis	Temp_°C SIM	Temp Corregida
Media	56.6	52.2	56.6
Desv. Estándar	10.76447793	14.43826273	0.934122409
Min	29.6	25.2	54.8
Max	74.5	87.8	58.9
P25	47.56875	41.18614875	55.84291994
P75	65.5125	65.0193695	57.38487453

Datos obtenidos para Marzo y Junio

Se iniciaron las mediciones con estación de clima en la temporada en la que el sol tiende a alturas solares de mayor ángulo. Para el periodo de mediados de mayo a mediados de agosto en la ubicación del prototipo, los rayos solares no entran en fachadas orientadas al sur. Esto provoca menos luz directa para convertir en luz difusa por medio del louver. Se espera que en meses entre Septiembre y Febrero esta tendencia se revierta y sea el control de radiación directa en el interior el que incremente.

Para el mes de marzo, el louver provoca un aumento de horas con temperatura de confort en un 36.87%. En la ZMVM, este mes es el más seco del año y no se logran horas dentro del confort propuesto para humedad relativa. Sólo disminuye en 3.4 hrs el rango de confort para iluminancia.

Para el mes de junio, el louver no provoca cambios en los rangos de confort obtenidos al no tener luz directa que reflejar al interior debido a que el sol se queda al norte sin llevar radiación a la fachada sur. Disminuye en 4.9 hrs el confort lumínico dentro del rango propuesto.

CONCLUSIONES

La variabilidad climática es un factor importante para pronosticar resultados en espacios interiores ubicados en entornos urbanos. Será importante estandarizar procesos para uniformizar datos de archivos .epw en los que se facilite identificar la tendencia del clima con respecto a los datos clasificados dentro de las normales climatológicas. Se monitoreará en la evolución de este estudio durante el año esta correlación para facilitar este proceso.

La implementación de un louver para control solar es un elemento pasivo valioso para hacer más eficiente la posible implementación de sistemas activos como HVAC o sistemas de iluminación artificial. Balancear las dimensiones del louver en su relación con el clima durante el año permitirá valores más favorables que un louver con dimensiones fijas todo el año.

REFERENCIAS

Antonanzas,J; Quinn, J.C. (2021). *Net environmental impact of the FV industry from 2000-2025*. Colorado, Estados Unidos: Journal of Cleaner Production. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621020096?via%3Dihub [2024, 13 de Mayo].

ASHRAE Research (2001). *ASHRAE Fundamentals SI Edition*. ASHRAE. Georgia, Estados Unidos.

ASHRAE Research (2021). *2021 ASHRAE Handbook Fundamentals SI Edition*. ASHRAE. Georgia, Estados Unidos.

Benis, Khadija; Reinhart, Christoph; Ferrao, Paulo (2017). *Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts*. Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal; MIT, Boston EU: Journal of Cleaner Production 147. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617301452?via%3Dihub [2024, 4 de Mayo].

Bugbee, Bruce; [Apogee Instruments Inc] (2016). *Conversion PPFD to Lux.* Disponible en: https://www-apogeeinstruments-com.translate.goog/conversion-ppfd-to-lux/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=rq [2024, 10 de Octubre].

Bugbee, Bruce; [Apogee Instruments Inc] (2019). *PAR, PPF, PPFD & PFD explained.* Disponible en: https://www-apogeeinstruments-com.translate.goog/original-x-quantum-support/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=rq#specifications [2024, 10 de Octubre].

CCA (2021). *Central de Abasto de la Ciudad de México (CEDA): Comprensión de la pérdida y el desperdicio de alimentos en el mercado más grande del mundo*. Comission for Environmental Cooperation. Disponible en: http://www.cec.org/publications/central-de-abasto-mexico-city-ceda/ [2024, 20 de Agosto].

Ellen McArthur Foundation (2019). *Ciudades y Economía Circular de los Alimentos*. Ellen MCArthur Foundation. Disponible en: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/ciudades-y-economia-circular-para-la-alimentacion [2024, 9 de Mayo].

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO (2023). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum*. Roma, Italia: FAO. Disponible en: https://doi.org/10.4060/cc3017en [2024, 09 de Mayo].

Fthenakis, V; Raugei, M (2017). *Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems.* Nueva York, Estados Unidos: Photovoltaic Environmental Research Center. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423362000070?via%3Dihub [2024, 13 de Mayo].

García, Enriqueta (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.* UNAM. Serie Libros. Disponible en: http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83 [2024, 10 de Septiembre].

Goto, Eiji. (2016). *Production of Pharmaceuticals in a specially designed Plant Factory*. Matsudo, Japón:Universidad de Chiba . Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128017753000159?via%3Dihub [2024, 23 de Abril].

Hausfather, Zeke (2018). *Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change.* Carbon Brief. Disponible en: https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/ [2024, 29 de Septiembre].

IIPC (2023). *Climate Change 2023 Synthesis Report.* IPCC, 2023:. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/ [2024, 12 de Octubre].

INEGI (sin esp). *Información de México para niños*. Disponible en: https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx [2024, 20 de Octubre].

INEGI, Instituto Nacional de Salud Pública, Secretaría de Salud (2018). *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2018*. Ciudad de México, México: INEGI. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/ensanut/2018/ [2024, 4 de Mayo].

Kreuger, Marc; Meeuws, Lianne; Meeuws, Gertjan (2018). *Total Indoor Farming Concepts for Large-Scale Production*. Singapur: Smart Plant Factory. The next generation indoor vertical farms. Springer Nature Singapore. Disponible en: https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-1065-2 [2024, 4 de Mayo].

Liebman-Pelaez, Mariana; Kongoletos, Johnathan; Norford, Leslie K.; Reinhart, Christoph (2021). *Validation of a building energy model of a hydroponic container farm and its application in urban design*. Boston, EU: Energy and Buildings 250. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877882100476X?via%3Dihub [2024, 4 de Mayo].

Li, Lanyu; Chong, Clive; Wang, Chi-Wa; Wang, Xiaonan (2020). *A decision support framework for the design and operation of Sustainable Urban Farms.* Singapur: Universidad Nacional de Singapur; Journal of Cleaner Production 268. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620319752?via%3Dihub [2024, 23 de Abril].

Lorenzo, O. G., Suárez-García, A., Peña, D. G., Fuente, M. G., & Granados-López, D. (2022). A Low-Cost Luxometer Benchmark for Solar Illuminance Measurement System Based on the Internet of Things. Sensors, 22(19), 7107.

Martin, Michael; Mugahid, Elnour; Cabrero Siñol, Aina (2023). *Environmental life cycle assessment of a large-scale commercial vertical farm*. Estocolmo, Suecia ; KTH Royal Institute of Technology. Disponible en: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352550923001525 [2024, 23 de Abril].

Ng, E. Y. K., & Foo, C. K. (2020). *Study of solar based vertical farming systems with raytraced daylighting analysis and visualizations*. Carpathian Journal of Food Science & Technology, 12(4).

Noorzai, E., Bakmohammadi, P., & Garmaroudi, M. A. (2023). *Optimizing daylight, energy and occupant comfort performance of classrooms with photovoltaic integrated vertical shading devices*. Architectural Engineering and Design Management, 19(4), 394-418. Disponible en: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452007.2022.2080173 [2024, 28 de Agosto].

ONU (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023*. Nueva York, EU; ONU. Disponible en: https://mexico.un.org/es/239254-informe-sobre-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible-2023-edici%C3%B3n-especial [2024, 9 de Mayo].

Orsini, F; Pennisi, G; Zulfiqar, F; Gianquinto, G (2020). *Sustainable Use of Resource in Plant Factories with artificial lighting (PFALS)*. Boloña, Italia. Disponible en: https://www.pubhort.org/ejhs/85/5/1/index.htm [2024, 23 de Abril].

Rojas Martínez, Agustín; Torres Torres, Felipe (2019). *Suelo agrícola en México: retrospección y retrospectiva para la seguridad alimentaria*. Ciudad de México, México; Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía vol 9 núm 3. Disponible en: https://rde.inegi.org.mx/index.php/2019/01/25/suelo-agricola-en-mexico-retrospeccion-prospectiva-la-seguridad-alimentaria/ [2024, 9 de mayo].

Rojas Mendoza, José Alberto (1992). *Obtención de propiedades ópticas, térmicas y físicas de algunos materiales de la construcción*. Instituto de Investigaciones en Materiales, Laboratorio de Energía Solar, Universidad Nacional Autónoma de México.

Salem Bahdad, A. A.; Syed Fadzil, S. F.; Onubi, H. O. & BenLasod, S. A. (2022). *Balancing daylight in office spaces with respect to the indoor thermal environment through optimization of light shelves design parameters in the tropics.* Indoor and Built Environment, 31(7), 1963-1985. Disponible en: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1420326X221086537 [2024, 24 de Agosto]

SEDATU,CONAPO,INEGI (2020). *Metrópolis de México 2020*. Ciudad de México, México: SEDATU. Disponible en: https://www.gob.mx/sedatu/documentos/metropolis-de-mexico-2020?state=published [2024, 4 de Mayo].

Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (2024). *Mercados Nacionales Frutas y Hortalizas*. Secretaría de Economía. Ciudad de México, México. Disponible en: http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/Home.aspx?opcion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaFrutasYHortalizas.aspx?SubOpcion=4%7C0 [2024, 20 de Agosto].

Sustainable Energy Research Group. University of Southampton (2012). *Manual. CCWorldWeatherGen. Climate change world weather file generator.* University of Southampton. Energy and Climate Change Division. Disponible en: https://energy.soton.ac.uk/climate-change-world-weather-file-generator-for-world-wide-weather-data-ccworldweathergen/ [2024, 20 de Agosto].

von Zabeltitz, Chr. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Springer.

Ward, Rebecca; Jans-Singh, Melaine; Choudhary, Ruchi (2018). *Quantifying the Environmental and Energy Benefits of Food Growth in the Urban Environment*. Singapur: Smart Plant Factory. The next generation indoor vertical farms. Springer Nature Singapore. Disponible en: https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-1065-2 [2024, 4 de Mayo].

Zou, H.; Li, Chunzhe.; Zhang, A.; Zhang, X.,; Chen, X.; Wang, F., Yan, Y.; Zhang, S. (2024). *Light environment control for reducing energy loss and increasing crop yield in plant factories*. Solar Energy Science Direct, 268. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X23009155?via%3Dihub [2024, 26 de Agosto]

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS ECONÓMICO POR LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN TARIFAS GDMTH

Mariana Hernández-Escalante[1*], Andrés Salazar-Texco, Elizabeth González-Escamilla, Rogelio Pérez-Cadena, Cristian Sarmiento-Gómez, Brandon A Vergara-Cruz

[1]Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860, Tolcayuca, Hidalgo, México, ***mkhernandez@upmh.edu.mx**

RESUMEN

La tarifa GDMTH (Gran Demanda en Media Tensión Horaria) es un esquema tarifario aplicado a consumidores industriales con altos niveles de demanda y consumo eléctrico en México. El alto consumo en las tarifas eléctricas dentro del sector industrial es relevante, puesto que ese sector depende de maquinaria especializada e iluminación, factores que influyen directamente en el importe total a pagar de cada usuario, esto va en función de las actividades que realiza la empresa, impactando directamente al costo de la energía. En el presente trabajo, se realizó un análisis económico por la implementación de sistemas de generación distribuida fotovoltaica en la tarifa GDMTH, a partir de un caso de estudio para la industria manufacturera en el Estado de Hidalgo en el municipio de San Agustín Tlaxiaca. El análisis se realizó a partir de la identificación de la tarifa aplicable, así como los horarios de demanda y consumo. Además, se analizaron los recibos eléctricos proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con el fin de tener claridad sobre la situación actual y tener un punto de comparación respecto al análisis. Se realiza la propuesta de un sistema fotovoltaico que no modifique su factor de potencia, esta situación se da a través de la compensación de reactivos, lo que significa que este análisis es exclusivo del consumo particular de la planta y su relación en los horarios de operación, por lo que se propone un sistema PV de 400 kW, generando un ahorro mensual promedio de $189,820.66. El análisis permite identificar el área de oportunidad económica para la industria, contextualizar al usuario e impulsar la adopción de tecnologías solares correspondiente al sector de las energías renovables; con el fin de mejorar el bienestar del sector empresarial de México dentro de un panorama previsiblemente sustentable.

Palabras claves: GDMTH, Generación distribuida, Consumo, Factor de potencia, Fotovoltaico.

ABSTRACT

The GDMTH tariff (High Demand in Medium Voltage with Hourly Differentiation) is applied to industrial consumers in Mexico with high electricity demand and consumption. This sector's dependence on specialized machinery and lighting makes energy costs particularly significant, as these factors directly impact on the total amount paid, depending on each company's activities. This study presents an economic analysis of implementing distributed photovoltaic (PV) generation systems under the GDMTH tariff, using a case study from a manufacturing facility in San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo. The analysis included identifying the applicable tariff and demand schedules, as well as reviewing electricity bills provided by the Federal Electricity Commission (CFE) to assess the current situation and establish a comparison baseline. A 400 kW PV system is proposed, designed to avoid changes to the power factor through reactive power compensation. This ensures that the analysis focuses exclusively on the plant's specific energy consumption during operational hours. The proposed system is estimated to generate average monthly savings of $189,820.66 MXN. This analysis highlights a significant economic opportunity for the industrial sector, provides users with a clear understanding of their energy situation, and promotes the adoption of solar technologies within the renewable energy framework. The goal is to support the sustainable development of Mexico's industrial sector.

Keywords: GDMTH, Distributed Generation, Consumption, Power Factor, Photovoltaic.

Introducción

Hoy día el uso eficiente de la energía exige un análisis profundo de aquellos organismos que consumen altas cantidades de energía (Aparicio, 2022). La Comisión Federal de Electricidad (CFE) subdivide la distribución de la energía en diferentes tarifas, de las cuales se clasifican según el consumo, demanda y su aplicación o servicio (Alanís-Navarro, Alanís-Cantú, Castillo-Tellez, & Lavín-Delgado, 2023). La industria manufacturera se caracteriza por tener niveles de consumos altos, y cuando la demanda sea igual o mayor a 100kW, se aplicarán las tarifas correspondientes a la GDMTH (CFE, s.f.) como en este caso de estudio.

Diversos autores han realizado propuestas para mejora de la calidad de la energía en este tipo de tarifas, las cuales incluyen desde diseño de sistemas de control (Murillo, 2023) hasta Sistemas Fotovoltaicos Interconectados (SFVI) a la red, así como de Generación Distribuida (GD) (Gutierrez, Ruiz, & Escamilla, 2021; Gutierrez, Escamilla, Ruiz, & Cruz, 2022; Rodríguez-Pérez, 2024). La implementación de sistemas fotovoltaicos se presenta como una opción conveniente a cada una de las empresas que requieran o pretendan una mejora continua dentro de sus fábricas, y así poder generar un bienestar energético para los mismos consumidores, desde lo económico, social y ambiental, y de esta manera cubrir las necesidades y requerimientos que se necesitan en este sector, al posicionarse como una tendencia emergente en la optimización de recursos energéticos (Salazar, 2018). Es necesario recalcar que la instalación de sistemas fotovoltaicos para industria es una práctica cada vez más común en la actualidad, por lo que genera una reducción de costos energéticos, menor impacto ambiental, así como contribución al desarrollo sostenible (Torres & Gonzalo, 2024). En la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes para optimizar el uso de la energía, conforme a (Barrantes, 2020) el desarrollo de análisis económicos se posiciona como una herramienta clave para la identificación de medidas u oportunidades de ahorro susceptibles a la implementación. Dentro de este trabajo se propone un enfoque basado en la tarifa GDMTH con el fin de identificar el impacto económico que tendrá la implementación de un sistema fotovoltaico sobre el recibo de Energía con el fin de reducir costos y promover la sostenibilidad en el sector industrial.

Metodología

Se desarrolló un análisis económico para la implementación de sistemas de generación distribuida fotovoltaica para usuarios con suministro en media tensión y tarifa GDMTH, con la finalidad de identificar oportunidades de ahorro mediante la diversificación de fuentes alternas de energía para la industria con altos niveles de demanda y consumo eléctrico en México. Primero fue necesario identificar la tarifa aplicable, analizar los recibos proporcionados por CFE con la finalidad de tener claridad sobre la situación actual, y así se realizó la propuesta de un SFVI. Con esta información se logró realizar una comparación económica y así conocer el ahorro total por la implementación de un Sistema Fotovoltaico.

Tarifa Contratada

Lo primero que se identificó fue la tarifa a la que estaba asignada la empresa, debido a que la tensión de suministro se encuentra en niveles entre 1 kV y 35 kV a la empresa le corresponde la tarifa GDMTH. Esta tarifa aplica servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda igual o mayor a 100 kW/mes (CFE, s.f.). Estas tarifas cambian con respecto a la región tarifaria y los cargos del suministro básico corresponden a cargos por Transmisión, Distribución, Operación del CENACE (Centro Nacional de Control de Energía), Operación del Suministro Básico, Servicios Conexos No MEM, Energía y Capacidad (CFE, s.f.). Es importante mencionar que el costo de la energía es variable a lo largo del día, se establecen los periodos base, intermedia y punta por sistema interconectado y temporada del año, con el fin de realizar un cargo diferenciado según el periodo de tiempo en el que el costo de generación es más alto, además, la tarifa cuenta con una medición de demanda lo que representa un costo de capacidad con base a su demanda máxima por bloque horario.

Análisis de recibos CFE

A continuación, se presenta la metodología que fue empleada para caracterizar el estado actual de la empresa en relación con su estructura tarifaria. Esta se basó en el enfoque metodológico propuesto por CFE, y el cual incorporó el análisis tarifario como herramienta principal. Dicho análisis consistió en examinar y evaluar la tarifa eléctrica, así como los patrones actuales de demanda y consumo de energía de la empresa. Lo anterior permitió verificar de manera precisa los costos asociados actuales al servicio eléctrico, con el objetivo de identificar posibles áreas de optimización económica.

Identificación de conceptos de cobro en la empresa. Una vez reconocida la tarifa en la que se encuentra la empresa fue necesario realizar un desglose de los conceptos de cobro por parte del suministrador de servicios básicos (CFE) a la empresa, esto se realiza mediante un análisis directo del recibo de energía que emite la CFE para interpretar y analizar el comportamiento del consumo de energía a sus costos asociados, así como evaluación de la demanda y los criterios aplicados para los cobros que se realizan para este rubro.

1.- Identificar las cuotas aplicables de acuerdo lo estipulado por la CFE.

Para verificar el cobro que se realizar en el recibo fue importante validar cada uno de los cargos aplicados la tarifa GDMTH y que se encuentran publicados en la página de la CFE.

Como se muestra en la figura 1 se encontraron 6 cargos aplicables al recibo, el primero es el cargo fijo aplicable independiente del consumo de energía expresado en $/mes, el cargo variable relacionados al consumo de energía expresados en $/kWh en los diferentes periodos horarios, las cuotas aplicables por la demanda divididos en capacidad y distribución dados en $/kW, todos los conceptos expresan en pesos mexicanos al mes ya que la tarifa cubre un periodo de 30 o 31 días según sea el caso.

Tarifa	Descripción	Int. Horario	Cargo	Unidades	MAR-25
GDMTH	Gran demanda en media tensión horaria	-	Fijo	$/mes	308.10
		Base	Variable (Energía)	$/kWh	1.1156
		Intermedia	Variable (Energía)	$/kWh	2.0069
		Punta	Variable (Energía)	$/kWh	2.2672
		-	Distribución	$/kW	155.81
		-	Capacidad	$/kW	418.39

Figura 1. Cargos aplicables al recibo de CFE. Fuente: (CFE, s.f.)

Una vez identificadas las cuotas aplicables y donde se encuentran publicados se procedió a realizar el desglose del importe a pagar para realizar en análisis del consumo energético y poder realizar las comparaciones una vez implementado el SFVI.

2. Verificar el importe a pagar en el periodo de facturación.

Para determinar los conceptos cobrados se revisó el consumo y la demanda, así como el factor de potencia que vienen marcados en el recibo como se muestra en la figura 2, y aplicando los criterios establecidos por la CFE se procedió a realizar el recalculo como se explica a continuación.

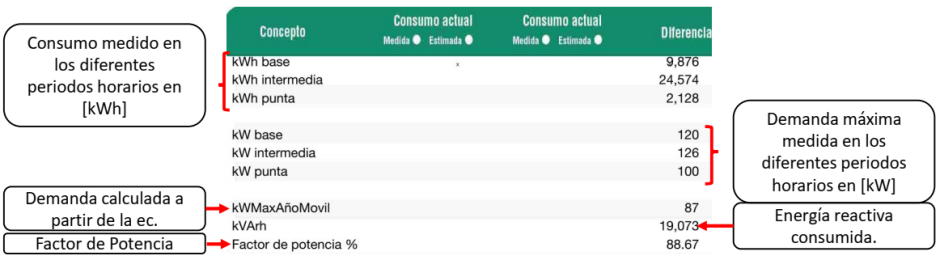


Figura 2. Conceptos recibo eléctrico CFE.

Recalcular el importe a pagar marcado en el recibo de facturación permitió verificar que los cargos sean correctos, así como entender de forma clara cuales son los conceptos que la CFE cobra. La figura 3, muestra un ejemplo de cómo aparece el desglose del importe a pagar en un recibo de CFE. Los conceptos que generan cargos son: el cargo fijo, energía y el factor de potencia que puede generar un recargo por un factor de potencia menor al 90% o una bonificación cuando el factor de potencia sea mayor al 90% según sea el caso.



Figura 3. Ejemplo de desglose del importe a pagar en periodo de facturación.

Cargo por Energía: El importe a pagar marcado como Energía abarca tres conceptos básicos el costo por la energía total determinado como se muestra en las ecuaciones (1), (2) y (3), se consideran los consumos en los tres periodos base, intermedia y punta. Como ya se ha mencionado el precio varía en los diferentes periodos como se muestra en la figura 1.

$$(consumo\ en\ horario\ base\ kWh)\left(\frac{\$}{kWh}\right) = Costo\ de\ la\ energía\ en\ horario\ base\ (\$) \quad (1)$$

$$(consumo\ en\ horario\ intermedio\ kWh)\left(\frac{\$}{kWh}\right) = Costo\ de\ la\ energía\ en\ horario\ intermedio\ (\$) \quad (2)$$

$$(consumo\ en\ horario\ punta\ kWh)\left(\frac{\$}{kWh}\right) = \cos t\ o\ de\ la\ energía\ en\ horario\ punta\ (\$) \quad (3)$$

El cargo por Energía también se incluye el costo por demanda de acuerdo con el Anexo Único del Acuerdo A/158/2024 el criterio de aplicación dice que la demanda máxima a la que se deberán aplicar los cargos por capacidad y distribución expresados en $/kW-mes será la mínima entre los valores que se definen a continuación ecuación (4) para capacidad y (5) para distribución:

Capacidad

$$mín\left\{D_{\max punta}, \left[\frac{Q_{mensual}}{24 \cdot d \cdot FC}\right]\right\} \quad (4)$$

Donde: $D_{\max punta}$= demanda máxima en el periodo punta en kW

Distribución

$$mín\left\{D_{\max mensual}, \left[\frac{Q_{mensual}}{24 \cdot d \cdot FC}\right]\right\} \quad (5)$$

Donde: $D_{\max mensual}$= demanda máxima en los 3 periodos horarios en kW

Tanto para capacidad como para distribución las variables Q mensual, d y FC son los mismos y se pueden observar en la ecuación (6).

$$Q_{mensual} = kWh_{base} + kWh_{intermedia} + kWh_{punta} \quad (6)$$

d =días del periodo de facturación

FC=Factor de carga igual a 0.57

También se aplica un cargo por factor de potencia, está representa que tan eficiente se está utilizando la energía en la instalación de forma de trabajo útil. CFE puede aplicar un porcentaje de recargo cuando el FP<90% o en su caso una bonificación cuando el FP>90%. Para determinar el porcentaje de recargo o bonificación aplicado a los cobros por Cargo Fijo y Energía, se determina a partir de las siguientes ecuaciones (7) y (8):

$$\%\ de\ rec\arg o = \frac{3}{5}\left[\left(\frac{90}{FP}\right) - 1\right] \cdot 100 \quad (7)$$

$$\%\ de\ bonificación = \frac{1}{4}\left[1 - \left(\frac{90}{FP}\right)\right] \cdot 100 \quad (8)$$

Propuesta de SFVI

Se realizó la propuesta para la implementación de un SFVI, donde se analizó primero la viabilidad de operar bajo el esquema de GD conforme al marco normativo vigente y posteriormente el dimensionado adecuado del sistema. Lo anterior se planteó como una estrategia de ahorro económico para la empresa, ya que este tipo de sistemas permiten reducir significativamente los costos asociados al suministro eléctrico.

Análisis de la Generación Distribuida. Con base en el análisis de todos los parámetros del recibo eléctrico, y los cobros realizados por CFE, se procedió a verificar si era posible tener una instalación de GD a partir de un SFVI. Para ello, fue indispensable revisar tanto la instrumentación requerida como el marco regulatorio vigente en materia de GD (CRE , 2017) establecido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), considerando que estas instalaciones deben cumplir con las siguientes características:

1. Cumplir con lo establecido en la resolución de la CRE sobre los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales de la GD (DOF, 2017).
2. La central debe tener una capacidad menor a 0.5 MW. Esto quiere decir, cumplir con los lineamientos del Manual de interconexión de centrales de generación (DOF, 2016).

Dimensionado del SFVI. Para llevar a cabo el dimensionado del SFVI para la tarifa GDMTH fue necesario retomar el análisis del consumo de energía intermedio promedio mensual en el período Nov – Dic 2023 a Nov – Dic 2024. En este caso, la energía consumida en el periodo intermedio cobra mayor relevancia, ya que corresponde al horario en el que se encuentra en operación las principales cargas eléctricas y el sistema fotovoltaico inyectará energía a la red. A partir de esta información se estimó el consumo diario promedio dando a lugar al cálculo de las dimensiones del Generador Solar Fotovoltaico Interconectado; estudiando las condiciones climatológicas promedio del lugar como: temperatura mínima, máxima e irradiación solar promedio diaria. Para el cálculo de la potencia del generador fotovoltaico se utiliza la siguiente ecuación (9):

$$P_{Gfv} = \frac{kWh_{Intermedia}}{(H.S.P.) \cdot \eta} \quad (9)$$

Donde, $kWh_{intermedia}$: Consumo de energía intermedio

H.S.P.: Horas sol pico

η : Eficiencia del sistema

P_{Gfv}: Potencia del generador fotovoltaico

El estudio consideró un 20% de pérdidas de energía debido a caída de tensión en conductores, eficiencia del inversor, por temperatura máxima registrada, por sombreado entre otras. El generador propuesto nos otorgó la cantidad de energía mensual por período inyectada a la red el cual impactó al consumo de energía en el horario intermedia, pudiendo realizar un análisis económico de los beneficios de diseñar un sistema solar fotovoltaico interconectado para la tarifa GDMTH.

Recalculo de costos teniendo SFVI y ahorros generados

Por último, se realizó un recalculo de los costos asociados considerando la implementación del SFVI, para realizar la evaluación se consideró la generación de energía proporcionado por el SFVI y calculado la diferencia con el consumo promedio mensual en horario intermedio en el periodo Nov – Dic 2023 a Nov – Dic 2024 para obtener la energía que se estará pagando a la CFE, ecuación (10), también se realizó el cálculo de la nueva demanda a la que se le estará aplicando el nuevo cargo por capacidad y distribución mediante las ecuaciones 4 y 5 considerando el consumo mensual como la diferencia antes mencionada.

$$Energía\ por\ pagar = (consumo\ promedio\ de\ energía\ \ total\ en\ kWh) - (energía\ promedio\ generado\ por\ el\ SFVI\ en\ kWh) \quad (10)$$

Resultados

Al realizar el análisis de los recibos de facturación se determinó un precio promedio de 3.6 $/kWh para la energía y un consumo mensual promedio de 99,043 kWh, los cargos reportados en los recibos son similares al evaluado, es decir, no existen discrepancias en lo calculado y lo reportado por CFE. Se calcularon también los conceptos de capacidad y distribución, los cuales fueron 200 kW y 235 kW respectivamente a estos se les aplicaron los cargos correspondientes por cada kW, en este caso fueron de 158.21 $/kW para distribución y 409.14 $/kW. Además, también se analizó el factor de potencia que se tiene en la instalación teniendo un valor de 86.3 % en promedio y la cual genera un recargo de 2.57 % de cargo adicional. Es importante mencionar que el SFVI no modifica en ninguna forma al factor de potencia de tal manera que seguirá siendo la misma aún después de la implementación del SFVI.

El dimensionado fotovoltaico consideró un análisis del consumo en el horario intermedio en la factura de energía eléctrica obteniendo un promedio mensual de 67,032 kWh para el período de Nov-Dic 2023 – 2024, se obtuvo el generador fotovoltaico con una potencia de 400 kW_p mediante el análisis climatológico de San Agustín Tlaxiaca, Hgo, con una eficiencia del sistema de 80% y con una irradiación de 5.5 HSP. Considerando que se tiene un consumo total de 99,043 kWh en los tres periodos horarios, la generación del sistema fotovoltaico permite disminuir el consumo de energía a 31,882 kWh mensualmente. Además, como se mencionó el tipo de tarifa en la cual se encuentra la empresa también realiza un cobro por demanda (kW) en dos conceptos capacidad y distribución, utilizando las ecuaciones (4) y (5) se calcularon los nuevos valores para el cobro de la demanda, esto permitió una reducción de 200 kW a 77 kW por demanda y de 235 kW a 77 kW para distribución.

En la Tabla 1. Se presenta el análisis económico, en el cual se comparan los importes a pagar en el estado actual y con la implementación del sistema fotovoltaico. Los resultados evidencian un ahorro significativo, ya que, de adoptarse esta tecnología, la empresa podría reducir sus gastos mensuales en aproximadamente $189,820.66 lo que representa un 53% de ahorro económico en promedio.

Tabla 1. Comparación del importe a pagar del Estado Actual y cuando se implementa el sistema fotovoltaico.

Importe	Estado actual	Con implementación del SFVI
Cargo fijo	$360.01	$360.01
Energía	$344,283.24	$158,989
Recargo por Fp en pesos (MXN)	$7,784.22	$4089
Cargo por derecho de alumbrado publico	$4,551.41	$3,268.76
IVA	$48,548.35	$163,438.01
Total	$356,527.43	$166,706.77
Ahorro	**$0.00**	**$189,820.66**

Fuente: Elaboración propia.

Conclusión

El análisis realizado en esta investigación demuestra que la implementación de un sistema fotovoltaico bajo el esquema tarifario GDMTH representa una alternativa económicamente viable para el sector industrial. En este caso de estudio, la propuesta realizada de un sistema fotovoltaico interconectado bajo el esquema de generación distribuida para las condiciones de consumo y demanda de la empresa puntualizan un ahorro mensual de 189,820 $ equivalente a un 53%, lo que refleja el potencial de la generación distribuida para reducir los costos por concepto de energía eléctrica. Así mismo, este tipo de proyectos contribuye a fomentar la transición hacia energías renovables, generando también beneficios ambientales que promueven un desarrollo energético más sostenible en México.

REFERENCIAS

Alanís-Navarro, J., Alanís-Cantú, R., Castillo-Tellez, M., & Lavín-Delgado, J. (2023). Análisis estadístico de la influencia de la demanda de potencia en tarifas de media tensión sobre la facturación final. *Revista Internacional de Investigación e innovación Tecnológica*, 19.

Aparicio, M. (2022). *Análisis comparativo de estrategias de uso eficiente y ahorro en energía entre las certificaciones CASA, LEED, BREEAM y EDGE para viviendas multifamiliares*. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/efc86f54-7e84-48c9-81b8-183647dd56c7/content

Barrantes, F. D. (2020). *DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN.* Obtenido de https://www.ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial128.pdf

CFE. (s.f.). *Tarifa GDMTH.* Obtenido de Comisión Federal de Electricidad: Negocio: https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx

CRE . (2017). *Generación Distribuida.* Obtenido de https://www.gob.mx/cre/articulos/generacion-distribuida-102284

DOF. (2016). *ACUERDO por el que se emite el Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad menor a 0.5 MW.* Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5465576&fecha=15/12/2016#gsc.tab=0

DOF. (2017). *RESOLUCIÓN de la Comisión Reguladora de Energía por la que expide las disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las cen.* Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5474790&fecha=07/03/2017#gsc.tab=0

Gutierrez, J. C., Escamilla, A., Ruiz, S. V., & Cruz, O. H. (2022). Metodología de prospección técnico-económica para la previsión e implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados. *CIATEQ*. Obtenido de https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/662/1/GutierrezVillegasJuanC%20DMANAV%202022.pdf

Gutierrez, J. C., Ruiz, S. V., & Escamilla, A. (2021). Sistema FV interconectado a la red eléctrica con control horario de inyección de energía. *Revista de la Facultad de Minas, 88*(217), 84-90. doi:0012-7353

Murillo, V. A. (2023). *Tesis: Diseño de un sistema de control para mejorar la calidad de la energía en tarifas (GDMTH) con base en un analizador de redes y software de simulación de sistemas eléctricos.* Obtenido de https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/701/1/MurilloRodriguezVirgilioA%20DMANAV.pdf

Rodríguez-Pérez, C. (2024). *Diseño de un sistema fotovoltaico interconectado a red: Análisis tarifario*. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.12753/5619

Salazar, W. A. (2018). *UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA.* Obtenido de PROPUESTA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA CONSUMO: https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15472/MONOGRAF%c3%8dA%2c%20PROPUESTA%20DE%20UN%20SISTEMA%20FOTOVOLTAICO%20PARA%20CONSUMO%20EL%c3%89CTRICO%20EN%20EL%20MUNICIPIO%20DE%20QUEBRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Torres, C., & Gonzalo, L. (2024). *Análisis de Instalaciones fotovoltaicas para suplir la demanda energética de la industria y reducir su huella de carbono : Análisis de la reducción en emisiones de efecto invernadero debido a la penetración de sistemas fotovoltaicos en la empresa Baker Hu*. Obtenido de https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25384

Cocinas Solares, Secaderos, Destilación y Desinfección Solar

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2133	Influencia de paredes filtro absorbentes en el desempeño térmico de un secador solar directo	Nicolás I. Román Roldán
2071	Secado solar de flor de izote (Yucca elephantipes Regel): una alternativa sustentable para preservar su valor nutricional y propiedades fisicoquímicas	Paulina Guillén Velázquez
2067	Influencia del secado solar mixto en las propiedades bioactivas de la flor de cempasúchil (Tagetes erecta L.)	José Manuel Vázquez Morales

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

INFLUENCIA DE PAREDES FILTRO ABSORBENTES EN EL DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN SECADOR SOLAR DIRECTO

Nicolás I. Román Roldán, Anabel López Ortiz y Nair P.K.
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autonoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos 62580, México, 7773620090, **roron@ier.unam.mx.**

Jean F. Ituna Yudonago
Departamento de Ingeniería en Aeronáutica, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard acceso a Tolcayuca 1009, Ex hacienda San Javier Tolcayuca, Hidalgo, 43860, México, 7712474014.

RESUMEN

Maximizar la captación de energía solar y reducir las pérdidas térmicas es fundamental para mejorar el desempeño de los secadores solares directos, sin comprometer la calidad del producto final. En este estudio se evaluó el comportamiento térmico de un secador solar directo operando bajo convección natural y forzada, mediante la integración de paredes filtro absorbentes en la cámara de secado. La evaluación experimental se llevó a cabo en cuatro pruebas, con y sin carga (microalgas), registrando la temperatura interna del secador en múltiples puntos. Las condiciones ambientales fueron obtenidas de la estación meteorológica y solarimétrica ESOLMET-IER. En las pruebas con carga, se determinaron las cinéticas de secado. Los resultados mostraron temperaturas máximas de 65 °*C* (convección natural) y 54 °*C* (forzada) sin carga, y de 59 °*C* y 53 °*C*, respectivamente, con carga. El contenido de humedad de las microalgas se redujo del 99.6 % al 10 % en base húmeda. Los tiempos de secado fueron de 15 *h* en convección natural y 7 *h* en convección forzada, lo que representa una reducción del 53% en el tiempo total de secado. Las eficiencias máximas para PSC-N, PSC-F, PCC-N y PCC-F fueron de 0.13, 0.45, 0.24 y 0.49, respectivamente. Esto demuestra la importancia del policarbonato con filtro UV para reducir las pérdidas de calor hacia el ambiente.

ABSTRACT

Maximizing solar energy capture and reducing thermal losses are essential to improve the performance of direct solar dryers without compromising the final product quality. In this study, the thermal behavior of a direct solar dryer operating under natural and forced convection was evaluated through the integration of absorbing filter walls in the drying chamber. The experimental evaluation was carried out in four tests, with and without load (microalgae), recording the internal temperature of the dryer at multiple points. Ambient conditions were obtained from the ESOLMET-IER meteorological and solarimetric station. In the tests with load, drying kinetics were determined. The results showed maximum temperatures of 65 °*C* (natural convection) and 54 °*C* (forced convection) without load, and 59 °*C* and 53 °*C*, respectively, with load. The moisture content of the microalgae was reduced from 99.6 % to 10 % on a wet basis. Drying times were 15 *h* in natural convection and 7 *h* in forced convection, representing a 53 % reduction in total drying time. The maximum efficiencies for PSC-N, PSC-F, PCC-N, and PCC-F were 0.13, 0.45, 0.24, and 0.49, respectively. This demonstrates the importance of UV-filtered polycarbonate in reducing heat losses to the environment.

Palabras claves: Filtro UV, Absorción de calor, Secado solar, Secador directo, Calidad de secado, Convección natural y forzada.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia en la captación de energía solar es clave para optimizar el desempeño térmico de los secadores solares. Este rendimiento depende principalmente del diseño y del material de cubierta, que captan y transmiten el calor hacia el producto para acelerar el secado. En el modo de operación directo, la radiación solar atraviesa la cubierta e incide sobre el producto, reduciendo el tiempo de secado, aunque con riesgo de deterioro por exposición prolongada a radiación UV. La literatura reporta el uso de cubiertas comerciales como policarbonato celular, polietileno blanco, acrílico y plástico transparente para incrementar la temperatura interna. Algunos recubrimientos con protección UV, orientados a preservar la calidad del producto, han alcanzado temperaturas del aire de hasta 59 °*C* dentro de los secadores y tiempos de secado de hasta 36 *h*, según la relación tamaño/carga (Román et al., 2025; Shrivastava et al., 2022). A nivel de laboratorio, se han probado materiales no comerciales que funcionan simultáneamente como filtros y absorbedores de radiación. Nair et al. (2020) secaron rodajas de manzana utilizando un material espectralmente selectivo de calcogenuro de cobre que bloquea longitudes de onda menores a 500 *nm*, logrando mayor retención de color y valor nutricional. De manera similar, López et al. (2024) reportaron, en condiciones controladas con el material de calcogenuro de cobre, que el secado de pulpa de fresa conserva mayor contenido de antocianinas y actividad antioxidante que el secado al sol o al aire libre. Posteriormente, López et al. (2025) emplearon materiales espectralmente selectivos (acrílico coloreado) verde (450–600 *nm*), rojo (600–1050 *nm*) y calcogenuro de cobre (450–1050 *nm*) en secadores a microescala para fresa y cilantro, obteniendo temperaturas de hasta 66 °*C* y mejor retención de compuestos bioactivos.

Los materiales con filtros especiales incrementan la temperatura interna, reducen pérdidas de calor y preservan la calidad gracias a sus propiedades ópticas y térmicas, aunque no se han aplicado en secadores de mayor capacidad. Por lo tanto, el presente estudio analiza el efecto de paredes con filtros absorbentes UV de calcogenuro de cobre sobre el desempeño térmico de un secador solar directo a escala piloto (150-200 *kg* de producto fresco), operando con y sin carga de microalgas, bajo convección natural y forzada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El secador solar directo evaluado (Figura 1) fue construido en el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), campus Temixco. La cámara de secado, con estructura de acero, está recubierta con placas de policarbonato celular (8 *mm*) laminadas con una película de calcogenuro de cobre que inhiben la entrada de radiación UV, violeta y verde azulada, además de una película adhesiva de polietileno apta para alimentos. Orientado este-oeste para maximizar la captación solar, cuenta con un área de 22.4 m^2 y volumen de 46.6 m^3. En su interior hay 15 bandejas de aluminio (0.4 m^2 c/u) distribuidas en tres mesas para colocar el producto. Una cubierta externa de policarbonato sólido transparente (3 *mm*) rodea la cámara, y tres ventiladores tubo-axiales suspendidos en el techo recirculan el aire. La capacidad de carga es de 150-200 *kg* de producto fresco.

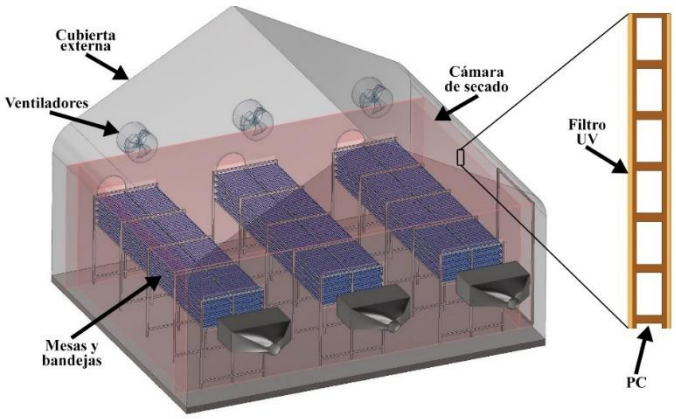


Figura 1. Esquema del secador solar directo con paredes de policarbonato celular con filtro UV en la cámara de secado.

Transmisividad (T), reflectividad (R) y absortividad (A) del filtro UV

La Figura 2 muestra la transmitancia (T) y reflectancia (R) ópticas del filtro UV, donde la absorbancia (A) se calcula como A = 1 – (T + R). La película, de aproximadamente 160 nm de espesor, presenta T = 0.40, R = 0.19 y A = 0.41. Por cada 1000 $\boldsymbol{W/m^2}$, se absorben 410 $\boldsymbol{W/m^2}$ y se transmiten 400 $\boldsymbol{W/m^2}$ hacia el interior de la cámara. La película reduce la transmitancia casi a cero para longitudes de onda menores a 500 *nm*, bloqueando los rayos UV-A, UV-B y parte de la región azul verdosa del espectro solar, que pueden afectar la calidad del producto (Nair et al., 2020).

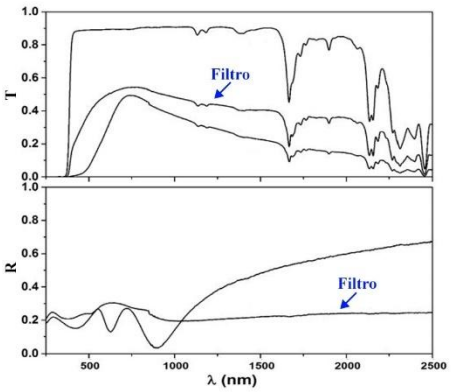


Figura 2. Propiedades ópticas de transmitancia (T) y reflectividad (R) del policarbonato celular con filtro UV (Mod. de Nair et al. 2020)

Instrumentación

Dentro del secador, la temperatura del aire se midió con termopares tipo T en tres niveles: inferior ($\boldsymbol{T_{inf}}$), medio ($\boldsymbol{T_{med}}$) y superior ($\boldsymbol{T_{sup}}$) de la primera mesa, coincidiendo con las bandejas de medición en pruebas con producto (Figura 3). En el exterior se registraron la irradiancia solar directa y la temperatura ambiente. Las características de los instrumentos se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Instrumentos utilizados durante la experimentación

Instrumento	Variable medida	Descripción	Fuente
Termopar tipo K	Temperatura interna	Intervalo: -200 a 350 °C, precisión: ± 1 °C	Propia
Sensor CS500	Temperatura ambiente	Precisión: $\pm 3\%$	ESOLMET-IER
Pirheliometro (Eppley NIP)	Radiación solar	Sensibilidad: ≈8 µV / Wm-2	ESOLMET-IER

Configuración del experimento y preparación de la muestra

Para evaluar el desempeño térmico del secador solar se llevaron a cabo 4 pruebas experimentales, 2 utilizando el secador vacío por ventilación natural y forzada denominadas PSC-N y PSC-F, 2 con el invernadero cargado con microalgas por ventilación natural y forzada denominadas PCC-N y PCC-F, respectivamente. Las pruebas fueron realizadas los días 05 y 08 de julio para PSC-N y PSC-F, respectivamente, PCC-F en los días 13 y 14 de octubre y PCC-N los días 03, 04 y 05 de noviembre, todas en el año 2022. En estas dos últimas pruebas se utilizaron microalgas de base acuosa. Las pruebas con secador vacío duraron 9 horas (de 9:00 a 17:00 *h*). En las pruebas con microalgas, la medición comenzó a las 8:00 *h* y se extendió hasta las 17:00 *h*, repitiéndose durante dos días para PCC-F y tres días para PCC-N.

Las microalgas fueron cultivadas por el Laboratorio de Bioenergía del IER-UNAM en volúmenes de 10 y 10.5 litros para las pruebas PCC-F y PCC-N, respectivamente. Esta cantidad se distribuyó en 34 bandejas plásticas sobre tres mesas, con área de 0.1 m² y un espesor de líquido aproximado de 2.5 *mm* por bandeja. Se midieron tres bandejas etiquetadas como inferior (BI), media (BM) y superior (BS) ubicadas en la mesa izquierda para los modos forzado (F) y natural (N) dentro del secador, como se muestra en la Figura 3. Además, se pesó una bandeja control ambiental (BCA). Las mediciones de peso se realizaron cada 30 minutos durante las primeras 2 horas y luego cada hora hasta alcanzar peso constante.

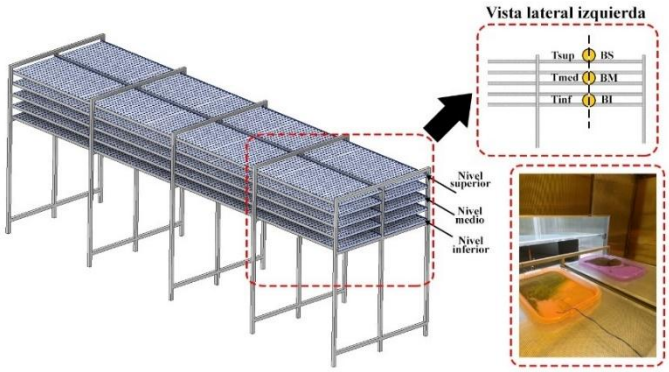


Figura 3. Esquema del posicionamiento de los sensores de temperatura en los niveles: inferior (T_{inf}), medio (T_{med}) y superior (T_{sup}) y de las bandejas de secado (BS, BM y BI) en la mesa izquierda para las mediciones.

Cinéticas de secado

El contenido de humedad (base húmeda) de las microalgas se determina usando la Ecuación 1.

$$X_{bh} = \frac{w_i - w_s}{w_i} \quad (1)$$

donde w_i y w_s son el peso la muestra humedad y seca, respectivamente.

La evolución del secado de las microalgas se representa con el índice de humedad (*MR*), descrito por la Ecuación 2 (Elwakeel et al. 2024).

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_e} \approx \frac{X_t}{X_0} \quad (2)$$

Donde X_t es el contenido de humedad en el punto *t*, X_{eq} es el contenido de humedad de equilibrio y X_0 es el contenido de humedad inicial. Cuando X_{eq} es muy pequeño comparado con X_t y X_0, puede ser despreciado.

Eficiencia del secador vacío y con producto

La eficiencia térmica del secador vacío ($\eta_{s\text{-}v}$), se define como la razón entre la energía ganada por el aire en el secador y la energía que entra en el secador a partir de la irradiancia solar incidente, tal como se muestra en la siguiente Ecuación (Mishra et al. 2021).

$$\eta_{s-v} = \frac{\dot{m}_{aire}\, C_p\, (T_{sec} - T_{amb})}{I_S\, A_{sec}} \quad (3)$$

donde $\dot{m}_{aire}$ es el flujo másico, Cp es el calor específico, T_{sec} es la temperatura del secador, T_{amb} es la temperatura ambiente, I_s es la irradiancia solar y A_{sec} es el área de captación.

En el caso del secador con carga, la eficiencia (η_{s-p}) se calcula como la relación entre la energía requerida para evaporar la humedad del producto y la energía suministrada al secador, incluyendo la energía consumida por los ventiladores en convección forzada, según la Ecuación 4 (Badaoui et al., 2019).

$$\eta_{s-p} = \frac{W_r\, L\, x\, 100}{I\, A_{sec}\, t + E} \quad (4)$$

donde W_r es la masa de agua removida, L es el calor latente de vaporización, t es el tiempo y E es la energía de los ventiladores consumida por el secador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento térmico del secador sin carga

Irradiancia solar.

La variación de la irradiancia solar durante el día influye en la temperatura del secador y en la rapidez de secado. La Figura 4 muestra el comportamiento de la irradiancia solar global (I_sG) gráficamente para las pruebas con el secador sin carga PSC-N y PSC-F, respectivamente. En PSC-N, la irradiancia inicia en 220 W/m^2 a las 9:00 *h*, alcanza un máximo de 1060 W/m^2 a las 13:00 *h* y disminuye a 450 W/m^2 a las 17:00 h. Para PSC-F, la irradiancia comienza en 400 W/m^2 a las 9:00 *h*, llega a un máximo de 1000 W/m^2 a las 13:00 *h* y cae a 350 W/m^2 a las 17:00 *h*.

Perfiles de temperatura en el secador.

La Figura 4 muestra la variación de la temperatura del aire dentro de la cámara de secado en los niveles T_{inf}, T_{med} y T_{sup} de la mesa durante las pruebas sin carga con convección natural y forzada. El aumento de temperatura interior es directamente proporcional a la irradiancia solar. En la prueba PSC-N (Figura 4a), T_{inf} varió de 29 °*C* a las 9:00 *h* hasta 50 °*C* a las 15:00 h; T_{med} aumentó de 30 °C a 55 °C en el mismo periodo; y T_{sup} alcanzó un máximo de 65 °*C* a las 14:00 *h*, 16 °*C* más que el valor reportado por Mishra et al. (2021) con cubierta de plástico transparente. Esta diferencia se debe al calentamiento directo de las bandejas por la radiación solar que entra por el techo y al calor transferido del techo al aire cercano. Según Román-Roldán et al. (2024), la temperatura de las paredes varió entre 35 y 61 °*C*, mientras que el techo alcanzó entre 81 y 90 °*C*, evidenciando la alta absorción térmica del policarbonato con filtro UV. Las diferencias máximas entre T_{inf}, T_{med}, T_{sup} y la temperatura ambiente fueron 22, 27 y 37 °*C*, respectivamente. En la prueba PSC-F (Figura 4b), las temperaturas T_{inf}, T_{med}, y T_{sup} oscilaron entre 25 °*C* a las 9:00 *h* y 54 °*C* a las 15:00 *h*. Este modo de operación registró temperaturas 10.5 °C superiores a las reportadas por Román et al. (2019) con cubierta de polietileno blanco comercial. La diferencia máxima respecto a la temperatura ambiente fue de 27 °*C*. Debido a la recirculación del aire por los ventiladores en convección forzada, las temperaturas entre los puntos de medición fueron aproximadamente iguales. En ambas pruebas, las paredes de policarbonato celular contribuyeron a aumentar y mantener la temperatura durante la evaluación sin producto.

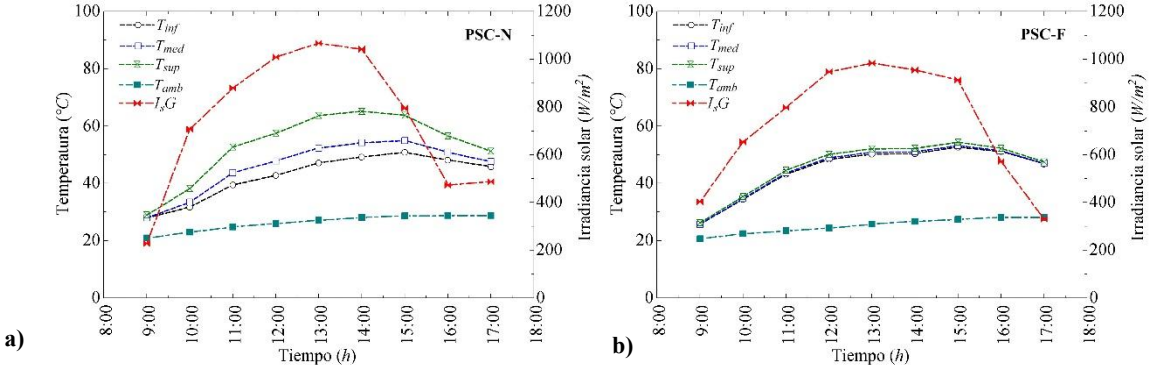


Figura 4. Variación de la irradiación solar (I_sG), temperatura ambiental (T_{amb}) y temperaturas internas en los niveles: inferior (T_{inf}), medio (T_{med}) y superior (T_{sup}) durante las pruebas sin carga: a) convección natural (PSC-N); b) convección forzada (PSC-F).

Comportamiento térmico del secador con carga

Irradiancia solar.

La variación de la irradiancia solar directa (I_sD) durante el secado por convección forzada y natural se presenta en las Figuras 5 y 6. En

PCC-F, la irradiancia osciló entre 160 y 800 $\boldsymbol{W/m^2}$, con un máximo a las 12:00 *h* del día 1; en el día 2 alcanzó 780 $\boldsymbol{W/m^2}$ a las 11:00 *h*, momento en que finalizó el secado. En PCC-N, la irradiancia del día 1 mostró variaciones significativas por nubosidad intermitente, con picos de 700 $\boldsymbol{W/m^2}$ a las 11:00 *h* y 560 $\boldsymbol{W/m^2}$ a las 15:00 *h*, y un mínimo intermedio de 100 $\boldsymbol{W/m^2}$. En el día 2 varió entre 20 y 700 $\boldsymbol{W/m^2}$, mientras que en el día 3 alcanzó un máximo de 350 $\boldsymbol{W/m^2}$ a las 10:00 *h*, cuando concluyó el proceso.

Perfiles de temperatura en el secador.

Los perfiles de temperatura del aire en la prueba PCC-F (Figura 5) muestran que $\boldsymbol{T_{inf}}$, $\boldsymbol{T_{med}}$, y $\boldsymbol{T_{sup}}$ aumentaron gradualmente hasta un máximo de 53 °*C* en el día 1. En el día 2, la temperatura máxima fue de 45 °*C* a las 11:00 *h*. En PCC-N (Figura 6), las temperaturas del día 1 variaron entre 30-40 °*C* ($\boldsymbol{T_{inf}}$), 33-43 °*C* ($\boldsymbol{T_{med}}$) y 34-52 °*C* ($\boldsymbol{T_{sup}}$). Aunque la irradiancia solar cayó notablemente entre las 11:00 *h* y 15:00 *h*, la alta absorción radiativa del policarbonato con filtro evitó descensos significativos. En el día 2, las temperaturas oscilaron entre 26-41 °*C*, 27-45 °*C* y 33-59 °*C* para $\boldsymbol{T_{inf}}$, $\boldsymbol{T_{med}}$, y $\boldsymbol{T_{sup}}$, respectivamente; a partir de las 12:00 *h*, la disminución de irradiancia provocó una caída máxima de 21 °*C*, manteniéndose estables hasta el final de la jornada. En el día 3, las máximas fueron de 50 °*C* ($\boldsymbol{T_{sup}}$), 42 °*C* ($\boldsymbol{T_{med}}$) y 38 °*C* ($\boldsymbol{T_{inf}}$).

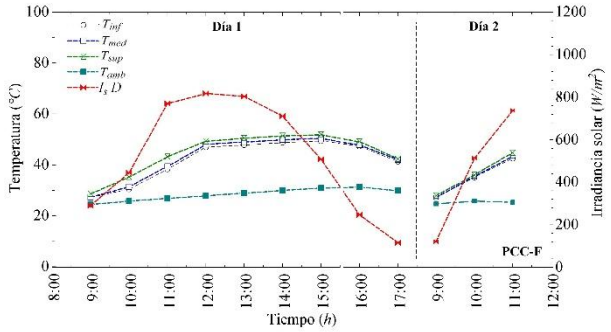


Figura 5. Variación de la irradiación solar (I_sD), temperatura ambiental (T_{amb}) y temperaturas internas en los niveles: inferior ($\boldsymbol{T_{inf}}$), medio (T_{med}) y superior (T_{sup}) durante las pruebas con convección forzada con producto (PCC-F).

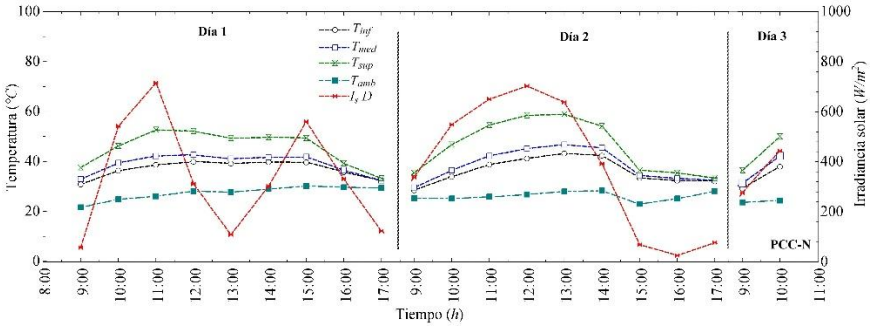


Figura 6. Variación de la irradiación solar (I_sD), temperatura ambiental (T_{amb}) y temperaturas internas en los niveles: inferior ($\boldsymbol{T_{inf}}$), medio (T_{med}) y superior (T_{sup}) durante las pruebas con convección natural con carga (PCC-N).

Cinéticas de secado de secador solar directo.

El contenido inicial de humedad de las microalgas fue de 99.6 % y 99.5 % (b.h.), reduciéndose a 13 % y 7.5 % (b.h.) para PCC-F y PCC-N, respectivamente (Figura 7). En convección forzada (PCC-F), el secado de BI-F, BM-F y BS-F tomó 7 h (420 *min*), con una reducción de humedad más rápida en BS-F durante las primeras horas. En convección natural (PCC-N), el tiempo total fue de 15 *h* (900 *min*), destacando también una disminución más acelerada en BS-N al inicio. El uso de ventiladores redujo el proceso en 8 h, equivalente a un 53 % menos de tiempo. Las bandejas expuestas a cielo abierto alcanzaron el secado en aproximadamente 6 h (360 min) en ambos casos.

Eficiencia térmica del secador vacío y con producto.

La eficiencia térmica de las pruebas mostró diferencias notables (Figura 7). En convección natural sin producto (PSC-N), la eficiencia se mantuvo entre 0.05 y 0.13, mientras que en convección forzada (PSC-F) aumentó gradualmente desde las 10:00 *h*, variando entre 0.10 y 0.45, debido al mayor flujo de aire generado por los ventiladores, que homogeniza la temperatura y aprovecha el calor absorbido por las paredes de policarbonato. En convección natural con producto (PCC-N), la eficiencia varió entre 0.08 y 0.24 durante día 1 obteniendo la máxima a las 13:00 *h* y la mínima a las 15:00 *h*; en el día 2 fue más baja variando entre 0.04 y 0.15, y en el día 3 fue cercano a cero. En convección forzada con producto (PCC-F), la eficiencia máxima fue de 0.49 a las 10:00 h y disminuyó gradualmente cercano a 0 a las 16:00 *h* el día 1; en el día 2 la eficiencia fue nula. Estos resultados muestran que el incremento del flujo de aire en convección forzada acelera la pérdida de agua y agiliza el proceso de secado.

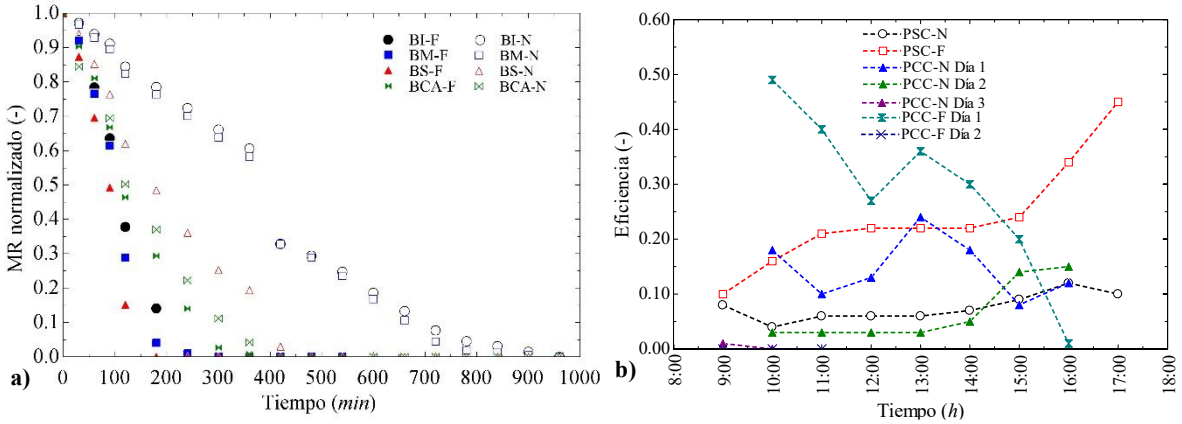


Figura 7. a) Cinéticas de secado de microalgas en los niveles inferior, media y superior con convección forzada (BI-F, BM-F, BS-F) y con convección natural (BI-N, BM-N, BS-N); b) Eficiencia térmica del secador con carga con convección natural (PCC-N) y convección forzada (PCC-F), así como sin carga con convección natural (PSC-N) y forzada (PCC-F).

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó experimentalmente el desempeño térmico de un secador solar directo bajo las condiciones climáticas de Temixco, Morelos (IER-UNAM). El sistema operó con convección natural y forzada, incorporando paredes con filtro absorbente en la cámara de secado. Se realizaron cuatro pruebas: dos sin carga (PSC-N y PSC-F) y dos con carga de microalgas (PCC-N y PCC-F). En todas las pruebas se registraron las temperaturas internas T_{inf}, T_{med}, y T_{sup}, mientras que las condiciones ambientales se obtuvieron de la estación meteorológica y solarimétrica ESOLMET-IER. Las temperaturas máximas alcanzadas fueron de 65 °*C* (PSC-N) y 54 °*C* (PSC-F) sin carga, y de 59 °*C* (PCC-N) y 53 °*C* (PCC-F) con carga. El contenido de humedad de las microalgas se redujo del 99.6 % al 10 % (b.h.), con tiempos de secado de 15 *h* en PCC-N y 7 *h* en PCC-F, lo que representa una reducción del 53 %. Las eficiencias máximas fueron de 0.13 (PSC-N), 0.45 (PSC-F), 0.24 (PCC-N) y 0.49 (PCC-F). El empleo de policarbonato con filtro absorbente permitió reducir pérdidas de calor al ambiente y mejorar la eficiencia térmica del secador.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos cordialmente a todos los miembros del comité organizador, a los miembros del comité científico y patrocinadores de SNES 2025. Asimismo, agradecemos al Fondo Sectorial CONACYT - Secretaría de Energía- Sustentabilidad Energética, México por la Beca 207450 Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol) a través del proyecto P90 “Desarrollo de un secador solar tipo invernadero con base en un estudio previo realizado en un prototipo” y PAPIIT IA204123. Nicolás Iván Román Roldán, con número de apoyo 780858, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) la beca otorgada para realizar el proyecto de doctorado y todos sus derivados.

REFERENCIAS

Román-Roldán N.I., López-Ortiz A., Ituna-Yudonago J.F., Nair P.K., Rodríguez-Ramírez J., Sandoval-Torres S. and Martynenko A. (2025). A current review: Engineering design of greenhouse solar dryers exploring novel approaches, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol 73, p. 104137.

Shrivastava A., Kumar Gaur M. and Singh P. (2022). Mango leather (Aam Papad) drying in hybrid greenhouse solar dryer with evacuated tube collector and finned drying tray: drying behavior and economic analysis, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol 47, No. 2, p. 1-18.

P.K. Nair, Angélica Lizbeth Espinosa-Santana, Laura Guerrero-Martínez, Anabel López-Ortiz and M.T.S. Nair (2020). Prospects toward UV-blue filtered solar drying of agricultural farm produce using chemically deposited copper chalcogenide thin films on cellular polycarbonate, Solar Energy, Vol. 203, p. 123-135.

A. Lopez-Ortiz, Navarrete Salgado M., Nair P.K., Balbuena Ortega A., Méndez-Lagunas L.L., Hernandez-Díaz W.N., Guerrero L. (2024). Improved preservation of the color and bioactive compounds in strawberry pulp dried under UV-Blue blocked solar radiation, Cleaner and Circular Bioeconomy, Vol 9, p. 100112.

Anabel López-Ortiz, Azucena Silva-Cortés, José A Velázquez, Argelia Balbuena, Jorge Escobar, W. N. Hernández-Díaz, P. K. Nair, J.A. del Río (2025). Light modulation through spectrally selective materials in solar dryers for the retention of bio-compounds, Drying Technology, p. 1-17.

Elwakeel A.E., Gameh M.A., Oraiath A.A.T., Elzein I.M., Eissa A.S., Mahmoud M.M., et al. (2024). Drying kinetics and thermo-environmental analysis of a PV-operated tracking indirect solar dryer for tomato slices, PLOS ONE, Vol. 19, No. 10, p. e0306281.

Mishra L., Sinha A. and Gupta R. (2021). Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of greenhouse dryer in no-load condition, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 45, p. 101186.

Badaoui O., Hanini S., Djebli H., Haddad B. and Benhamou A. (2019). Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying

in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models, Vol. 133, p. 144-155.

Román Roldán, N.I., Ituna Yudonago, J.F., López Ortiz, A., P.K. Nair, Sandoval Torres, S. and Rodríguez Ramírez, J. (2024) Drying kinetics of carrot in a natural convection UV blocked greenhouse solar dryer, Avances en Ingeniería Química, Vol. 3, No. 1, p. 125-130.

Román-Roldán N.I., López-Ortiz A., Ituna-Yudonago J.F., García-Valladares O. and Pilatowsky-Figueroa I. (2019). Computational fluid dynamics analysis of heat transfer in a greenhouse solar dryer "chapel-type" coupled to an air solar heating system, Energy Sci Eng. Vol. 7, p. 1123–1139.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

SECADO SOLAR DE FLOR DE IZOTE (Yucca elephantipes Regel): UNA ALTERNATIVA SUSTENTABLE PARA PRESERVAR SU VALOR NUTRICIONAL Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Paulina Guillén Velázquez, Alfredo Domínguez Niño y Octavio García Valladares
Laboratorio de Secado Solar, Instituto de Energías Renovables, Priv. Xochicalco S/N 62580, Temixco, Morelos, México, 7773620090, **pgv@ier.unam.mx, aldoni@ier.unam.mx, ogv@ier.unam.mx.**

Dulce María Ávila Sandoval
Área Calidad y Ahorro de Energía, Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero, Nacional Acapulco de Juárez - Zihuatanejo Kilómetro 201, Ejido el Cocotero, Petatlán, Gro. 40830 758 538 2341, **adulcemaria076@gmail.com**

RESUMEN

La flor de izote (*Yucca elephantipes* Regel) es un alimento tradicional mexicano de alto valor nutracéutico por su contenido de vitamina C, compuestos fenólicos y actividad antioxidante. Su estacionalidad y alta humedad limitan su disponibilidad y conservación. Este estudio evaluó el efecto de tres métodos de secado —secador solar con cubierta selectiva, secador solar con policarbonato oscuro y estufa eléctrica a 50 °C— sobre la actividad antioxidante, vitamina C y color, con el objetivo de identificar la tecnología más eficiente para preservar sus propiedades. Las cinéticas de secado mostraron que el policarbonato oscuro y la estufa alcanzaron el secado en ~240 min, mientras que el selectivo requirió ~300 min. En la flor fresca se registró una actividad antioxidante del 90.03 % y 352.24 mg/100 g de vitamina C. Tras el secado, el método selectivo incrementó la actividad antioxidante a 94.3 %, seguido de policarbonato oscuro (85.19 %) y estufa (83.58 %). La vitamina C aumentó por efecto de concentración, alcanzando 792.54 mg/100 g (secador selectivo), 730.90 mg/100 g (secador de policarbonato oscuro) y 616.42 mg/100 g (estufa). El cambio de color (ΔE) fue menor en el secador selectivo (13.73) respecto a policarbonato oscuro (20.92) y estufa (24.17), indicando mejor preservación de pigmentos. El secador solar con cubierta selectiva demostró ser la tecnología más eficaz para conservar la calidad nutracéutica y sensorial, además de ser sustentable y de bajo costo, ideal para implementación en comunidades rurales, contribuyendo a reducir pérdidas postcosecha y a generar valor agregado a este recurso estacional.

ABSTRACT

The izote flower (*Yucca elephantipes* Regel) is a traditional Mexican food with high nutraceutical value due to its vitamin C, phenolic compounds, and antioxidant activity. Its seasonality and high moisture content limit its availability and preservation. This study evaluated the effect of three drying methods—solar dryer with selective cover, solar dryer with dark polycarbonate cover, and electric oven at 50 °C—on antioxidant activity, vitamin C, and color, aiming to identify the most efficient technology for preserving its properties.
Drying kinetics showed that dark polycarbonate and the electric oven completed drying in ~240 min, while the selective dryer required ~300 min. Fresh flowers had an antioxidant activity of 90.03 % and 352.24 mg/100 g vitamin C. After drying, the selective method increased antioxidant activity to 94.3 %, followed by dark polycarbonate (85.19 %) and oven (83.58 %). Vitamin C rose due to concentration effects, reaching 792.54 mg/100 g (selective), 730.90 mg/100 g (dark polycarbonate), and 616.42 mg/100 g (oven). Color change (ΔE) was lowest in the selective dryer (13.73) compared to dark polycarbonate (20.92) and oven (24.17), indicating better pigment preservation. The solar dryer with selective cover proved to be the most effective technology for maintaining nutraceutical and sensory quality, while being sustainable and low-cost, making it ideal for rural implementation. It can help reduce postharvest losses and add value to this seasonal resource

Palabras claves: Flor de izote, secado solar, actividad antioxidante, vitamina C, energía solar.

INTRODUCCIÓN

La flor de izote (*Yucca elephantipes Regel*) ha sido parte de la dieta tradicional en diversas regiones de México desde tiempos prehispánicos (Bautista-Baños, 2013). Su consumo ocurre principalmente de febrero a abril, coincidiendo con su floración, lo que la convierte en un recurso estacional muy valorado por comunidades rurales y consumidores en mercados locales. Esta flor se incluye en una variedad de platillos, desde guisos y sopas hasta propuestas más elaboradas en la gastronomía contemporánea. Su importancia nutricional radica en su contenido elevado de ácido ascórbico (vitamina C), fibra dietética, proteínas y compuestos bioactivos como flavonoides y saponinas (Marcos-Gómez et al., 2024). La vitamina C desempeña funciones esenciales en el fortalecimiento del sistema inmunológico, la síntesis de colágeno y la neutralización de radicales libres (Machado et al., 2023). Mientras tanto, los compuestos fenólicos contribuyen a la actividad antioxidante, asociada con la prevención de enfermedades crónicas como las cardiovasculares, algunos cánceres y enfermedades neurodegenerativas. No obstante, la flor de izote presenta una alta susceptibilidad al

deterioro debido a su contenido de humedad (~81–82 %) y actividad de agua (aw ≈ 0.87), condiciones que favorecen el crecimiento microbiano y aceleran su deterioro fisicoquímico y sensorial (Bautista-Baños, 2013). Esta característica, junto con su estacionalidad, limita su disponibilidad continua, restringiendo su aprovechamiento comercial y su potencial como ingrediente funcional.

El secado es una de las técnicas más utilizadas para prolongar la vida útil de productos hortofrutícolas, ya que al reducir la humedad se inhibe el desarrollo microbiano y la velocidad de reacciones enzimáticas y químicas responsables del deterioro. Sin embargo, los métodos convencionales de secado, como estufas eléctricas o combustibles fósiles, requieren altos consumos de energía, pueden provocar pérdidas de nutrientes termosensibles y generan costos operativos elevados. En este contexto, el secado solar surge como una alternativa sustentable y de bajo costo, ya que aprovecha la radiación solar, eliminando la necesidad de energía eléctrica o combustibles fósiles. Esto lo convierte en una tecnología amigable con el medio ambiente. Además, con un diseño adecuado—como cubiertas selectivas o policarbonato oscuro—se puede mejorar la eficiencia del proceso y minimizar la pérdida de compuestos sensibles al calor, como la vitamina C y los pigmentos naturales.

Por ello, este estudio planteó evaluar el impacto de tres métodos de secado —secador solar con cubierta selectiva, secador solar con policarbonato oscuro y estufa eléctrica a 50 °C— sobre la actividad antioxidante, contenido de vitamina C y color de la flor de izote, con el fin de identificar la técnica más adecuada para conservar sus propiedades nutricionales fomentando un modelo sustentable que pueda adoptarse en comunidades productoras en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección, acondicionamiento y secado de las muestras

Las muestras de flor de izote fueron obtenidas de la región de Orizaba, Veracruz, México en un mercado local. Los pétalos fueron separados del tallo y colocados en los secadores mostrados en la Figura 1. En cada secador se introdujeron muestras de 150 g de flor. Durante el secado se registró la disminución de peso de las muestras de flor a lo largo del tiempo (cada 20 min) hasta observar una mínima variación entre cada pesaje. Se elaboraron cinéticas de secado reportando el contenido de humedad desde el inicio al final del secado. Las flores deshidratadas fueron empacadas al vacío hasta su posterior análisis. El secado solar se llevó a cabo en Temixco, Morelos, México, los días 20 y 21 de mayo de 2024, las condiciones ambientales reportadas para ese día se muestran a continuación en la Tabla 1, los datos se adquirieron de la Red Solarimétrica mexicana, los cuales se recopilaron de 9 am a 6 pm. El secado inició las 9 am.

Tabla 1. Condiciones ambientales

Fecha	Irradiancia solar W/m²	Temperatura ambiente °C	Humedad relativa %
20/Mayo/2024	593.962	33.663	33.652
21/Mayo/2024	629.987	33.45314815	38.058



Figura 1. Equipos de secado de la flor de izote

Análisis de actividad antioxidante

El contenido de antioxidantes se determinó mediante la metodología propuesta por Kailey et al., 2019 con ligeras modificaciones. Se midió la capacidad de inhibición del radical DPPH (2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) donde a una muestra de 0.5 g de las flores deshidratadas se le adicionaron 25 mL de metanol al 80%. La mezcla se dejó reposar durante 40 min, posteriormente se tomó una alícuota 0.1 mL y se adicionaron 3.9 mL de radical DPPH. El tubo de ensayo se mantuvo durante 30 minutos en la oscuridad y se midió la absorbancia a 517

nm utilizando un espectrofotómetro. Se preparó un control utilizando metanol al 80% en lugar de la muestra. La inhibición del radical libre DPPH (%) se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{\text{absorbancia control} - \text{absorbancia de muestra}}{\text{absorbancia control}} \text{ x } 100 \qquad \text{Ecuación (1)}$$

Determinación de vitamina C

La vitamina C presente en las flores fue determinada mediante titulación yodométrica siguiendo la metodología descrita por Medina Meza y Barbosa-Cánovas (2015) y Suntornsuk et al. (2002), con ligeras modificaciones. Se añadió ácido metafosfórico (10 % de concentración) a la muestra (10 g) (m), luego se disolvió y filtró. El extracto se vertió en un matraz aforado de 100 mL y se completó con agua destilada. Se tomó una alícuota de 10 mL y, como indicador, se utilizó una solución de almidón (1 %) (10 gotas). Se empleó yodo 0.01 N para realizar la titulación hasta observar una solución de color azul. El ácido ascórbico (*Aa*), expresado en mg/100 g, se evaluó de la siguiente manera (Ecuación 2):

$$Aa\ \left(\frac{mg}{100\ g}\right) = \frac{(i)(0.8806)(V_t)}{(V_f)(m)}\ x\ 100 \qquad \text{Ecuación (2)}$$

donde i representa el volumen de yodo usado (mL), V_t representa el volumen del extracto (mL) y V_f representa el volumen de la alícuota (mL).

Determinación de diferencias de color

Las propiedades de color se determinaron con un colorímetro de alta calidad (NR60CP+) y partir de los parámetros *L, a* y *b* se calculó la diferencia de color (ΔE) entre las muestras frescas y deshidratadas (Ecuación 3):

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{\frac{1}{2}} \qquad \text{Ecuación (3)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flor de izote fresca

Los resultados obtenidos en la flor de izote fresca mostraron un perfil inicial muy favorable en términos nutricionales y funcionales: una actividad antioxidante de 90.03 %, contenido de vitamina C de 352.24 mg/100 g, humedad del 81.63 % y actividad de agua de 0.87. Estas características confirman que la flor de izote es un alimento perecedero, pero con alto valor nutracéutico.

Cinéticas de secado

La Figura 2 muestra el desarrollo del proceso de secado empleando las tres tecnologías. Se observa la típica curva decreciente del contenido de humedad con el tiempo, donde la tasa de pérdida de agua fue mayor en las primeras etapas y posteriormente se desaceleró a medida que el producto se acercó al equilibrio. El secador solar con cubierta de policarbonato oscuro y estufa eléctrica a 50 °C presentaron curvas similares, con tiempos totales de secado de 240 minutos. Por su parte, el secador selectivo presentó un secado más lento, con tiempo total de 300 minutos.

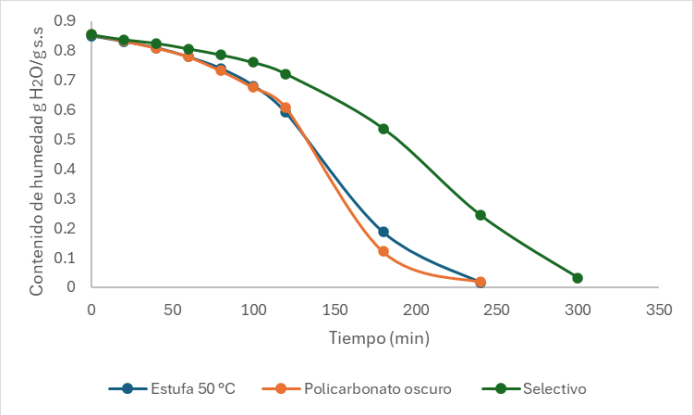


Figura 2. Cinéticas de secado de la flor de izote en diferentes condiciones

Actividad antioxidante

Tras el secado, los cambios observados dependieron significativamente del tipo de tecnología utilizada. (ver Tabla 2). En términos de actividad antioxidante, el secador solar con cubierta selectiva no solo logró preservar sino incrementar este parámetro hasta 94.3 %. Este fenómeno se puede explicar por la concentración de compuestos antioxidantes al reducir el contenido de humedad y, posiblemente, por la liberación de compuestos fenólicos ligados durante el tratamiento térmico. Estudios en flores comestibles como cempasúchil y caléndula han reportado aumentos similares tras secados controlados (Domínguez-Niño et al., 2025; Machado et al., 2023). Por el contrario, en el secador de policarbonato oscuro y la estufa eléctrica, la actividad antioxidante disminuyó a 85.19 % y 83.58 %, respectivamente, lo que puede deberse a degradación térmica de compuestos sensibles y a tiempos de secado más prolongados.

Contenido de Vitamina C

En cuanto a vitamina C, los valores del producto seco se incrementaron respecto a la muestra fresca, con 792.54 mg/100 g para el secador solar selectivo, 730.90 mg/100 g para policarbonato oscuro y 616.42 mg/100 g para la estufa eléctrica. Este aumento no implica síntesis, sino un efecto de concentración por pérdida de agua. Sin embargo, las diferencias entre tecnologías indican que el secador solar con cubierta selectiva permite minimizar la degradación oxidativa de la vitamina C, probablemente debido a un balance óptimo entre temperatura, radiación y tiempo de exposición. Investigaciones en pétalos de rosa y flores de hibisco secadas con energía solar han reportado patrones similares en la preservación de ácido ascórbico (Marcos-Gómez et al., 2024).

Cambios de color ΔE

El análisis del color (ΔE) reveló que el secador solar con cubierta selectiva produjo el menor cambio (13.73) frente a valores mayores en el secador de policarbonato oscuro (20.92) y la estufa eléctrica (24.17). Este resultado sugiere una mejor conservación de pigmentos como carotenoides y clorofilas, lo que se traduce en una apariencia más atractiva para el consumidor. La conservación del color es crucial no solo por razones estéticas, sino también porque los pigmentos vegetales cumplen funciones antioxidantes y aportan beneficios a la salud.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la flor de izote fresca y deshidratada

Experimento	Actividad antioxidante (%)	Vitamina C (mg/100g)	ΔE
Flor fresca	90.03	352.24	---
Secador solar selectivo	94.3	792.54	13.73
Secador solar de policarbonato oscuro	85.19	730.9	20.92
Estufa eléctrica (50°C)	83.58	616.42	24.17

CONCLUSIONES

Con este estudio se demuestra que el secador solar con cubierta selectiva es la tecnología más eficiente para conservar las propiedades nutracéuticas y sensoriales de la flor de izote. Además, esta tecnología ofrece ventajas socioambientales debido a que aprovecha la energía solar, que es de bajo costo y puede ser implementada en comunidades rurales para agregar valor a un producto estacional. La aplicación de este tipo de tecnologías contribuye a disminuir pérdidas post-cosecha, ampliando la disponibilidad de la flor de izote a lo largo del año y generando oportunidades económicas a partir de productos deshidratados con alto valor nutricional

REFERENCIAS

Bautista-Baños, S. (2013). Contenido nutricional, propiedades funcionales y conservación de flores comestibles. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 63(3), 197-208.

Domínguez-Niño, A., Guillén-Velázquez, P., Santos-González, I., García-Valladares, O., & Vázquez-Morales, J. M. (2025). Total Phenolic, Flavonoid Content, and Antioxidant Activity of Dried Marigold (Tagetes erecta L.) Petals Produced in a Mixed-Mode Solar Dryer. *Plant Foods for Human Nutrition*, *80*(3), 123.

Kailey, R., Dhawan, K., Rasane, P., Singh, J., Kaur, S., Singh, B. P., ... & Kaur, D. (2019). Utilization of Foeniculum vulgare in herbal candy preparation and analysing its effect on the physico-chemical and sensory properties. Current Science, 116(12), 2013-2019.

Machado, J. S., Pieracci, Y., Carmassi, G., Ruffoni, B., Copetta, A., & Pistelli, L. (2023). Effect of drying post-harvest on the nutritional compounds of edible flowers. *Horticulturae*, *9*(11), 1248.

Marcos-Gómez, R., Vera-Guzmán, A. M., Pérez-Ochoa, M. L., Martínez-Martínez, L., Hernández-Delgado, S., Martínez-Sánchez, D., & Chávez-Servia, J. L. (2024). Phenolic compounds and antioxidant activity in edible flower species from Oaxaca. *Applied Sciences*, *14*(8), 3136.

Medina-Meza, I. G., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2015). Assisted extraction of bioactive compounds from plum and grape peels by ultrasonics and pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, *166*, 268-275.

Suntornsuk, L., Gritsanapun, W., Nilkamhank, S., & Paochom, A. (2002). Quantitation of vitamin C content in herbal juice using direct titration. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, *28*(5), 849-855.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

INFLUENCIA DEL SECADO SOLAR MIXTO EN LAS PROPIEDADES BIOACTIVAS DE LA FLOR DE CEMPASÚCHIL (*Tagetes erecta* L)

Alfredo Domínguez Niño, Paulina Guillén Velázquez, Octavio García Valladares, José Manuel Vázquez Morales
Laboratorio de Secado Solar, Instituto de Energías Renovables, Priv. Xochicalco S/N 62580, Temixco, Morelos, México, 7773620090, **aldoni@ier.unam.mx, pgv@ier.unam.mx, ogv@ier.unam.mx, vamojm@ier.unam.mx.**

Iris Santos González
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Investigadoras e Investigadores por México, Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, 03940, México, 5553227700, **iris.santos@secihti.mx.**

RESUMEN

El Cempasúchil, es un símbolo importante de las celebraciones del Día de Muertos en México. Sin embargo, una vez concluidas las festividades, las flores y los pétalos se desechan con frecuencia, lo que contribuye a la contaminación ambiental. Para solucionar este problema, se deshidrató el cempasúchil mediante un secador solar activo de tipo mixto. La temperatura máxima de secado fue de 69.65 °C y la irradiancia solar máxima fue de 1080.60 W/m². El contenido de humedad inicial fue de 87.35% y terminó en 4.93%. Los parámetros colorimétricos iniciales fueron: luminosidad 65.44, a 32.43, b 78.38, croma 84.83 y ángulo de tono 67.53°. La actividad antioxidante de la flor de cempasúchil fue del 93.51%, un contenido total de fenoles de 28.06 GAE/g (equivalentes de ácido gálico), un contenido total de flavonoides de 6.34 QE/g (equivalentes de quercetina) y un contenido de carotenoides de 2.07 mg/g. Tras el secado, se observó un aumento del contenido de carotenoides (de 2.073 a 18.947 mg/100g) y actividad antioxidante (de 93.513% a 98.178%). No se observaron cambios significativos en el contenido total de fenoles, con un valor de 28.488 QE/g para muestras de cempasúchil secas, ni en el contenido de flavonoides, de 6.348 QE/g y 6.622 QE/g. Las flores y los pétalos secos se pueden utilizar en aplicaciones prácticas, como la agricultura. Actúan como insecticidas naturales, lo que proporciona una alternativa para el control de plagas, y también pueden actuar como fertilizantes, mejorando las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo.

ABSTRACT

Cempasúchil is an important symbol in Mexico's Day of the Dead celebrations. However, once the festivities conclude, the flowers and petals are often discarded, contributing to environmental pollution. To address this issue, Cempasúchil was dehydrated using a mixed-type active solar dryer. The maximum drying temperature reached 69.65 °C, and the peak solar irradiance was 1080.60 W/m². The initial moisture content was 87.35%, which decreased to 4.93%. Initial colorimetric parameters were: brightness 65.44, a 32.43, b 78.38, chroma 84.83, and hue angle 67.53°. The antioxidant activity of the Cempasúchil flower was 93.51%, with a total phenolic content of 28.06 GAE/g (gallic acid equivalents), total flavonoid content of 6.34 QE/g (quercetin equivalents), and carotenoid content of 2.07 mg/g. After drying, an increase in carotenoid content (from 2.073 to 18.947 mg/100g) and antioxidant activity (from 93.513% to 98.178%) was observed. No significant changes were found in total phenolic content, with a value of 28.488 QE/g for dried Cempasúchil samples, nor in flavonoid content, which ranged from 6.348 QE/g to 6.622 QE/g. The dried flowers and petals can be used in practical applications such as agriculture. They act as natural insecticides, offering an alternative for pest control, and can also function as fertilizers, improving the physical, chemical, and biological conditions of the soil.

Palabras claves: Solar energy, Tagetes erecta, bioactive compounds, solar drying, edible flowers, cempasúchil

INTRODUCCIÓN

Tagetes erecta L [1], también conocida como cempasúchil, del náhuatl cempohualxochitl, que significa veinte flores, es una planta anual [2], de hasta 120 cm de altura, muy aromática cuando se exprime, de color amarillo a naranja. Pertenece al género *Tagetes*, que tiene alrededor de 55 especies en todo el continente americano y 8 en el valle de México [3]. El cempasúchil es endémico de México [2] y ha sido registrado en los estados de Zacatecas, Aguascalientes, Yucatán, Campeche, Tlaxcala, Ciudad de México, Tamaulipas, Chiapas, Tabasco, Coahuila, Sonora, Colima, Sinaloa, Durango, San Luis Potosí, Estado de México, Quintana Roo, Guerrero, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Jalisco, Oaxaca, Michoacán, Nayarit, Morelos y Veracruz [4]. *Tagetes erecta* L, es uno de los íconos más representativos de las festividades del Día de Muertos en México. Son fáciles de cultivar y no requieren mucha agua. Según la tradición mexicana, estas flores decoran altares y sus pétalos se utilizan para crear caminos que guían a las almas desde la entrada de la casa hasta el altar. En 2023, se cultivaron más de 5 millones de plantas, con un porcentaje de ventas del 95% [5]. Sin embargo, una vez terminadas las festividades, las flores y los pétalos suelen desecharse como desechos,

lo que contribuye a la contaminación ambiental. Algunos medios de comunicación estiman que se recolectan toneladas de desechos después de las actividades de limpieza en los cementerios municipales. Sin embargo, México no cuenta con datos precisos sobre la cantidad de desechos generados a nivel nacional. Actualmente, se han implementado iniciativas de reciclaje y reutilización, estableciendo centros de acopio. Sin embargo, estos esfuerzos aún son limitados. Las flores y los pétalos secos se pueden utilizar en aplicaciones prácticas como la agricultura; pueden utilizarse como insecticida natural, ya que representan una alternativa para el manejo de plagas y como fertilizante, mejorando las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, además de aportar nutrientes a los cultivos [6-9]. Asimismo, su uso facilita la extracción de pigmentos [10], que se utilizan como colorantes en las industrias alimentaria y textil. *Tagetes erecta* L tiene propiedades poco conocidas que se pueden utilizar de diversas maneras. En México, también tiene usos medicinales y, como la mayoría de las plantas medicinales, se utilizan todas sus partes (raíz, tallo y flores). *Tagetes erecta* L trata resfriados, bronquitis, dolores de estómago, enfermedades intestinales, diarrea, problemas hepáticos, indigestión, cólicos e irregularidades menstruales [11]. En otras partes del mundo, *Tagetes erecta* L tiene otros usos medicinales, como el tratamiento de quemaduras, heridas, úlceras, problemas renales y dolor muscular [12]. También se utiliza como carminativo, vermífugo, diurético y la infusión de raíz como laxante. Los pigmentos extraídos de la planta se utilizan en alimentos, como huevos con yema amarilla, pastas y piel y grasa amarillas de aves. Además, la planta contiene flavonoides, metabolitos fenólicos y carotenoides como la luteína, lo que puede explicar sus usos medicinales [13]. En particular, se ha reportado que la luteína protege contra la aterosclerosis, las enfermedades cardiovasculares y el cáncer. Además de sus usos medicinales, *Tagetes erecta* L también se utiliza como alimento; sus flores se incluyen en ensaladas y son una de las flores comestibles más populares del mundo. [14] Sin embargo, las flores comestibles son perecederas y tienen una vida útil muy corta; por lo tanto, es importante extender su vida útil y conservar sus compuestos bioactivos. El secado es el método más simple y básico para conservar las flores comestibles, ya que elimina el agua y la humedad, evitando así la degradación causada por enzimas y microorganismos. Existen diversas técnicas para secarlas, pero el secado solar destaca como una alternativa eficiente, ya que es fácil de implementar, requiere poca o ninguna electricidad, produce productos de alta calidad, tiene menores costos operativos y un menor impacto ambiental. Un secador solar reduce la humedad del producto mediante ventilación natural, convección forzada y radiación solar. Estos secadores se dividen en dos tipos: activos y pasivos. Los sistemas activos, utilizan ventiladores dentro del gabinete para mejorar la circulación del aire en la cámara de secado. Los sistemas pasivos, por otro lado, el aire se calienta y circula de forma natural gracias a la presión del viento o la fuerza de flotación. Los secadores activos y pasivos se clasifican en subcategorías de modo directo, indirecto y mixto. En los secadores directos, la cámara de secado transparente permite que la radiación solar incida sobre los productos, lo que puede modificar su color. En los secadores indirectos, el sistema cuenta con un colector solar y una cámara de secado opaca. El aire caliente generado en el colector se introduce en la cámara, evitando que los productos reciban radiación solar directa, lo que ayuda a preservar su color y reduce la formación de grietas. Finalmente, los secadores mixtos combinan características de los secadores indirectos, ya que incluyen un calentador de aire solar (colector solar), pero su cámara de secado tiene paredes transparentes lo que permite que una parte de la radiación solar alcance los productos [15]. En esta investigación se utilizó un secador solar de tipo mixto para evaluar los efectos en los compuestos bioactivos de las flores secas de cempasúchil. En la literatura, algunos investigadores han reportado el secado solar de flores comestibles utilizando tecnología solar: jazmín (secado solar convectivo natural) [16], flor de calabaza (secador solar directo de gabinete) [17], zompantle (secado solar de modo mixto) [18], rosa (usando el secador solar de canasta de alambre) [19], rosa (secador solar híbrido) [20]. Sin embargo, no se ha realizado un estudio del proceso de secado de cempasúchil mediante tecnología solar nueva, económica y fácil de usar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras frescas de cempasúchil

Se limpió la flor de cempasúchil y se retiró el pedicelo, el receptáculo y los sépalos. Posteriormente, las flores se colocaron en las bandejas del secador. El peso inicial y el contenido de humedad de la flor de cempasúchil cruda fueron de 50 ± 2.0 g y 87.35%, respectivamente. Las muestras se colocaron en una malla de polietileno y se introdujeron en el secador solar. La flor de cempasúchil se obtuvo en un mercado tradicional de productos agrícolas en Hueyapan, Morelos, México.

Descripción del secador

Para esta investigación, se utilizó un deshidratador de tipo mixto, fácil de usar y económico. Este deshidratador cuenta con un ventilador fotovoltaico integrado para favorecer el arrastre de humedad. El deshidratador puede absorber directamente el calor del sol en la cámara de secado, y el proceso se mejora añadiendo un colector solar de placa plana con calentador de aire. La cámara de secado contiene diez bandejas (0.63 x 0.43 m) en cinco niveles; cada bandeja tiene perforaciones de 0.0025 x 0.007 m. La cubierta de la cámara de secado es de policarbonato con un espesor de 6 mm y con protección ultravioleta. El secador solar de tipo mixto consta de tres partes fundamentales: un colector solar de placa plana para calentar el aire, una cámara de secado con cubierta de policarbonato y un pequeño ventilador fotovoltaico. La cámara de secado puede permitir el paso de la radiación solar a través de una cubierta de policarbonato transparente, funcionando en modo mixto, o puede cubrirse para funcionar en modo indirecto (solo con el aire caliente proveniente del colector solar). Dentro de la cámara de secado (0.32 m^3) se encuentran 10 bandejas perforadas de 63 x 43 cm, con una superficie total de secado de 2.7 m^2, dispuestas en 5 niveles verticales ascendentes. El colector solar para calentar el aire tiene una superficie bruta de 1.9 m^2 (1.2 x 1.59 m) con un vidrio templado de 3.2 mm y una lámina de aluminio con superficie selectiva. El aire se calienta mediante el colector solar, que fluye mediante convección natural y forzada (gracias al pequeño ventilador fotovoltaico) hacia la cámara de secado. A continuación, el aire fluye entre los pétalos de caléndula y, mediante procesos

de transferencia de calor y masa, transfiere calor a los pétalos de cempasúchil y estos transfieren humedad al aire. Posteriormente, el aire caliente y húmedo sale de la cámara de secado por la parte superior.

Cinética de secado

El proceso de secado solar de la flor de cempasúchil se llevó a cabo los días 21 y 24 de octubre de 2024 mediante un secador solar de tipo mixto (Figura 1). La evolución del contenido de humedad se calculó aplicando la ecuación de Vijayan [21].

$$M_{wb} = \frac{m_w}{m_w + m_d} = \frac{m_w}{mt} \quad (1)$$

Donde:

M_{wb} Es la humedad en base húmeda (kg); m_w es la masa de agua evaporada (kg); m_d es la masa seca (kg); m_t es la masa total (kg).

Análisis experimental

El análisis experimental se realizó por triplicado y los datos se analizaron utilizando MINITAB 19. Las variables de respuesta fueron el contenido de humedad, la actividad de agua, el color, la actividad antioxidante, el ácido ascórbico, el contenido total de fenoles, el contenido total de flavonoides y el contenido total de carotenoides del producto seco.

Métodos analíticos

El contenido de humedad se obtuvo utilizando una termobalanza (OHAUS, MB45, con una precisión de 0.001 g) a 105 °C. Se colocaron aproximadamente 3 g de la muestra y se distribuyeron uniformemente en una bandeja de aluminio dentro del equipo. La actividad de agua se determinó con un medidor de actividad de agua Rotronic (Higrolab C1) a 25 °C, cubriendo completamente el recipiente desechable para muestras y manteniéndolo dentro del kit durante 20 minutos. El equipo se calibró utilizando estándares de verificación Rotronic. Finalmente, las propiedades de color se determinaron con un colorímetro de alta calidad (NR60CP+) CIE L a b C H. Los valores se expresaron como L (luminosidad), a (rojo-verde), b (amarillo-azul), H (ángulo de tono) y C (saturación-croma). A partir de los resultados obtenidos, se calculó la diferencia de color (ΔE) entre las muestras crudas y secas, el croma y el ángulo de tono, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$C = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} \quad (3)$$

$$H = arctg\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4)$$

El contenido de antioxidantes se determinó siguiendo la metodología propuesta por Kailey et al. [22] con ligeras modificaciones. La capacidad de inhibición del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) se midió añadiendo 25 ml de metanol al 80 % a una muestra de 0.5 g de hierbas deshidratadas. La mezcla se dejó reposar durante 40 minutos, tras lo cual se tomó una alícuota de 0.1 ml y se combinó con 3.9 ml de solución de radical DPPH. El tubo de ensayo se mantuvo en oscuridad durante 30 minutos y se midió la absorbancia a 517 nm con un espectrofotómetro (Genesys 50 UV Visible Spectrophotometer, Thermo Scientific USA). Se preparó un blanco con etanol al 80%. La inhibición del radical libre DPPH(%) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\%\ Inhibición = \frac{Absorbancia\ Control - Absorbancia\ de\ la\ muestra}{Absorbancia\ Control} X100 \quad (5)$$

Se utilizó el método de Folin-Ciocalteu para determinar el contenido total de fenoles en la flor de cempasúchil. Se desarrolló añadiendo 0.5 ml de las muestras y 0.5 ml de reactivo de Folin-Ciocalteu (2M). Se mezcló bien y se dejó reposar durante 10 min, tras lo cual se añadieron 1.5 ml de solución de carbonato de sodio al 20%. La solución se mezcló e incubó a temperatura ambiente en oscuridad. Posteriormente, se leyó la absorbancia a 760 nm. El contenido total de fenoles se expresó en términos de equivalente de ácido gálico (mg GAE/g de masa seca), un compuesto de referencia común. Se utilizó agua destilada como blanco. Se utilizó el método colorimétrico de cloruro de aluminio para la determinación de flavonoides (Figura 3). Cada extracto vegetal (0.5 ml de 1:10 g/ml) en metanol se mezcló por separado con 1.5 ml de metanol, 0.1 ml de cloruro de aluminio al 10 %, 0.1 ml de acetato de potasio 1 M y 2.8 ml de agua destilada. Se mantuvo a temperatura ambiente durante 30 min; la absorbancia de la mezcla de reacción se midió a 415 nm. La curva de calibración se preparó preparando soluciones de quercetina a

concentraciones de 20 a 100 mg/ml en metanol. El contenido de carotenoides se determinó pesando 0.1 g de muestra y disolviéndolos en 10 ml de acetona en un matraz aforado. La mezcla se agitó durante 10 min y luego se agitó en vórtex a 5000 rpm durante 10 min. Se recogió el sobrenadante y se midió la absorbancia a 472 y 508 nm con un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 50 UV Visible Spectrophotometer, Thermo Scientific USA). Los ensayos de carotenoides se determinaron por triplicado y los cálculos se realizaron mediante las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$C^R = \frac{A_{508} * 2144.0 - A_{472} * 403.3}{270.9} \quad (6)$$

$$C^Y = \frac{A_{472} * 1724.3 - A_{508} * 2450.1}{270.9} \quad (7)$$

$$C^T = C^R + C^Y \quad (8)$$

Donde C^R representa el contenido de la fracción isocromática roja (µg/mL), C^Y representa el contenido de la fracción isocromática amarilla (µg/mL) y C^T es el contenido total de carotenoides (µg/mL).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de secado y caracterización de la flor de cempasúchil

La cinética de secado de las flores de cempasúchil se realizó el día 21 de octubre de 2024 utilizando un secador solar de tipo mixto (Figura 4). El ensayo comenzó de 9:00 a 14:00 h.

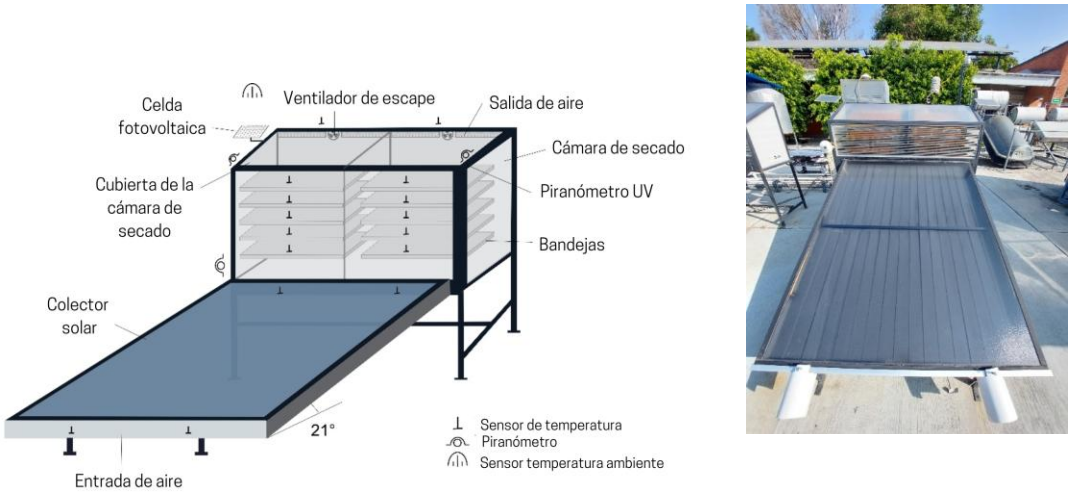


Figura 4. Secador solar de tipo mixto utilizado en el proceso de secado de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.)

El contenido de humedad inicial fue del 87.35% y finalizó en 5.687%. Sowbhagya [23] reportó un 93 % de contenido de humedad en las flores de cempasúchil. La temperatura máxima de secado fue de 69.65 °C y la irradiancia solar máxima fue de 1080.60 W/m² (Figura 5).

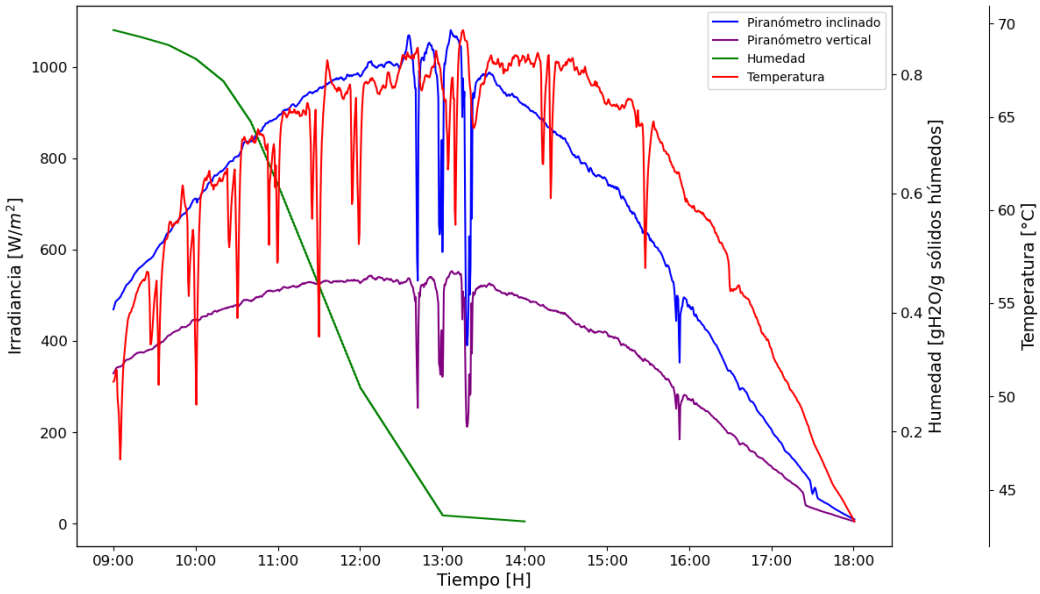


Figura 5. Cinética de secado de cempasúchil (*Tagetes erecta* L) realizada en un secador solar de modo mixto el día 21 de octubre de 2024.

La actividad inicial del agua se redujo de 0.96 a 0.36. Los parámetros colorimétricos iniciales fueron los siguientes: luminosidad (*L*) 65.44, *a* 32.43, *b* 78.38, Croma (*c*) 84.83 y ángulo de tono (*H*) 67.53 (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis fisicoquímico de flores frescas y secas de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.)

Análisis	Flor de cempasúchil fresca	Flor de cempasúchil seca
Contenido de humedad (w.b.)	$87.35^{\pm 0.142}$	$5.687^{\pm 0.289}$
Actividad de agua	$0.962^{\pm 0.010}$	$0.368^{\pm 0.027}$
Actividad antioxidante (%)	$93.513^{\pm 0.309}$	$*98.178^{\pm 0.001}$
Contenido total de fenoles (GAE/g)	$28.06^{\pm 1.426}$	$28.488^{\pm 0.059}$
Contenido total de flavonoides (QE/g)	$6.348^{\pm 0.127}$	$6.622^{\pm 0.333}$
Contenido de carotenoides (mg/g)	$2.073^{\pm 0.041}$	$*18.947^{\pm 0.379}$
Parámetros de color	L $65.44^{\pm 0.084}$	ΔL $-15.51^{\pm 2.679}$
	a $32.43^{\pm 2.333}$	Δa $-1.56^{\pm 0.014}$
	b $78.38^{\pm 3.026}$	Δb $-17.5^{\pm 0.685}$
	C $84.83^{\pm 3.691}$	ΔC $-16.57^{\pm 0.601}$
	H $67.53^{\pm 0.685}$	ΔH $-5.85^{\pm 0.332}$
		ΔE $23.44^{\pm 2.05}$

L (luminosidad), *a* (verde-rojo), *b* (amarillo-azul), ΔL (diferencia de luminosidad), Δa (diferencia de rojez-verdoso), Δb (diferencia de amarillez-azulado), ΔC (diferencia de Croma), ΔH (diferencia de ángulo de tono), ΔE (diferencia de color), valores medios$^{\pm}$ desviación estándar, *Los valores medios son significativamente diferentes del control (flor de cempasúchil fresca).

Como se ve en los resultados, el enrojecimiento está representado por *a* en el lado positivo, y el amarilleamiento está representado por *b* en el lado positivo; esto significa que el color tiende a ser amarillo-rojizo. Dujmovic [24] informó los parámetros de cromaticidad de flores comestibles frescas como caléndula común (luminosidad 70.90, *a* 26.48, *b* 73.14, Croma 80.12 y ángulo de tono 72.89°) y caléndula africana (luminosidad 38.40, *a* 25.54, *b* 37.79, Croma 53.90 y ángulo de tono 67.17°); Siriamornpun [25] informó el color de la flor de caléndula; según sus resultados, la luminosidad fue 83.2, *a* -3.4 y *b* 68.8, como se ve en los resultados, la diferencia entre los valores de los parámetros depende de la especie de flor. En este estudio, la actividad antioxidante de la flor de cempasúchil fue del 93.51%, ácido ascórbico 27.86 mg/100 g, contenido total de fenoles 28.06 GAE/g, contenido total de flavonoides 6.34 QE/g y contenido total de carotenoides 2.07 mg/g. Dujmovic [24] reportó la capacidad antioxidante de la cempasúchil común (2489.04 µmol TE/L), 25.46 mg/100 g de ácido ascórbico, 379.38 GAE/100 g de contenido total de fenoles, 165.49 CTH/100 g de contenido total de flavonoides y 0.42 mg/g de contenido total de carotenoides; por otro lado, la flor de cempasúchil mostró 2500.22 µmol TE/L de actividad antioxidante, 36.69 mg/100 g de ácido ascórbico, 898.19 mg GAE/100 g de contenido total de fenoles, 391.09 mg CTH/100 g de contenido total de flavonoides y 36.69 mg/100 g de ácido ascórbico. Los resultados muestran que la diferencia entre los valores de los parámetros depende de la especie de flor.

Contenido de carotenoides

Los carotenoides presentes en las flores de cempasúchil contribuyen a diversas funciones biológicas importantes. Autores como Vanegas [26] reportaron la inhibición del crecimiento de células de cáncer de colon; los carotenoides se han asociado con la prevención de la degeneración macular y las cataratas. En este estudio, los carotenoides aumentaron significativamente con la disminución del contenido de humedad de 2.073 a 18.947 mg/g (Tabla 1). Sarkar [27] reportó un comportamiento similar al deshidratar *Tagetes erecta* L. africana mediante diversos métodos, incluyendo el secado solar. Los carotenoides presentes en las flores de cempasúchil son una fuente de pigmentos naturales que pueden emplearse en la industria alimentaria y, debido a sus beneficios para la salud de los consumidores, como suplemento dietético. Mashitoa [28] reportó una disminución en el contenido de carotenoides mediante el uso de diferentes tratamientos de secado de 2.23 mg/100 g a 1.01 mg/100 g (liofilización), 0.11 mg/100 g (secado por microondas), 0.08 mg/100 g (secado en horno), 0.47 mg/100 g (secado solar), 0.15 mg/100 g (secado al sol). Por otro lado, Managa [29] reportó un aumento en el contenido de carotenoides durante el secado al sol, secado solar y liofilización de 0.93 mg/100 g a 1.81 mg/100 g para la col china y la solanácea africana, respectivamente. Los cambios en el contenido de carotenoides han sido reportados por Siriamornpun [25], Gargi [30] y Akshaya [31].

Actividad antioxidante

Los antioxidantes en *Tagetes erecta* L. constituyen un componente importante porque agregan valor como alimento funcional y/o ingrediente nutracéutico [14]. Se ha reportado que los antioxidantes pueden prevenir y tratar enfermedades al eliminar radicales libres y regular la actividad de diferentes tipos de oxidasas en el cuerpo [36]. Los resultados demostraron un aumento en la actividad antioxidante de las flores frescas (93.513%) a las secas, con un valor de 98.178 % (Tabla 1). Siriamornpun [25] también reportó un incremento en la actividad antioxidante de la flor de cempasúchil posterior al secado. En esta investigación, lo explican debido al aumento de licopeno, b-caroteno y luteína, un fitoquímico principal en la flor de cempasúchil, y otros fitoquímicos unidos liberados de la matriz con el procesamiento térmico. En esta investigación, el incremento en el porcentaje de inhibición de radicales DPPH se atribuye a la liberación de carotenoides y ácido ascórbico, resultando en un valor mayor en comparación con las flores frescas. Managa [29] reportó una disminución en la actividad antioxidante durante el secado al sol y al microondas; sin embargo, se reportó un aumento durante el proceso de liofilización de hojas de col china y solanáceas. Mashitoa [28] reportó el efecto de diferentes tratamientos de secado en la actividad antioxidante de hojas de calabaza; según sus resultados, la actividad antioxidante expresada en µmol TEAC 100 g^{-1} (Capacidad Antioxidante Equivalente de Trolox) aumentó de 23.35 µmol TEAC 100 g^{-1} a 25.01 µmol TEAC 100 g^{-1}, 24.31 µmol TEAC 100 g^{-1} y 23.52 µmol TEAC 100 g^{-1} mediante el uso de liofilización, secado solar y secado al sol, respectivamente. Sin embargo, la actividad antioxidante disminuyó de 23.35 µmol TEAC 100 g^{-1} a 22.04 µmol TEAC 100 g^{-1} y 10.18 µmol TEAC 100 g^{-1} mediante el secado por microondas y horno, respectivamente. En la mayoría de los casos, el secado reduce el contenido de antioxidantes debido a procesos de oxidación o degradación térmica. Sin embargo, en algunos casos se han observado aumentos, y algunos autores explican que esto puede estar relacionado con los productos de la reacción de Maillard, que pueden formarse debido al tratamiento térmico, y también con el hecho de que los polifenoles parcialmente oxidados tienen una actividad antioxidante más significativa que los polifenoles no oxidados [32].

Contenido total de fenoles

Los fenoles totales, expresados como equivalentes de ácido gálico por gramo de producto seco (GAE/g) (Figura 2), no mostraron diferencias significativas al comparar muestras frescas y secas. La prueba de Dunnett (p=0.717) no mostró cambios en el contenido total de fenoles, con un valor de 28.488 GAE/g para la muestra de cempasúchil seca (Tabla 1). Existen informes sobre el contenido total de fenoles en la flor de cempasúchil seca mediante diferentes métodos [26], varía de 55.8 (muestra fresca) a valores entre 43.6 y 60.0 mg GAE/g de peso seco. El aumento de este parámetro se observó al combinar radiación infrarroja lejana con convección de aire caliente. Dorozko [33] reportó un incremento en el contenido fenólico total de 1058 mg GAE 100 g^{-1} DW a 1062 mg GAE 100 g^{-1} DW y 1122 mg GAE 100 g^{-1} DW en pétalos de flores de cempasúchil mediante el uso de liofilización y secado por microondas, respectivamente. Las diferencias entre el contenido de fenoles en el presente estudio y el reportado se atribuyen a la etapa de madurez, las prácticas agrícolas (genética, fertilizantes, insolación e irrigación) y el manejo poscosecha de la flor de cempasúchil. En general, fue posible observar que el secado solar permitió la preservación de fenoles, que son compuestos importantes que proporcionan actividad antioxidante y han ganado más atención en los últimos años como agentes

potenciales para prevenir y tratar varias enfermedades crónicas y relacionadas con el estrés oxidativo [34]. Akshaya ha reportado los cambios en el contenido fenólico total en la flor de cempasúchil [31].

Contenido total de flavonoides

Se ha reportado que los flavonoides tienen un rol potencial en la prevención de enfermedades cardiovasculares, la prevención de enfermedades neurodegenerativas relacionadas con la edad, la inactivación de carcinógenos, la inhibición de la proliferación celular, la mejora de los procesos de reparación del ADN y la reducción del estrés oxidativo [35], de ahí la importancia de la retención de estos compuestos después del secado (Figura 3). La prueba de Dunnett (α=0.05) no mostró diferencias significativas entre las muestras frescas (6.348 QE/g) y secas (6.622 QE/g) (Tabla 1), lo que representa una ventaja del método de secado solar en la retención de un compuesto tan importante de las flores de cempasúchil. Gargi [30] reportó una disminución en el contenido total de flavonoides en la flor de calabaza fresca (17.95 µgQE/ml) en comparación con el secado en bandeja (4.31 µgQE/ml), secado a la sombra (5.22 µgQE/ml), secado en microondas (2.95 µgQE/ml) y secado al sol (1.59 µgQE/ml). Dorozco [33] reportó una disminución en el contenido total de flavonoides en caléndulas (2522 mg 100 g^{-1} DW) en comparación con el secado por liofilización (1947 mg 100 g^{-1} DW), secado con aire caliente (1903 mg 100 g^{-1} DW) y secado en microondas (1965 mg 100 g^{-1} DW); según su informe, las altas temperaturas y los tiempos de secado prolongados disminuyen el contenido total de flavonoides.

Color

Los resultados del análisis de color indicaron una diferencia significativa en la luminosidad, representada por el parámetro *L*. Tras el secado solar, se observó una reducción en los niveles de luminosidad, con un valor de ΔL de -15.51. Se ha reportado que el parámetro de color L está estrechamente correlacionado con el oscurecimiento en los tejidos de frutas y hortalizas debido al pardeamiento enzimático y no enzimático tras el secado [36]. El parámetro Δa registró un valor negativo de -1.56. En este caso, cuando Δa adopta valores negativos, el color tiende a ser menos rojo. El parámetro Δb también fue negativo, con un valor de -17.5, lo que corresponde a una tendencia del producto seco a ser menos amarillo. Valores negativos de Δc (-16.57) para pétalos secos describieron que las muestras resultaron menos saturadas o con menor intensidad en comparación con el estándar original, y valores negativos de ΔH (-5.85) indicaron un cambio de amarillo a rojo (Figura 6), como ocurrió en el secado de frutos de carambola [37], reportando un ΔH de -9.92 a -7.29. El parámetro ΔE que mide la diferencia de color global tomó un valor de 23.44. En este caso, cuando los valores exceden un ΔE de 12 describen una diferencia pronunciada según Hii y Law [38]. Siriamompun [26] reportó los cambios en el color de las flores de cempasúchil por diferentes métodos de secado; según su informe, la diferencia de color total fue de 24.2 para el secado por liofilización, 24 para el secado con aire caliente y 19.1 para el secado con aire caliente FIR.



Figura 6. Flor de caléndula fresca y seca (*Tagetes erecta* L.)

Conclusiones

En el presente estudio, se secaron pétalos de flor de cempasúchil en un secador solar de tipo mixto debido a su naturaleza altamente perecedera y a los usos potenciales que los productos secos pueden aportar en términos de compuestos bioactivos y propiedades antioxidantes. Tras el secado solar, se observó un incremento en algunas propiedades como el ácido ascórbico, de 27.86 a 75.67 mg/100 g; los carotenoides, de 2.073 a 18.947 mg/mL; y la actividad antioxidante, de 93.513 a 98.178 %. Esta liberación de compuestos bioactivos tras el secado puede ser ventajosa para aplicaciones industriales como aditivos alimentarios, colorantes o pigmentantes. Por otro lado, el contenido total de fenoles y el contenido total de flavonoides no mostraron diferencias significativas después del secado, siendo 28.06 a 28.48 GAE/g en el caso de los fenoles, y de 6.348 a 6.622 QE/g de contenido de flavonoides. Asimismo, la principal ventaja del presente estudio es el uso de tecnologías sostenibles que no generan impacto ambiental y son de fácil manejo, lo que representa una alternativa a los métodos de secado convencionales y una alternativa para dar un segundo uso a las flores que suelen tratarse como residuo después de festividades o que se utilizan poco el resto del año.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los proyectos CONAHCYT 319188 Centro Comunitario para el Deshidratado Solar de Productos Agropecuarios de Pequeños Productores Indígenas en Hueyapan, Morelos, Investigadores por México CONAHCYT y Estancias Posdoctorales por México (2023-1).

Referencias

1. Global Compositae Database (GCD) (2024) *Tagetes erecta* L. https://www.compositae.org/gcd/aphia.php?p=taxdetails&id=1083758. Accessed 28 november 2024
2. Rojas J. (2022c). *Tagetes erecta* (Mexican marigold) [Conjunto de datos]. En CABI Compendium. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.52641. Accessed 28 november 2024
3. Rzedowski GC, de Rzedowski J (2010) Flora Fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/Indice_Flora_del_Valle_de_Mx.pdf. Accessed 28 november 2024
4. Villaseñor J, Espinosa F (1998) Catálogo de Malezas de México. Universidad Nacional Autónoma de México.https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=1wza8r&d=false&q=*:*&i=2&v=1&t=search_0&as=0. Accessed 28 november 2024
5. Secretaría del medio ambiente (2023). https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/reporta-sedema-incremento-del-465-en-produccion-de-cempasuchil. Accessed 3 march 2025
6. Morales GF (2023) El cempasúchil más allá de las ofrendas. https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-cempasuchil-mas-alla-de-las-ofrendas/. Accessed 3 march 2025
7. Lopamudra B, Rajyasri G (2022) Marigold biopesticide as an alternative to conventional chemical pesticides. J Adv Sci Res. 13:26-33. https://doi.org/10.55218/JASR.202213503
8. Padma V, Suman K, Satyawati S (2002) Tagetes: a multipurpose plant. Bioresour Technol. 62: 29-35. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00101-6
9. Santos PC, Oliveira GF, Bronzel JJ, Pavarini R, Pereira PG, Chorilli M, Reis ZC, Pereira SL, Gonçalves SR (2022) Insecticidal activity of *Tagetes erecta* and *Tagetes patula* extracts and fractions free and microencapsulated. Biocat Agric Biotechnol. 45:102511 https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102511
10. Sowbhagya HB, Sushma SB, Rastogi NK, Naidu MM (2013) Effect of pretreatments on extraction of pigment from marigold flower. J Food Sci Technol. 50:122-128. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0313-4
11. Chitrakar B, Zhang M, Bhandari B (2019) Edible flowers with the common name "marigold": Their therapeutic values and processing. Trends Food Sci Technol. 89: 76-87. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.008
12. Chopra R N, Nayar SL, Chopra I C (1956). Glossary of Indian medicinal plants. Council of Scientific and Industrial Research New Delhi. 89:77-100. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2016037
13. Estrada DL, Chang W, Heinrich M (2024) From "traditional" to modern medicine: A medical and historical analysis of *Tagetes erecta* L. (Cempasúchil). J Tradit Complement Med. 15:6-14. https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2024.08.001
14. Moliner C, Barros L, Dias MI, López V, Langa E, Ferreira IC, Gómez RC (2018) Edible Flowers of *Tagetes erecta* L. as Functional Ingredients: Phenolic Composition, Antioxidant and Protective Effects on Caenorhabditis elegans. Nutrients. 10:2002. https://doi.org/10.3390/nu10122002
15. Prakash O, Kumar A (2017) Solar drying technology. Springer, Singapore https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4
16. Monica B, Monika S, Chinmaya M, Adinpunya M (2022) Dehydrated jasmine flowers obtained through natural convective solar drying retain scent volatiles and phenolics – A prospective for added-value utility, Ind Crops Prod. 177:114483. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114483.
17. García VO, Lucho GAM, Montiel BEA, Castañeda VM, Ortiz SCA, Castillo TB, Domínguez NA (2023) Effect of modified solar dryers on colorimetric and physicochemical properties of pumpkin flower (*Cucurbita maxima*). Plant Foods Hum Nutr. 78:139-145. https://doi.org/10.1007/s11130-022-01032-8
18. García VO, Domínguez NA, Lucho GAM, Jiménez MAG, Rodríguez MAS, Castillo TB, Castillo TM (2024) Mixed-Mode Solar Drying and its Effect on Physicochemical and Colorimetric Properties of Zompantle (*Erythrina americana*). Plant Foods Hum Nutr. 79:194-201. https://doi.org/10.1007/s11130-024-01147-0
19. Balladin DA, Headley O (1999) Solar drying of rose (*Rosa* sp.) petals. Renew energy. 18:249-255. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00765-4
20. Pachpinde P, Sharma PK., Mani I (2019) Hybrid solar dryer for drying of high-value flowers. Curr Sci. 116: 1463-1466. https://www.currentscience.ac.in/Volumes/116/09/1463.pdf
21. Vijayan S, Arjunan T, Kumar A (2017) Fundamental concepts of drying. In: Om P, Anil K (eds) Solar drying technology, 1st edn. Springer, Singapore, pp 3-38
22. Kailey R, Dhawan K, Rasane P, Singh J, Kaur S, Singh BP, Kaur D (2019) Utilization of Foeniculum vulgare in herbal candy preparation and analysing its effect on the physico-chemical and sensory properties. Current Science, 116. DOI:10.18520/cs/v116/i12/2013-2019
23. Sowbhagya HB, Sushma SB, Rastogi NK, Naidu M (2013) Effect of pretreatments on extraction of pigment from marigold flower. J Food Sci Technol. 50:122-128. https://doi10.1007/s13197-011-0313-4
24. Dujmovic M, Radman S, Opacic N, Uher SF, Mikulicin V, Voca S (2022) Edible flower species as a promising source of specialized metabolites. Plants 11:2529. https://doi.org/10.3390/plants11192529

25. Siriamornpun S, Kaisoon O, Meeso N (2012) Changes in colour, antioxidant activities and carotenoids (lycopene, B-carotene, lutein) of marigold flower (*Tagetes erecta* L.) resulting from different drying processes. J Funct Foods. 4:757-766. http://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2012.05.002
26. Vanegas EPE, Del Villar MAA, Serrato CMÁ, Solano NA, Arenas OML, Quintero GAG, García JFA (2007) Carotenoides en *Tagetes erecta* L. la modificación genética como alternativa. Rev Fito Mex 30: 109-118. DOI:10.35196/rfm.2007.2.109
27. Sarkar A, Majumder J, Sarkar A, Koley P. (2019) Studies on drying methods for evaluation of biochemical properties in African marigold (*Tagetes erecta* L.). Int J Chem Stud. 7:128-131.
28. Mashitoa FM, Shoko T, Shai JL, Slabbert RM, Sultanbawa Y, Sivakumar D (2021) Influence of different types of drying methods on color properties, phenolic metabolites and bioactivities of pumpkin leaves of var. butternut squash (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poir). Front Nut. 8:694649. DOI:10.3389/fnut.2021.694649
29. Managa MG, Sultanbawa Y, Sivakumar D (2020) Effects of different drying methods on untargeted phenolic metabolites, and antioxidant activity in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. chinensis) and nightshade (Solanum retroflexum Dun.). Molecules. 25:1326. https://doi.org/10.3390/molecules25061326
30. Gargi A, Singh J, Rasane P, Kaur S, Kaur J, Kumar M, Ercisli S (2023) Effect of drying methods on the nutritional and phytochemical properties of pumpkin flower (*Cucurbita maxima*) and its characterization. J Food Meas Charact. 17:5330-5343. https://doi.org/10.1007/s11694-023-02026-z
31. Akshaya NR, Singh KP, Saha S, Panwar S, Bharadwaj C (2020) Influence of drying methods on retention of carotenoids and their antioxidant activity in marigold flowers. Indian J Hortic. 77(4), 713-719.
32. Yan Z, Zhong Y, Duan Y, Chen Q, Li F (2020) Antioxidant mechanism of tea polyphenols and its impact on health benefits. Anim Nut 6:115-123. doi: 10.1016/j.aninu.2020.01.001
33. Dorozko J, Kunkulberga D, Sivicka I, Kruma Z (2019) The influence of various drying methods on the quality of edible flower petals. In Conference Proceedings. Foodbalt. 13:182-187. DOI:10.22616/FoodBalt.2019.045
34. Bhuyan DJ, Basu A (2017) Phenolic compounds potential health benefits and toxicity. In: Quan VV (ed) Utilisation of bioactive compounds from agricultural and food production waste, CRC, Australia, pp 27-59
35. Kozlowska A, Szostak WD (2014) Flavonoids-food sources and health benefits. Rocz Państw Zakł Hig. 65:79-85. PMID: 25272572
36. Kurozawa LE, Azoubel PM, Murr FEX, Park KJ (2012) Drying kinetic of fresh and osmotically dehydrated mushroom (*Agaricus blazei*). J Food Process Eng. 35:295-313. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00590.x
37. García VO, Cesar MAL, López VEC, Castillo TB, Ortiz SCA, Lizama TFI, Domínguez NA (2022) Effect by using a modified solar dryer on physicochemical properties of carambola fruit (*Averrhoa Carambola* L.). Rev Mex Ing Quím 21:Alim2650. DOI:10.24275/rmiq/Alim2650
38. Hii CL, Law CL. Product quality evolution during drying of foods, vegetables and fruits. In: Law CL, Mujumdar AS, eds. Drying of Foods, Vegetables and Fruits. Singapore: CRC Press; 2010:125-144. https://arunmujumdar.com/wp-content/uploads/2020/03/Drying-of-Foods-Vegetables-and-Fruits-Volume-1.pdf

Edificios Bioclimáticos

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2214	Ventanas fotovoltaicas: un enfoque bioclimático para la incorporación a la arquitectura sustentable – mejora de la habitabilidad y la eficiencia energética	Rosa Gabriela Ayala Cipriano
2177	Simulación de un edificio de aulas para la evaluación térmica de dos diferentes materiales en muros, en la Universidad Autónoma de Baja California Sur	Fernanda Guadalupe Murillo Jiménez
1540	La influencia de los archivos climatológicos en la precisión del modelado energético de edificaciones	Iván Oropeza Pérez

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

VENTANAS FOTOVOLTAICAS: UN ENFOQUE BIOCLIMÁTICO PARA LA INCORPORACIÓN A LA ARQUITECTURA SUSTENTABLE - MEJORA DE LA HABITABILIDAD Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Rosa Gabriela Ayala Cipriano
Departamento de Posgrado en Bioclimática, UAM Azcapotzalco, Av San Pablo Xalpa 180, CDMX, 02128, México, 5637538171,
rosayala67cg@gmail.com

RESUMEN

El diseño bioclimático puede maximizar la eficiencia energética en la arquitectura. Un ejemplo destacado de esta tendencia es el uso de vidrios fotovoltaicos transparentes.

Este material permite proteger los espacios de la intemperie, funcionando como ventana convencional. Generando energía eléctrica siendo así una ecotecnología aplicada a la arquitectura bioclimática, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables.

En México el hablar de vidrios fotovoltaicos no es relevante en razón de escasa información. En otros países como España, Japón, India, entre otros que poco a poco se suman a la lista, son conscientes del potencial de este sistema como una alternativa que cumple con ser sustentable y eficiente.

Además es multifuncional, porque después de su período de vida útil, funciona como un vidrio común.

Este sistema de acristalamientos es atractivo para investigadores, dando inicio a una carrera por crear el mejor producto de vidrios inteligentes que aprovecha la energía solar para la generación de energía eléctrica. Esta competencia la conforman diversas universidades y compañías tecnológicas comprometidas a desarrollar el vidrio más eficaz para el mercado.

Aunque la generación de energía sea mínima con un grado de eficiencia de 5% - 10%, el uso de estos vidrios va innovando con el paso del tiempo, siendo una tecnología que puede revolucionar la industria de la construcción sustentable.

A través de la evaluación de las limitaciones, se busca proporcionar una visión valorativa y práctica sobre el uso de vidrios fotovoltaicos proponiendo mejoras para su implementación en la arquitectura. En este sentido, el artículo se determina a partir de la práctica de los sistemas activos para proporcionar una visión concisa sobre el desempeño que puedan tener en la construcción de proyectos.

Se propone presentar el potencial de generación a partir de la eficiencia así como el desempeño al interior del espacio arquitectónico.

ABSTRACT

Bioclimatic design can maximize energy efficiency in architecture. A prominent example of this trend is the use of transparent photovoltaic glass.

This material protects spaces from the elements, functioning as a conventional window. It generates electricity, making it an eco-technology applied to bioclimatic architecture, reducing dependence on non-renewable energy sources.

In Mexico, talking about photovoltaic glass is not relevant due to limited information. In other countries such as Spain, Japan, and India, among others that are gradually joining the list, they are aware of the potential of this system as an alternative that is both sustainable and efficient.

It is also multifunctional because after its useful life, it functions like ordinary glass.

This glazing system is attractive to researchers, kicking off a race to create the best smart glass product that harnesses solar energy to generate electricity. This competition is comprised of various universities and technology companies committed to developing the most efficient glass for the market. Although energy generation is minimal, with an efficiency rating of 5%-10%, the use of these glasses continues to innovate over time, representing a technology that could revolutionize the sustainable construction industry.

By assessing their limitations, the article seeks to provide an evaluative and practical perspective on the use of photovoltaic glass, proposing improvements for its implementation in architecture. In this sense, the article draws on the practice of active systems to provide a concise overview of their potential performance in construction projects.

The aim is to present the generation potential based on efficiency, as well as their performance within the architectural space.

Palabras clave: Vidrios Fotovoltaicos, Bioclimática, Arquitectura, Sustentabilidad, Eficiencia Energética e Innovación.
Keywords: Photovoltaic Glass, Bioclimatic, Architecture, Sustainability, Energy Efficiency and Innovation.

1. VIDRIOS FV EN LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA COMO ECOTECNOLOGÍA

La tecnología bioclimática

Ha avanzado considerablemente en la última década, especialmente en su integración con sistemas innovadores que buscan gestionar de manera eficaz los recursos naturales proporcionados por el clima del entorno. Para lograr comprender con mayor claridad este

concepto el Dr. Riadh Habash[1] describe como intención principal de la arquitectura bioclimática el crear interiores confortables y energéticamente eficientes, reduciendo la dependencia del edificio de la energía artificial o incluso cubriendo completamente sus necesidades energéticas sin causar daños ambientales.

Si a esto le sumamos que existen sistemas como el vidrio FV que permite generar energía y mejorar el confort térmico y lumínico del espacio pasando desapercibido. Esto indica que la implementación de las tecnologías en conjunto a las estrategias de diseño bioclimáticas pueden maximizar la eficiencia energética de manera exponencial a la arquitectura sin afectar la comodidad del usuario.

El vidrio FV es un material que permite proteger los espacios de la intemperie, funcionando como ventana permitiendo el paso de la luz natural conservando la temperatura interior, lo que lo convierte en una ecotecnología aplicada a la arquitectura bioclimática, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables.

El principal problema que hay para México al utilizar sistemas tecnológicos fuera de lo convencional es el que aún no es ampliamente relevante a causa de su relativa novedad. Sin embargo, su impacto en el país se ve afectada por la preferencia de sistemas fotovoltaicos comunes como lo son los paneles solares, que brinda costos menores en comparación con sistemas avanzados que requieren de una instalación más específica que aumenta los costos y disponibilidad.

La demanda mundial de energía renovable y sostenible sigue aumentando y en el ámbito internacional el vidrio FV genera intereses como alternativa eficiente, si en México su aplicación es incipiente, existirá un retroceso o estancamiento en el progreso de evolución de consumo de energía responsable, original y con un amplio rango de posibilidades para su implementación y desarrollo.

Actualmente, encontrar un equilibrio entre eficiencia energética y confort de los usuarios se considera un reto significativo para diseñadores, arquitectos y constructores. Sin embargo, es un requisito indispensable para el desarrollo de proyectos que la obra incorpore estrategias de diseño eficientes para reducir el consumo energético. Esto se debe a que el cambio climático incrementa la insatisfacción térmica en los usuarios debido a la adaptabilidad limitada del ser humano a los cambios climáticos rápidos. Ante esta situación, los usuarios recurren a equipos de condicionamiento que consumen más energía eléctrica, lo que a su vez aumenta la generación de contaminantes y acelera el efecto del cambio climático. Formando un círculo vicioso que impacta de forma negativa al ambiente y la calidad de vida humana.

Bajo esta premisa, las ecotecnologías son una herramienta que permite brindar cambios positivos tanto para el usuario como para el medio ambiente, funcionando como estrategia clave para lograr edificaciones sostenibles. Entre ellas, los sistemas activos representan una solución de alto impacto cuando se integran adecuadamente en el diseño bioclimático.

1.1 Vidrios FV y sistemas activos. Este sistema lo podemos definir como aquellas tecnologías o estrategias de diseño que dependen de una fuente de energía externa o algún equipo mecánico técnico para su funcionamiento, a diferencia de los sistemas pasivos que no requieren de algún sistema operativo externo para poder cumplir con su función. Para comprender mejor este concepto, la compañía Kömmerling (2024)[2] describe estos sistemas como aquellos que necesitan energía para su funcionamiento, y que se instalan para mejorar el confort interior.

En la práctica, su integración requiere de una planificación analítica para asegurar que realmente aporten beneficios térmicos, lumínicos y energéticos, sin generar costos exorbitantes y/o complejidad operativa. En razón, los vidrios FV representan una de las formas más integradas de sistemas activos, al combinar la función de cerramiento, control solar y generación eléctrica.

1.2 El vidrio FV es una solución práctica resultado de la combinación de un sistema activo y pasivo. Desde este punto, esta tecnología representa la fusión entre ambos enfoques (activo y pasivo), al lograr integrar funciones que aprovechan la energía solar de manera activa, y como elemento arquitectónico que utiliza la luz natural y el calor solar de forma pasiva tal cual como una ventana. En este contexto, los sistemas activos se refieren a tecnologías como los vidrios FV, que generan energía renovable. Por otro lado, los sistemas pasivos incluyen elementos como las ventanas, que aprovechan la luz natural y permiten el control de la ventilación natural en el espacio.

Generalmente este producto aún no se considera viable para proyectos residenciales ya que son áreas pequeñas las que ocupan los acristalamientos y lo que genera es un ahorro equivalente al área en donde se instale por lo tanto es un beneficio menor en comparación a un edificio.

---

[1] *Riadh W.Y. Habash*. (s. f.). Faculty Of Engineering. https://www.uottawa.ca/faculty-engineering/school-electrical-engineering-computer-science/directory/riadh-habash

[2] Reto Kömmerling. (2024, November 7). *Sistemas activos - Reto KÖMMERLING*. https://retokommerling.com/reto-kommerling/quienes-somos/

Aunque el rendimiento varía según el diseño y las características específicas del vidrio FV debido a que es un material muy versátil, normalmente, el vidrio tiene un rendimiento inferior al de los paneles convencionales, oscilando entre el 5% y el 15% ([3]) . La gran ventaja es que al ser un material muy prometedor y eficaz al ocupar menos espacio en comparación de los paneles solares, las empresas privadas y las universidades encargadas en el desarrollo de la tecnología cada año dan a conocer información acerca de mejoras en el sistema. Es crucial evaluar las especificaciones del fabricante y el tipo de vidrio para maximizar su rendimiento y contribución a la sostenibilidad en los edificios.

1.3 Funcionamiento y aplicaciones prácticas de vidrios FV

Existen diferentes tipos de vidrio, aunque están hechos de diferentes materiales, se rigen bajo los mismos principios físicos los cuales funcionan por medio de la energía solar directa e indirecta capturando la luz visible, ultravioleta e infrarroja (Fig 1).

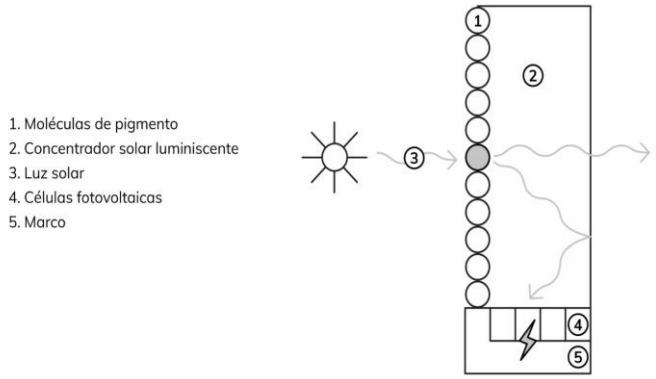


Fig 1. Funcionamiento ilustración elemental (Ventanas Solares: Toda la Información, 2024) [4]

Se puede identificar que la máxima capacidad de generar energía eléctrica es equivalente a 57.6 Wp/m² que puede ser utilizada para alimentar una variedad de dispositivos de baja potencia, esto corresponde a una eficiencia aproximada de entre el 2.8% al 5.8% por metro cuadrado. Aunque es importante mencionar que la eficiencia de los paneles solares comerciales sigue superando al de este sistema fotovoltaico, lo que se traduce en una potencia de alrededor de 150-200 Wp/m², mientras que los de alta potencia pueden llegar a valores de 300 Wp/m² o más.

Sin embargo el vidrio FV amplía las opciones de crear energía eléctrica a partir de energía solar facilitando la integración de sistemas eficientes a la arquitectura. El funcionamiento de los vidrios FV se rige similar a la de los paneles que es mantenerlos expuestos al sol, la diferencia es que este sistema no depende de la orientación óptima o el evitar sombras parciales en vista que funcionan como concentradores solares transparentes, absorbiendo las longitudes de onda de la luz no visible, como la ultravioleta y la infrarroja mientras dejan pasar la luz visible.

En resumen, su eficiencia energética es constante independientemente de las condiciones climáticas como días nublados y lo único que puede perjudicar y en mínima parte es la concentración de polvo, calentamiento excesivo del vidrio y periodos de muy baja exposición solar, pero en el contexto climático de México no aplica porque según la revista el cerramiento[5] explica que el promedio de horas luz solar es de 11 horas en invierno y de casi 13 horas en verano, siendo México uno de los países con mayor irradiación en el mundo.

Tipos de vidrio fotovoltaico. Actualmente se están desarrollando diferentes vidrios FV. Los dos tipos principales son parcialmente transparentes (silicio cristalino) y paneles transparentes (silicio amorfo, cuarzo y perovskita).

- Vidrio FV semitransparente. Este sistema equilibra la transmisión de luz con una mayor producción de energía, la característica principal de este sistema es su capacidad para generar energía en función de la opacidad del vidrio. Un factor que juega en contra de este sistema es el que en temas tecnológicos, el máximo nivel de eficiencia que puede llegar a alcanzar es del 10% al 12% con un nivel de opacidad del 100%. Y en relación a lo que se está poniendo en marcha para fines de construcción, solo llega al 5% promedio de eficiencia energética respetando un grado de transparencia adecuado de entre el 70% y 90% de visión. [6]

---

[3] Ingeniería Fotovoltaica / Soluciones de Energía Sostenible. (2023, 27 octubre). El vidrio fotovoltaico. IngenierÍA Fotovoltaica / Soluciones de EnergÍA Sostenible. https://www.demesol.com/blog/el-vidrio-fotovoltaico

[4] Ventanas Solares: Toda la información. (2024, 17 enero). EDP Blog. https://www.edpenergia.es/es/blog/energia-fotovoltaica/ventanas-solares/#:~:text=Qu%C3%A9%20son%20las%20ventanas%20fotovoltaicas,uso%20y%20circulaci%C3%B3n%20del%20ambiente.

[5] Radiación solar en México – Amevec. (s. f.). https://amevec.mx/radiacion-solar-en-mexico/

[6] Onyx Solar, Soluciones de Fotovoltaica Integrada en Edificios. (s. f.). https://onyxsolar.es/#:~:text=La%20integraci%C3%B3n%20del%20vidrio%20fotovoltaico,beneficios%20de%20la%20luz%20natural.&text=M%C3%A1s%20de%20500%20proyectos%20completados%20en%2060%20pa%C3%ADses%20de%20los%20cinco%20continentes.

- Vidrio FV transparente (SQPV: Solar Quartz Panel). Actualmente es el vidrio fotovoltaico más avanzado tecnológicamente completamente transparente desarrollado por la empresa InQs[7] . Con estos vidrios se puede controlar la temperatura interior con una fuente de alimentación independiente y es tan sofisticado que también funciona como protector contra el calor. Destaca la facilidad de reciclaje del producto, ya que no contiene metales ni tierras que comprometan la salud ambiental, en contraste con los paneles solares convencionales.

2. ANÁLISIS CRÍTICO Y LIMITANTES

Descripción de caso de estudio práctico, resultados y análisis de resultados

Los investigadores están experimentando con varios enfoques innovadores para lograr una transparencia mejorando la eficiencia energética y procurando que su huella de carbono sea mínima, como las células fotovoltaicas orgánicas, las tecnologías de película fina, las células solares sensibilizadas por colorantes, el silicio transparente y las células solares de puntos cuánticos. Aunque se han logrado avances significativos hacia la fabricación de este sistema fotovoltaico transparente, estos materiales aún se encuentran en las primeras fases de comercialización.

Los proyectos que han integrado los vidrios FV transparentes son contados y en su mayoría son edificios empresariales los que han incorporado el sistema de vidrios semitransparentes. Lamentablemente al ser empresas privadas no permiten el acceso a investigadores ajenos a su empresa y por ende dificulta la obtención de datos precisos de la eficiencia del sistema ya aplicado en sitio. Y aunque hay universidades dando seguimiento al desarrollo de este producto, siguen estando en fases experimentales los cuales aunque superan la eficiencia de los productos en el mercado y poseen datos precisos, no son resultados concisos en la práctica de la construcción.

Sin embargo se puede resolver fácilmente el saber cuánta energía proporciona un vidrio fotovoltaico colocándolo en un caso hipotético residencial basándose principalmente en los datos de fichas técnicas.

Cálculo de Energía Generada por vidrio fotovoltaico transparente con eficiencia del 7% m²

(1)

Supongamos que el vidrio fotovoltaico está expuesto a la radiación solar durante 5 horas al día, con una potencia promedio de 70 Wp/m². La energía generada en un día sería:

$$\text{Energía} = \text{Potencia} \times \text{Tiempo}$$

$$\text{Energía} = 70\ \text{W/m}^2 \times 5\ \text{horas}$$

$$\text{Energía} = 350\ \text{Wh/m}^2$$

Esto significa que el panel solar o vidrio fotovoltaico generaría aproximadamente 350 vatios-hora de energía por metro cuadrado en un día, asumiendo 5 horas de exposición a la radiación solar pico.

(Se ha de aclarar que 5 horas solares pico no significa 5 horas de sol literal. El número de horas solares pico varía según la región. En México, por ejemplo, muchas zonas reciben entre 4.5 y 6.5 horas solares pico al día. Por eso para este ejemplo se consideró la media de 5.)

Sin embargo, en condiciones reales, la eficiencia se pudiera ver afectada por suciedad, temperatura excesiva en el sistema o pérdidas de energía tras la conexión directa o almacenamiento e incluso por la disminución considerable del factor solar. Por dichas causas se sugiere agregar en el cálculo el concepto de rendimiento del sistema (Performance Ratio):

[7] InQs Co., Ltd. | Powering the IoT revolution! (s. f.). inQs Co., Ltd. | Powering The IoT Revolution! http://inqs.co.jp/en/

En la práctica, los sistemas fotovoltaicos no operan al 100% de eficiencia debido a diversas causas. Por eso, se suele aplicar un performance ratio (PR), que varía entre 0.75 y 0.85 para estimaciones realistas.

Entonces se podría complementar el cálculo de la siguiente manera:

(2)

$$\text{Energía real estimada} = 350\ \text{Wh/m}^2 \times \text{PR (por ejemplo, 0.80)}$$

$$\text{Energía real} = 280\ \text{Wh/m}^2 \text{ al día}$$

Una vez se obtiene este valor se multiplica por la unidad de superficie acristalada (en un proyecto sencillo).

En una residencia promedio en México, la superficie acristalada de las ventanas suele representar entre un 10% y un 25% del área del suelo de cada habitación, dependiendo del diseño y las necesidades de iluminación y ventilación. Sin embargo, no existe una regla fija sobre la cantidad exacta de metros cuadrados, ya que depende del tamaño de la casa y el diseño de las ventanas.

El tamaño promedio de una casa en México suele tener entre 83 y 270 metros cuadrados. Este tamaño puede variar significativamente según la zona y el tipo de vivienda (departamento o casa unifamiliar).

Consideraciones sobre la superficie acristalada. El Código Técnico de la Edificación (CTE)[8] Establece que la superficie acristalada de las ventanas no debe ser inferior al 10% del área del suelo de la habitación. En salas y comedores, se recomienda que la superficie acristalada sea mayor, llegando incluso al 25% del área del suelo. Por lo tanto se considerará los valores de la siguiente manera:

-Casas residenciales: En viviendas de aproximadamente 270 m², la superficie acristalada puede representar entre el 15% y el 25% del total, es decir, entre 40.5 m² y 67.5 m².

-Departamentos: En unidades de alrededor de 83 m², la superficie acristalada suele oscilar entre el 10% y el 20%, lo que equivale a entre 8.3 m² y 16.6 m².

Ejemplo. En un departamento de 83m² cuya superficie acristalada corresponde a 12m² se colocan vidrios fotovoltaicos semitransparentes con una eficiencia del 7%, se tendría que multiplicar la eficiencia promedio fija correspondiente a 280 Wh/m² por una unidad de 1x1m² al día por los 12m² de superficie acristalada dando un total de 3360 W al día. Y suponiendo que una vivienda de esa dimensión requiere aproximadamente 9 kW/día[9] y la potencia nominal del módulo es de 3360 W lo que corresponde a cubrir la demanda del 37.3% del consumo total de un día.

[8] IngenieriaReal.com. (2024b, abril 13). Tamaño de ventanas para una casa: Aspectos clave a considerar. Ingeniería Real. https://ingenieriareal.com/que-tamano-de-ventanas-necesito-en-mi-casa/

[9] ¿Cuántos Kw/h consume una casa al día? ¿Y al mes? - KronosHomes. (s. f.). https://kronoshomes.com. https://www.kronoshomes.com/es/actualidad/cuantos-kwh-consume-de-media-una-casa-al-dia/#:~:text=%C2%BFCu%C3%A1ntos%20KwH%20consume%20una%20casa,en%20torno%20a%20los%209KWh.

Análisis crítico del potencial práctico de los vidrios fotovoltaicos semitransparentes y transparentes en bioclimática y su relación con las ecotecnologías

Los vidrios fotovoltaicos semitransparentes y transparentes han representado un gran avance en el campo de la energía renovable y complementario a la arquitectura bioclimática moderna porque han representado ser una solución fuera de lo convencional al incorporar un nuevo método que a su vez brinda un control pasivo del ambiente interior. Existe una dualidad que los convierte en un sistema clave dentro del conjunto de ecotecnologías, cuyo único objetivo es reducir el impacto ambiental que se genera al crear elementos de construcción e integrarlos para la reducción del consumo eléctrico dejando de depender tanto de equipos de acondicionamiento artificial.

A partir de un caso hipotético del apartado anterior de una vivienda en la Ciudad de México con una demanda energética diaria de 9 kWh, el uso de vidrios fotovoltaicos con una potencia nominal de 3360 W permite cubrir aproximadamente el 37.3% de ese consumo. Esta cifra, aunque modesta en términos absolutos, demuestra un avance significativo si se considera que los módulos están integrados a la envolvente del proyecto, sin ocupar espacio adicional con una ganancia estética y funcional. Cabe mencionar que en una ciudad con una radiación solar promedio de 2300 kWh/m²/año, el rendimiento energético de estos vidrios se mantiene competitivo frente a tecnologías convencionales de paneles solares.

En el análisis práctico se destaca que la instalación de estos sistemas es simple para ciertos modelos debido a que los que son una película se puede lograr integrar al acristalamiento existente sin problemas, la desventaja es la fragilidad. En comparación con los sistemas donde en el proceso de producción del sistema ya viene integrada la energía fotovoltaica, mantienen una resistencia mayor.

Desde la perspectiva bioclimática, estos vidrios también cumplen una función reguladora del confort térmico, al filtrar la radiación solar y reducir la carga térmica interna disminuyendo la necesidad de climatización. Su uso debe estar respaldado por un diseño integral que considere la orientación, el sombreado y la ventilación natural como parte de un enfoque holístico. Estos factores de orientación y sombreado son independientes de la eficiencia energética; se relacionan directamente al confort visual por incidencia lumínica y efectos termofísicos por la radiación solar prolongada (energía convectiva y radiactiva).

Factores limitantes y recomendaciones de implementación. Los paneles fotovoltaicos semitransparentes sin ninguna medida de optimización reducen la carga de calefacción anual, pero provocan un sobrecalentamiento en verano que aumenta la carga de refrigeración en regiones con temporada de enfriamiento[10] .

Los edificios incorporados con paneles fotovoltaicos semitransparentes pueden beneficiarse de la ventaja de la calefacción natural de los espacios durante el invierno y del aumento de la iluminación interior gracias a la luz natural. Sin embargo, si se integra de forma inadecuada, podrían surgir problemas como el sobrecalentamiento en verano y el deslumbramiento. En este sentido se deberá hacer uso de estrategias bioclimáticas para una óptima orientación y ubicación para ventanas, domos, recubrimientos, doble fachada u otros recursos aplicables para la incorporación de este sistema al proyecto arquitectónico.

También es fundamental entender que, cuando se trata de ventanas con paneles solares, la eficiencia del panel no es lo más importante. En términos prácticos, una ventana con vidrios FV menos eficiente solo requiere que la ventana abarque áreas más grandes, en comparación con el panel más eficiente para generar la misma cantidad de electricidad.

Los paneles solares transparentes no necesitan tener ni una orientación ni una inclinación concreta. A nivel mecánico se instalan exactamente igual que las ventanas convencionales, aunque luego cada placa de vidrio se conecta formando una red que se recoge en las cajas de conexión. Una limitante para recoger o almacenar la energía generada por estos sistemas es que aún no se estandariza a nivel residencial, ya que a diferencia de proyectos corporativos, su implementación y distribución es directa. Por el contrario, una característica del acristalamiento en una casa o departamento es que la ubicación de cada vidrio/ventana es intermitente en los espacios. Estos aspectos de instalación aún no se publican en sus fichas técnicas de los principales distribuidores, por lo que aunque ofrecen una instalación de sus propios productos, son aspectos que solo los técnicos encargados de la incorporación de esta tecnología pueden resolver.

[10] M.Z. Hussin, S. Shaari, A.M. Omar, Z.M. Zain, Amorphous silicon thin-film: Behaviour of light-induced degradation, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 43, 2015, Pages 388-402, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.093.(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114009186)

3. CONCLUSIÓN

La realidad del cambio climático nos obliga a encontrar más formas de utilizar energías renovables y los paneles solares parecen tener más ventaja que diversas tecnologías fotovoltaicas. Estas innovaciones existen desde hace décadas, pero su evolución como producto se trunca tras la eficiencia que año con año mejora en elementos fotovoltaicos tradicionales. Que no es malo, pero el interés de los investigadores y fabricantes se acumula más para darle prioridad a un sistema que ya por sí mismo es óptimo, alentando el crecimiento para eficientizar las nuevas formas de incorporar otros sistemas prometedores que optimizaría soluciones en la construcción que los paneles fotovoltaicos no pueden cumplir.

La tecnología fotovoltaica se va expandiendo cada vez más en diferentes presentaciones, permitiendo cambios al proceso de diseño dando más alternativas para incorporar un desarrollo sostenible a los proyectos constructivos y es impactante ver cómo se logra repensar la forma en que se integra la energía renovable en edificios. Pero para generar un progreso en la evolución de aplicación de sistemas novedosos se requiere primero entender cómo funcionan y en este caso se determina como los vidrios FV se integran de manera efectiva en diferentes contextos. Esto permitirá explorar y acrecentar las posibilidades de seguir mejorando su verdadero potencial y crear entornos más responsables y sostenibles para las generaciones futuras.

El modernizar la manera en la que concebimos las energías renovables en fotovoltaica aplicada a la arquitectura sostenible consiste en ser conciencientes como diseñadores arquitectos de que la incorporación de sistemas fotovoltaicos ya no solo se trata de colocar techos llenos de paneles pesados y saturar áreas horizontales que fácilmente se podrían aprovechar de diversas maneras. La evolución que nos brinda la tecnología nos permite considerar más alternativas eficaces no solo para la optimización de espacios, sino que también brinde mayor flexibilidad para incorporarse en proyectos sin afectar al diseño, a su vez ofrece posibilidades de mantener al usuario cómodo en los espacios, siendo la respuesta superficies inteligentes ligeras y estéticas que generan energía donde antes era imposible como en ventanas, dobles fachadas, barandales o cualquier área acristalada.

Los investigadores trabajan activamente para mejorar la producción energética de la tecnología solar transparente, pero por ahora no está a la altura de la eficiencia de los paneles solares opacos convencionales. Sin embargo, esto podría cambiar si se da la atención e información requerida a los profesionales para impulsar la innovación y vislumbrar las numerosas tecnologías solares, que podrían alcanzar el futuro del movimiento de energías limpias más rápido minimizando los residuos contaminantes tras su elaboración y desecho, aportando a la generación energía renovable durante su período de vida.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SIMULACIÓN DE UN EDIFICIO DE AULAS PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA DE DOS DIFERENTES MATERIALES EN MUROS, EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA SUR

Fernanda Guadalupe Murillo Jiménez, Federico T. Poujol Galván, Oscar Resendiz Pacheco y Madelein Galindo de la Cruz
Departamento de Ingeniería en Pesquerías, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Sur KM 5.5, Universidad Autónoma de Baja California Sur, 23085 La Paz, B.C.S,, México, 6122333080, fmurillo_23@alu.uabcs.mx.

RESUMEN
Este estudio se enfoca en el análisis del desempeño energético de un edificio de aulas escolares en la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), ubicado en La Paz, B.C.S. Se empleo la herramienta de simulación energética Energy Plus, con el fin de modelar el comportamiento térmico del edificio con dos sistemas constructivos, analizando parámetros como el consumo energético total, explorando alternativas bioclimáticas para mejorar el comportamiento del edificio convencional.
Uno de los sistemas constructivos está compuesto de dos capas de aislante (Quadlock) y una de concreto, mientras que el otro consiste en block de concreto hueco.
De acuerdo con los resultados se encontró que el material de concreto y aislante requiere un consumo de energía ligeramente menor para alcanzar el confort térmico en los meses más calurosos en comparación al material convencional (block de concreto hueco). Sin embargo, considerando la totalidad del año se encuentra que para tener una carga de refrigeración menor en el edificio de Quadlock en comparación con la construcción de block de concreto hueco, se necesita instalar un sombreador en la pared de alto asoleamiento (sur).

Abstrac:
This study focuses on the analysis of the energy performance of a classroom building at the Autonomous University of Baja California Sur (UABCS), located in La Paz, B.C.S. The energy simulation tool Energy Plus was used to model the thermal behavior of the building with two construction systems, analyzing parameters such as total energy consumption, exploring bioclimatic alternatives to improve the behavior of the conventional building.
One of the construction systems is composed of two layers of insulation (Quadlock) and one layer of concrete, while the other consists of hollow concrete block.
According to the results, it was found that concrete and insulation material requires slightly less energy consumption to achieve thermal comfort in the hottest months compared to the conventional material (hollow concrete block). However, considering the entire year, it is found that in order for the Quadlock building to require a lower cooling load than the hollow concrete block construction, a shader needs to be installed on the high-sun (south) wall.

Palabras clave:
Simulación térmica, confort térmico, consumo energético, Quadlock

Introducción
Hoy en día la eficiencia energética en edificaciones es una prioridad frente al cambio climático y el creciente consumo energético. En México, el uso de electricidad para confort térmico en viviendas ha aumentado del 20% al 35% en los últimos 20 años, según la CONUEE. Dada esta situación, el diseño bioclimático surge como una estrategia clave para reducir la dependencia de sistemas activos de climatización e iluminación. Como señala la Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros (IER-UNAM, 2023), diseñar considerando el clima local permite mejorar el confort térmico y disminuir consumos energéticos innecesarios.
Una manera de verificar si las medidas implementadas para reducir el consumo energético son costeables, es comparar el rendimiento de la edificación propuesta con el rendimiento con una edificación convencional, mediante softwares que nos permitan obtener la simulación térmica o mediante mediciones en campo. En este trabajo evaluamos la conveniencia mediante un estudio numérico de utilizar el material de baja conductividad térmica dentro de una matriz estructural de concreto en contraposición de los materiales de uso más frecuente como el block de concreto hueco.

Antecedentes
De acuerdo con Lucero Álvarez et al (2016) las condiciones ambientales, como la temperatura del aire y la radiación solar, tienen una relación compleja con los requerimientos energéticos para calefacción y refrigeración de edificios residenciales. Estos investigadores presentan un análisis comparativo utilizando el programa TRNSyS de los métodos de aislamiento más comúnmente aplicados a viviendas unifamiliares de bajos recursos en México, con el fin de encontrar las combinaciones de métodos más eficientes energéticamente para los diversos climas del país. Según sus resultados del análisis realizado, aislar tanto el techo como las paredes es más efectivo en ciudades con inviernos fríos; aislar solo el techo es mejor para climas templados, y los muros aislantes (combinados con techos de alto albedo) son más efectivos para ciudades con clima cálido durante todo el año.
Por otro lado, Barrios et al (2010) utilizan un modelo unidimensional de transferencia de calor para condiciones exteriores periódicas, para evaluar el rendimiento térmico de una envolvente monocapa y multicapa en una habitación con y sin aire acondicionado. La principal conclusión de su trabajo es que una pared/techo adecuado para una habitación con aire acondicionado puede no ser adecuada para una sin aire acondicionado. Para la pared/techo monocapa y las condiciones en estudio, observaron que, en una habitación con aire acondicionado, la

propiedad física más importante es su conductividad térmica, que debe ser lo más baja posible, mientras que, en una habitación sin aire acondicionado, la propiedad física más importante es la difusividad térmica, que también debe ser lo más baja posible. En este caso, encuentran que la posición del aislamiento en una pared/techo multicapa es importante.

Por su parte otro autor (Felices Puértolas, 2017) en su trabajo estudia un edificio ubicado en Madrid que incorpora la mayoría de los sistemas pasivos encontrados en la literatura. Lleva a cabo su análisis mediante un modelo experimental y un modelo simulado. Sus resultados experimentales obtenidos muestran cómo se alcanzan mayores temperaturas en el edificio en invierno que en verano. Señala que para el caso estudiado es importante la influencia de la longitud de los aleros, que bloquean la radiación solar en verano, pero la permiten en invierno.

Tomando en cuenta estos trabajos se puede ver que es importante llevar a cabo una simulación previa a la construcción de un edificio para asegurar que las estrategias bioclimáticas utilizadas sean las más adecuadas tomando en cuenta el clima y el uso que tendrá el edificio, por tal motivo nos hemos trazado los siguientes objetivos.

Objetivos

Con base a lo anterior el propósito de la realización de este trabajo es proporcionar una perspectiva del comportamiento térmico de edificio cuyas paredes han sido construidas con base de material que combina concreto y materiales de baja conductividad térmica (poliestireno) en comparación con el de una edificación de material con paredes de material común (block de concreto), la variable a considerar es el consumo de energía para la climatización de la edificación la cual se tendrá a partir de un software que utiliza métodos numéricos para modelar la difusión de calor a través de las paredes (EnergyPlus).

Metodología

La ciudad de La Paz se ubica en las coordenadas 24°06′03″N 110°18′54″O. La temporada calurosa dura 4.3 meses, del 26 de mayo al 3 de octubre, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 34 °C. El mes más cálido del año en La Paz es agosto, con una temperatura máxima promedio de 36 °C y mínima de 25 °C. La temporada fresca dura 2.8 meses, del 1 de diciembre al 25 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 26 °C. El mes más frío del año en La Paz es enero, con una temperatura mínima promedio de 12 °C y máxima de 24 °C.

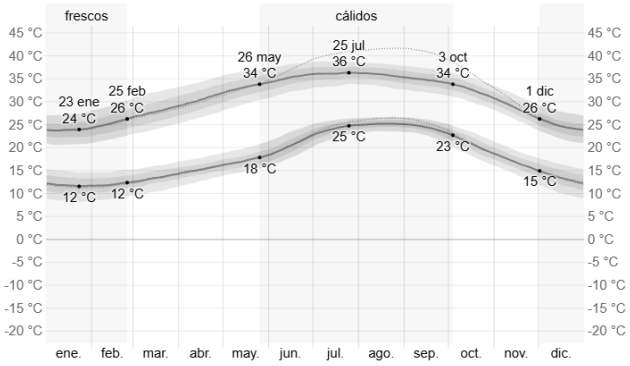


Figura 1 Temperaturas ambientales máximas y mínimas en La Paz B.C.S. fuente Weatherspark 2025

Esta grafica (Figura 1) nos proporciona una vista de las temperaturas a lo largo del año mostrando el rango de mínimas y máximas temperaturas en la ciudad de La Paz, Baja California Sur. Se puede apreciar que en el verano las temperaturas alcanzan un máximo históricamente de 36ºC, aunque en la actualidad se pueden llegar a 42ºC.

El clima de La Paz, Baja California Sur, se clasifica principalmente como desértico cálido (BWh), según la clasificación climática de Köppen. Esto significa que es un clima muy seco y cálido, con temperaturas elevadas y baja precipitación a lo largo del año.

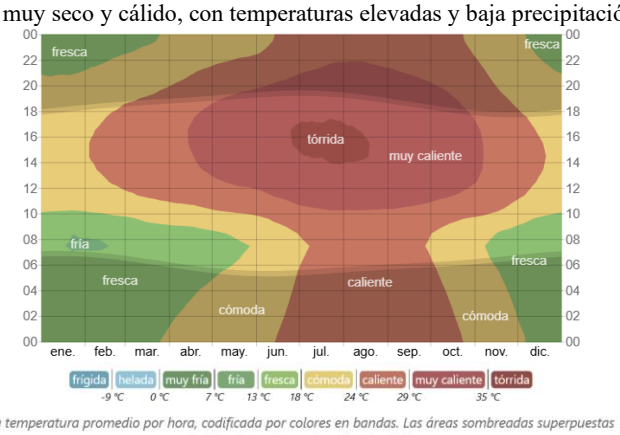


Figura 2 Variación horaria de la temperatura por mes, fuente Weatherspark 2025

En esta otra grafica (Figura 2) se puede apreciar que las temperaturas a medio día exceden las de confort térmico en los meses de mayo a octubre, mientras que las temperaturas bajas no llegan a afectar el confort. Por lo anterior se puede inferir que se requiere de sistemas de climatización artificial para mantener la temperatura en aulas de la localidad de La Paz, Baja California Sur.

Simulación

Para esta simulación se utilizó el programa Energy Plus el cual es un programa de análisis de la energía térmica y de simulación de carga, estructura simplificada. Lo emplean tanto ingenieros como arquitectos que desean dimensionar de manera óptima instalaciones HVAC (Heating Ventilating and Air Conditionated), estudios de adaptación, optimizar el rendimiento de la energía, etc.

Energy Plus calcula la calefacción y la refrigeración de cargas necesarias para mantener puntos de ajuste de control térmico, condiciones en un sistema HVAC, y el consumo energético de los equipos de la planta primaria, así como muchos detalles de simulación de otro tipo que son necesarios para comprobar que la simulación está funcionando como se desea.

El edificio de aulas que se analiza presenta una forma en U (con patio central) distribuyendo sus aulas en un área total de 473.06 m^2 como se muestra a continuación en la Figura 3.

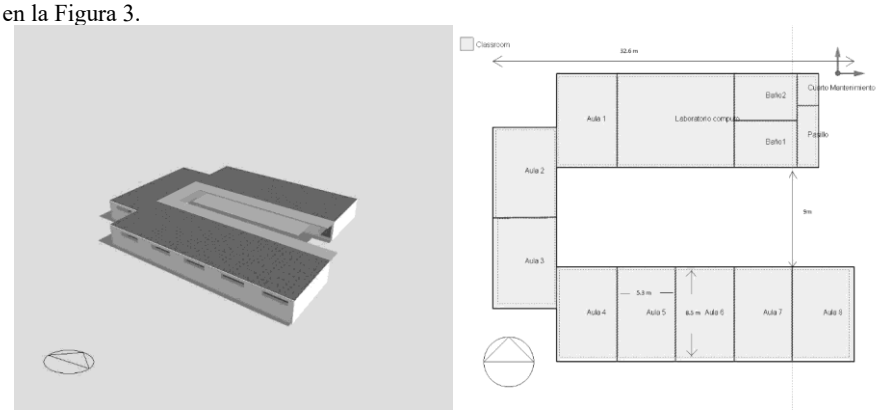


Figura 3 Representación gráfica y plano del edificio de aulas.

El edificio de aulas tiene un promedio de relación muro/ventana de un 8.41%

La composición de las paredes de los edificios a comparar se muestra en las tablas 1 y 2. Las propiedades de los materiales se tomaron como valores constantes basados en datos proporcionados por el programa Design Builder el cual es un software que proporciona una interfaz de usuario para generar archivos que se procesan con el motor de cálculo Energy Plus. Para el material de block hueco el programa da la referencia que los datos provienen de una guía elaborada por el CIBSE (Chaterd Institution of Building Services)

Tabla 1 Composición de la pared de Quadlock

PARED QUADLOCK

MATERIAL	Espesor	Conductividad (W/mK)	Calor específico(J/kgK)	Densidad (kg/m^3)
MORTERO	0.0130	0.35	840	950
POLIESTIRENO	0.0635	0.04	1400	15
CONCRETO COLADO	0.1000	1.13	1000	2000
POLIESTIRENO	0.0635	0.04	1400	15
YESO	0.0130	0.4	1000	1000

Tabla 2 Composición de la pared de Concreto Hueco

PARED CONCRETO HUECO

MATERIAL	Espesor	Conductividad (W/mK)	Calor específico(J/kgK)	Densidad (kg/m^3)
MORTERO	0.0130	0.35	840	950
CONCRETO COLADO	0.1000	1.13	1000	2000
YESO	0.0130	0.4	1000	1000

Se le proporciono también la información para alimentar el campo de los horarios de ocupación y operación del sistema de climatización artificial, número de personas y consumo de energía en equipos eléctricos de cada aula respectivamente (Tabla 3). Se le dio la instrucción al programa de calcular las temperaturas del aire en el interior de cada aula, así como la energía necesaria (District Colling) que debía retirarse

mediante un sistema de climatización para mantener el confort térmico (temperatura de 24º C) durante el periodo de clases.

Tabla 3 Distribución de cargas térmicas internas

	AULA TIPICA	AULA DE COMPUTO
PERSONAS	8	16
EQUIPO DE OFICINA	300 watts	5000 watts
LUCES	620 watts	1250 watts

Resultados

La siguiente figura muestra las temperaturas promedio horarias para el mes de Julio, observándose que las temperaturas de las 2 construcciones muestran amortiguamiento de la temperatura ambiente tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas. Los mayores valores de temperatura corresponden al material llamado Quadlock de concreto y poliestireno y se alcanzan dos horas después del momento de las máximas temperaturas ambientales, mientras que con el material block hueco se alcanzan temperaturas de 2 grados más bajas.

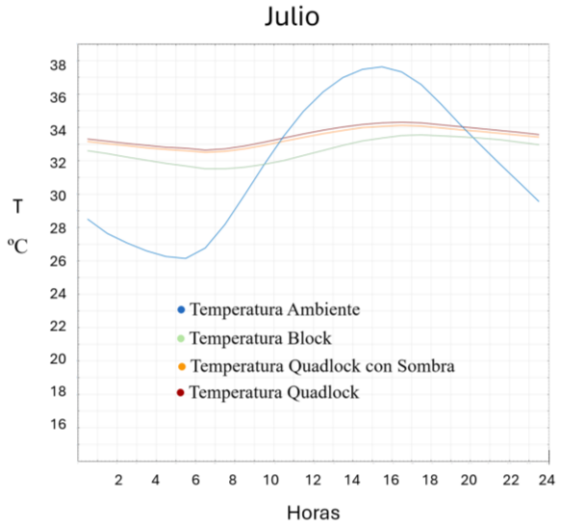


Figura 4 Representación de las temperaturas promedio horarias para un día típico para el mes de Julio

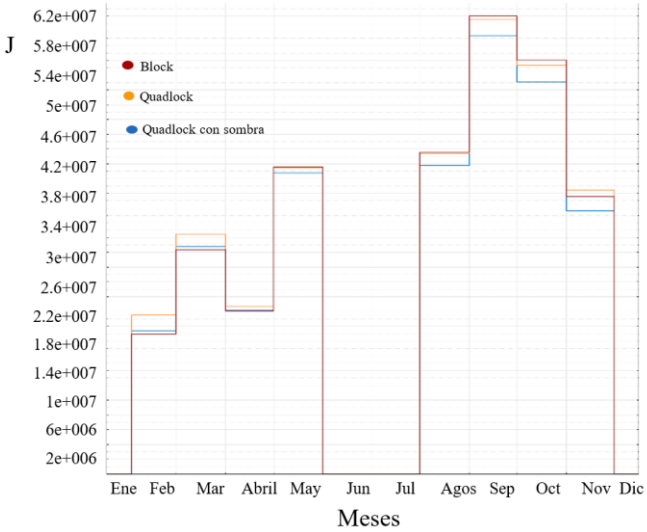


Figura 5 Grafica correspondiente al consumo de energía para climatización del edificio.

Estas temperaturas corresponden al periodo en el cual no se utiliza el sistema de climatización artificial.
Dentro de la Figura 5 se observa el consumo de energía para la climatización del edificio comparando los dos materiales y la propuesta de la adición de un sombreador al material de Quadlock con el que está construido actualmente el edificio. Se observa que en los meses menos cálidos tiene un mayor consumo el material de Quadlock mientras que en los meses de mayor temperatura ambiente tiene un menor consumo, especialmente cuando se utiliza un sombreador en la pared sur.
En el mes más caluroso la diferencia entre la mejor opción que sería Quadlock con sombreado y la peor opción (block concreto) es de un 4% (2.5 e 6 kWh).
Tabla 4 Comparativa de la carga de refrigeración anual por material

Block de concreto hueco	Quadlock	Quadlock con sombra sur
63291.59 kWh	64189.06 kWh	61385.95 kWh

La tabla 4 presenta el dato de la energía total que retira el sistema de enfriamiento a lo largo del año para mantener condiciones de confort térmico en las aulas durante las clases. Se aprecia que el edificio construido con paredes a base de Quadlock requiere de un sombreador en la pared sur para disminuir su carga de enfriamiento con respecto al edificio con paredes de Block hueco.

Conclusión

Durante el análisis se mostró que no existe una gran diferencia del comportamiento térmico del edificio de aulas para los materiales comparados, con un 1.398% en la carga de refrigeración, siendo el de mayor carga el edificio con pared de Quadlock.
Este resultado resalta la importancia de hacer cálculos antes de aplicar soluciones, cuya utilidad puede parecer obvia en un principio, como la aplicación de aislantes para disminuir la carga de refrigeración.
Y también se vio en este trabajo la utilidad de aplicar sombreado, lo que sugiere que para un caso determinado una sola estrategia bioclimática puede no ser suficiente para encontrar el máximo ahorro de energía.
Un punto muy importante para seleccionar la estrategia bioclimática es el clima en el que se sitúa el edificio, poniendo especial atención en el control de radiación y en la variación diurna y nocturna de la temperatura ambiente.
Se debe tener en cuenta el uso y los horarios de uso del edificio ya que es este es un factor importante en la carga de refrigeración del edificio.

Bibliografía

Barrios G., Huelsz G., Rechtman R., Rojas J. (2010) Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned room. Energy and Buildings. p. 219-223. El Sevier
Lucero Alvarez J., Rodriguez Muñoz N., Martín Domínguez I (2016) The Effects of Roof and Wall Insulation on the Energy Costs of Low Income Housing in Mexico. Sustainability. p. 1-19. MDPI
Felices Puértolas R. (2017) Influencia de las estrategias pasivas de la evolvente en el confort térmico de un edificio bioclimático, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Edificación. p. 1-314.
Morán Rodríguez L. (2023) Diseño bioclimático. A favor de la eficiencia energética. CienciaUNAM https://ciencia.unam.mx/leer/1438/diseno-bioclimatico-a-favor-de-la-eficiencia-energetica consultado en 2025
Weatherspark (2025) El clima y el tiempo promedio en todo el año en La Paz México. Weatherspark https://es.weatherspark.com/y/2800/Clima-promedio-en-La-Paz-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o consultado en 2025.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

LA INFLUENCIA DE LOS ARCHIVOS CLIMATOLÓGICOS EN LA PRECISIÓN DEL MODELADO ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES

Ivan Oropeza Perez[1]
[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76017, México, 4422574684,
ivan.oropeza@uaq.mx

Francisco Javier Cruz Velasco[2]
[2]Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Avenida Universidad s/, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, 68120, México, 9512320143,
fcruz.cat@uabjo.mx

RESUMEN

En este documento se presenta un análisis de sensibilidad de los archivos de clima que son usados para la simulación energética de edificios. El objetivo principal del análisis es determinar la influencia de los diferentes archivos de clima en una simulación energética considerando que hay muchos lugares en el mundo cuyo archivo climatológico no ha sido aún determinado o es erróneo. Para tal objeto, se seleccionó una localidad mexicana con la misma clasificación climatológica de Köppen-Geiger que otras dos ciudades de Rumania. Así pues, utilizando las herramientas de simulación Sefaira y OpenStudio, y comparando los resultados con ambos programas, se llega a la conclusión que, si bien hay una variación a tomar en cuenta, los resultados indican que un archivo climatológico similar puede calcular un resultado un tanto confiable para edificios con características iguales de construcción y comportamiento de los usuarios, pero situados en sitios totalmente diferentes, solamente compartiendo similitudes en sus características climatológicas.

ABSTRACT

In this document a sensitivity analysis of the weather files used for energy simulation of buildings is presented. The main objective of the assessment is to determine the influence of the different files of specific climate condition upon energy simulations considering that there are many places in the world whose weather file is not developed yet or is incorrect. For doing this, a Mexican location is selected along with two other locations geographically far from each other but with similar Köppen-Geiger climate classification. Thereby, using the simulation tools Sefaira and OpenStudio, and comparing the results from both computational programs, the main conclusion is that, there is a slight variation between the results, the outputs indicate that a similar weather file can estimate a sort of reliable result for buildings with similar characteristics of construction and occupancy, but locate in totally different places, only sharing resemblances in their climate conditions.

Palabras claves: Archivos climatológicos; simulación energética de edificios; error de estimación.

INTRODUCCIÓN

La simulación de edificios se ha vuelto una herramienta indispensable en la rama de la arquitectura bioclimática y sustentable. Su necesidad recae principalmente en la obtención de información confiable y rápida con respecto al comportamiento térmico y energético de un espacio construido, ya sea residencial, comercial, o incluso urbano. Asimismo, su uso ha ido en aumento debido al contexto mundial que se ha dado en los últimos años, y que se ha caracterizado por la amenaza cada vez mayor del cambio climático y, por ende, la necesidad de construir espacios energéticamente eficientes y confortables.

En este sentido, la simulación de edificios ha jugado un papel fundamental ya que evalúa de una manera rápida y eficiente el consumo energético y las condiciones interiores, entre otros resultados, de un edificio con un diseño específico, bajo condiciones específicas tanto exteriores (climatológicas) e interiores (comportamiento de los usuarios). Las principales características del diseño del edificio se podrían establecer como: materiales de construcción, geometría en general, orientación y aperturas. Para el caso de las condiciones climatológicas se establecen generalmente cuatro: temperatura del aire exterior, humedad relativa, radiación solar global, y velocidad & dirección del viento. En el caso del comportamiento de los usuarios, se han establecido, para evaluar energéticamente un edificio, las siguientes características: número de ocupantes, horario, manejo de aparatos eléctricos, manejo de HVAC, fuentes internas de calor, manejo de aperturas, ropa y tasa metabólica.

Un programa de simulación de edificios básico determinará el consumo energético y las condiciones interiores, como mínimo, de un edificio que cuenta con un diseño en específico a las condiciones exteriores e interiores dadas. Sin embargo, en años recientes, la simulación de edificios ha evolucionado para mejorar sus resultados, incluyendo técnicas como la simulación gemela (digital twin), aprendizaje automático (machine learning) e inteligencia artificial. Todo esto también ha sido aplicado para mayores alcances gráficos y amigables con el usuario, e incluso cambiando las escalas, y ser aplicado a nivel urbano e incluso nacional.

Con respecto a la simulación energética y térmica básica, calculando consumo energético y condiciones de confort interior térmico, se establece que los cálculos son hechos por medio de ecuaciones de transferencia de calor, generalmente transitorias, es decir, bajo condiciones dinámicas (que cambian con respecto al tiempo) con condiciones específicas iniciales, o condiciones a la frontera.

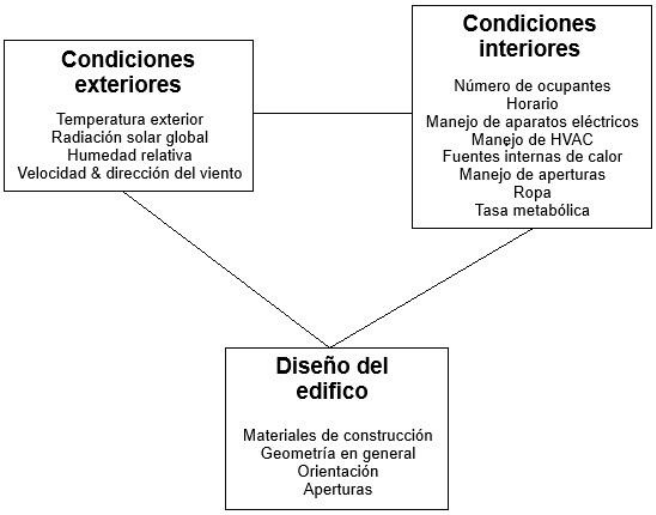


Figura 1. Valores de entrada para realizar una simulación energética y térmica de una edificación (Fuente: propia).

Haciendo un estudio del arte con respecto al papel que tienen las condiciones climatológicas, o exteriores, en la precisión de la simulación energética y térmica de un edificio, se comenta que por ejemplo Amin et. al (2024) argumenta la necesidad de datos en el sitio y en tiempo real, preferente de estaciones climatológicas en físico y con una buena conexión a base de datos, no disponibles en países en desarrollo, como Latinoamérica y México. Amin et. al también analiza el papel de la predicción de los datos climatológicos, tal como lo hace Werhli et. al (2024) quién plantea diferentes escenarios con un incremento de temperatura calculado a partir de los escenarios de calentamiento global. En ambos casos, se concluye que el cambio climático impactará la manera de diseñar edificios en las próximas décadas, resaltando la necesidad de aplicar herramientas como la simulación de edificios para definir los parámetros de construcción adecuados para conseguir edificios ahorradores y confortables.

En el mismo tenor Torres-Quezada et. al (2025) plantea la necesidad de no sólo incluir los cambios climatológicos futuros, sino una evolución del comportamiento de los usuarios, resumido en la Figura 1, los cuáles han sido modificados, al menos en los 40 años que los autores analizaron estos cambios bajo un contexto ecuatoriano. Estos cambios son principalmente en el aumento de fuentes internas de calor, al aumentar el uso de aparatos eléctricos, así como el consumo de agua caliente y combustible para la cocción de alimentos. En el mismo sentido Rida et. al (2017) propone un modelo de simulación más preciso al utilizar en Esp-r, una herramienta de simulación comercial, un modelo termoregulatorio de dos nodos, el cuál mostró mejores resultados comparado con los modelos comúnmente utilizados dentro del paquete del programa.

Por su parte Schünemann et. al (2023) y Ma et. al (2023) utilizan el método de cadenas de herramientas, o toolchain, para simular edificios considerando el fenómeno de la isla de calor urbana. En otras palabras, calculan las condiciones meteorológicas, a partir de datos reales, de la isla de calor urbana, a partir de estos datos, la encadenan al siguiente paso, que es el cálculo de consumo energético y comportamiento térmico, con base a los datos climatológicos (o microclimatológicos) calculados previamente, y considerados como las nuevas condiciones a la frontera.

Finalmente, Vandemeulebroucke et al. (2022) presenta una solución a un problema común: la falta de datos climatológicos o datos erróneos de lugar específico. De esta manera, el autor propone el uso de datos recabados de estaciones meteorológicas cercanas y adaptándolas al sito a estudiar, cuyo estudio de caso es Bruselas, Bélgica. Los autores concluyen, sin embargo, que este proceso, aunque preciso, es muy tardado y costoso, por lo que optan por soluciones menos eficientes, pero más baratas y rápidas.

Así pues, en este documento se pretende analizar las condiciones climatológicas específicas de un lugar, y evaluar si estas condiciones pueden ser sustituidas por condiciones similares de otras partes del mundo, esto con el objetivo de analizar energética y térmicamente un edificio que no cuente con datos meteorológicos confiables, ya sea por falta de estaciones meteorológicas, porque no se considera el cambio climático o la isla de calor urbana, o simplemente porque las cifras obtenidas en bases de datos son erróneas.

METODOLOGÍA

Clasificación de Köppen-Geiger

Para estimar la precisión de las simulaciones en la sustitución de normales climatológicas para lugares que no cuentan con información meteorológica confiable se plantea primero el uso de la clasificación meteorológica de Köppen-Geiger. Esta clasificación establece cinco grandes grupos climatológicos mundiales con base a patrones de temperatura y precipitación lluviosa anuales. Estos grupos están subdivididos a su vez en grupos con base a patrones estacionales de precipitación. Así pues, los cinco grupos generales son establecidos en tropical (A), seco (B), templado (C), continental (D), y polar & alpino (E). La segunda división, como se dijo, es mayormente asignada por la precipitación estacional, se indica con una letra minúscula o mayúscula, y no es asignada para los grupos A y E. La tercera subdivisión es asignada para los grupos B, C y D e indica la temperatura estacional, principalmente en verano e invierno, y se indica con una letra minúscula. Así, por ejemplo, el clima Dwb indica un clima continental (D), con invierno seco (w), y con verano cálido (b).

Tabla 1. Clasificación climatológica de Köppen-Geiger.

Primer grupo	**Segundo grupo**	**Tercer grupo**
Tropical (A)	f (selva tropical) m (monzón) w (sabana, invierno seco) s (sabana, verano seco)	
Seco (B)	W (desierto árido) S (estepa semi-árida)	h (cálido) k (frío)
Templado (C)	w (invierno seco) f (sin temporada seca) s (verano seco)	a (verano caluroso) b (verano cálido) c (verano frío)
Continental (D)	w (invierno seco) f (sin temporada seca) s (verano seco)	a (verano caluroso) b (verano cálido) c (verano frío) d (invierno muy frío)
Polar & alpino (E)	T (tundra) F (capa de hielo)	

De acuerdo con la Tabla 1, existen en el mundo 31 diferentes climas cuyas variaciones son principalmente por la temperatura y precipitación anual, y la temperatura y precipitación estacional. En otras palabras, la temperatura y la humedad, de una manera general y después durante las estaciones del año, determinan el clima de una región. En este sentido, se consideran climas similares para simulaciones energéticas de un edificio en diferentes localidades.

Simulación energética

Tomando en cuenta estas condiciones similares, se procede a realizar una simulación energética. Para tal objetivo, se establece un estudio de caso el cual consiste en un aula universitaria ubicada en el municipio de Pinal de Amoles, Querétaro. Esta localidad, ubicada en la Sierra Gorda de Querétaro, es clasificada con un clima Cwb, es decir, un clima templado con inviernos secos y veranos cálidos. Los datos de entrada para la simulación energética con los programas Sefaira y OpenStudio.

Tabla 2. Parámetros de entrada del modelo de simulación energética de un edificio

Diseño	
Materiales de construcción	Techo de concreto de 100 mm Tabique de 120 mm Vidrio claro 6 mm Aluminio plateado
Geometría en general	Rectangular 257 m2
Orientación	Línea principal este-oeste
Aperturas	Cuatro aperturas en las fachadas norte y sur Dimensiones 210 cm x 160 cm
Comportamiento de los usuarios	
Número de ocupantes	20 personas
Horario	Horario escolar Días hábiles 8 am – 5 pm ocupación llena Días inhábiles sin ocupación
Aparatos eléctricos	25 lámparas de 40 W c/u con horario escolar Proyector de 500 W con horario escolar Computadora portátil de 100 W con horario escolar
HVAC	Radiador eléctrico con capacitor de calor
Fuentes internas de calor	Sin fuentes internas de calor diferentes a las personas y las aperturas
Ropa	1 clo
Tasa metabólica	1 met
Condiciones climatológicas	
Temperatura exterior	Cwb
Radiación solar global	Cwb
Humedad relativa	Cwb
Velocidad & dirección del viento	Cwb

Considerando entonces que Pinal de Amoles cuenta con un clima Cwb, en el programa Sefaira se establecen los mismos parámetros de entrada de diseño y comportamiento de los usuarios, pero considerando a la ciudad de Sinaia, Rumania, que también cuenta con una clasificación climatológica de Köppen Cwb. Esto se hace por dos razones: como ya se comentó, el objetivo del documento es analizar la precisión de una sustitución de datos climatológicos de un lugar que no cuenta con datos actuales, disponibles o confiables. Este es el caso de Pinal de Amoles, cuyos datos no están actualizados, de acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (estación meteorológica 22064), siendo el año 1983 el último registro y con una ubicación de coordenadas: latitud 21.13° y longitud -99.62°. La estación más próxima es la de Peñamiller, siendo la número 22057 y estando ubicada a 49.5 km de distancia. Sin embargo, la clasificación de Köppen de Peñamiller es considerada como semidesértico con verano cálido (BSk).

Como segunda razón, está el hecho que el software Sefaira es un programa amigable con el usuario, pero costoso en su licencia, y que inclusive en su versión demo, las locaciones de estudio son muy limitadas, encontrando la ciudad de Sinaia como la única locación con condiciones climatológicas similares a Pinal de Amoles. Asimismo, para el software OpenStudio, aunque libre de licencia, no se encontraron archivos climatológicos EnergyPlus (epw), que son necesarios para realizar las simulaciones, adecuados para la locación mexicana de estudio. De esta manera, se utilizó el archivo epw de Bucarest, Rumania, que también tiene una clasificación de Köppen Cwb. Las Figuras 2 y 3 muestran los resultados de las simulaciones realizadas en Sefaira (Figura 2) y OpenStudio (Figura 3).

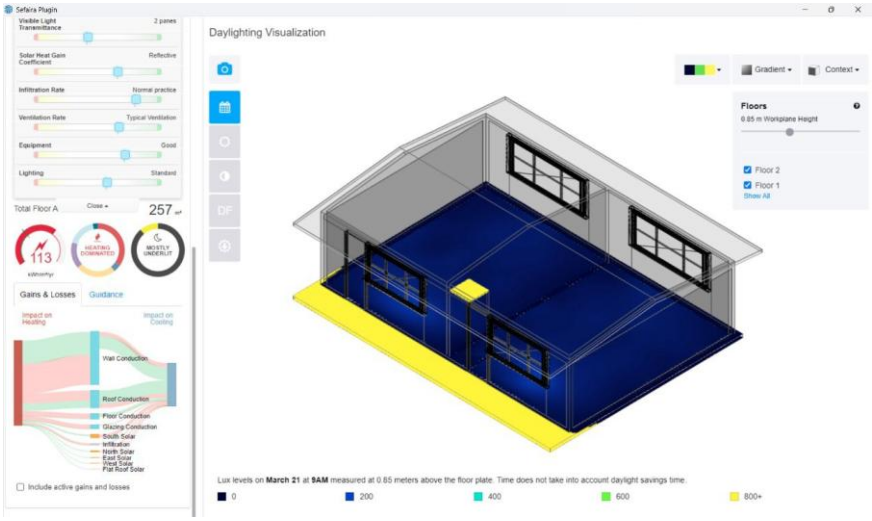


Figura 2. Simulación energética de un salón universitario utilizando el programa Sefaira.

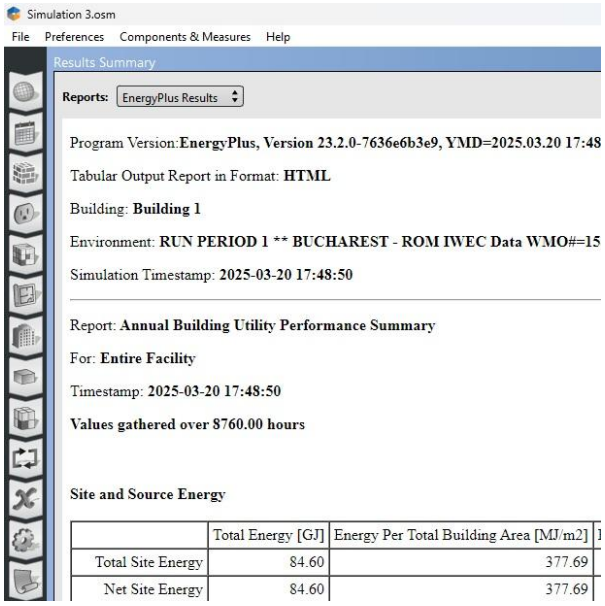


Figura 3. Simulación energética de un salón universitario utilizando el programa OpenStudio.

Para hacer una comparativa entre los resultados de ambos programas se considera un solo dato de salida que es el consumo energético por metro cuadrado construido. Este parámetro es determinado considerando una temperatura de confort establecida de 19°C para ambos modelos de simulación, y considerando que temperaturas debajo de este límite un sistema de calefacción (radiador eléctrico con capacitor de calor) es automáticamente encendido y por ende existiendo un consumo energético más allá de los establecidos en los aparatos eléctricos convencionales.

Así pues, puede apreciarse que con Sefaira el consumo por metro cuadrado anual promedio es de 113 kWh, mayormente dedicado a la calefacción, debido a que el clima Cwb es considerado como un clima templado con invierno seco y verano cálido. Las comparativas de las tres ciudades evaluadas pueden verse a continuación.

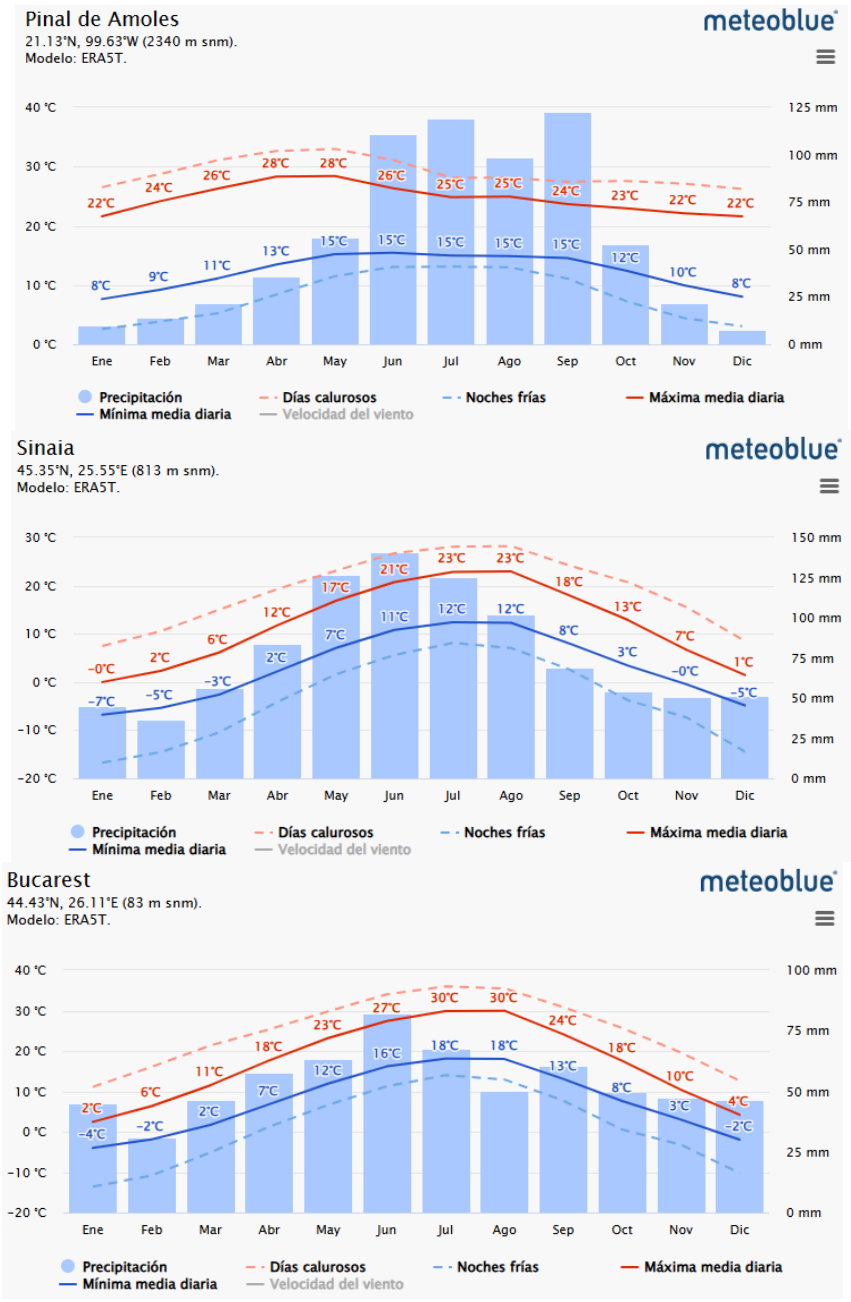


Figura 4. Temperatura y precipitación anual para Pinal de Amoles, Siania y Bucarest (Fuente: Meteoblue.com)

De acuerdo con la Figura 3, el programa OpenStudio calcula un consumo energético de 377.69 MJ/m^2 (104.91 kWh/m^2), existiendo una diferencia de 8.09 kWh/m^2. Como se puede ver en la Figura 4, existen diferencias de temperaturas y precipitaciones entre las tres ciudades. Sin embargo, estas diferencias son mínimas en el momento de realizar las simulaciones energéticas. Esto se puede explicar por varias razones, como la similitud en términos anuales y no estacionales. Otra razón es que, como se puede ver en la Figura 1, las condiciones climatológicas también deben considerar la radiación solar global y las características del viento. No obstante, en la clasificación climatológica de Köppen, estos dos parámetros no son tomados en cuenta, por lo que habría diferencias y similitudes en las simulaciones energéticas.

De esta manera, se recomienda ampliamente que, al no contar con estos dos parámetros de manera clara en el momento de hacer las simulaciones, se consideren elementos que puedan controlar estos datos climatológicos de manera dinámica. Esto es, en el caso de la radiación solar global (difusa y directa), se cuenten con elementos de control solar que puedan ser manejados fácilmente por los usuarios. Asimismo, para la dirección & velocidad del viento, se recomienda un diseño del edificio que incentive la ventilación natural controlada (incluyendo la ventilación cruzada) siempre considerando que los ocupantes de los edificios tienden a tener un control, al menos parcial, de su espacio interior.

CONCLUSIONES

Este documento trata sobre un problema común dentro del campo de la simulación energética y térmica de un edificio: la falla de datos climatológicos ya sea en su disponibilidad, confiabilidad o actualización. Si los datos meteorológicos no son los adecuados es muy probable que los resultados energéticos y térmicos obtenidos no sean útiles para su análisis y utilización posterior. De esta manera se establece la simulación en una localidad de México, Pinal de Amoles, Querétaro, cuyos datos climatológicos son incompletos y desactualizados. Considerando un modelo de simulación completamente similar en su diseño arquitectónico y comportamiento de los usuarios, se utilizan por separado los programas Sefaira y OpenStudio. Con el primer programa se usa la información climatológica de Siania, Rumania, y con el segundo los datos de Bucarest, del mismo país. Para ambos casos se compara el dato de salida de consumo energético por metro cuadrado, encontrándose una diferencia de sólo 8.01 kWh/m^2.

Considerando que ambas ciudades rumanas tienen climas muy similares, compartiendo la clasificación climatológica de Köppen-Geiger Cwb (clima templado con inviernos secos y veranos cálidos) y que son los mismos de Pinal de Amoles en México, se concluye que los resultados calculados por cualquiera de los dos programas de simulación de edificios pueden ser usados para la población mexicana, y así encontrar soluciones bioclimáticas en este estudio de caso en específico.

Otra conclusión fue que, de acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger, solamente la temperatura exterior y la precipitación (humedad relativa) son parámetros para considerar dos lugares con climas similares. Sin embargo, la simulación energética y térmica de edificios requiere también los datos climatológicos de radiación global y características del viento. En este sentido, se puede concluir que los edificios deben de contar con diseños arquitectónicos y de comportamiento de los usuarios con métodos pasivos que puedan controlar de un manera fácil y dinámica los parámetros de radiación solar (elementos de control solar) y viento (ventilación natural controlada).

Como último comentario, se considera que otra ventaja de sustituir datos climatológicos cuando estos no están disponibles es evitar el uso de programas costosos en su licencia. Este es el caso de Sefaira, que, siendo un programa sin libre acceso, solamente considera pocas locaciones para su uso, inclusive en su versión demo, lo cuál limita en demasía las buenas prácticas de lograr edificios ahorradores, sustentables, confortables y bioclimáticos, especialmente dentro del contexto actual de emergencia climática, pobreza energética y transición hacia energías renovables.

REFERENCIAS

Amin A. and Mourshed M. (2024). Weather and climate data for energy applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 192, p. 114247.

Wehrli K., Sidler F., Gubler S., Settembrini G., Koschenz M., Irigoyen S.D., Kotlarski S., Fischer A.M., and Zweifel G. (2024). Building design in a changing climate – Future Swiss reference years for building simulations, Climate Services, Vol 34, p. 100448.

Torres-Quezada J. and Avila-Argudo A. (2015). Dataset of operational energy of forty Andean buildings from 1980 to 2020, Data in Breaf, Vol 61, p. 111818.

Rida M. and Kelly N. (2017). Toward better estimation HVAC Loads: integrating a detailed human thermal model into building simulation, Building Simulation (Innovation, Rapid Design, Design Support) & ICT, Vol 122, p. 1147-1152.

Schünemann C., Ziemann A. and Goldberg V. (2023). Spatially resolved indoor overheating evaluation using microscale meteorological simulation as input for building simulation – opportunities and limitations, City and Environment Interactions, Vol 20, p. 100122.

Ma Y., Luawaet D., Kouti A. and Verbeke S. (2023). A toolchain to evaluate the impact of urban heat island and climate change on summer overheating at district level, Urban Climate, Vol 51, p. 101602.

Vandemeulebroucke I., Caluwaerts S. and Van Den Bossche N. (2022). Climate data for hygrothermal simulations of Brussels, Data in Breaf, Vol 44, p. 108491.

Celdas y Módulo Fotovoltaicos

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2064	Sistema solar de cogeneración para la producción simultánea de electricidad y calor, compuesto por un panel fotovoltaico de 12 W y una celda termoeléctrica SP1848, la cual aprovecha el calor residual para el calentamiento de agua	José Guillermo Pérez Luna
2225	Escritura láser para interconexión en serie de celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS	Rogelio Mendoza-Pérez
2139	Modelo de trabajo colaborativo basado en ciencia de datos para celdas solares de perovskita	Paola G. Abrego-Martínez

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

SISTEMA SOLAR DE COGENERACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN SIMULTÁNEA DE ELECTRICIDAD Y CALOR, COMPUESTO POR UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 12 W Y UNA CELDA TERMOELÉCTRICA SP1848, LA CUAL APROVECHA EL CALOR RESIDUAL PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA

Sandra Jiménez Xochimitl, Osvaldo López Hernández, José Guillermo Pérez Luna, Ricardo Baruch Guzmán Lorenzo y Cesar Marco Mucio Corte García.

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. 14 sur y Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue., CP 72560, México.
Tel: 2222295500 Ext: 7141, e-mail: jgperezluna@gmail.com.

Alfredo Hernández Juárez
Las Vegas 19, Amozoc, Puebla, CP 72980, México, **Tel: 2211560671**,
e-Mail: **alfred123stark@gmail.com**

RESUMEN

Se presenta el diseño y evaluación experimental de un sistema fotovoltaico-termoeléctrico solar conformado por un panel fotovoltaico de 12 W, una celda termoeléctrica SP1848 y un termotanque. Estos elementos fueron acoplados para realizar las funciones de generación de energía eléctrica y calentamiento de agua en condición de alta eficiencia. Un sistema con esta estructura permite estudiar las condiciones de generación eléctrica que presenta el Panel Fotovoltaico (PFV) cuando se enfría por medio de un sistema termoeléctrico. Al mismo tiempo, se evalúa la capacidad de generación eléctrica que presenta la celda termoeléctrica cuando se emplea como elemento de recuperación de calor. El sistema en su conjunto establece las condiciones que deben prevalecer en un sistema solar de este tipo para alcanzar alta eficiencia en el aprovechamiento de la energía solar. El diseño contempla el acoplamiento térmico entre el panel fotovoltaico y la celda termoeléctrica y, al mismo tiempo, el enfriamiento de la celda por medio de una red hidráulica conectada a un termotanque en donde queda almacenada la energía residual en forma de agua caliente. Se presentan los resultados de campo obtenidos tanto para la generación de energía eléctrica como para el calentamiento de agua almacenada en el termotanque.

ABSTRACT

The design and experimental evaluation of a solar photovoltaic-thermoelectric system consisting of a 12 W photovoltaic panel, an SP1848 thermoelectric cell, and a water heater are presented. These elements were coupled to perform the functions of electrical power generation and water heating under high efficiency conditions. A system with this structure allows for the study of the power generation conditions presented by the Photovoltaic Panel (PFV) when cooled by a thermoelectric system. At the same time, the power generation capacity of the thermoelectric cell is evaluated when used as a heat recovery element. The system as a whole establishes the conditions that must prevail in a solar system of this type to achieve high efficiency in the use of solar energy. The design includes the thermal coupling between the photovoltaic panel and the thermoelectric cell and, at the same time, the cooling of the cell by means of a hydraulic network connected to a water heater where the residual energy is stored in the form of hot water. The field results obtained for both the generation of electrical energy and the heating of water stored in the water heater are presented.

Palabras claves: Cogeneración, Panel fotovoltaico, Celda termoeléctrica, Calentador solar, Alta eficiencia.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos han alcanzado altas eficiencias de transformación de la energía solar en energía eléctrica [1]; sin embargo, la mayor cantidad de energía de la radiación solar en estos sistemas se transforma en calor. Por una parte, cuando un panel solar recibe la energía solar, cada una de las celdas solares se calienta pues al mismo tiempo que la radiación solar se transforma en energía eléctrica por efecto fotovoltaico, también hay transformación de la radiación solar en calor. Por otra parte, todos los sistemas eléctricos presentan impedancia interna; esto significa que cuando el sistema fotovoltaico transfiere su energía a una carga, la impedancia interna provoca que parte de la energía eléctrica se convierta en calor. Se estima que más del 50 % de la energía recibida por el panel fotovoltaico se transforma en calor. De esta experiencia surge la idea de aprovechar el calor presente en un panel fotovoltaico cuando éste se encuentra en operación.

Una forma de aprovechar el calor residual presente en un Panel Fotovoltaico (PFV) es convertirlo en energía eléctrica por medio de celdas termoeléctricas (CT). Esto requiere que el calor sea colectado de una manera eficiente y canalizado hacia la CT. Las celdas termoeléctricas son dispositivos que transforman el calor en energía eléctrica en forma directa; es decir, sin partes móviles. Las CT para operar requiere de una diferencia de temperatura. Consta de dos placas, de las cuales, una debe estar más caliente que la otra. La generación de energía eléctrica depende de manera proporcional de la diferencia de temperatura entre ambas placas. El tipo de energía

generado por estas celdas es de corriente directa (cd). Para obtener el enfriamiento en una de las placas de la CT se puede emplear flujo de agua; de aquí surge la idea de aprovechar los PFV para efectuar de manera simultánea el calentamiento de agua. Además, el enfriamiento de los paneles fotovoltaicos provocado mediante esta técnica mejora la eficiencia eléctrica de los PFV [2].

Diseño del Sistema Fotovoltaico-Termoeléctrico

El Sistema Fotovoltaico-Termoeléctrico (SFT) que realiza la doble función; generación de energía eléctrica y calentamiento de agua, consta de las siguientes partes: PFV, Generador Termoeléctrico (GTE) y Termotanque. Para el desarrollo de este sistema, se eligió un PFV de 10 W, con una superficie efectiva 250 mm x 255 mm (0.0637 m^2), sus dimensiones geométricas se muestran en la figura 1.

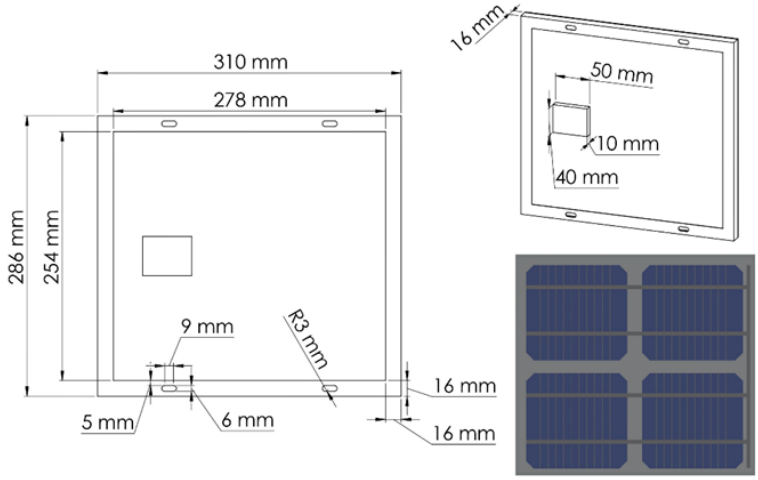


Figura 1. Características geométricas del Panel Fotovoltaico.

El GTE está conformado por una placa de cobre calibre 36, el Módulo Termoeléctrico (MTE) y el sistema de enfriamiento. La placa de cobre se pega a la superficie inferior del PFV para colectar el calor residual. En la parte central de la placa de cobre, se encuentra colocado un MTE, el cual está conformado por dos celdas termoeléctricas SP1848, conectadas eléctricamente en serie. Ambas celdas están unidas térmicamente a dos soleras de cobre con espesor de 1/16 “, una para recibir el calor de la placa de cobre y la otra para retirar el calor y transmitirlo mediante tubería a un flujo de agua, el cual llega a la parte superior del termotanque. La figura 2 muestra las características de la placa de cobre; mientras que, la figura 3 muestra la estructura del MTE.

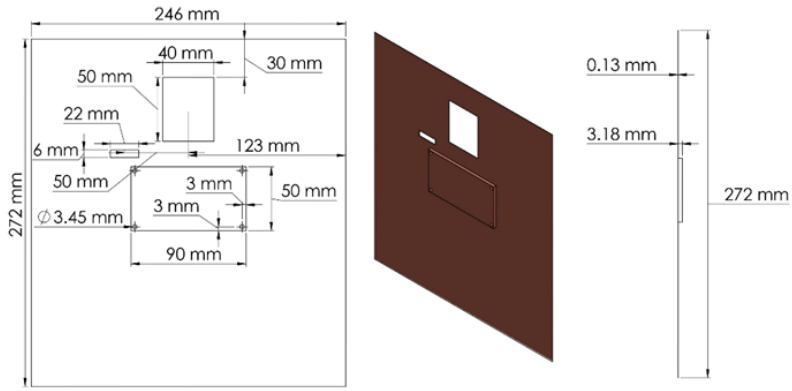


Figura 2. Características de la placa de cobre.

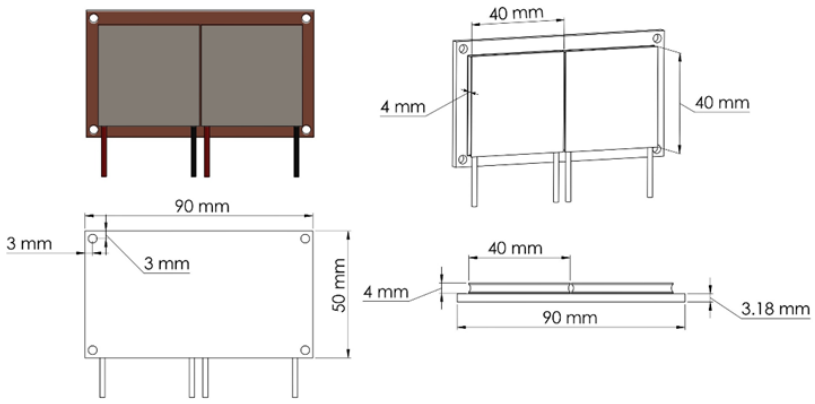


Figura 3. Estructura del MTE

Para aislar la tubería del medio ambiente se fabricó una charola de protección y su interior se rellenó con espuma de poliuretano; de tal manera que el agua caliente generada como residuo en el módulo termoeléctrico se puede llevar sin pérdidas al termotanque. La figura 4 muestra la charola; mientras que, la figura 5 muestra un dibujo de explosión con las partes que conforman el SFT.

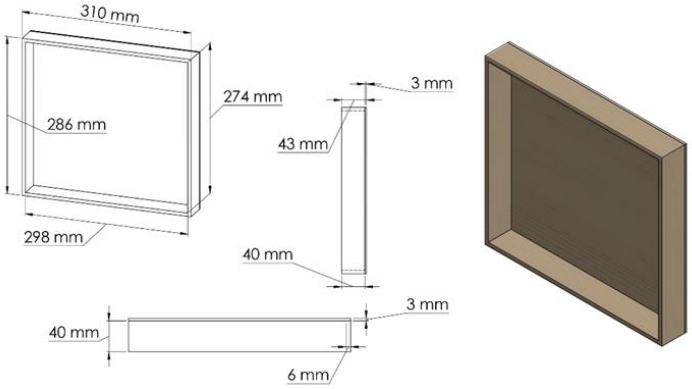


Figura 4. Charola para conservar el calor recuperado en el módulo termoeléctrico.

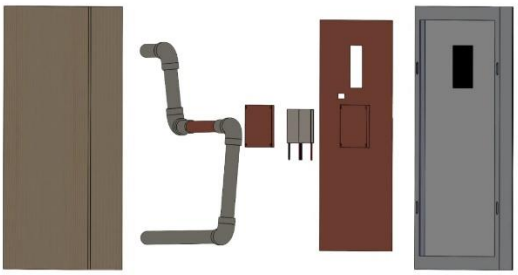


Figura 5. Dibujo de explosión de la unión del PFV y módulo termoeléctrico (SFT).

El diseño del termotanque se realizó para obtener un volumen de 6 l; este volumen corresponde aproximadamente un cilindro de 6” de diámetro con una longitud de 33 cm. La figura 6 muestra un esquema del termotanque, en donde se observan tres posibles conexiones. En particular, la conexión superior corresponde a la eliminación de burbujas de aire en el interior del termotanque. La inferior corresponde a la salida de agua fría y la superior corresponde a la entrada de agua caliente.

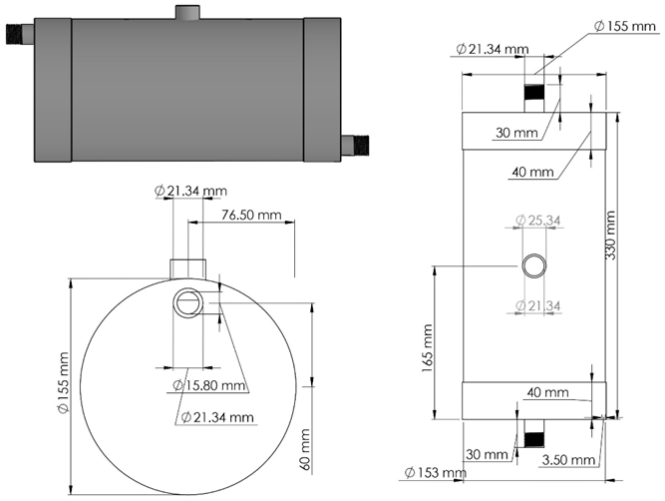


Figura 6. Termotanque

La figura 7 muestra la imagen del sistema ensamblado y listo para su operación.

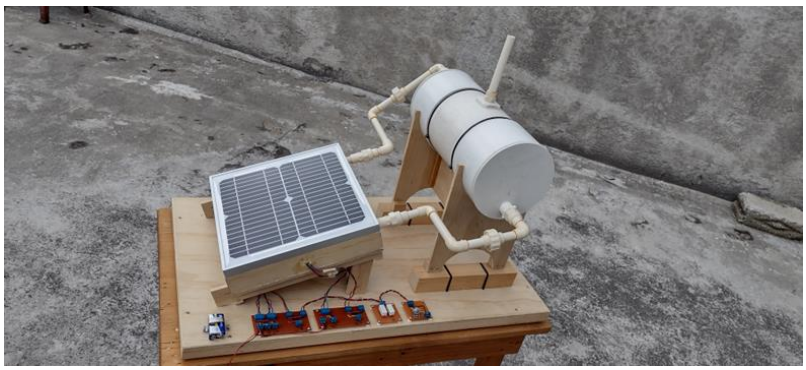


Figura 7. SFT listo para su operación.

Resultados experimentales

Las pruebas de campo se realizaron durante un periodo de 55 minutos de la 1:05 PM a las 2 PM (06/09/25). La atención se enfocó a medir las potencias generadas por el PFV y la CTE; además, se determinó la cantidad de energía calorífica que se almacenó en el termotanque. La variable fundamental que se midió, fue la irradiancia; ésta se midió por medio del Medidor de Potencia Solar SM206-solar. La figura 8 muestra como varió la irradiancia durante este periodo.

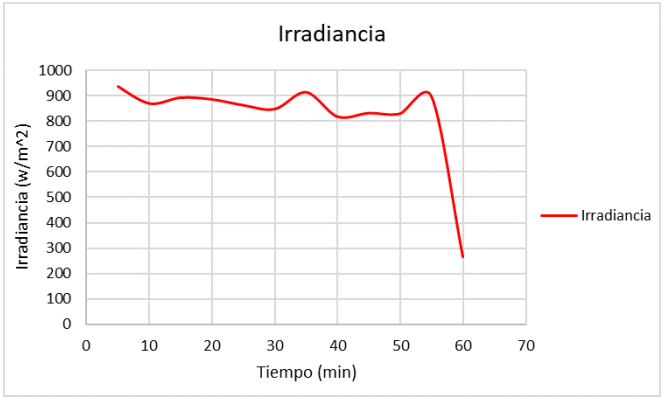


Figura 8. Variación de la irradiancia durante el periodo de prueba.

Con los datos mostrados en la gráfica y tomando en cuenta que el área efectiva del PFV es de 0.0637 m^2, se determinó la cantidad de energía recibida por el PFV durante el periodo de 55 min. La energía recibida por el PFV corresponde a la integración de la irradiancia durante el periodo de 55 minutos, multiplicando este dato por el área correspondiente. De esta manera se determinó que la energía total recibida por el PFV durante el periodo de 55 minutos fue de 188 200 J.

En las pruebas de campo, la atención también se enfocó a obtener el comportamiento eléctrico del PFV acoplado a una carga. La figura 9 muestra cómo se comportó el voltaje del PFV aplicado a una carga de 24 Ω. A partir de estos datos se pudo determinar la cantidad de energía generada durante el periodo de 55 minutos. Tomando en cuenta que las muestras se tomaron cada 5 minutos; se determino la potencia para cada periodo de muestreo multiplicando el voltaje por la corriente. Para la primera muestra, el voltaje correspondió a 5.4 V, aplicados estos a una carga de 24 Ω; por tanto, la potencia generada durante los primeros 5 minutos fue de 1.215 W. Empleando este dato, la energía generada por el PFV o consumida en la carga se pudo obtener multiplicando la potencia por 300 s (5 min), el resultado obtenido fue de 364.5 J. El mismo procedimiento se aplicó a las 10 muestras restantes. La suma de todos los datos permite obtener que la energía total generada por el PFV durante el periodo de 55 minutos fue igual a 23314 J. La división de este dato entre la energía recibida por el PFV permitió determinar que la eficiencia del PFV en operación es igual a 12.38 %.

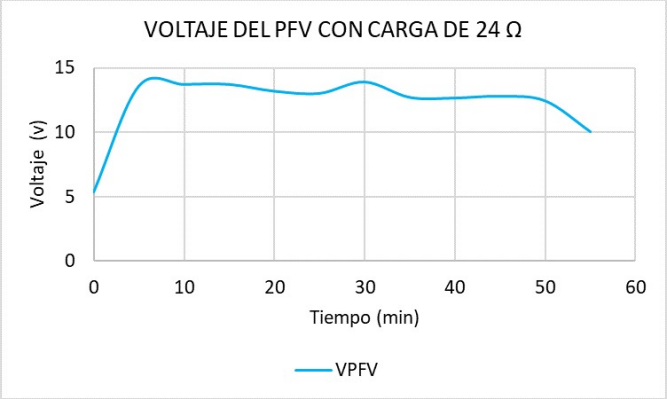


Figura 9. Variación del voltaje generado por el PFV con resistencia de carga acoplada igual a 24 Ω.

El tercer tema que se tomó en cuenta en las pruebas de campo fue, evaluar el comportamiento térmico y eléctrico del MTE. Para esto se requirió tomar mediciones de temperatura en el respaldo del PFV (TPFV), en la placa caliente del MTE (TCTE-C) y en la placa fría del MTE. La figura 10 presenta las gráficas obtenidas para cada uno de los casos. Como se puede observar de las gráficas, en el respaldo del PFV se pueden alcanzar temperaturas máximas de 55 °C. Esta magnitud es relevante si se toma en cuenta que el SFT está en operación; es decir, se está provocando internamente un enfriamiento por medio de la recirculación de agua. Otro aspecto relevante que se puede observar de las gráficas es que, en el MTE siempre hay diferencia de temperatura entre la placa caliente y la placa fría. Está diferencia de temperatura pudo alcanzar magnitudes de hasta 15 °C. Este valor es próximo a uno de los datos establecidos por el proveedor (ΔT=20°C; permite obtener 0.97V y 0.225 A)

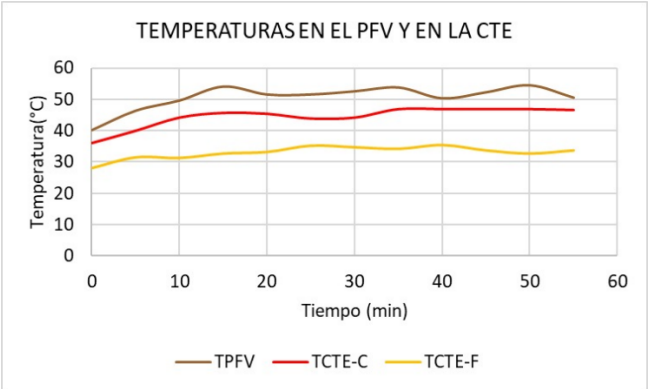


Figura 10. Temperaturas medidas en el respaldo del PFV y en las placas del MTE.

Simultáneamente con las gráficas de temperatura se obtuvo la gráfica de generación eléctrica del MTE. La figura 11 muestra el comportamiento eléctrico del voltaje presente en la carga de 27 Ω acoplada al MTE. En esta gráfica se observa que la magnitud de voltaje máximo es de 0.62 V. Este máximo coincide con el primer máximo de diferencia de temperatura que se puede observar cercano a los 15

minutos (ver figura 10). Con los datos de voltaje aplicados a la carga de 27 Ω se puede determinar, la corriente, la potencia y en consecuencia la energía generada por el MTE durante el periodo de 55 minutos. El resultado obtenido fue de 40.84 J. Este valor se considera pequeño, pero está relacionado con la eficiencia de las CT; las cuales operan con una eficiencia del orden de 4 %. En realidad, el MTE puede proporcionar un poco mas de energía efectiva si este sistema se lleva a la condición de Máxima Transferencia de Potencia (MTP), la cual se obtiene cuando la resistencia de carga se hace igual a la resistencia interna del MTE.

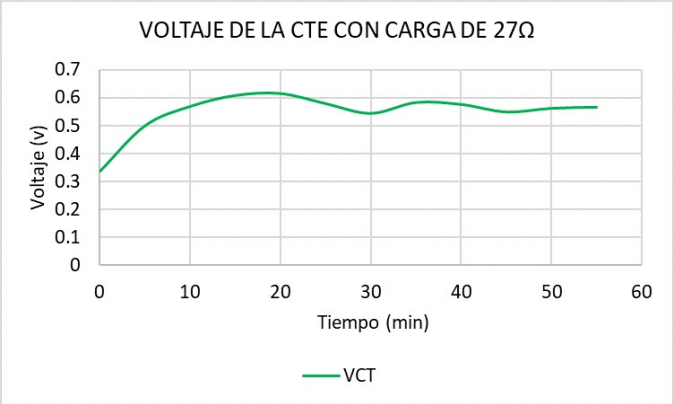


Figura 11. Voltaje presente en la carga de 27 Ω acoplada al MTE.

Para determinar la energía calorífica que fue recuperada en el termotanque del SFT, se midió la temperatura del agua al inicio y al final de la prueba. Éstas fueron 24 °C y 28 °C respectivamente. Aplicando la expresión propia de un sistema térmico que almacena energía calorífica:

$$Q = m\, C_v\, (T_f - T_i), \qquad (1)$$

en donde: Q es la cantidad de calor almacenado, C_v es el calor específico, T_f la temperatura final y T_i la temperatura inicial; entonces, el valor obtenido para Q es igual a 100 483 J. Para una masa de 6 000 g, Cv = 4.1868 J/g °C y para una diferencia de temperatura igual a 4 °C.

De los resultados obtenidos en la prueba experimental, podemos hacer un balance de energía. La Energía total aprovechada (Et) es igual a la suma de las energías E_{FV} (Energía Fotovoltaica), E_{TE} (Energía Termoeléctrica) y E_{CA} (Energía calorífica); por tanto:

$$Et = E_{FV} + E_{TE} + E_{CA}, \qquad (2)$$

$$Et = 23314 + 40.84 + 100\,483 = 123\,837\ J. \qquad (3)$$

En este caso la energía calorífica recuperada por medio de SFT equivale a un 53.39 % en relación con la energía solar recibida por el PFV. Si ahora evaluamos la eficiencia del SFT en su conjunto, tomando en cuenta todas las fracciones de energía aprovechada; la eficiencia es de:

$$\text{Eficiencia del SFT} = (123837/188200) \times 100\% = 65.8\ \%$$

Este valor es bastante mayor que la eficiencia determinada para la función de generación fotovoltaica, la cual fue de 12.38 %.

CONCLUSIONES

Se desarrollo un SFT de alta eficiencia que realiza dos funciones; generación de Energía Eléctrica y Calentamiento de agua. Se alcanzó una eficiencia de 65.8 %, aprovechando el calor residual que el PFV emite al aire en su cara inferior.

Los resultados muestran que la energía recuperada en forma calorífica, es bastante mayor que la energía eléctrica producida por efecto fotovoltaico (100 483 J vs. 23314 J).

La estructura desarrollada para el SFT resulto adecuada para recuperar el calor y evitar su pérdida; mientras ésta energía se canalizaba hacia el MTE y el termotanque. El MTE, solo generó una pequeña fracción de energía eléctrica total (40.84 J vs. 23314).

REFERENCIAS

1.- Romo García F., R. Verdugo Miranda, R. Flores Ochoa, M. Martínez Gil, R. García Gutiérrez, Avances de la Tecnología Solar Fotovoltaica en las Tres Últimas Décadas, XLVIII Semana Nacional de Energía Solar del 7 al 11 de octubre 2024, los Mochis, Sinaloa, México.

2.- Sánchez Maza M. A., Energía Solar Fotovoltaica, Editorial LIMUSA S. A. de C.V., 2018, México, pp. 61-71.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ESCRITURA LÁSER PARA INTERCONEXIÓN EN SERIE DE CELDAS SOLARES HÍBRIDAS DE CdTe/PEDOT:PSS)

Jesús A. Fierro-López, Jesús A. Núñez-Membrillo, Antony F. López-Sánchez and Gerardo S. Contreras-Puente
Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional Edificio No. 9, U.P.A.L.M., San Pedro Zacatenco, 07738, México.

Daniel Jiménez-Olarte
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y eléctrica, Instituto Politécnico Nacional Edificio No. 9, U.P.A.L.M., San Pedro Zacatenco, 07738, México.

Rogelio Mendoza-Pérez
Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Prolongación San Isidro No.151, San Lorenzo Tezonco, 09790, México.
rogelio.mendoza@uacm.edu.mx

RESUMEN

La escritura láser tiene un papel importante en el proceso de la interconexión en serie de las celdas solares de CdTe, lo anterior debido a la optimización del área activa de aprovechamiento; además de reducir la resistencia en serie en estos dispositivos. Este estudio se centra en la técnica de escritura láser aplicada a materiales semiconductores de película delgada para obtener interconexiones eléctricas en serie en dispositivos fotovoltaicos basados en CdTe. El proceso de escritura láser desempeña un papel crucial en el rendimiento fotovoltaico de la tecnología de celdas solares de película delgada. A través de las tres etapas implicadas P1 en el material TCO como contacto frontal, P2 en la heterounión, y P3 en el contacto metálico posterior, es posible reducir la resistencia en serie del dispositivo, incrementando el transporte de portadores de carga mediante las interconexiones en serie proporcionadas por los patrones de escritura láser P1, P2, y P3. Para llevar a cabo estos procesos, se utilizó un sistema láser Nd: YAG con una longitud de onda de 532 nm, operando a frecuencias de 2000 y 3750 Hz, pulsos de energía de 45 µJ a 50 µJ y velocidades de barrido de 3 cm/s. Los parámetros de escritura láser se ajustaron teniendo en cuenta las propiedades físicas de cada material y los requisitos específicos de cada etapa de escritura, optimizando la frecuencia, la energía y la velocidad de barrido para lograr perfiles ideales. En estos dispositivos fotovoltaicos obtenidos los resultados preliminares muestran que se alcanzaron eficiencias fotovoltaicas del 6%, con anchos promedio de los patrones de escritura láser de 100 µm; estos resultados fueron analizados mediante las técnicas de perfilometría y microscopia óptica. En la actualidad estos dispositivos fotovoltaicos a nivel mundial pueden alcanzar eficiencias fotovoltaicas cercanas alrededor del 18%. La optimización del proceso de escritura láser puede contribuir a aumentar los parámetros fotovoltaicos y la potencia eléctrica de estas celdas solares de CdTe.

Palabras claves: Escritura láser, interconexión, celdas solares, CdTe, dispositivos fotovoltaicos.

ABSTRACT

This study focuses on the laser scribing technique applied to thin-film semiconductor materials to obtain serial electrical interconnections in photovoltaic devices based on CdTe. The laser scribing process plays a crucial role in the photovoltaic performance of thin-film solar cell technology. Through the three stages involved P1 in the TCO material as the front contact, P2 in the heterojunction, and P3 on the back metal contact, it is possible to reduce the series resistance of the device, increase the transport of charge carriers by the serial interconnections provided by the P1, P2, and P3 laser scribing patterns. To perform these processes, a Nd: YAG laser system with a 532 nm wavelength was used, operating at frequencies of 2000 and 3750 Hz, energy pulses from 45 µJ to 50 µJ, and scanning speeds of 3 cm/s. Laser scribing parameters were adjusted considering the physical properties of each material and the specific requirements of each scribing stage, optimizing frequency, energy, and scanning speed to achieve ideal profiles. Efficiencies of 6% were achieved in the photovoltaic devices, with scribing patterns featuring widths of 100 µm. These results were evaluated and analyzed using profilometry and optical microscopy techniques. Currently, these photovoltaic devices can achieve photovoltaic efficiencies of around 18% worldwide. Optimize the laser scribing process can contribute to increasing the photovoltaic parameters and electrical power of these CdTe solar cells.

Keywords: Laser scribing, Interconnection, solar cells, CdTe, photovoltaic devices.

INTRODUCCIÓN

Las celdas solares de teluro de cadmio (CdTe) se han logrado posicionar como la segunda tecnología fotovoltaica (FV) a gran escala después de las celdas solares basadas en silicio con un 7% de presencia en el mercado de las tecnologías de este tipo [1]. La tecnología FV de CdTe se considera la de menor costo por watt generado y con el menor impacto ambiental en su producción. La principal empresa manufacturera de módulos de CdTe es First Solar, la compañía norteamericana tiene proyectado aumentar su capacidad a 25 GW de producción global de

módulos fotovoltaicos para el 2026, su eficiencia fotovoltaica a nivel laboratorio ha alcanzado el 22% y en los módulos fotovoltaicos el 18% [2 y 3]. Las celdas solares de CdTe han evolucionado y cambiado su configuración básica desde sus inicios hasta el día de hoy, con el fin de incrementar su eficiencia FV, como el uso de diferentes contactos frontales, los tratamientos térmicos con cloruros y optimizando el contacto posterior.

La estructura típica de una celda solar híbrida de CdTe/PEDOT:PSS se muestra en la Figura 1. El sustrato es un vidrio conductor con SnO_2:F (FTO) el cual es el contacto frontal. Sobre este substrato se deposita la capa buffer de ZnO y el semiconductor ventana tipo n de CdS por medio de la técnica Sputtering en modo de Radio Frecuencia con espesores de alrededor de los 200 nm. El semiconductor absorbente tipo p de CdTe con espesores de 6 µm aproximadamente, se deposita por medio de la técnica de sublimación en espacio cercano (CSS); mientras que, el polímero conductor orgánico PEDOT:PSS, se dispersa por medio de la técnica de Spin Coating, finalmente las celdas solares se obtienen con el depósito de los contactos posteriores de Cu-Mo por medio de la técnica Sputtering en modo de Corriente Directa [4]. Para obtener voltajes a circuito abierto (V_{oc}) del orden de 80 V (necesario en sistemas fotovoltaicos interconectados a red) más de 100 celdas solares deben ser interconectadas en serie con V_{oc} aproximados de 0.8 V. Las celdas solares que componen un módulo fotovoltaico de CdTe pueden ser interconectadas en serie por escritura láser, escritura mecánica o fotolitografía, siendo el primero el más utilizado en la industria [5].

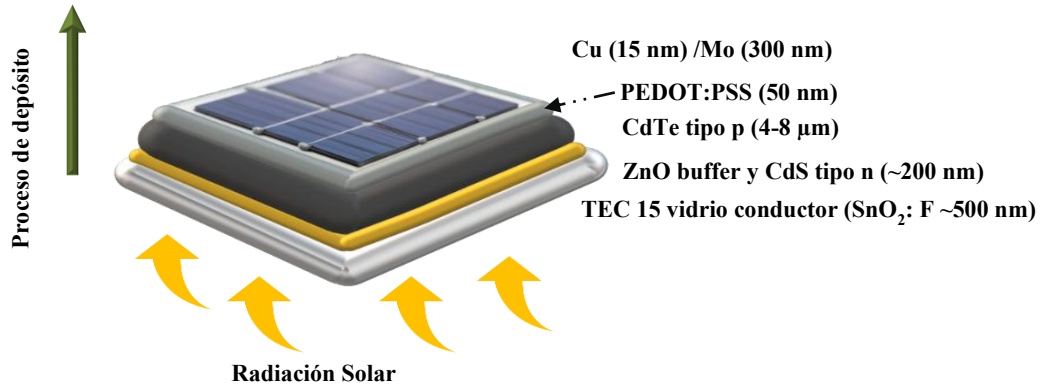


Figura 1. Estructura típica de una celda solar híbrida de CdTe/PEDOT:PSS.

México, por su posición geográfica, forma parte del cinturón solar con una radiación mayor a 5.5 kWh/m^2 al día y es uno de los cinco países más atractivos en el mundo para invertir en proyectos de energía solar fotovoltaica comparado con China y Singapur [6]. Entre las empresas manufactureras de módulos fotovoltaicos y de componentes de sistemas fotovoltaicos establecidas en el país están JA Solar, Kyocera, Sanyo, Trina Solar, IUSA y Canadian Solar [7]. En México se estima que puede alcanzar los 10 GW de capacidad solar instalada en el 2025; sin embargo, la tecnología fotovoltaica se importa y no existe el desarrollo de módulos fotovoltaicos con tecnología nacional.

Uno de los retos tecnológicos es el escalamiento en la producción de celdas solares a nivel de laboratorio a módulos fotovoltaicos de película delgada de CdTe y CIGS (Cobre-Indio-Galio-Selenio) y para lograr este escalamiento es necesario un proceso de interconexión eléctrica entre las celdas solares. En la industria fotovoltaica el proceso de interconexión se lleva a cabo mediante un proceso de escritura láser en la celda solar; sin embargo, los detalles técnicos no son conocidos. En las patentes de First Solar y TEL solar se menciona el uso de hasta tres láseres (1064 nm, 532 nm y 355 nm). En este trabajo, se empleo un láser de Nd: YAG en la longitud de onda de 532 nm, operando a frecuencias de 2000 y 3750 Hz, ajustando los parámetros de escritura láser (frecuencia, energía y velocidad de barrido) en función de las propiedades físicas de cada material para obtener perfiles ideales y lograr la interconexión en serie de celdas solares de 1 plg^2.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El proceso de interconexión por escritura láser se realizó con un láser pulsado de Nd:YAG controlado por una interfaz por computadora y con un sistema de movimiento X-Y, como se muestra en la Figura 2. La erosión de cada material fue debido al fenómeno de interacción láser-materia, que como resultado se obtienen los patrones de escritura láser en cada uno de los materiales: el patrón P1 sobre el contacto frontal de SnO_2:F, el patrón P2 sobre la heterounión formada por el semiconductor ventana de CdS y el semiconductor absorbente de CdTe y el patrón P3 en el contacto posterior de Cu-Mo. La Figura 3 muestra un esquema del proceso para conseguir la interconexión eléctrica en serie P1, P2 y P3 por escritura láser, alternando cada una de estas etapas con el depósito de cada uno de los materiales mencionados que componen la estructura de la celda solar híbrida de CdTe/PEDOT:PSS [8].

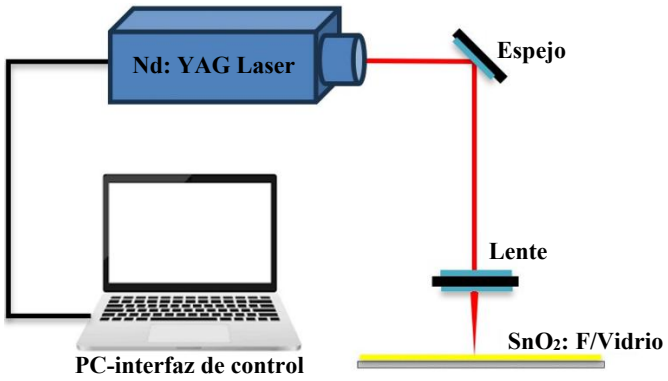


Figura 2. Esquema del sistema de escritura láser empleado.

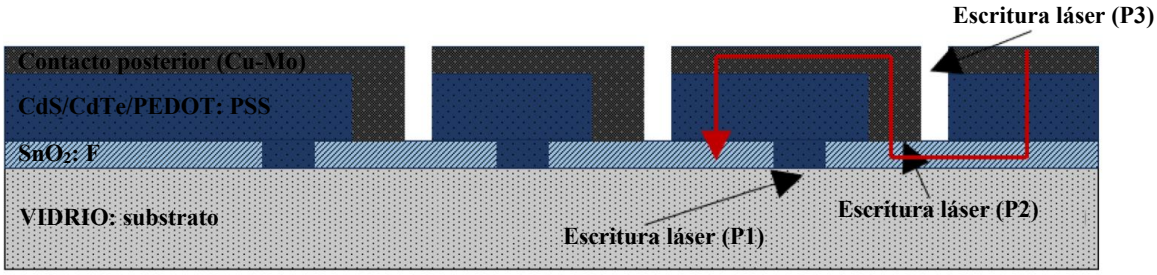


Figura 3. Vista transversal de los patrones de escritura láser P1, P2 y P3 empleados en el SnO_2:F, CdTe y Cu-Mo, respectivamente.

En la Tabla I, se muestran los parámetros de escritura láser empleados para cada uno de los patrones P1, P2 y P3, como son frecuencia (f), velocidad (v), energía (E) y distancia focal (d_f)

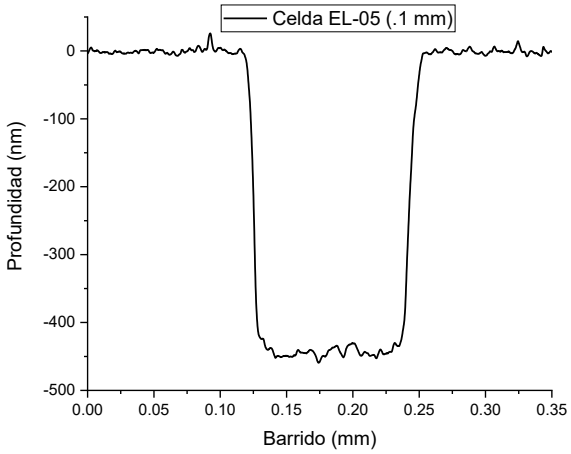
Tabla I. Parámetros empleados en los patrones de escritura láser P1, P2 y P3.

Parámetros escritura láser (λ=532 nm, P=4 W, t_p=12 ns)				
	f (Hz)	v (cm/s)	E (µJ)	d_f (mm)
P1 en SnO_2:F	3750	3	45	12.85
P2 en CdTe	2000		50	18.5
P3 en Cu-Mo				

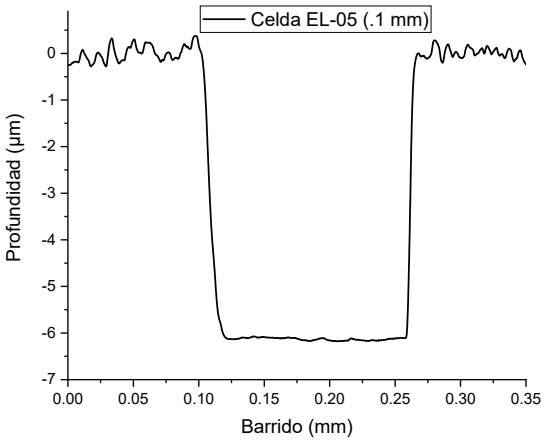
ANALISIS DE RESULTADOS

Medición de perfilometría y de microscopio óptico

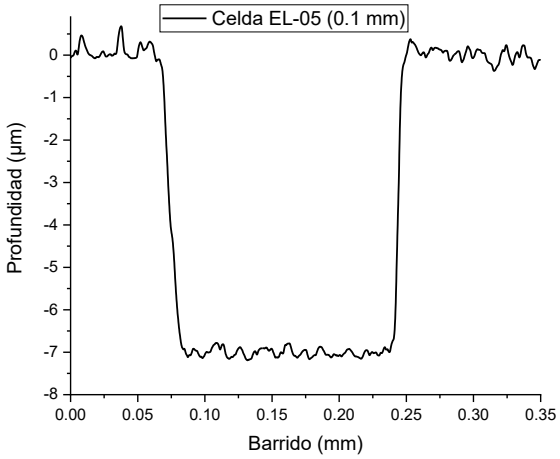
En la Figura 4 se muestran las mediciones de perfilometría correspondientes a cada uno de los patrones de escritura láser a) P1, b) P2 y c) P3 sobre cada uno de sus respectivos materiales (SnO_2:F, CdTe y Cu-Mo), en las cuales se observa el ancho promedio de la escritura láser de 100 µm y profundidades de 450 nm para el SnO_2:F, de 6.5 µm para el CdTe y de hasta7 µm para el Cu-Mo. En la Figura 5 se observan las imágenes ópticas de los patrones de escritura a) P1, b) P2 y c) P3.



a)

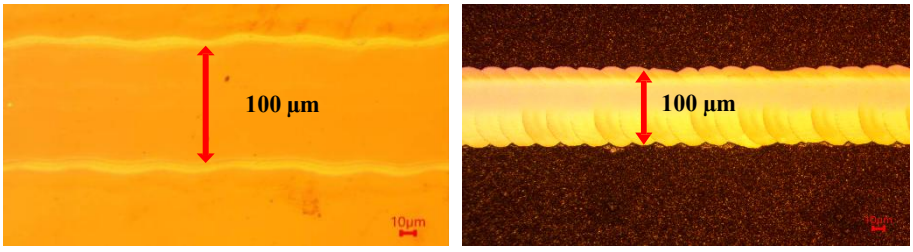


b)

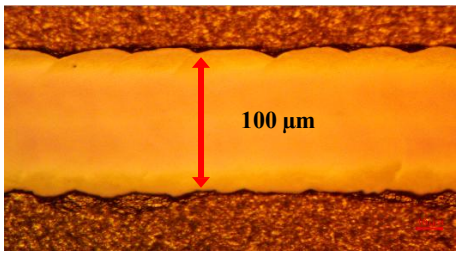


c)

Figura 4. Mediciones de perfilometría correspondientes a los patrones de escritura láser a) P1-SnO_2:F, b) P2-CdTe y c) P3-Cu-Mo.



a) b)



c)

Figura 5. Imágenes ópticas de los patrones de escritura a) P1-SnO_2:F, b) P2-CdTe y c) P3-Cu-Mo.

En la Figura 6 se observa la imagen de la celda solar híbrida CdTe/PEDOT:PSS EL-05 con los tres patrones de escritura a) P1-SnO_2:F, b) P2-CdTe y c) P3-Cu-Mo.

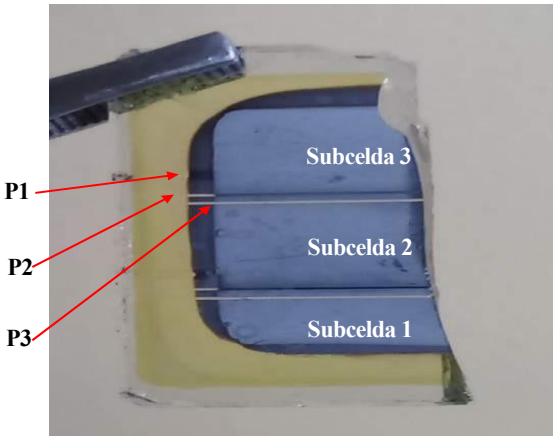
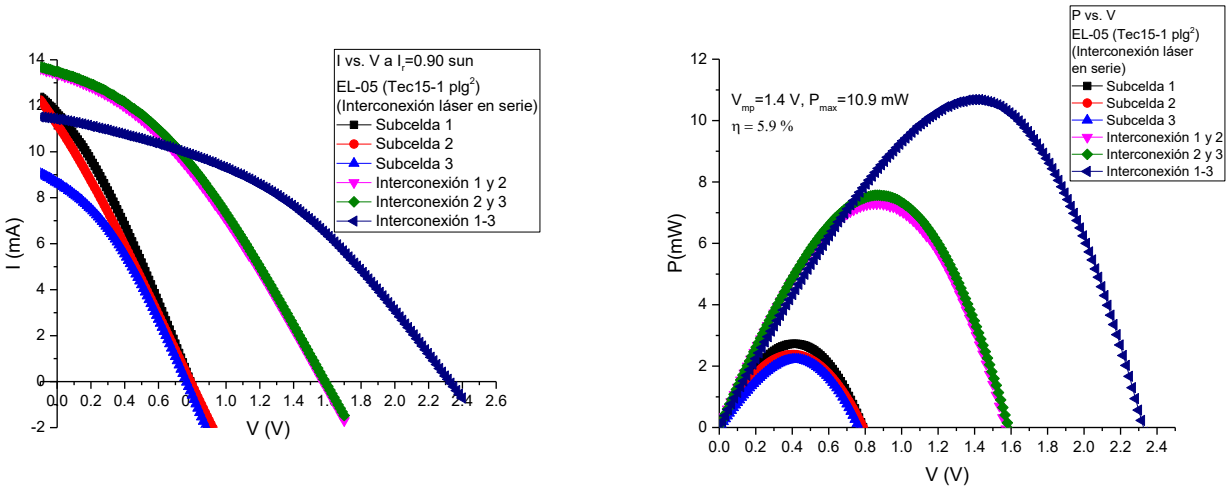


Figura 6. Imagen de la celda solar híbrida EL-05 con los tres patrones de escritura láser a) P1-SnO_2:F, b) P2-CdTe y c) P3-Cu-Mo

Caracterización eléctrica I vs. V

En la Figura 7 se muestran las gráficas de a) I vs. V y b) P vs. V para la celda solar híbrida CdTe/PEDOT:PSS EL-05 con los tres patrones de escritura a) P1-SnO_2:F, b) P2-CdTe y c) P3-Cu-Mo y la interconexión en serie como se muestra en las Figuras 3 y 6. Tanto en las gráficas de I vs. V como en las gráficas de P vs. V, se observa la respuesta fotovoltaica de cada subcelda 1, 2 y 3 por separado; así como, la interconexión eléctrica entre las subceldas 1-2, 2-3 y 1-3. En la gráfica de I vs. V y debido a la interconexión en serie de estas tres subceldas 1, 2 y 3 se observa la suma del V_{oc} de 0.8 V hasta los 2.3 V, aproximadamente; mientras que, los valores de la corriente de corto circuito (I_{sc}) permanecen prácticamente constantes en valores cercanos a los 12 mA. Respecto a la curva de P vs. V se observa que la celda solar híbrida El-05 aumenta su valor de máxima potencia eléctrica (P_{max}) de 3 mW para cada subcelda 1, 2 y 3, a valores aproximados 7 mW para la interconexión 1-2 y 2-3 y finalmente la P_{max} de la celda solar EL-05 interconectada en serie obtenida es de casi 11 mW a un V_{mp}=1.4 V.



a) b)

Figura 7. Gráficas de a) I vs. V y b) P vs. V de la celda solar híbrida EL-05 interconectada en serie.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un proceso de interconexión eléctrica en serie obteniendo los patrones de escritura láser P1-SnO_2:F, P2-CdTe y P3-Cu-Mo, mediante un láser pulsado de Nd: YAG con una longitud de onda de 532 nm, operando a frecuencias de 2000 y 3750 Hz, pulsos de energía de 45 µJ a 50 µJ, y una velocidad de barrido de 3 cm/s, la potencia del láser fue de 4 W con tiempos de pulsado del orden de 12 ns. Al realizar estos patrones de escritura láser de forma intercalada con los respectivos depósitos de los materiales semiconductores que conforman una celda solar híbrida de CdTe/PEDOT:PSS se obtuvo la interconexión eléctrica en serie de la celda solar EL-05 de 1 plg^2, aumentando el V_{oc} y la P_{max} de esta celda solar híbrida.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es gracias al apoyo de los siguientes proyectos y apoyos SIP-20240621 ESFM-IPN, UACM-CCyT-2025-CON-01 CCyT-UACM y beca de posgrado CONAHCyT (SECIHTI). Los autores agradecen también al Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable (LACyTES) por las mediciones de I vs.V.

REFERENCIAS

[1] Philipps, S. Warmuth, W. photovoltaics report—Fraunhofer ISE; 2016. Available from: https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html.

[2] https://pv-magazine-usa.com/2024/02/28/first-solar-plans-to-double-manufacturing-capacity-by-2026/

[3] Green MA, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED, Levi DH, et al: Solar cell efficiency tables (version 49), *Prog Photovolt Res Appl* 25:3–13, 2017.

[4] Influence of Processing Experimental Parameters of PEDOT: PSS on the Photovoltaic Performance on CdTe Solar Cells". R. Mendoza-Pérez, José A. Del Oso, J. Sastré-Hernández, B. P. Reyes-García and J. Aguilar Hernández. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2023 12 055008. DOI: 10.1149/2162-8777/acd211.

[5] A.D. Compaan, I. Matulionis, S. Nakade, Laser scribing of polycrystalline thin films, Opt. Laser Eng. 34 (2000) 15-45.

[6] W.L. Lozano Cardona (2014), Energías Renovables, ProMéxico

[7] https://www.pv-magazine-mexico.com/

[8] Tesis doctoral Interconexión eléctrica en celdas solares de CdS/CdTe por escritura láser y su efecto en las propiedades de los materiales policristalinos que las constituyen. Daniel Jiménez Olarte. Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional. Julio 2015.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

MODELO DE TRABAJO COLABORATIVO BASADO EN CIENCIA DE DATOS PARA CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA

Paola G. Abrego-Martínez, Francisco E. Cancino -Gordillo, Carlos F. Arias Ramos y Hailin Z. Hu
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México,Teléfono, Fax, **gabrielazabrego@comunidad.unam.mx.**

Asiel N. Corpus-Mendoza
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México, Teléfono, Fax.
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Av. Insurgentes Sur 1582 Col. Crédito Constructor, Demarcación Territorial, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México.

RESUMEN

En la investigación científica, gran parte de los experimentos realizados no son reportados ni analizados debido a que se consideran como negativos, fallidos o poco concluyentes, lo que representa una pérdida significativa de información. Esta limitación, junto con la complejidad de los procesos experimentales, dificulta el progreso en el desarrollo de materiales fotovoltaicos. Superar estos desafíos requiere no solo documentar de forma sistemática todos los experimentos, sino también fomentar la colaboración entre grupos de investigación y aprovechar herramientas de ciencia de datos. Por tal razón, estas estrategias son importantes para integrar conocimientos dispersos, descubrir patrones ocultos en grandes volúmenes de datos y orientar de forma más eficiente los esfuerzos experimentales hacia condiciones prometedoras. En este trabajo, desarrollamos un modelo de trabajo colaborativo mediante el diseño de una base de datos orientada a optimizar la organización, adquisición y calidad de los datos experimentales. Como parte de un esfuerzo colaborativo entre estudiantes e investigadores, se recopilan y transcriben datos experimentales relacionados con películas de perovskita preparadas bajo condiciones ambientales. Esta metodología ha permitido registrar más de 400 muestras, cada una descrita con hasta 60 parámetros que incluyen diferentes condiciones de síntesis, técnicas de depósito y métricas derivadas de caracterizaciones estructurales, ópticas y electrónicas. Este enfoque no solo preserva el conocimiento generado en el laboratorio, sino que también permite identificar y cuantificar relaciones entre las condiciones de procesamiento, las propiedades de los materiales y su desempeño fotovoltaico. Por lo tanto, este modelo de trabajo colaborativo se convierte en una herramienta esencial para mejorar la accesibilidad de los datos, guiar el diseño de experimentos y permitir la aplicación de nuevos métodos de análisis basados en ciencia de datos para la investigación de celdas solares de perovskita (PSCs).

ABSTRACT

In scientific research, a large portion of experiments go unreported and unanalyzed because they are considered negative, failed, or inconclusive, resulting in a significant loss of valuable information. This limitation, combined with the complexity of experimental processes, hinders the progress in the development of photovoltaic materials. Overcoming these challenges requires not only the systematic documentation of all experiments but also the promotion of collaboration among research groups and the strategic use of data science tools. For this reason, such strategies are essential to integrate scattered knowledge, uncover hidden patterns in large datasets, and more efficiently guide experimental efforts toward promising conditions. In this work, we present a collaborative research model through the design of a database aimed at optimizing the organization, acquisition, and quality of experimental data. As part of a joint effort between students and researchers, experimental data related to perovskite films prepared under ambient conditions are collected and transcribed. This methodology has enabled the recording of over 400 samples, each described by up to 60 parameters, including various synthesis conditions, deposition techniques, and metrics derived from structural, optical, and electronic characterizations. This approach not only preserves the knowledge generated in the laboratory but also allows for the identification and quantification of relationships between processing conditions, material properties, and photovoltaic performance. Therefore, this collaborative research model becomes a key tool for improving data accessibility, guiding experimental design, and enabling the application of novel data-driven analytical methods in the study of perovskite solar cells (PSCs).

Palabras claves: *perovskita, celdas solares, base de datos, colaboración científica*.

INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovables ha impulsado una intensa búsqueda de materiales fotovoltaicos que combinen eficiencia, bajo costo y facilidad de fabricación. En este contexto, las celdas solares basadas en materiales de perovskita han recibido gran atención por parte de la comunidad científica debido a sus excelentes propiedades optoelectrónicas, su versatilidad en procesos de síntesis y su potencial para superar las limitaciones de tecnologías convencionales, logrando un impresionante progreso en la eficiencia de conversión de energía (PCE) de hasta un 27 % (NREL, 2025), la cual espera que incremente aún más de acuerdo con los estudios teóricos, ya que el PCE teórico máximo estimado por la teoría de Shockley-Queisser (S-Q) es del 33 % para una perovskita de 1.4 eV y de 31.4 % para las celdas solares que emplean $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ (Yin et al., 2015). Además de la extensa investigación para incrementar de la eficiencia, también se está trabajando para aumentar la estabilidad y la vida útil de las celdas. No obstante, a pesar del rápido crecimiento en publicaciones y avances experimentales, el desarrollo sistemático de estos materiales enfrenta barreras significativas que comprometen su

avance hacia la comercialización (Roy et al., 2020). Una de las principales limitaciones en la investigación de perovskitas, y en la ciencia de materiales, radica en la gestión del conocimiento experimental. En muchos laboratorios, los datos generados a partir de experimentos considerados fallidos, negativos o poco concluyentes no son reportados ni analizados, lo que representa una pérdida sustancial de información valiosa para la investigación. Estos datos, aunque no conduzcan directamente a resultados exitosos, contienen patrones, condiciones límite y aprendizajes que podrían orientar futuras investigaciones. La falta de sistematización y accesibilidad a esta información fragmentada impide la construcción de modelos predictivos y dificulta la reproducibilidad de los experimentos, afectando la eficiencia del proceso científico. Por ejemplo, se repiten experimentos que podrían evitarse si se contara con registros más completos, o se ignoran preguntas de investigación con alto impacto. Esta dificultad se ve agravada por la rápida expansión del cuerpo de conocimiento en el área, lo que complica mantenerse al día con los avances más recientes y seleccionar enfoques experimentales pertinentes. Además, persisten brechas significativas en la etapa experimental, especialmente en la integración efectiva entre modelos digitales y pruebas físicas, así como en la garantía de reproducibilidad de los resultados. De hecho, se ha reportado que aproximadamente el 70 % de los científicos ha intentado, al menos una vez, replicar resultados obtenidos por otros sin éxito (Baker, 2016). Además, en la investigación de PSCs, la complejidad de los procesos de síntesis, que involucran múltiples variables como la composición química, las técnicas de depósito, las condiciones ambientales y los métodos de caracterización, exige un enfoque más estructurado para capturar, organizar y analizar los datos generados en el laboratorio. En respuesta a estas necesidades, se ha promovido la creación de bases de datos y plataformas colaborativas que faciliten el intercambio de información dentro de grupos de investigación. Sin embargo, la diversidad en metodologías y la falta de estandarización en la captura de datos representan barreras significativas para un trabajo colaborativo efectivo. A su vez, la creciente cantidad y complejidad de la información experimental requieren la adopción de herramientas para acelerar el desarrollo y la optimización de nuevos materiales. En este sentido, la gran cantidad de datos generados tanto por experimentos como por simulaciones ha impulsado, en los últimos años, el surgimiento de un cuarto paradigma: la ciencia basada en datos, que unifica los paradigmas de la ciencia basada en observaciones empíricas, la ciencia teórica y la ciencia computacional, y está estrechamente vinculada al desarrollo y adopción de métodos de inteligencia artificial. El auge de la ciencia de datos ha introducido herramientas claves en la ciencia de materiales para procesar cantidades masivas de datos y descubrir conocimiento en los conjuntos de datos. Este nuevo enfoque está mejorando significativamente la capacidad de analizar y comprender la información, destacándose especialmente en la construcción de modelos y la predicción de tendencias (Chávez-Angel et al., 2025). Por lo tanto, en este trabajo desarrollamos un modelo de trabajo colaborativo basado en ciencia de datos, orientado a mejorar la organización, adquisición y calidad de los datos experimentales en el estudio de PSCs. Como parte de un esfuerzo conjunto entre estudiantes e investigadores, se ha desarrollado una base de datos estructurada que recopila información detallada de más de 400 muestras de películas de perovskita preparadas bajo condiciones ambientales, donde cada muestra está descrita hasta por 60 parámetros, los cuales incluyen, variables de síntesis, técnicas de depósito y métricas derivadas de caracterización estructural, óptica y electrónica. El modelo propuesto busca fomentar una cultura de colaboración y apertura en la investigación científica, donde el intercambio de datos y la integración de conocimientos dispersos se conviertan en puentes para la innovación tecnológica. Al facilitar el acceso a información sistematizada y promover el uso de técnicas analíticas avanzadas, este enfoque contribuye a mejorar la reproducibilidad, acelerar el desarrollo de materiales y orientar los esfuerzos experimentales hacia condiciones más prometedoras.

METODOLOGÍA

El desarrollo del modelo de trabajo colaborativo en este estudio sigue un proceso sistemático de planeación, diseño, implementación y validación. En la primera etapa, se definen los objetivos, alcances y limitaciones para establecer un entorno de colaboración eficiente, flexible y escalable. A continuación, se selecciona una plataforma accesible, funcional y compatible con herramientas de visualización y análisis para almacenar, sincronizar y administrar los datos experimentales. Aquí, la estructura de la base de datos se construye alineada con las etapas del ciclo de investigación de los materiales de perovskita para organizar la información experimental. Posteriormente, se describen las categorías y las pautas de formato utilizando nomenclaturas y unidades de medida estandarizadas para facilitar la comprensión, el mantenimiento y la modificación de la base de datos. Los datos recopilados de las bitácoras manuscritas o digitales de laboratorio se integran en la base de datos aplicando el formato estandarizado para identificar y corregir datos duplicados, inconsistentes o faltantes. Este paso ayuda a minimizar confusiones o errores para mantener la calidad e integridad de la base de datos, asegurando que los colaboradores participen de manera activa en el desarrollo del modelo de trabajo. Finalmente, el rendimiento del modelo de trabajo colaborativo se evalúa mediante pruebas en condiciones de uso real, revisión cruzada y análisis comparativos entre distintos experimentos. Este paso permite confirmar la consistencia de los datos, identificar posibles ajustes en la estructura y asegurar que la base de datos sea útil tanto para el análisis interno como para la preparación de resultados publicables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra el esquema del modelo de trabajo colaborativo para la integración eficiente de datos experimentales en flujos de investigación de materiales de perovskita. A partir de esto, se observa que las cuatro etapas de planeación, diseño, implementación y evaluación se conectan de manera lógica y secuencial, formando un ciclo dinámico que facilita la organización, el procesamiento y la mejora continua de la información experimental para su análisis, interpretación y publicación. De este modo, se consolida una herramienta clave en el laboratorio que optimiza el ciclo de investigación, fortalece la colaboración y favorece la reproducibilidad de los resultados.

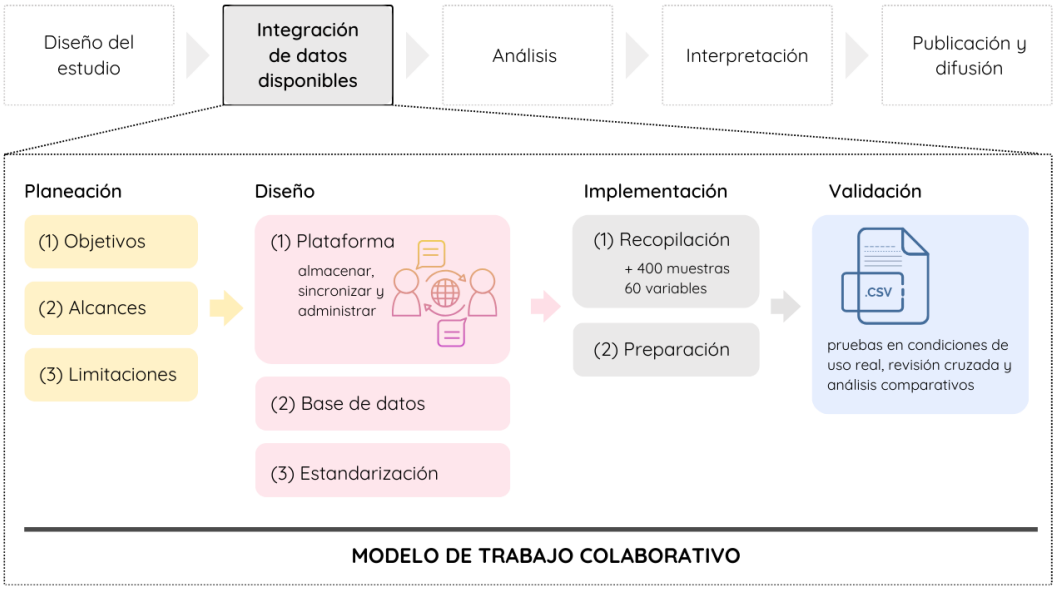


Figura 1. Esquema del modelo de trabajo colaborativo, posicionado entre el diseño del estudio y el análisis de datos para guiar el diseño de experimentos en la investigación de materiales de perovskita.

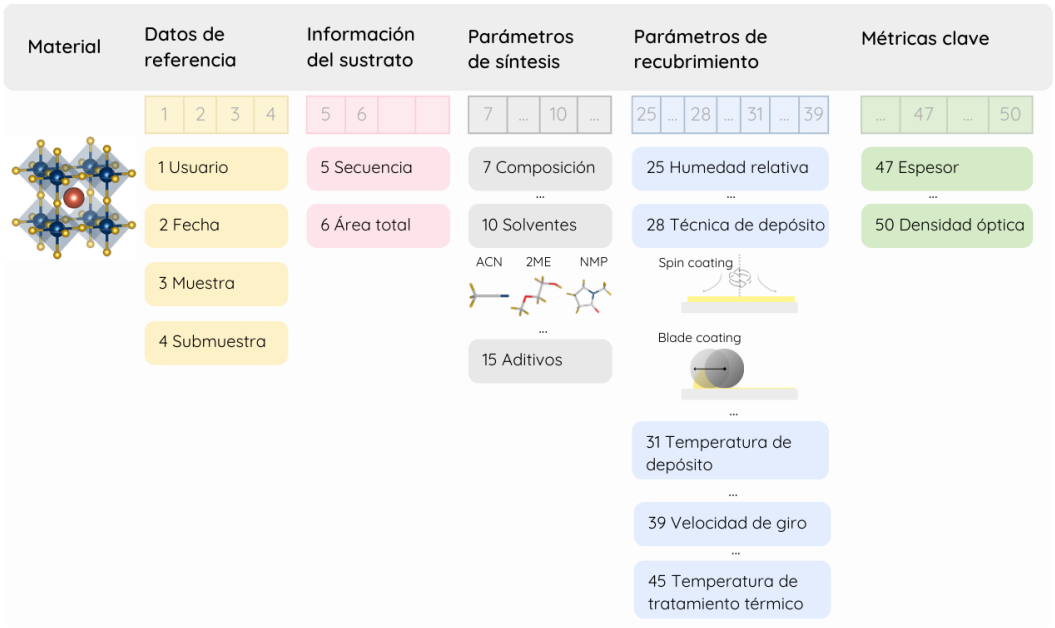


Figura 2. Esquema de las principales categorías de la base de datos de materiales de perovskita.

Este modelo de trabajo colaborativo se desarrolla mediante el diseño de una base de datos estructurada según las categorías propuestas en el esquema de la figura 2, donde se utilizaron campos y formatos estandarizados para representar la información de los materiales de perovskita preparadas en forma de películas delgadas. La primera categoría corresponde a la información de identificación de cada muestra, mientras que la segunda categoría reúne los datos descriptivos del material. En las PSCs, la capa activa de perovskita se obtiene mediante la formulación de soluciones que consideran la composición precursora, el sistema de solventes y los aditivos, estos datos se almacenan en los campos de la tercera categoría. También se incluyeron los detalles del proceso de fabricación mediante las técnicas de spin coating y blade coating, donde los registros documentan, por ejemplo, un recubrimiento a “5000 rpm durante 20 segundos, asistido por la adición de 200 µL de antidisolvente a los 10 segundos de empezar el giro” o “30 mm/s a 70 °C con una separación de 50 µm entre la cuchilla y el

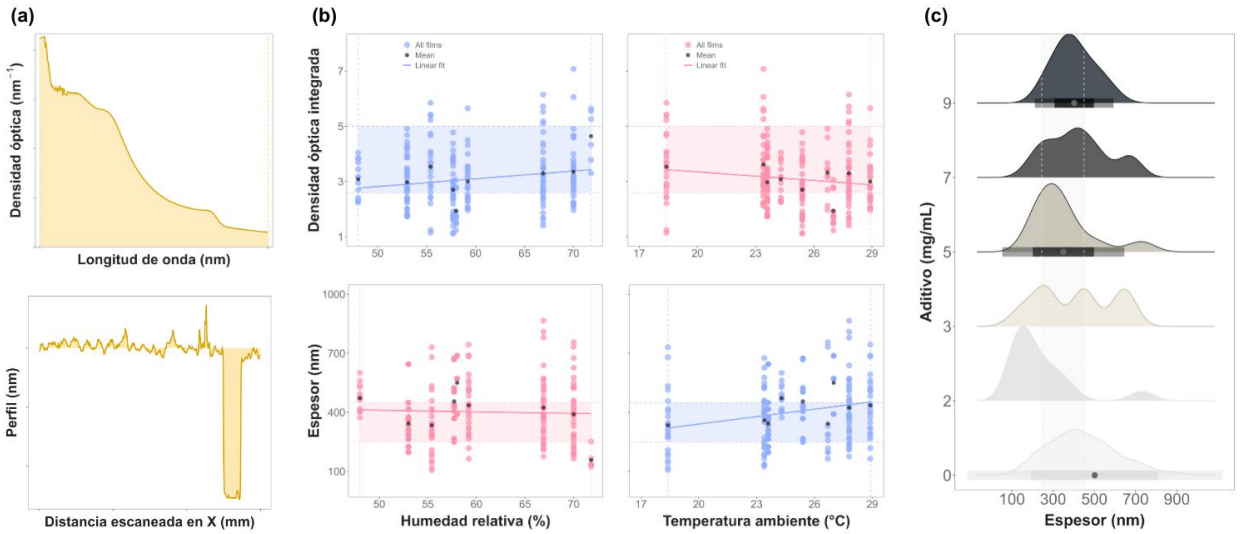


Figura 3. Oportunidades para el diseño de materiales de perovskita utilizando el modelo de trabajo colaborativo.

sustrato", respectivamente. En tales casos, cada variable de procesamiento se almacena por separado, incluidas las condiciones de humedad relativa y temperatura ambiente de cada diseño experimental. Después del recubrimiento, los parámetros del sistema de tratamiento térmico se registran en esta misma categoría. Finalmente, en la quinta categoría se almacenan las métricas derivadas de caracterizaciones estructurales, ópticas y electrónicas de las películas de perovskita.

La validación de los datos experimentales ofrece un enfoque representativo para analizar el comportamiento del modelo de trabajo. Un ejemplo de caso de estudio se observa en la figura 3. En la fabricación de películas de perovskita bajo condiciones ambientales, cada experimento aporta no solo los resultados inmediatos de caracterización, como densidad óptica y espesor, sino también las condiciones de temperatura ambiente y humedad relativa. Aunque en un diseño de experimentos estas variables se consideran constantes frente a los parámetros de síntesis y recubrimiento, cuando se recopilan y combinan datos de muchos experimentos realizados en distintos ambientes, es posible descubrir que estas variables sí influyen de manera significativa en la calidad de las películas de perovskita. Esta capacidad de identificar correlaciones y tendencias que no se perciben en experimentos de grupos pequeños y aislados es una de las principales ventajas del modelo de trabajo colaborativo. Al centralizar toda la información del proceso de investigación de materiales de perovskita, desde la formulación de las soluciones precursoras hasta la caracterización, en una plataforma colaborativa, el modelo transforma registros dispersos en un sistema coherente y estructurado. Esto facilita la comparación de condiciones de fabricación, la validación de hipótesis con mayor solidez y la evaluación de estrategias para la escalabilidad de las capas activas de perovskita, como la incorporación de aditivos en las soluciones precursoras. Además, el acceso a un volumen amplio de datos permite aplicar herramientas de aprendizaje automático para predecir comportamientos, optimizar procesos y orientar el análisis de nuevos experimentos con mayor eficiencia y precisión.

CONCLUSIONES

El modelo de trabajo colaborativo fortalece la gestión de datos experimentales, creando estrategias más efectivas para difundir los datos de los materiales de perovskita facilitando la identificación de patrones y variables clave para la fabricación de PSCs. Actualmente, este modelo se aplica al estudio y optimización de la película de perovskita mediante la técnica de blade coating, además, se espera expandir su alcance a todos las capas que componen las celdas solares, fomentando una cultura de intercambio de datos. Aspiramos a que la incorporación sistemática de información en bases de datos se establezca como una práctica habitual, pues esto potenciará la visibilidad y el impacto de las publicaciones científicas. Este modelo, aplicado de manera sistemática mediante el uso de técnicas de aprendizaje automático, puede contribuir significativamente a reducir las barreras entre investigación básica y desarrollo tecnológico, acelerando la transición hacia dispositivos eficientes, estables, sostenibles y escalables.

AGRADECIMIENTOS

PGAM agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México, por la beca de posgrado (CVU # 919194). FECG y CFAR agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México, por la beca postdoctoral (CVU # 784149 y # 709010), ANCM agradece el apoyo de SECIHTI bajo el programa de Investigadores por México, proyecto 7193. Se agradece el apoyo financiero de PAPIIT-UNAM (IA102625) y SECIHTI (CF-2023-I-725), así como la infraestructura proporcionada por Laboratorios Nacionales de SECIHTI (APOYOS LNC 2023-33 Innovación y Desarrollo de prototipos de módulos fotovoltaicos con celdas solares experimentales LIFYCS-IER-UNAM).

REFERENCIAS

Chávez-Angel, E., Eriksen, M. B., Castro-Alvarez, A., Garcia, J. H., Botifoll, M., Avalos-Ovando, O., Arbiol, J., & Mugarza, A. (2025). Applied Artificial Intelligence in Materials Science and Material Design. In Advanced Intelligent Systems. John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/aisy.202400986

Baker, M.. (2016). 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. Nature, 533(7604), 452–454. https://doi.org/10.1038/533452a

NREL. (2025). Photovoltaic Research, Best Research-Cell Efficiency Chart.

Roy, P., Kumar Sinha, N., Tiwari, S., & Khare, A. (2020). A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status. In Solar Energy (Vol. 198, pp. 665–688). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.080

Yin, W.-J., Yang, J.-H., Kang, J., Yan, Y., & Wei, S.-H. (2015). Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review. Journal of Materials Chemistry A, 3(17), 8926–8942. https://doi.org/10.1039/C4TA05033A

Solar Térmica de Alta Temperatura

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2374	Caracterización térmica de un sistema de cuatro concentradores cilindro parabólico	Carlos Pérez Rábago
2220	Prediseño de un banco experimental para el análisis de diferencias de temperatura azimutales	Roger Cundapí
2158	Modelación de una central eléctrica de torre central bajo diferentes modos de operación en México	Iván Salgado Tránsito

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UN SISTEMA DE CUATRO CONCENTRADORES CILINDRO PARABÓLICO

Manterola-Villanueva Gustavo, Arizmendi-Chávez Uriel, Pérez-Rábago Carlos Alberto, Gómez-Espinoza Víctor Hugo, García-Valladares Octavio

Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco s/n Col. Centro, Temixco, Morelos, 62580, México, 55 2069 4018, gmv@ier.unam.mx

RESUMEN

Los sistemas de Concentración Cilindro Parabólica (CCP) representan una de las fuentes de energía renovable más competitivas y menos costosas, en comparación con otras alternativas de energía solar de concentración, debido a sus altas temperaturas alcanzables, eficiencia térmica y niveles de madurez tecnológica. Estas características les permiten una amplia gama de aplicaciones en diversos procesos industriales. Para un prototipo diseñado y construido en el IER UNAM de un CCP con un área de captación de 2 m², denominado CP1250, el cual tiene un ángulo de borde de 90° y un receptor de 1.27 cm de diámetro con cubierta de borosilicato de 5 cm de diámetro, se observaron pérdidas máximas del 45% de la potencia recibida y del 22% en eficiencia en condiciones de menor altitud solar. A partir de estos resultados de caracterización térmica, obtenidos a lo largo de un año y que incluyen las curvas de eficiencia, se desarrolló un banco de cuatro concentradores conectados en serie, donde se compara la eficiencia global del sistema con la reportada en la unidad independiente.

ABSTRACT

Parabolic Trough Concentrating (PTC) solar arrays represent one of the most competitive and least expensive renewable energy sources compared to other solar energy concentrators alternatives, due to their high achievable temperatures, thermal efficiency, and technological maturity. These characteristics allow them to be used in a wide range of applications in various industrial processes. For a PTC prototype designed and manufactures at IER UNAM with a 2 m² collection area, a 90° edge angle, and a 1.27 cm diameter receiver with a borosilicate cover, maximum losses of 45% of the received power and 22% in efficiency were observed at lower solar altitudes. Based on these thermal characterization results, obtained over a year and including efficiency curves, a bank of four concentrators connected in series was developed, where the overall system efficiency is compared with that reported for the stand-alone unit.

INTRODUCCIÓN

Existen muchos procesos industriales que presentan una gran demanda de energía térmica dentro de los rangos de 80 a 250 °C [1], lo cual resulta ser un campo prometedor para la implementación de tecnologías correspondientes a las energías renovables, tales como la solar térmica, puesto que en este ramo se tienen configuraciones de concentración solar capaces de lograr cumplir los requerimientos de los procesos industriales, que en este caso son dependientes directamente de las temperaturas deseadas a alcanzar. Estas configuraciones van desde colectores solares planos para aplicaciones domésticas por debajo de los 65 °C, de tubos evacuados con temperaturas alrededor de los 85°C, hasta los concentradores solares como Fresnel o canal parabólico para temperaturas que van de 150 a 400 °C [2]. Sin embargo, para tal fin se tiene que los sistemas de concentración solar aprovechan la radiación solar directa y por tal razón se requiere desarrollar e implementar sistemas de seguimiento solar, los cuales tienen como finalidad aumentar la energía colectada. Esto se logra manteniendo al sistema en una posición perpendicular a la dirección de la radiación solar a lo largo del día.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El cilindro parabólico con el que se trabajó el CP1250 (Figura 1), cuenta con un ángulo de apertura es de 90°, con las dimensiones mostradas en la tabla. 1. Para el seguimiento del sistema se implementó una transmisión de cadena, la cual, se coloca de manera estratégica sobre la estructura, buscando para resguardar el sistema, cuando no se encuentra en operación. El canal parabólico se orienta sobre el eje Norte-Sur y se tiene un seguimiento de Este a Oeste, realizando el sistema de seguimiento de lazo abierto.

Tabla 1. Características del canal parabólico CP1250

Parámetro	CP1250	
Longitud	2	m
Apertura	1.09	m
Área de apertura	2.18	m^2
Distancia focal	0.272	m
Diámetro receptor	0.0222	m
Diámetro cubierta	0.054	m
Reflectividad	0.92	-
Transmitancia cubierta	0.90	-

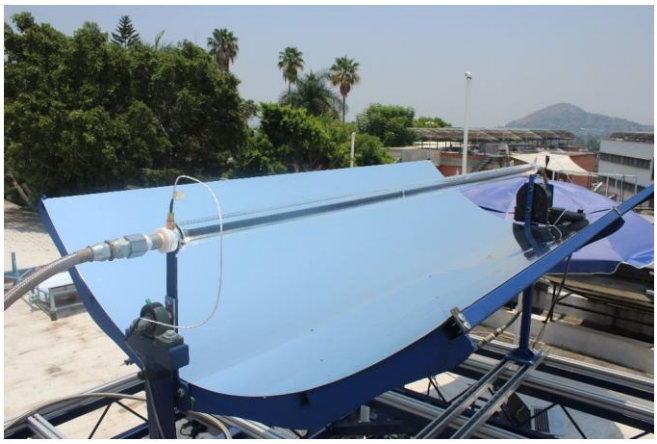


Figura 1: Fotografía del CP1250, modelo de cilindro parabólico desarrollado e instalado en el IER UNAM.

El sistema tiene una orientación Norte-Sur y con un seguimiento de un solo eje, haciendo su recorrido de manera diaria en el sentido de Este a Oeste, a una velocidad concentrarte de 15° por hora. El seguimiento solar para este dispositivo es propio y fue desarrollado buscando una buena resolución del mecanismo, siempre por debajo de los ±0.5 °, logrando obtener una respuesta instantánea y con una variación no mayor a los ±0.15 °.

CARACTERIZACIÓN TERMICA DEL PROTOTIPO CP1250

Al contar con seguimiento en un solo eje y en el sentido de Este a Oeste, la variación en la altura solar a lo largo del año resulta ser suma importancia, puesto que esto significa perder parte de la radiación concentrada sobre el absorbedor del sistema y por tanto reduciendo la eficiencia del sistema comparado con si se tuviera completamente perpendicular al vector solar. Por tal motivo, se realizaron pruebas durante dos años consecutivos, buscando obtener datos representativos del funcionamiento y comportamiento del sistema. A pesar de múltiples factores, en su mayoría meteorológicos, se lograron datos sólidos sobre el desempeño del sistema, de los cuales se pudo obtener cuatro épocas de gran interés. Estos cuatro periodos corresponden a los equinoccios y solsticios de acuerdo con la ubicación del sistema [3]. Como resultado de esto se encontró la repetibilidad en el funcionamiento del sistema y se logró apreciar la variación en la eficiencia debido a la variación de la altura solar, obteniendo las siguientes curvas de rendimiento térmico, realizadas bajo los lineamientos de las normas NMXES-001-NORMEX-2018 [4], ISO 9806:2017 [5] y E905-87. [6]

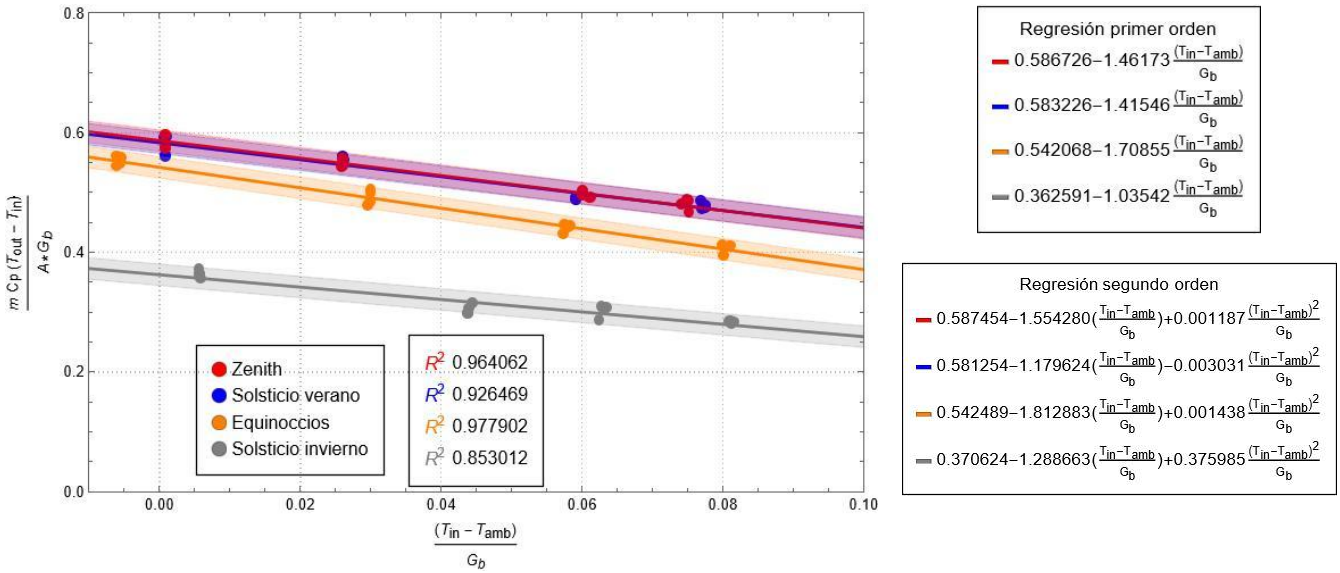


Figura 2: Curva de eficiencia del prototipo CP1250, para los puntos críticos del año.

Con las cuatro curvas obtenidas sobre rendimiento térmico de la Figura 2, es posible apreciar la notable caída en la eficiencia térmica del

sistema, cayendo hasta un 36% de eficiencia para los meses en donde se tiene una menor altura solar. Un aspecto interesante es que, para ambos equinoccios, con una misma altura solar, pero en diferentes meses y con ligeras variaciones en las condiciones meteorológicas, se logró un comportamiento bastante similar, dejando claro que el flujo de radiación concentrada es muy similar para ambos periodos. Por otra parte, es posible apreciar que las perdidas térmicas son similares para todos los periodos, mostrando una consistencia en los elementos que se emplean como aislantes del absorbedor. Con todo lo conseguido hasta este punto y con todos los problemas enfrentados para la caracterización térmica del sistema, se propuso una metodología que ayude a mejorar estos métodos de prueba, buscando la estandarización de las curvas de rendimiento térmico para sistemas de concentración solar, validándola con datos experimentales y siendo publicados en la revista Solar Energy [7]. Esta metodología consiste en analizar la variación del flujo radiativo concentrado sobre el absorbedor, simulado con ayuda de software para el trazado de rayos, obteniendo así una curva característica para el sistema. Como se puede observar en la curva de ajustes de la Figura 3.

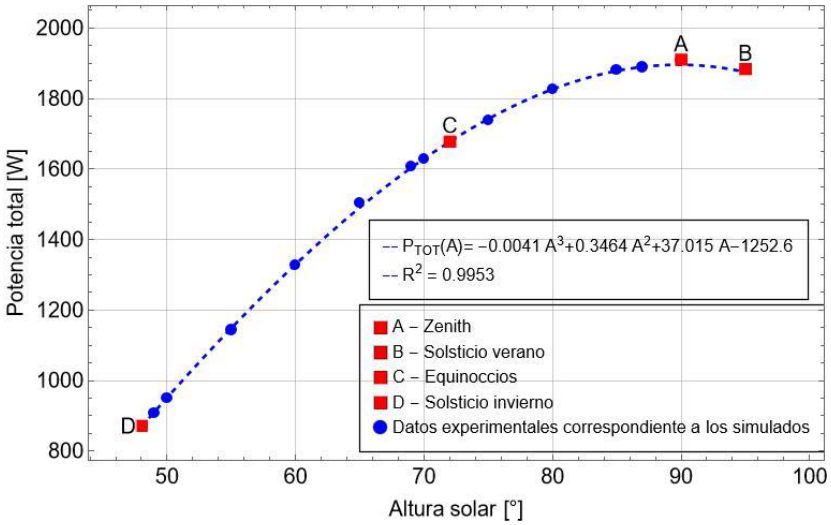


Figura 3: Curva de ajuste anual de las eficiencias evaluado a través de trazado de rayos para el CP1250 [2].

Se comprueba de manera experimental, dando validez a la curva característica obtenida y se procede a realizar proyecciones de las curvas de rendimiento térmico a menor altura solar, con el objetivo de obtener la de mayor rendimiento, es decir, la que se obtendría teniendo al Sol en el Zenith. Una vez realizado todo el procedimiento se consigue aproximar con buena precisión las cuatro curvas de tal manera que muestran la curva de mayor eficiencia bajo condiciones de perpendicularidad del vector solar con el área de apertura del sistema (Figura 4).

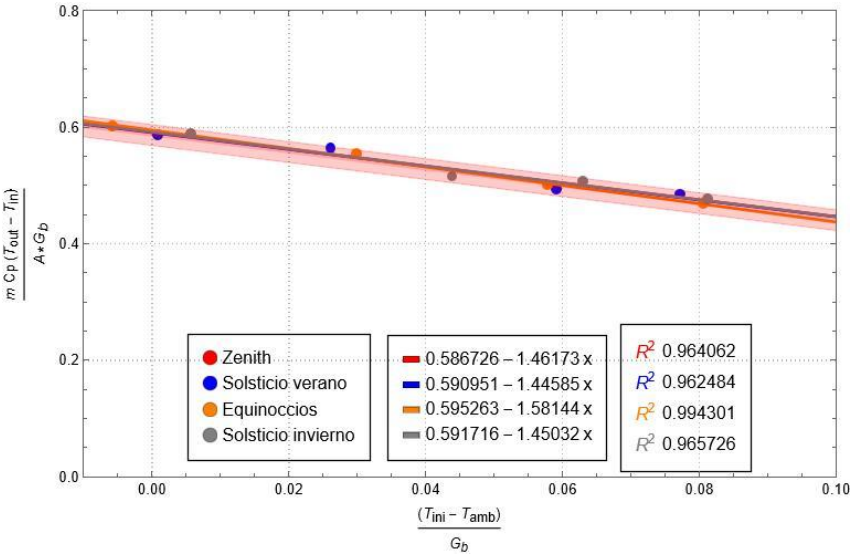


Figura 4: Curva de eficiencia del prototipo CP1250 ajustadas con el polinomio desarrollado con trazado de rayos [2].

Esta metodología desarrollada puede ayudar a la realización de las pruebas de rendimiento térmico, logrando facilitarlas, sin necesidad de contar con un sistema de seguimiento de dos ejes, sin la necesidad de realizar las pruebas en un periodo específico durante el año, y siendo útil

para poder estandarizar y hacer comparables las diferentes curvas de sistemas de canal parabólico realizados por otros autores. Así como ayudar a los desarrolladores de sistemas de calentamiento de este tipo a poder calcular de manera correcta la energía obtenida por estos sistemas en cada época del año.

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL CONJUNTO DE LOS CUATRO CCP

Este tipo de sistemas regularmente se instalan en grandes arreglos o circuitos que permitan conseguir mayores temperaturas, por lo que se buscó armar una primera conexión en serie de cuatro módulos de canal parabólico (CCP). Estos módulos se desarrollaron siguiendo el mismo diseño del sistema ya probado. Al conectar módulos en serie, se busca rescatar parte de la radiación concentrada perdida debido a la declinación solar y ser dirigida hacia el absorbedor del canal parabólico siguiente.

Las pruebas se realizaron los días 23 agosto, 24 agosto, 26 agosto y 2 septiembre de 2024, a las temperaturas del agua a la entrada de 30°C, 45°C, 65°C y 80°C, respectivamente. Las condiciones de la prueba se mantuvieron constantes para cumplir con lo estipulado en la norma, caudal másico de 2.5 kg/s, temperatura de entrada constantes, radiación global mayor a 800 W/m^2 y la componente difusa menor a 20 %. De acuerdo a la norma, se obtuvieron 4 puntos de cada temperatura de entrada donde cada punto es el promedio de un lapso de tiempo representativo, es decir, de 15 minutos en condición cuasiestacionaria. A continuación, se presenta en la Figura 5 el arreglo de cuatro CCP acoplados al sistema de caracterización térmica, así como un esquema del arreglo experimental.

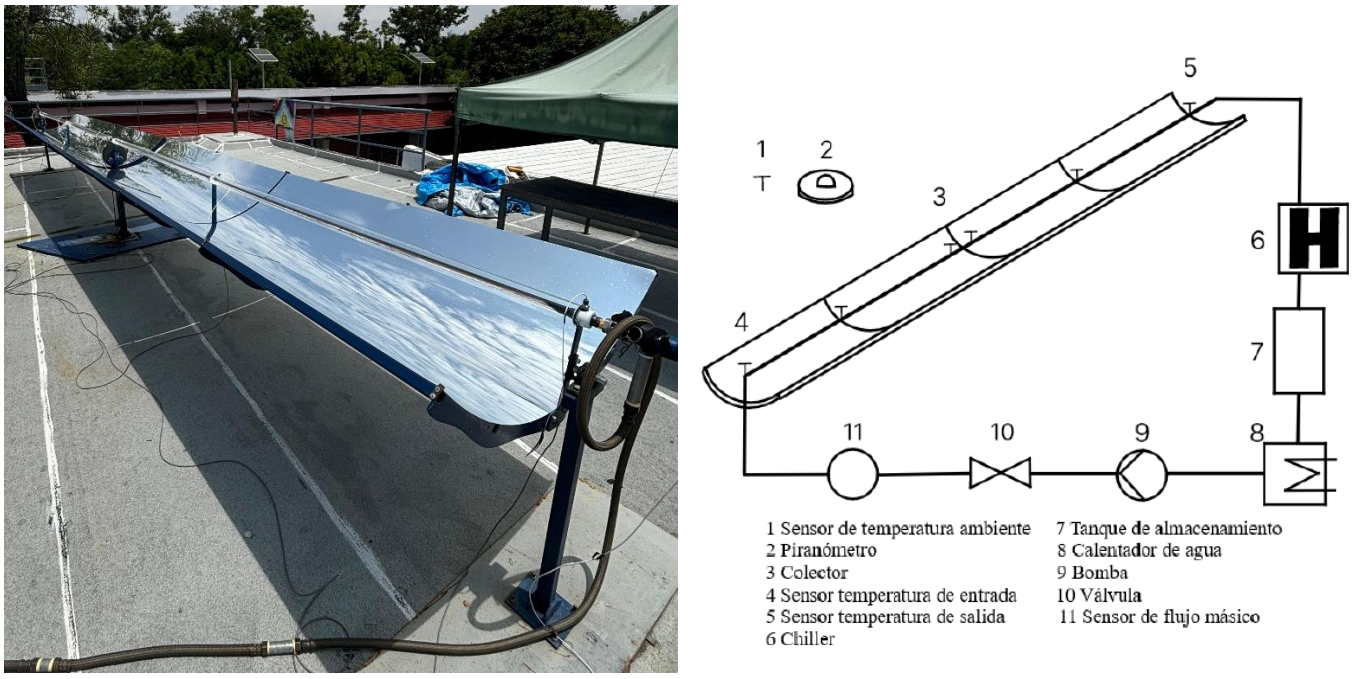


Figura 5: Arreglo de cuatro CCP conectados en serie y acoplados al banco de caracterización LAPECA, así como el arreglo experimental.

De igual manera, se realizaron las pruebas de rendimiento térmico para todo este banco de cuatro canales, se hizo la adquisición de datos con dos diferentes sistemas, obteniéndose la Figura 6.

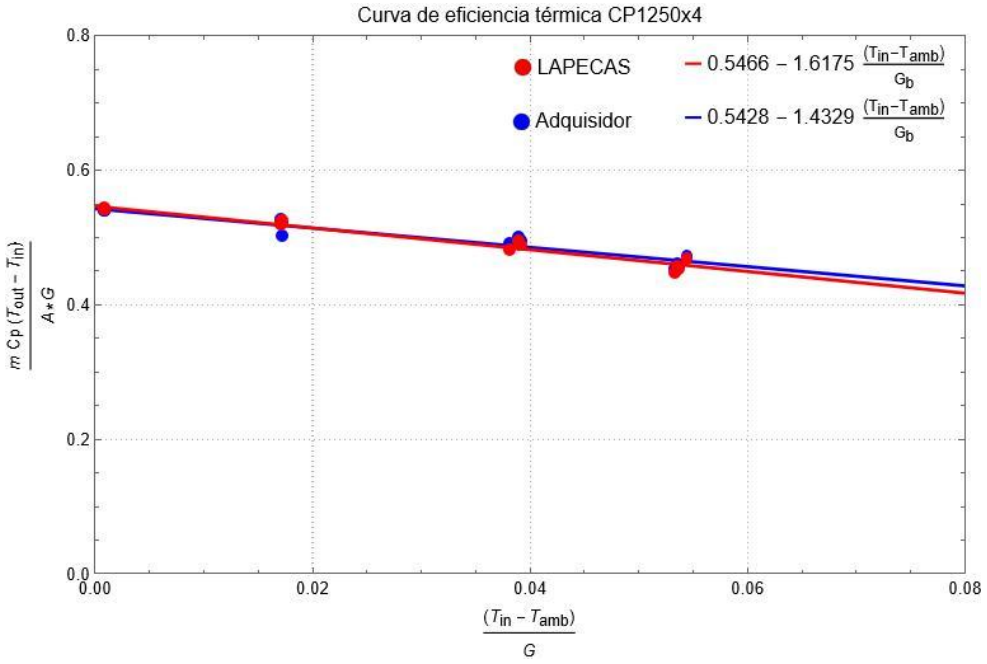


Figura 6: Curva de eficiencia térmica de 4 CP1250 en serie.

Las pruebas se realizaron en el periodo cercano a el equinoccio de otoño, es decir, cercano al 21 de septiembre, por lo que pudimos comparar con la curva obtenida para el mismo periodo de un solo módulo de canal parabólico, marcada como equinoccios en la Figura 7.

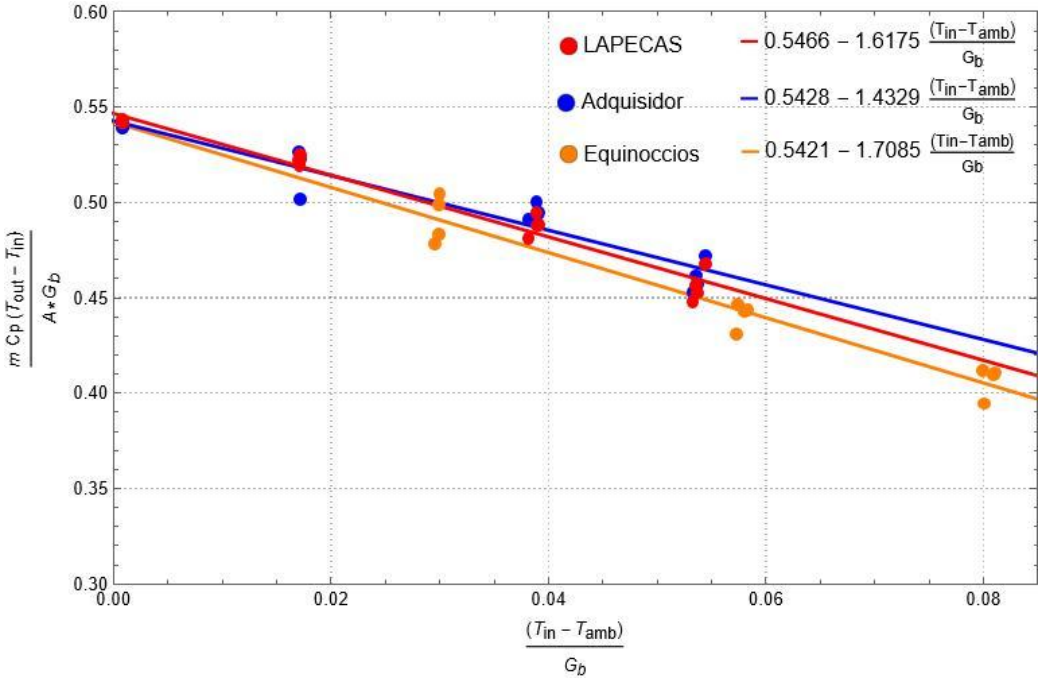


Figura 7: Comparativo de las curvas de eficiencia térmica de 4 CP1250 con la curva de eficiencia del prototipo CP1250 en el equinoccio de otoño.

Con esto logramos ver que la eficiencia del sistema se mantiene pero que se reducen las pérdidas térmicas del sistema, dando así la posibilidad de poder seguir conectando algunos canales parabólicos más en serie que ayuden a conseguir mayores temperaturas con buenas eficiencias.

CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó una metodología para obtener curvas instantáneas de rendimiento térmico en un sistema solar de canal parabólico, combinando datos experimentales y un modelo de trazado de rayos. Esta metodología permite evaluar el sistema en cualquier época del año, incluso sin seguidor de dos ejes.

Los resultados muestran que para el prototipo CP1250, la pérdida máxima en la longitud útil del absorbedor fue de 0.25 m (12.5 %), con una caída de potencia del 8 % para variaciones menores a 15° y de hasta 45 % en el solsticio de invierno (48°), lo que implicó una reducción del 22 % en la eficiencia térmica.

La metodología, además, posibilita generar familias de curvas de rendimiento para distintas estaciones o días del año, constituyendo una alternativa útil para la caracterización de sistemas solares de concentración y el correcto dimensionamiento de los mismos, siempre que se consideren las tolerancias normativas y las propiedades técnicas de los materiales y componentes empleados.

Para el arreglo en serie de cuatro CP1250, se evaluó la curva de eficiencia con cuatro puntos con dos sistemas de adquisición de datos, obteniendo resultados similares, por otra parte, se realizó la comparativa de estas curvas de eficiencia con la del equinoccio de otoño de un solo concentrador, debido a que las fechas eran muy similares, encontrando eficiencias por arriba de 54%

REFERENCIAS

[1] International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Power Generation Costs, 2016. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf

[2] V.K. Jebasingh, G.M.J. Herbert, “A review of solar parabolic trough collector”, Renew. Sustain. Energy Rev., 54 (2016), pp. 1085-1091, 10.1016/j.rser.2015.10.043

[3] Aránzazu Fernández-García, Loreto Valenzuela, Eduardo Zarza, Esther Rojas, Manuel Pérez, Quetzalcoatl Hernández Escobedo, Francisco Manzano-Agugliaro, 2018, Parabolic-trough solar collectors: Development of a test loop and evaluation of testing conditions, Energy, Volume 152, Pages 401-415, ISSN 0360-5442, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.160

[4] Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods, ISO 9806:2017, 2017. https://www.iso.org/standard/67978.html
.
[5] NORMEX, NMX-ES-001, 2018. https://normex.com.mx/producto/nmx-es-001-normex-2018/
.
[6] ASTM, Standard Test Method for Determining Thermal Performance of Tracking Concentrating Solar Collectors, vol. 12, no. Reapproved. 2001, doi: E0905-87R21.2.

[7] Manterola-Villanueva Gustavo and Pérez-Rábago Carlos Alberto and Gómez-Espinoza Víctor Hugo and García-Valladares Octavio, (2023), Methodology for obtaining instantaneous thermal performance curves for a parabolic trough solar by experimental data and projections based on a ray tracing model, Solar Energy, 262, 0038-092X, https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111827

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

PREDISEÑO DE UN BANCO EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DE DIFERENCIAS DE TEMPERATURA AZIMUTALES

Roger Cundapí, Sara L. Moya, Lázaro Rodríguez
Departamento de Ingeniería Mecánica, TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Calle, Cuernavaca, Morelos, 62490, México,Teléfono: N/A,
roger.cap@cenidet.tecnm.mx.

RESUMEN

Las plantas termosolares de generación de energía eléctrica, mediante concentradores solares cilindroparabólicos, tienen un gran potencial para abastecer la demanda energética de una región sin afectar al medio ambiente. Sin embargo, el flujo de calor que recibe el tubo absorbedor no es uniforme en su dirección perimetral. Lo anterior ocasiona diferencias de temperatura en dicha dirección, provocando deformaciones del tubo absorbedor que pueden derivar en fallas técnicas y pérdidas económicas. La modelación matemática ayuda a predecir el comportamiento de la temperatura en la pared del absorbedor, la cual depende principalmente del coeficiente de transferencia de calor del fluido circulante en la tubería y de la distribución del flujo de calor sobre la misma. Las correlaciones existentes para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor mayormente fueron obtenidas con flujo de calor uniforme, lo que hace que las diferencias de temperatura del absorbedor estén mayormente subestimadas. El objetivo de este trabajo es plantear la metodología empleada antes de realizar los experimentos para evaluar la obtención de los coeficientes de transferencia de calor con diferentes correlaciones y establecer cuál es la que menos es afectada por la distribución no uniforme del flujo de calor. Para resolver el modelo termohidráulico se empleó el software RELAP5 para después tratarse junto con el software EES y obtener los coeficientes de transferencia de calor por convección con las correlaciones de Gnielinski y Dittus-Boelter. Se encontró que las máximas diferencias de temperatura en la dirección azimutal son independientes de la presión de operación. Sin embargo, con la correlación de Gnielinski se obtuvieron desviaciones hasta 12 % debajo de los resultados de las máximas diferencias de temperatura en la dirección azimutal obtenidas con RELAP5. Es necesario validar, con datos experimentales, bajo qué condiciones estas correlaciones pueden ser aplicadas en la generación directa de vapor.

ABSTRACT

Solar thermal power plants for generating electricity using parabolic trough solar concentrators have great potential to meet a region's energy demand without affecting the environment. However, the heat flux received by the absorber tube is not uniform along its perimeter. This causes temperature differences in this direction, resulting in deformations of the absorber tube that can lead to technical failures and economic losses. Mathematical modeling helps predict the temperature behavior at the absorber wall, which depends primarily on the convective heat transfer coefficient of the fluid flowing in the tube and the heat flux distribution over it. Current correlations for calculating heat transfer coefficients were obtained with uniform heat flux, which means that temperature differences in the absorber are largely underestimated. The objective of this work is to present the methodology used before conducting experiments to evaluate the heat transfer coefficients obtained with different correlations and to determine which one is least affected by the non-uniform distribution of heat flux. The thermohydraulic model was solved using RELAP5 software, which was then combined with EES software to obtain the convection heat transfer coefficients using the Gnielinski and Dittus-Boelter correlations. It was found that the maximum temperature differences in the azimuthal direction are independent of the operating pressure. However, the Gnielinski correlation obtained deviations of up to 12% below the maximum temperature differences in the azimuthal direction obtained with RELAP5. It is necessary to validate, with experimental data, under what conditions these correlations can be applied in direct steam generation.

Palabras claves: Flujo de calor no uniforme, generación directa de vapor, Dittus-Boelter, Gnielinski, RELAP5.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día el uso de energías provenientes de fuentes alternas es más que una moda, es una necesidad para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero causados por la quema de combustibles fósiles. Entre las energías renovables está la energía solar.

Una de las tecnologías más maduras para el aprovechamiento de energía solar para el calentamiento de agua es la generación directa de vapor (GDV) mediante captadores solares cilindroparabólico (CCP). Los CCP concentran los rayos del sol en un tubo absorbedor colocado en su eje focal. Sin embargo, el flujo de calor que recibe no es uniforme en la dirección azimutal, lo que conlleva a una distribución de temperatura no uniforme en el absorbedor, dando lugar a dilataciones no homogéneas en el absorbedor, lo que llega a causar fallos en el sistema. Los fallos pueden deberse a deformaciones permanentes del absorbedor ocasionando el desalineamiento del eje focal y disminuyendo la eficiencia óptica. También el tubo flexionado podría romper la cubierta de vidrio, derivando en pérdidas económicas.

Para el diseño adecuado de los CCP, el análisis termohidráulico es fundamental, ya que el fluido se encarga de refrigerar al absorbedor aprovechando su energía térmica para diferentes propósitos. Pero la distribución no uniforme del flujo de calor (DNUFC) hace que ese calor se transfiera al fluido de una manera que no es igual a un tubo con flujo de calor uniforme, dando lugar a incertidumbres y que los modelos que se utilizan subestimen o sobreestimen las diferencias de temperatura azimutales en el absorbedor. De hecho, como lo han mencionado Sandá et al. (2021, 2023), las correlaciones actuales de coeficientes de transferencia de calor por convección (CTC) usadas para flujo monofásico con tuberías calentadas uniformemente, no son capaces de predecirlos sin un gran margen de incertidumbre. De hecho, anteriormente Moya et al. (2011) ya había analizado cómo la concentración del flujo de calor en la dirección circunferencial afecta

a los CTC (locales del fluido y globales) y por ende a las diferencias de temperatura del tubo absorbedor en la dirección azimutal. Por su parte, Valenzuela et al. (2016) también analizaron cómo diferentes distribuciones de flujo de calor impactan directamente a los parámetros termohidráulicos del fluido de trabajo dentro de un CCP. Sin embargo, no evaluaron el efecto que la distribución no uniforme tiene sobre los CTC, los gradientes de temperatura ni analizaron diferentes correlaciones del CTC para compararlas entre sí.

Algunos estudios experimentales o teórico-experimentales han sido realizado por Krüger et al. (2015), Dirker et al. (2018, 2022) y Ebolese et al. (2023), pero no evaluaron diferentes correlaciones de CTC ni el impacto que la DNUFC tiene sobre dichas correlaciones.

El objetivo de este trabajo es plantear la metodología empleada antes de realizar los experimentos para evaluar la obtención de los CTC con diferentes correlaciones y establecer cuál es la que menos es afectada por la DNUFC bajo las condiciones de operación del lazo de pruebas del sistema DISS ubicado en la Plataforma Solar de Almería, España.

MODELO FÍSICO

En la Figura *1*a se presenta un esquema de un solo CCP del lazo de pruebas del sistema DISS. Dicho sistema es el que se pretende replicar en condiciones de laboratorio, principalmente para controlar la potencia térmica suministrada al tubo absorbedor y obtener condiciones cuasi-estacionarias que permitan estudiar diferentes aspectos del fenómeno de la transferencia de calor en el tubo absorbedor y el fluido de trabajo sin considerar la cubierta de vidrio. Lo anterior, se logra sustituyendo la fuente de energía solar concentrada por 6 resistencias eléctricas, cada una con 1 m de longitud y ¼ de pulgada de diámetro (Figura 1b). Por la complejidad del fenómeno, este artículo se limita a abordar las cuestiones teóricas, dejando el planteamiento para futuros trabajos, extensiones de este mismo, entre ellos el experimental.

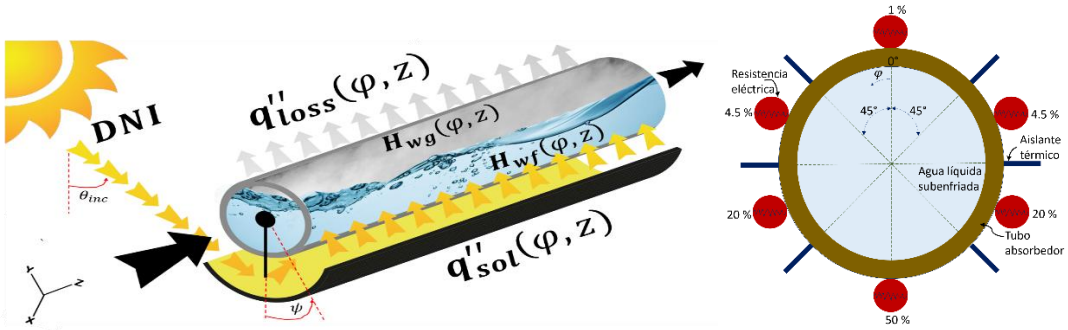


Figura 1. Modelo físico: a) CCP tomado como base para el estudio (tomada de Cundapí et al., 2025); b) Tubo absorbedor sin cubierta de vidrio con la distribución de flujo de calor propuesta usando 6 resistencias eléctricas.

La distribución propuesta está inspirada en el trabajo de Valenzuela et al. (2016), que, entre algunas de las configuraciones de distribución del flujo de calor, la de 6 estructuras de calor (6 proporciones) considera una buena aproximación a un perfil gaussiano reflejado sobre el tubo absorbedor. Además, que su estudio también fue enfocado al lazo de pruebas del sistema DISS. Por otra parte, en la Tabla 1 se presentan los datos del CCP utilizado de referencia para unas condiciones cuasi-estacionarias (Elsafi, 2015). El trabajo previamente mencionado ha sido reproducido en un trabajo anterior (Cundapí et al., 2025), donde se justifican los valores de la Tabla 1, a excepción de la temperatura de entrada, que ese valor se propone para caer en la región de líquido monofásico, ya que si usa el valor de referencia se caería en la zona bifásica y por el momento esa zona está fuera del alcance de este proyecto. Otro cambio es la longitud de la tubería, se considera 1 m y no 25 m como en el trabajo de Cundapí et al. (2025). También en cuanto a la presión, además de solo considerar 10 MPa, se consideran 1, 3 y 6 MPa, para hacer el estudio más completo (Elsafi, 2015; Serrano-Aguilera et al., 2014).

Tabla 1. Datos de diseño del CCP, datos de sitio y operación para un caso planteado a partir del trabajo de Cundapí et al. (2025).

Parámetro	Valor
Longitud del CCP (m)	1
Ancho de apertura (m)	5.76
Diámetro interno/externo del absorbedor metálico (m)	0.05/0.07
Radiación solar directa (W/m^2)	908.05
Ángulo de incidencia (°)	14
Modificador del ángulo de incidencia (-)	0.98
Eficiencia térmica (-)	0.9113
Eficiencia óptica pico (-)	0.63
Factor de ensuciamiento (-)	0.99
Presión de salida (MPa)	1, 3, 6 y10
Temperatura de entrada (K)	300
Flujo másico (kg/s)	0.62

Las resistencias eléctricas son tubulares, en un arreglo de 6 resistencias paralelas al tubo metálico distribuidas de la manera que se muestran en la Figura 1b. Además, la conductividad térmica se considera constante, con un valor de 38 W/m-K, ya que ha sido un valor comúnmente utilizado para el sistema DISS (Serrano-Aguilera et al., 2014). En este artículo se omite el diagrama completo del banco de pruebas experimentales por dos razones, la primera es por la limitación del número de páginas para cada artículo y la segunda, todavía no se han obtenido resultados experimentales y este artículo solo se centra en la parte teórica, así que estaría de más agregar este diagrama detallado. Para el diseño del experimento se hacen las siguientes consideraciones para el caso base: Tubería completamente horizontal con sección transversal constante, tubería de acero ferrítico con conductividad térmica independiente de la temperatura, el fluido de trabajo es agua líquida subenfriada e incompresible, flujo desarrollado y no se considera la cubierta de vidrio, aunque sí su efecto

MODELO MATEMÁTICO

Para el diseño de banco experimental se requiere analizar diferentes fenómenos presentes en el sistema. Primeramente, se requiere determinar una potencia eléctrica equivalente para un pequeño CCP, por ejemplo, condiciones casi equivalentes que las que usaron Elsafi, (2015), y luego adecuarlo a una escala más pequeña de 1 m de longitud.

Modelo de conducción de calor

Para la determinación de la distribución de la temperatura en el tubo absorbedor, se emplea la Ec. (1), que es la ecuación de conducción de calor en estado transitorio (Cundapí et al., 2021) debido a su acoplamiento al modelo termohidráulico del flujo de fluido. Aunque los resultados que son de interés son los del estado estacionario.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial^2 \varphi}=\frac{\rho_a C_{P_a}}{k_a}\frac{\partial T}{\partial r} \tag{1}$$

Donde T, ρ_a, C_{P_a} y k_a son la temperatura, densidad, calor específico a presión constante y conductividad térmica del absorbedor, respectivamente. Mientras que r, φ y t son las coordenadas radial, azimutal y temporal, respectivamente. Por otra parte, la Ec. (1) está sujeta a las condiciones de frontera de segunda y tercera clase, para las paredes externas e internas, respectivamente.

Determinación del flujo de calor

El flujo de calor incidente sobre el tubo absorbedor toma en cuenta las características geométricas del CCP, características técnicas del CCP y datos de sitio. La Ec. (2) determina la magnitud total del flujo de calor del sol ($\dot{Q}_{power}$) que incide sobre la tubería de un CCP después de ser concentrada por el espejo reflector y habiendo tomado en cuenta las pérdidas de calor por los efectos térmicos y ópticos.

$$\dot{Q}_{power}=DNI\cdot\cos\theta\cdot K(\theta)\cdot\eta_t\cdot\eta_{opt,0^\circ}\cdot A_p\cdot L \tag{2}$$

Donde DNI es la radiación solar directa, θ es el ángulo de incidencia, $K(\theta)$ es el modificador del ángulo de incidencia, η_t es la eficiencia térmica, $\eta_{opt,0^\circ}$ es la eficiencia óptica pico, A_p es el ancho de apertura de la parábola y L es la longitud del CCP.

Ecuaciones de conservación del fluido de trabajo

Para analizar cómo el fujo de calor influye en los coeficientes de transferencia de calor del fluido, debe evaluarse diferentes correlaciones del mismo y a su vez resolver las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía del fluido, dadas por las Ecs. (3), (4) y (5), respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f)+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial z}(\rho_f v_f A)=0 \tag{3}$$

$$\rho_f A\frac{\partial v_f}{\partial t}+\frac{1}{2}\rho_f A\frac{\partial v_f^2}{\partial z}=-A\frac{\partial p}{\partial z}+\rho_f g_z A-(\rho_f A)FW_f(v_f) \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f U_f)+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial z}(\rho_f U_f v_f A)=-\frac{P}{A}\frac{\partial}{\partial z}(v_f A)+Q_{wf}+\Phi_f \tag{5}$$

Donde todas las variables termohidráulicas están especificadas la fase líquida con el subíndice f. Dicho lo anterior, ρ_f es la densidad, v_f es la velocidad, A es el área transversal de la tubería, p es la presión, g_z es la componente z de la gravedad, t es el tiempo, FW es la fricción en la pared, U_f.es la energía interna específica, Q_{wf} es el flujo de calor volumétrico debido a la pared y Φ_f es la disipación de energía.

SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para resolver el modelo matemático en cuestión, las Ecs. (3)-(5). Deben ser discretizadas por el método de elemento finito, habiendo tomado en cuenta las condiciones de frontera e iniciales, las propiedades de la tubería y del fluido. Para la obtención de los resultados, se puede optar por dos opciones, la primera es desarrollar un código numérico. La otra opción es emplear el software RELAP5. Por practicidad y porque el software RELAP5 ha sido validado y verificado por diferentes autores bajo las condiciones de este trabajo, se opta por este

software.

RELAP5, aunque es un software generalizado para resolver el flujo bifásico agua/vapor, puede también resolver el modelo monofásico aplicando ciertas consideraciones, como estables condiciones de flujo monofásico. De hecho, las Ecs. (3)-(5) no son propias de RELAP5, pero estas mismas ecuaciones surgen del modelo general de RELAP5 (conocimiento obtenido de la experiencia del manejo de este software). Su modelo matemático a dos fluidos es resuelto mediante el método de diferencias finitas en el esquema semi-implícito en el tiempo. Adicionalmente, se toman en cuenta las tablas agua/vapor que maneja el software EES.

Con el software RELAP5 se pueden obtener el perfil axial de la temperatura, velocidad y presión, CTC del fluido, como las variables de interés de este estudio. Así como la temperatura de la pared en contado con el fluido, en cada estructura de calor considerada. Dicho sea de paso, RELPA5 usa la correlación de Dittus-Boelter para el cálculo del CTC del flujo monofásico.

Para implementar la distribución de flujo de calor presentada en la Figura 2b, se utiliza una técnica implementada por Moya et al. (2011). Donde se establecen 6 estructuras de calor (término de un componente usado por RELAP que vincula el flujo de calor sobre el tubo y el fluido de trabajo) variando la potencia suministrada por cada una de ellas y un área superficial proporcional a las áreas ocupadas por cada resistencia. Los resultados obtenidos con RELAP5 son extraídos en un archivo Excel y junto con el Software EES se obtienen los parámetros (propiedades del fluido de trabajo) para obtener los CTC con dos correlaciones diferentes, para posteriormente determinar las diferencias de temperatura en dirección azimutal. En la Figura 2 se incluye la metodología propuesta para este estudio.



Figura 2. Metodología resumida para la obtención del $\Delta T_{máx}$ en la dirección azimutal del tubo absorbedor.

RESULTADOS

Primeramente, se calcula el flujo de calor en 1 m de longitud (debido a la infraestructura que se cuenta para realizar el experimento), lo que equivale a 2828.23 W. La cual puede ser suplida con 3 resistencias eléctricas con 1000 W de potencia nominal cada una. Sin embargo, se usan 6 resistencias eléctricas, ya que no se usan al 100 % cada resistencia, sino en cierta proporción como se muestra en la Figura *1*b. Donde se toma como 100% a los 2828.23 W. Cabe destacar que para la resistencia #4, que es la que está justo en la parte inferior del tubo, se emplea una resistencia de 1500 W de potencia nominal.

Como ya se ha presentado en la Tabla 1, se consideran 4 casos de presión de operación, los cuales son 1, 3, 6 y 10 MPa. Particularmente, 3, 6 y 10 MPa son condiciones de operación muy comunes para el sistema DISS. La otra presión considerada (1 MPa), es debido a que es más fácil alcanzarla con la infraestructura que se cuenta. Por otra parte, se consideran 20 volúmenes de control en la dirección axial y 5 volúmenes de control en la dirección radial, ambas de manera uniforme.

Análisis del impacto de la presión sobre los parámetros termohidráulicos

Para medir el impacto de la presión de operación sobre el fluido dentro de una tubería sometida a calentamiento no uniforme (Figura *1*b), se consideran de interés la caída de presión, el incremento de la temperatura del fluido (ΔT_f) desde la entrada hasta la salida y el gradiente de temperatura máximo (entre cada volumen de control) en la dirección azimutal ($\Delta T_{máx}$). Tales parámetros se resumen en la Tabla 2. Donde se aprecia que la caída de presión en general es de 30 Pa. Para el caso particular de 10 MPa, debido a la precisión en dígitos significativos de los resultados, no fue posible obtenerse, pero es de esperar que sea menor a 30 Pa, como reporta la literatura, que a mayor presión las caídas de presión son menores (Cundapí et al., 2017; Lobón & Valenzuela, 2013). Como se nota, la caída de presión es poca, prácticamente despreciable, debido a que se tiene solo 1 m de tubería y el estudio se lleva a cabo en la región de líquido monofásico. En cuanto al incremento de la temperatura del fluido (ΔT_f), se obtuvo a lo mucho 1.13 K en ese metro de longitud, lo cual está dentro del incremento de temperatura 1 K/m que comúnmente se ve en el sistema DISS en las regiones monofásicas (Serrano-Aguilera et al., 2014). Por otra parte, tampoco la máxima diferencia de temperatura azimutal en toda la tubería es impactada por la presión de operación. Cabe destacar que esta diferencia de temperatura depende del CTC, que a su vez depende de varios parámetros termohidráulicos, así como propiedades del fluido, que, al ser un fluido incompresible, sus propiedades no varían tanto con la presión, aunque sí con la temperatura, pero dicha temperatura del fluido apenas varía en 1 K, aproximadamente desde la entrada a la salida. De hecho, el caso de 10 MPa solo incrementa 0.3 % el $\Delta T_{máx}$ con respecto a una presión de operación de 1 MPa.

Tabla 2. Impacto de la presión sobre los principales parámetros termohidráulicos.

P (MPa)	ΔP (Pa)	ΔT_f (K)	$\Delta T_{máx}$ (K)
1	30	1.12	23.91
3	30	1.12	23.92
6	30	1.12	23.94
10	-	1.13	23.96

Respecto a la distribución de temperatura en la dirección azimutal justo a la entrada de la tubería (comportamiento similar a lo largo de toda la tubería), se ve que la presión de operación tampoco tiene impacto sobre sus valores (ver Figura 3). Cabe aclarar que estos valores son obtenidos en la simulación, solo que se presentan como datos discretos porque en el simulador RELAP5 asigna un valor de temperatura a la pared interna de cada estructura de calor, que fueron 6, ya que se considera una para cada resistencia eléctrica. El valor de temperatura que se muestra, está ubicado en el centro (en dirección azimutal) de cada estructura de calor. Debido al diseño de la simulación, se puede observar cómo hay consistencia en obtener simetría en las temperaturas con respecto al eje vertical de la sección transversal de la tubería.

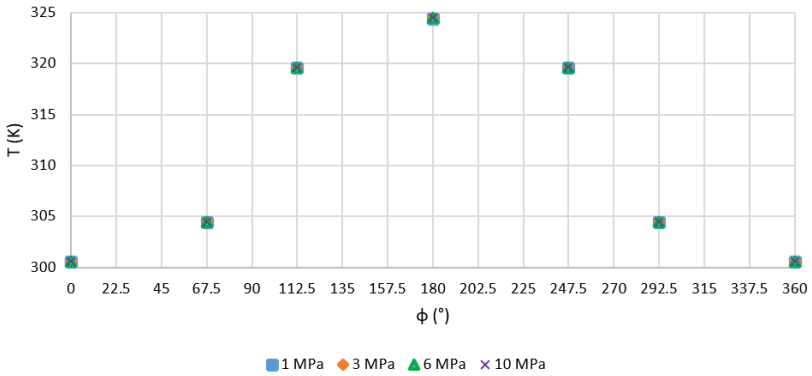


Figura 3. Impacto de la presión sobre la distribución de temperatura en la dirección azimutal a la entrada de la tubería.

Impacto de la distribución no uniforme sobre los CTC

De los resultados obtenidos con RELAP5 y con el uso del software EES, se obtuvieron las propiedades necesarias para obtener los valores de los CTC con dos correlaciones diferentes, la de Gnielinski y de Dittus-Boelter. Nuevamente la presión no afecta los resultados.

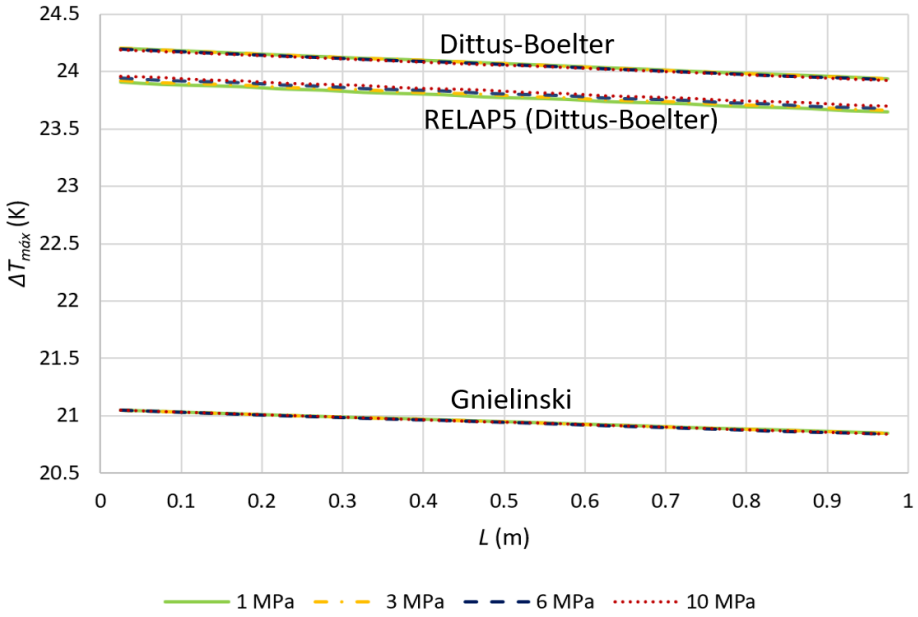


Figura 4. Perfiles axiales de las máximas diferencias de temperatura en dirección azimutal.

Las máximas diferencias de temperatura en la dirección azimutal de cada volumen de control axial obtenidas usando la correlación de Dittus-Boelter y Gnielinski dan como máximo, respectivamente, 1.3% y 12% arriba de los obtenidos con RELAP5. Porcentualmente, este último valor es grande, aunque numéricamente representaría cerca de 2 K de temperatura. Es importante mencionar que RELAP5 utiliza la correlación de Dittus-Boelter para el cálculo de los CTC para las regiones monofásicas del agua. Pero aún así, se obtuvieron ligeramente mayores valores con esta metodología empleada que con el software RELAP (Figura 4).

Una de las diferencias entre las correlaciones de Gnielinski y Dittus-Boelter es que la primera tiene algunos parámetros que involucran las propiedades del fluido a la temperatura de la pared de la tubería, mientras que la de Dittus-Boelter no. Lo que puede resultar en que la

correlación de Gnielinski puede ser más general que la de Dittus-Boelter. Por otra parte, la correlación de Dittus-Boelter tiene un límite de validez bajo, máximo 10,000 de Reynolds. Así que, si RELAP5 utiliza esta correlación para el CTC, debería utilizar alguna modificación para su aplicación a valores superiores de Reynolds, que para este estudio es cerca de 18,000. Se aprecia que la presión de operación para el rango manejado, tiene un impacto despreciable sobre las máximas diferencias de temperatura en la dirección azimutal.

Se espera probar otras correlaciones para la obtención del CTC, pero de este estudio se aprecia que la metodología planteada en la Figura 2 es válida. Por otra parte, como otro trabajo futuro, se quiere implementar, estas correlaciones para el cálculo del CTC, en un simulador propio. Además, se pretende comparar con el trabajo experimental a desarrollar, para evaluar la validez de dichas correlaciones en condiciones de operación de una planta de GDV. Otro ajuste que se va a implementar es utilizar otro material para la tubería, por ejemplo, cobre, ya que al tener aproximadamente 10 veces una mayor conductividad térmica al del acero ferrítico considerado en este estudio, se tendría una menor deformación, lo cual ayudaría a evitar problemas técnicos en la configuración de la tubería rodeada por las resistencias eléctricas.

CONCLUSIONES

Al momento se ha utilizado el software RELAP5 para prediseñar el sistema a construir, obteniendo resultados consistentes con la literatura. Particularmente se encontró que la presión de operación desde 1 a 10 MPa no tiene impacto sobre los resultados termohidráulicos del agua líquida que fluye por una tubería de 1 m de longitud y 5 cm de diámetro interno, con calentamiento no uniforme sobre la pared externa.

Por otra parte, las máximas diferencias de temperatura en la dirección azimutal son independiente de la presión de operación, ya que, aumentar desde 1 MPa hasta 10 MPa, solo impacta en 0.3 %. Lo interesante será, comparar estos resultados con los datos experimentales.

De las dos correlaciones probadas para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección, sus valores no son afectados por la presión. Se encontró que la correlación de Dittus-Boelter predice mayores máximas diferencias de temperatura en la dirección azimutal de cada volumen de control axial, que las obtenidas empleando la de Gnielinski. Es probable que la correlación de Gnielinski puede ser más general que la de Dittus-Boelter para emplearse a tuberías calentadas de manera no uniforme en la dirección azimutal. A pesar del límite para números de Reynolds menores a 10,000 de la correlación de Dittus-Boelter, en este estudió se vio que puede ser aplicado también a números de Reynolds de 18,000.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al TecNM por el financiamiento para el proyecto con número 22669.25-P aprobado en el marco de la convocatoria 2025. Particularmente, el primer autor también agradece a la SECIHTI por el apoyo para la realización de la estancia posdoctoral en la convocatoria 2024(Renovación).

REFERENCIAS

Cundapí, R., Moya, S. L., & Cazarez, O. (2021). Analytical Solution of the Transient Heat Conduction in the Absorber Tube of a Parabolic Trough Solar Collector Under Quasi-Steady Conditions. Journal of Solar Energy Engineering, 143(3), 1–43.

Cundapí, R., Moya, S. L., Cazarez, O., & Sandá, A. (2025). Azimuthal temperature differences in the dryout zone of an absorber tube for direct steam generation. Applied Thermal Engineering, 267, 125626.

Cundapí, R., Moya, S. L., & Valenzuela, L. (2017). Approaches to modelling a solar field for direct generation of industrial steam. Renewable Energy, 103, 666–681

Dirker, J., Meyer, J. P., & Reid, W. J. (2018). Experimental investigation of circumferentially non-uniform heat flux on the heat transfer coefficient in a smooth horizontal tube with buoyancy driven secondary flow. Experimental Thermal and Fluid Science, 98(June), 480–496.

Dirker, J., Scheepers, H., & Meyer, J. P. (2022). The effect of circumferentially non-uniform heat flux on flow boiling heat transfer in a horizontal tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 185, 122428.

Ebolese, A., Marano, D., Copeta, C., Bruno, A., & Sabatelli, V. (2023). Numerical Modeling and Experimental Validation of Heat Transfer Characteristics in Small PTCs with Nonevacuated Receivers. Solar, 3(4), 544–565.

Elsafi, A. M. (2015). On thermo-hydraulic modeling of direct steam generation. Solar Energy, 120, 636–650.

Lobón, D. H., & Valenzuela, L. (2013). Impact of pressure losses in small-sized parabolic-trough collectors for direct steam generation. Energy, 61, 502–512.

Moya, S. L., Valenzuela, L., & Zarza, E. (2011). Numerical study of the thermal-hydraulic behavior of water-steam flow in the absorber tube of the DISS system using RELAP. 17th SolarPACES Conference, 8pp.

Sandá, A., Moya, S. L., Valenzuela, L., & Cundapí, R. (2021). Three-dimensional thermal modelling and heat transfer analysis in the heat collector element of parabolic-trough solar collectors. Applied Thermal Engineering, 189, 1–59.

Sandá, A., Moya, S. L., Valenzuela, L., & Cundapí, R. (2023). Coupling of 3D thermal with 1D thermohydraulic model for single-phase flows of direct steam generation in parabolic-trough solar collectors. Applied Thermal Engineering, 22(7), 120614.

Serrano-Aguilera, J. J., Valenzuela, L., & Parras, L. (2014). Thermal 3D model for direct solar steam generation under superheated conditions. Applied Energy, 132, 370–382.

Valenzuela, L., Saynes, J., & Moya, S. L. (2016). Análisis termo-hidráulico de captadores solares cilindroparabólicos para generación directa de vapor con RELAP5. Tecnología y Ciencias Del Agua, VII, 75–91.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

MODELACIÓN DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA DE TORRE CENTRAL BAJO DIFERENTES MODOS DE OPERACIÓN EN MÉXICO

Enrique A. Garrido Fayad e Iván Salgado Tránsito*
SECIHTY - Centro de Investigaciones en Óptica A.C. Prol. Constitución 607. Reserva de Loma Bonita. CP. 20200. Aguascalientes, Ags. **isalgadotr@cio.mx**

RESUMEN

Este estudio evalúa la viabilidad técnica y económica de sistemas de torre central con almacenamiento en sales fundidas en México, mediante un análisis paramétrico desarrollado con el software *System Advisor Model* (SAM, versión 2024) bajo el esquema *Power Tower Molten Salt – PPA: Single Owner*. Se seleccionaron tres emplazamientos representativos: Gómez Palacio (Durango), Hermosillo (Sonora) y La Paz (Baja California Sur), considerando perfiles de irradiancia solar directa (DNI), disponibilidad de terreno y conexión a nodos del Sistema Eléctrico Nacional. El rango de simulación abarcó múltiplos solares de 1.0 a 4.0 y almacenamiento térmico de 4 a 20 horas, evaluando indicadores clave como el costo nivelado de la energía (LCOE), el factor de planta (FP), la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN). Los resultados muestran que el modo base de operación (0:00–24:00 h) es el más competitivo en los tres sitios, con La Paz destacando por su mayor estabilidad técnica-económica LCOE de $11.48 ¢/kWh y VPN de $430 Mill. USD, Hermosillo con LCOE de $8.7 ¢/kWh, pero con VPN negativo debido a los bajos precios de la energía en la región y Durango con un LCOE de $9.15 ¢/kWh, pero también con VPN negativo. En una segunda etapa, al modificar el punto de diseño con un DNI de 850 W/m², se observó una ligera mejora en el rendimiento de las tres ubicaciones. Estos hallazgos evidencian que la factibilidad de proyectos CSP en México depende no solo de la irradiancia disponible, sino también de las condiciones del mercado eléctrico local a través del precio marginal local (PML) y del régimen operativo seleccionado.

ABSTRACT

This study evaluates the technical and economic feasibility of central tower systems with molten salt storage (CSP-TES) in Mexico, using a parametric analysis developed in the System Advisor Model (SAM, version 2024) software under the Power Tower Molten Salt – PPA: Single Owner scheme. Three representative sites were selected: Gómez Palacio (Durango), Hermosillo (Sonora), and La Paz (Baja California Sur), considering solar irradiance profiles, land availability, and connection to National Electric System nodes. The simulation range covered solar multiples from 1.0 to 4.0 and thermal storage from 4 to 20 hours, evaluating key indicators such as levelized cost of energy (LCOE), plant factor (PF), internal rate of return (IRR), and net present value (NPV). The results show that the base mode of operation (0:00–24:00 h) is the most competitive at all three sites, with La Paz standing out for its greater technical-economic stability with an LCOE of $11.48¢/kWh and a NPV of $430 million USD, Hermosillo with an LCOE of $8.7¢/kWh but a negative NPV due to low energy prices in the region, and Durango with an LCOE of $9.15¢/kWh but also a negative NPV. kWh but with a negative NPV due to low energy prices in the region, and Durango with an LCOE of $9.15¢/kWh but also a negative NPV. In a second stage, when modifying the design point with a DNI of 850 W/m², a slight improvement was observed in the performance of the three locations. These findings show that the feasibility of CSP projects in Mexico depends on available irradiance, electricity market signals (PML), and the selected operating regime.

Palabras claves:
Energía solar de concentración, almacenamiento térmico en sales fundidas, torre solar, receptor central, System Advisor Model.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de tecnologías de concentración solar de torre central con almacenamiento térmico en sales fundidas representa una alternativa viable para diversificar la matriz de generación eléctrica [Mehos et al., 2017], particularmente en regiones con alta disponibilidad de irradiancia solar directa [Thirumalai, 2014] [Vant-Hull, 2012]. La evaluación de su factibilidad requiere de análisis paramétricos que consideren tanto los aspectos técnicos como las condiciones económicas y de mercado eléctrico en los distintos sistemas interconectados del país [Elfeky y Wang, 2023]. El desempeño tecno-económico de una planta es variable en función de condiciones meteorológicas como la disponibilidad del recurso solar DNI; variables de diseño como el múltiplo solar, la capacidad del sistema de almacenamiento térmico, el punto de diseño de la DNI; modos de operación y estrategia de despacho, carga base, intermedia y pico; e ingresos por venta de energía en base a los precios PML locales.

Por ello, en este estudio se desarrolló un marco de simulación comparativo basado en el software System Advisor Model (SAM, versión 2024) [NREL,2024][Wagner, 2008] con el objetivo de identificar configuraciones óptimas de operación y determinar indicadores de competitividad económica para tres emplazamientos representativos: Gómez Palacio (Durango), Hermosillo (Sonora) y La Paz (Baja California Sur). La metodología implementada integra variables técnicas de diseño (múltiplo solar, capacidad de almacenamiento térmico, eficiencia de ciclo) [Elfeky & Wang, 2023], condiciones de irradiancia local DNI, y referencias de precios nodales de energía PML, con el fin de obtener métricas clave como el LCOE, el factor de planta, el VPN y la TIR.

METODOLOGÍA

El análisis paramétrico de los sistemas de torre central con sales fundidas se llevó a cabo mediante simulaciones en el software System Advisor Model (SAM, versión 2024), bajo el esquema Power Tower Molten Salt – Power Purchase Agreement (PPA): Single Owner [Boretti et al., 2020][NREL, 2024]. Se seleccionaron tres emplazamientos representativos de México, considerando tanto perfiles de irradiación solar como la disponibilidad de espacio suficiente para la instalación del campo solar en las cercanías de nodos del Sistema Eléctrico Nacional, a fin de utilizarlos como referencia para el cálculo de los precios de venta de energía. Dichos emplazamientos corresponden a: la Central Termoeléctrica Guadalupe Victoria, ubicada en Gómez Palacio, Durango; la Central de Ciclo Combinado Hermosillo, ubicada en Hermosillo, Sonora; y la Central de Combustión Interna Baja California Sur, ubicada en La Paz, BCS. Las coordenadas geográficas específicas de cada emplazamiento son: 25.4895° N, –103.56° O; 29.02567° N, –110.82656° O; y 24.19251° N, –110.24847° O, respectivamente. Estas coordenadas fueron utilizadas para generar los archivos del año meteorológico típico (TMY, por sus siglas en inglés) a partir de la base de datos climática del National Solar Radiation Database (NSRDB) [NREL, 2025][Solargis, 2025].

En todos los casos, se consideraron configuraciones con una capacidad nominal de 70 MWe, heliostatos con dimensiones de 5.8 × 3.5 m y facetas (2.2 × 2.2 m) [Chen et al., 2018], y un receptor externo. El rango de simulación abarcó un múltiplo solar (SM) de 1.0 a 4.0 con incrementos de 0.2 y un almacenamiento térmico (TES) de 4 a 20 horas con incrementos de 1 hora. Se fijaron como condiciones de referencia un campo base de SM = 2.6, TES = 10 horas y punto de diseño de la DNI al 5%.

El bloque de potencia utilizado fue un ciclo Rankine utilizando el modelo por defecto de SAM [Hamilton et al., 2020], con una eficiencia térmica de ciclo de 0.412 y ajustes estandarizados. Para todos los escenarios se consideraron una tasa de inflación promedio de 4.62 % (calculada a partir del INPC de 10 años) y una tasa real de descuento de 6.89 %. El análisis financiero se integró con los precios nodales locales de cada ubicación, para los dos primeros emplazamientos del Sistema Interconectado Mexicano (SIM) y con el del Sistema de Baja California Sur (BCS) para el último, mediante las tablas de Precio Marginal Local (PML) [CENACE, 2025]. Con estos datos se calcularon los factores de escalamiento del PPA (6.37 % para Guadalupe Victoria, 5.22 % para Hermosillo y 5.45 % para Baja California Sur) y precios iniciales de PPA de 0.06563, 0.05428 y 0.21202 USD/kWh, respectivamente, en concordancia con los precios promedio en cada región.

El modelo de operación incluyó tres regímenes: modo base (0:00–24:00 h), modo intermedio (12:00–22:00 h) y modo de punta (19:00–22:00 h). Los indicadores analizados de las simulaciones fueron el costo nivelado de la energía (LCOE real), el factor de planta (FP) en el primer año, la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (NPV). Estos indicadores permitieron comparar la competitividad de cada sitio bajo condiciones homogéneas de diseño y referencia financiera.

Finalmente, una vez determinado el punto operativo óptimo de cada emplazamiento, se efectuó un análisis adicional fijando un valor de punto de diseño de DNI a 850 W/m² (~30%), con el propósito de evaluar la respuesta del sistema bajo el mejor modo operativo previamente identificado y, al mismo tiempo, establecer una referencia comparativa frente a los valores de punto de diseño de la DNI correspondientes al 5 % de confianza estadística en cada sitio.

RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran los resultados del análisis paramétrico de los tres emplazamientos, a) Gómez Palacio, Durango, b) Hermosillo, Sonora, y c) La Paz, Baja California Sur, considerando un rango de múltiplos solares (SM) de 1.0 a 4.0 y un almacenamiento térmico (TES) de 4 a 20 horas. Los indicadores evaluados incluyen el LCOE real, el factor de planta en el primer año (FP), la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN). Cada superficie representa los 3 modos de operación, modo base, modo intermedio y demanda pico.

Central Guadalupe Victoria (Gómez Palacio, Durango):

El escenario con mínimo LCOE en usd (~9.15 ¢/kWh) se ubica en el régimen base, con un FP de aproximadamente 70 %, TIR cercana a 4.0 % y un VPN negativo en el orden de -184 Mill. USD. En modos intermedio y pico, el LCOE aumenta significativamente, acompañado de reducciones en la rentabilidad (TIR negativa en modo intermedio y VPN decreciente). Esto confirma que la operación en modo base ofrece mayor estabilidad económica, mientras que en modos de operación restringidos el sistema pierde competitividad.

Central Hermosillo (Sonora):

El valor mínimo de LCOE alcanzado es de 8.70 ¢/kWh, con un FP de ~71 %, una TIR del -0.72% y un VPN negativo de -249 Mill USD en modo base. Bajo modo de operación intermedia o de punta, la rentabilidad se reduce aún más de forma considerable: la TIR se mantiene negativa en modo intermedio (–4.8 %), y el VPN en – 279 Mill. USD, y aunque en demanda pico el VPN mejora aún se mantiene en números negativos alrededor de -255 Mill. USD. Esto evidencia que Hermosillo presenta los mejores resultados de desempeño bajo un esquema de operación continua, mientras que su competitividad disminuye en regímenes de flexibilidad.

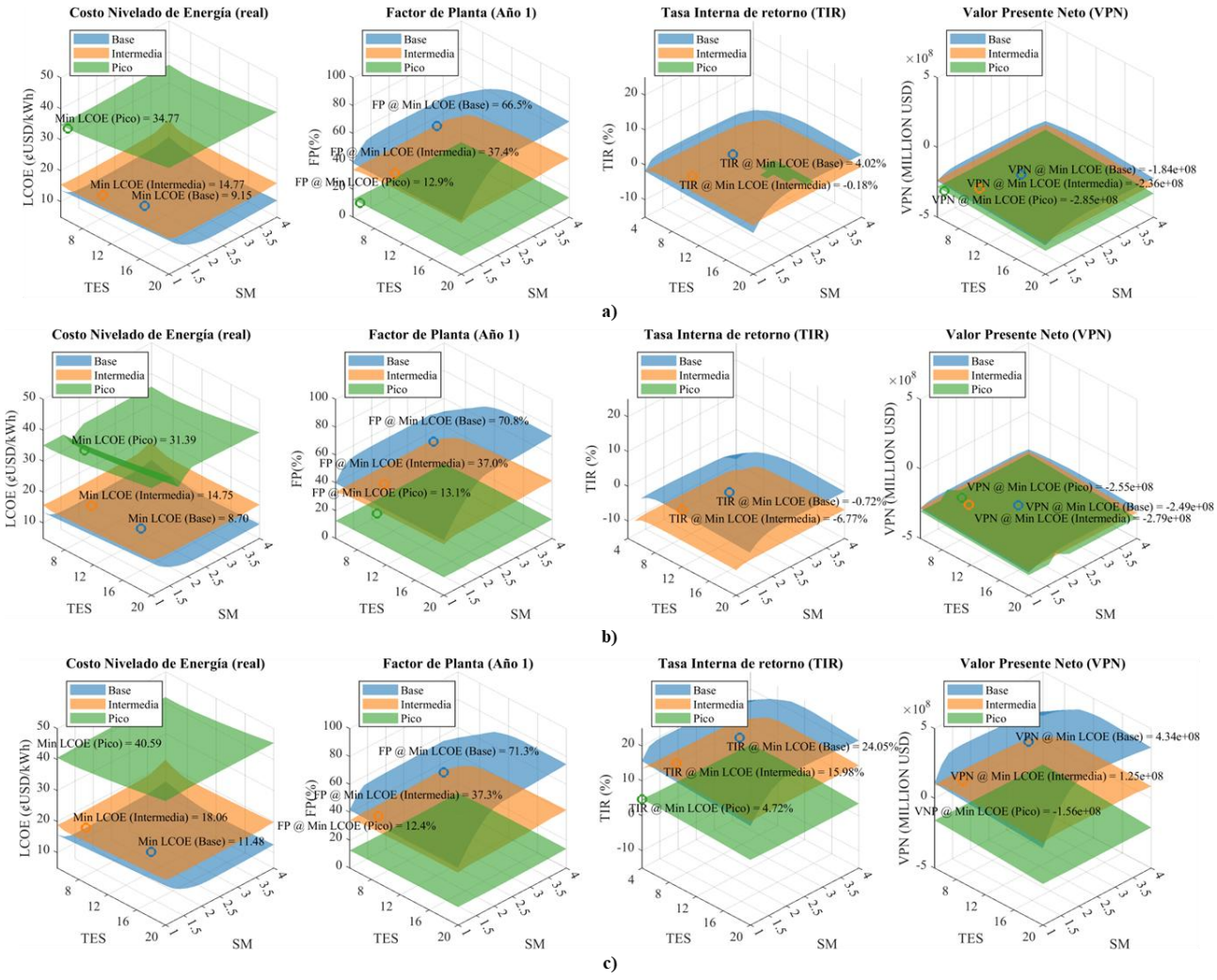


Figura 1. Resultados del análisis paramétrico del sistema en los tres emplazamientos seleccionados: a) Gómez Palacio, Durango; b) Hermosillo, Sonora; y c) La Paz, Baja California Sur, considerando variaciones de múltiplo solar (SM) y almacenamiento térmico (TES) bajo valores del punto de diseño de la DNI al 95 %.

Central La Paz (Baja California Sur):

A diferencia de los casos anteriores, esta central parte de un LCOE más elevado, con un mínimo de 11.48 USD¢/kWh (modo base). Aún así, logra un FP de ~71 % y una TIR positiva (4.7 %), con un VPN positivo cercano a 434 MUSD. En modos intermedio y pico, el LCOE se incrementa hasta superar los 18–40 USD¢/kWh, resultando en valores inferiores de TIR y VPN. Estos resultados muestran que aunque los costos iniciales en BCS elevan el LCOE, los altos valores de DNI y los otros precios PML aumentan su competitividad significativamente.

En general, la primera etapa confirma que la operación en modo base es la más competitiva en los tres emplazamientos, aunque con diferencias sustanciales en magnitudes absolutas de LCOE y VPN.

La Fig. 2 presenta el análisis complementario en el cual, una vez determinado el modo óptimo para cada central, se fijó un punto de diseño de la DNI de 850 W/m² (~30%) con el fin de establecer una comparación frente al punto de diseño convencional de la DNI del 5 %.

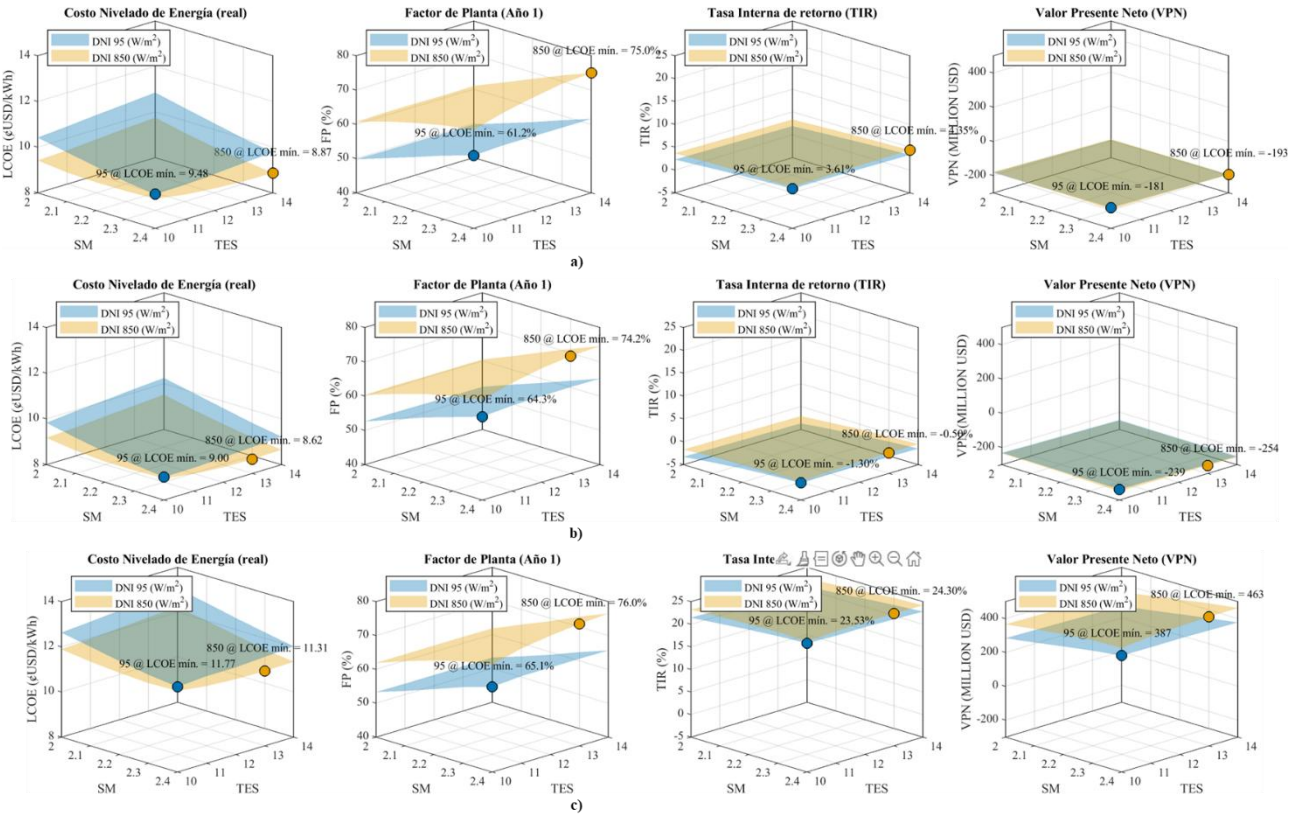


Figura 2. Resultados del análisis comparativo de los sistemas CSP-TES en los tres emplazamientos seleccionados: a) Gómez Palacio, b) Hermosillo y c) La Paz, bajo condiciones de punto de diseño de DNI 5% vs DNI fijo = 850 W/m² (~30%), en el modo operativo óptimo de cada central.

Central Guadalupe Victoria (a):

Con un punto de diseño de la DNI de 850 W/m², el LCOE se reduce ligeramente de 9.48 a 8.87 USD ¢/kWh, mientras que el FP se incrementa de 61 % a 75 %, manteniendo una TIR positiva (3.6 %). El VPN se mantiene en valores negativos (–193 MUSD en condiciones nominales vs mejor desempeño relativo en el caso ajustado). Esto indica que la planta en Durango, aunque es robusta en su producción de energía y alto factor de planta, los bajos precios de la energía del SIM limitan su factibilidad económica por el momento.

Central Hermosillo (b):

El comportamiento es similar: el LCOE disminuye de 9.00 a 8.62 USD ¢/kWh, acompañado de un aumento en FP de 64 % a 74 %. La TIR pasa de valores marginales a una ligera recuperación (–1.3 % a 0.3 %), aunque el VPN sigue siendo negativo (–254 MUSD vs –239 MUSD). Esto sugiere que Hermosillo se beneficia en términos técnicos al fijar un menor punto de diseño de la DNI, pero no logra alcanzar plena viabilidad financiera bajo las condiciones de mercado consideradas.

Central La Paz (c):

Presenta la mejora más marcada. El LCOE disminuye de 11.77 a 11.31 USD ¢/kWh, mientras que el FP crece de 65 % a 76 %. La TIR pasa de 23.5 % a 24.3 %, y el VPN de 387 MUSD a 463 MUSD. Estos resultados muestran que, al aumentar el campo solar, la central de Baja California Sur aumenta significativamente su rentabilidad y competitividad, superando a los otros emplazamientos en términos financieros.

CONCLUSIONES

Los resultados evidencian que:

- El modo base constituye la estrategia de operación más competitiva en los tres sitios, debido a que al mantener en operación la planta el mayor tiempo posible, sus ingresos por la venta de energía se incrementan.
- Bajo condiciones nominales del punto de diseño para una DNI del 5 %, Baja California Sur muestra la mayor estabilidad técnico-económica debido a los altos precios de venta de la energía al ser un sistema aislado, mientras que Sonora presenta el menor valor de LCOE y el mayor FP, sin embargo, sus indicadores económicos de TIR y VPN son negativos. Durango queda en situación marginal con una TIR positiva, pero con un VPN negativo.
- Con un punto de diseño de la DNI de 850 W/m², se observa una ligera mejora en el desempeño técnico y económico de las tres centrales, debido a que, aunque hay una mayor producción de energía, también hay un incremento de los costos de instalación por necesitar un mayor campo de heliostatos. Sin embargo, la única que mantiene valores positivos de VPN es la planta en BCS.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar tanto las condiciones locales de irradiancia como los modos de operación y las señales de mercado (PML) para establecer la viabilidad de proyectos de torre solar en México. También hay que aclarar que el desempeño económico negativo de las plantas en Sonora y Durango es debido a los bajos precios de la energía actuales del SIM, pero estas condiciones de mercado son temporales y en un futuro pueden cambiar.

REFERENCIAS

Boretti, A., Nayfeh, J., & Al-Kouz, W. (2020). Validation of SAM Modeling of Concentrated Solar Power Plants. Energies, 13. doi:10.3390/en13081949

CENACE. (2025). Precios Marginales Locales MDA. Taken from https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/PreEnerServConMDA.aspx, Online access Jun-2025.

Chen, R., Rao, Z., & Liao, S. (2018). Determination of key parameters for sizing the heliostat field and thermal energy storage in solar tower power plants. Energy conversion and management, 177, 385–394.

Elfeky, K. E., & Wang, Q. (2023). Techno-economic assessment and optimization of the performance of a solar power tower plant in Egypt's climate conditions. Energy Conversion and Management, 280, 116829.

Hamilton, W. T., Newman, A. M., Wagner, M. J., & Braun, R. J. (2020). Off-design performance of molten salt-driven Rankine cycles and its impact on the optimal dispatch of concentrating solar power systems. Energy Conversion and Management, 220, 113025. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113025

Mehos, M., Turchi, C., Vidal, J., Wagner, M., & Ma, Z. (2017). Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap. Tech. rep., NREL Report No. TP-5500-67464.

doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.078

NREL. (2024). System Advisor Model, SAM. System Advisor Model, SAM. Retrieved from https://sam.nrel.gov

NREL. (2025a). National Solar Radiation Database (NSRDB). National Solar Radiation Database (NSRDB). Taken from https://nsrdb.nrel.gov, Online access Dec-2022.

Solargis. (2025). Global Solar Atlas. Taken from https://globalsolaratlas.info, Online access Dec-2022

Thirumalai, N. C., Ramaswamy, M. A., Srilakshmi, G., Venkatesh, V., & Rao, B. (2014). Global review of solar tower technology. Center for Study of Science, Technology and Policy (CSTEP).

Vant-Hull, L. L. (2012). 8 - Central tower concentrating solar power (CSP) systems. En K. Lovegrove, & W. Stein (Edits.), Concentrating Solar Power Technology (págs. 240-283). Woodhead Publishing.

Wagner, M. J. (2008). Simulation and Predictive Performance Modeling of Utility-scale Central Receiver System Power Plants. Simulation and Predictive Performance Modeling of Utility-scale Central Receiver System Power Plants. Madison.

Celdas y Módulos Fotovoltaicos/ Análisis de modelos de negocios/ Energía de la biomasa

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2063	Evaluación del potencial energético del nopal (Nopalea cochenillifera) como biocombustible sostenible para la generación de energía en clima semidesértico	Crisnaik A. Avalos Palafox
2201	Impacto de las Propuestas de Contraprestación de Servicios con CFE para Plantas Fotovoltaicas Colectivas	Carlos E. Borjas Castillo
2375	Sistema de control y adquisición de datos de las parcelas agrovoltaicas del proyecto PASE	Carlos Pérez Rábago

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL NOPAL (NOPALEA COCHENILLIFERA) COMO BIOCOMBUSTIBLE SOSTENIBLE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN CLIMA SEMIDESÉRTICO.

Crisnaik A. Avalos Palafox, Ramiro A. Calleja Valdez, Victor M. Maytorena Soria, Guadalupe Dórame Carreño, Ricardo A. Perez Encinso.
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora (UNISON), Blvd. Rosales y Luis Encinas, Hermosillo, Sonora, CP 83000, México, 662 259 2100, FAX (662) 259-21-28 con extensiones 1215 y 1216, **crisnaik1@outlook.com**

RESUMEN

En los últimos años, el cambio climático se ha consolidado como una amenaza global persistente para todas las formas de vida. Entre sus principales causas se encuentra la explotación intensiva de fuentes fósiles, responsable de la acumulación de gases de efecto invernadero y la contaminación de cuerpos de agua con metales pesados derivados de la extracción de carbón mineral. Ante esta problemática, surge la necesidad de encontrar alternativas energéticas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental. Este estudio propone el uso de biochar producido a partir de la poda de las especies *Nopalea cochenillifera* y *Opuntia ficus-indica* como sustituto del carbón mineral. La investigación se realizó en Hermosillo, Sonora, una región con altos niveles de radiación solar (promedios de 1000 W/m²), escasas precipitaciones (promedios de 309 mm) y temperaturas extremas de hasta 47 °C. En este contexto, se buscó una fuente de energía local, con baja demanda hídrica y resistencia a climas áridos. Utilizando el horno solar ubicado en la PSH (Planta Solar de Hermosillo) se produjeron biochars utilizando la poda de las especies de nopal antes mencionadas mediante pirólisis solar. La biomasa cruda de la especie *Nopalea cochenillifera*, seca y pelletizada, presentó un poder calorífico en la prueba bomba calorimétrica de 13.55 MJ/kg, mientras que el biochar producido alcanzó los 11.07 MJ/kg. Estos valores son comparables al lignito (carbón mineral de bajo poder calorífico), pero sin las desventajas ambientales asociadas a su explotación. Los resultados respaldan el potencial del biochar como una solución energética viable para regiones áridas y una alternativa para el uso de lignito en la producción de energía.

Palabras claves: Pirólisis solar, Biochar, Nopal, Poder Calorífico, Caracterización, Energía renovable, Bioenergía.

ABSTRACT

In recent years, climate change has emerged as a persistent global threat to all life forms. Among its main causes are the intensive exploitation of fossil fuels, responsible for the accumulation of greenhouse gases and the contamination of water bodies with heavy metals derived from coal extraction. Faced with this problem, there is a need to find sustainable energy alternatives that reduce environmental impact. This study proposes the use of biochar produced from the pruning of *Nopalea cochenillifera* and *Opuntia ficus-indica* species as a substitute for mineral coal. The research was conducted in Hermosillo, Sonora, a region with high levels of solar radiation (averages of 1000 W/m²), low rainfall (averages of 309 mm), and extreme temperatures of up to 47°C. In this context, a local energy source with low water demand and resistance to arid climates was sought. Using the solar oven located at the Hermosillo Solar Plant (PSH), biochars were produced using the pruning of the aforementioned cactus species through solar pyrolysis. The raw biomass from the specie Nopalea cochenillifera, dried and pelletized, had a calorific value in the calorimeter bomb of 13.55 MJ/kg, while the biochar produced reached 11.07 MJ/kg. These values are comparable to lignite (a mineral coal with a low calorific value), but without the environmental disadvantages associated with its exploitation. The results support the potential of biochar as a viable energy solution for arid regions and an alternative to the use of lignite in energy production.

Palabras claves: Solar Pirolisis, Biochar, Prickly pear, Power heat, Caracterization, Renewable energy, Bioenergy.

INTRODUCCIÓN

México es un país con gran biodiversidad; su amplia gama de climas lo convierte en un candidato ideal para la proliferación de la vida. Gracias a estos factores, se ha consolidado como el exportador de nopal número uno a nivel mundial (Gobierno de México, 2022). Por esta razón, el presente estudio se enfoca en esta planta, que además representa el escudo nacional del país. El proyecto fue realizado en la Universidad de Sonora, apoyado por la “Secihti” en el año 2025. La localidad de Hermosillo presenta un clima árido debido a los largos

periodos de exposición solar y a la escasez de recursos hídricos, ya que las precipitaciones anuales rondan los 309 mm (Conagua, 2024), una cantidad baja en comparación con pueblos cercanos como Yécora, que alcanzan los 1114 mm (Gutiérrez-Ruacho, 2011).

Tomando esto en cuenta, el nopal se convierte en una planta atractiva para la producción de energía debido a su fácil adaptabilidad a climas inhóspitos, sequías y cambios bruscos de temperatura (Gaona E., 2024), ya que estas plantas soportan temperaturas superiores a 45 °C y períodos prolongados de sequía (Medina-García G, 2021). "Las principales especies cultivadas en México son: *Opuntia amyclaea, O. ficus-indica, O. xoconostle, O. megacantha* y *O. Streptacantha"* (Gaona E., 2024). Por ello, se buscó seleccionar especies que crecieran contra las complicaciones climáticas de la zona y de forma nativa en México. Como es sabido, el uso intensivo del carbón mineral como fuente energética ha contribuido significativamente a la contaminación atmosférica y la degradación ambiental a escala global. Las minas de carbón generan contaminaciones abióticas irreversibles en las zonas de excavación y sus alrededores (Marco A., 2025). En el mundo se consumen 140,229 TWh provenientes de fuentes fósiles, de los cuales 45,564 TWh corresponden al carbón mineral, México consumió 2,115 TWh en fuentes fósiles durante 2023 (Statistical Review of World Energy, 2024), lo cual representa el 90 % de la energía consumida en ese mismo año. Frente a este panorama, se ha intensificado la búsqueda de alternativas sostenibles que permitan mitigar los impactos negativos de los combustibles fósiles sin comprometer la seguridad energética. Como solución a este problema, se buscan biomasas para producir carbón vegetal, también conocido como biochar, el cual se usará para generar energía. Los biochars obtenidos a partir de residuos lignocelulósicos, presentan características fisicoquímicas ajustables, menor contenido de azufre y metales pesados, y un balance de carbono potencialmente neutro (Rivera C., 2021). Se buscan biomasas con mayor porcentaje de carbono fijo, ya que estas contienen un poder calorífico superior (Serafín C., 2023), lo que las convierte en una alternativa estratégica en la transición hacia una economía más limpia y sustentable. Entre los tipos de carbón mineral que se utilizan para la producción de energía se encuentra el lignito, cuyo poder calorífico ronda entre los 10,000 y 20,000 kJ/kg (Vegas L., 2021). En este ensayo se abordarán las características energéticas de los biocombustibles sólidos derivados del nopal, siendo la biomasa cruda seca y el biochar pelletizado. Utilizando diferentes métodos de caracterización, como el análisis proximal y la bomba calorimétrica, se realizará la cuantificación de su poder calorífico y se evaluarán si estos representan una alternativa funcional para sustituir el carbón mineral.



Figura 1- Diagrama de procesos experimentales

METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presentan las etapas fundamentales del proceso experimental diseñado para evaluar el potencial energético de dos especies de nopal como biomasa: *Nopalea cochenillifera* (NP) *y Opuntia ficus-indica* (OP). El procedimiento comenzó con la selección de la biomasa, al mismo tiempo de un pretratamiento mediante secado solar para reducir su contenido de humedad para la producción de biochar. Posteriormente, se realizó un análisis proximal para determinar características como la humedad, la materia volátil, el contenido de cenizas y el carbono fijo. A continuación, se llevó a cabo la pirólisis en un horno solar con un reactor de calentamiento indirecto y, finalmente, se utilizó una bomba calorimétrica para estimar el poder calorífico de la biomasa cruda seca y de los biochars obtenidos de ambas especies.



Figura 2- Poda de las especies seleccionadas

Selección de biomasa

En esta fase del estudio se seleccionaron dos especies de nopal pertenecientes al género *Opuntia*, como se puede apreciar en la Figura 2: del lado izquierdo, NP, y del lado derecho, OP. Ambas muestras fueron recolectadas en el bulevar Vado del Río, frente al CRIT Sonora. Esta elección se fundamentó en la adaptabilidad de estas especies a las condiciones extremas del desierto de Sonora. Ambas especies fueron sometidas a un proceso de poda selectiva, consistente en el corte de las pencas maduras, con el objetivo de mantener la salud de la planta y estimular la producción de nuevos brotes. Este manejo favorece la regeneración continua del material vegetal, asegurando un suministro constante para estudios posteriores.

Análisis proximal

Se realizó un análisis proximal sobre las dos especies de nopal seleccionadas. Para cada especie, se prepararon tres muestras de 1 g de biomasa en su estado húmedo. El proceso constó de cuatro fases principales:

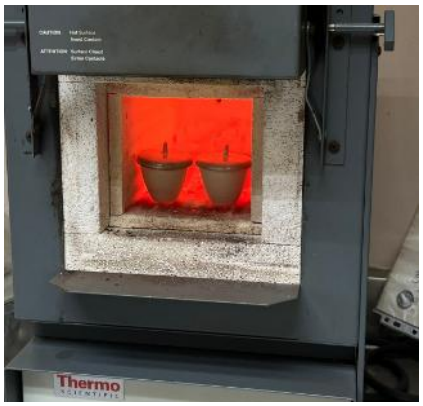


Figura 3- Muestras en crisoles para análisis proximal

1. **Fase de secado:** Las muestras húmedas fueron pesadas y depositadas en crisoles cerámicos antes de ser sometidas a un secado a 105°C durante 24 horas en una mufla marca Thermo Scientific. Este proceso permitió la extracción de la mayor cantidad de humedad posible. Posteriormente, las muestras fueron enfriadas y pesadas nuevamente para determinar la cantidad de masa evaporada.
2. **Fase de volátiles:** Las muestras secas fueron expuestas a una temperatura de 950°C durante 10 minutos, lo que permitió la evaporación de los aceites presentes en la biomasa. Después de este tratamiento, las muestras se pesaron de nuevo para cuantificar la masa de aceites volátiles extraídos.
3. **Fase de combustión:** Para esta fase, se buscó que solo quedaran cenizas como producto final. Las muestras que habían sido volatizadas fueron expuestas a 750°C durante 6 horas. Tras el proceso, las cenizas resultantes fueron pesadas para obtener el contenido mineral residual.
4. **Fase de carbono fijo:** Por balance de masa se obtuvo el contenido de carbono fijo, utilizando el peso de la masa seca ya volatizada, y restándole el peso de las cenizas.

Pretratamiento de Secado Solar

Para reducir el contenido de humedad de la biomasa antes de la pirólisis solar, se diseñó y construyó un secador solar casero utilizando materiales de fácil acceso. El dispositivo fue planeado para maximizar la absorción de radiación solar, mejorar el almacenamiento térmico interno y fomentar una ventilación eficiente. La estructura del secador se construyó con una caja de cartón, forrada en su interior con papel aluminio para aumentar el almacenamiento térmico. Se incorporaron aberturas en las paredes laterales para permitir la circulación del aire. Además, se incorporó una superficie absorbente de color negro mate en el exterior para maximizar la captación de calor. La combinación de estos elementos permitió crear un ambiente controlado que facilitó la extracción eficiente de la humedad contenida en la biomasa. Se utilizó una báscula con sensibilidad (±0.01 g) para realizar mediciones cada día de prueba, después de ser expuestas las biomasas al sol todo un día.

Pirolisis solar

Las pruebas fueron realizadas el 28 de marzo de 2025, día en el que se registró un DNI promedio durante las pruebas de 775 W/m². Para llevar a cabo la prueba, se cargaron 40 g de cada biomasa seca en un reactor batch calentado por energía solar concentrada, utilizando el horno solar de la PSH (29.027636, -111.145795), el cual tiene un factor de 0.6 en perturbaciones ópticas globales y un área de 2.72 m². Las muestras fueron expuestas a un rango de temperaturas que fue incrementado desde la ambiente hasta alcanzar los 500°C, se puede apreciar en la Figura 4 el funcionamiento del reactor. Durante este proceso, al mantener la temperatura constante, se favoreció la reacción termoquímica que permitió la formación del biochar. Esta temperatura se mantuvo durante 30 minutos, lo que permitió que se desarrollara el proceso efectivo de pirólisis. Los gases producidos por la descomposición de la biomasa generaron una atmósfera inerte, lo cual promueve la reacción. Posteriormente, las muestras fueron enfriadas de forma natural hasta alcanzar la temperatura ambiente. Al finalizar la prueba, se extrajo el biochar generado de cada especie, separándolo cuidadosamente para su análisis posterior (rendimientos y poder calorífico). Para calcular los rendimientos se utilizó la Ec. 1.


Figura 4- Reactor pirólisis solar en funcionamiento

$$\text{Rendimiento} = (\text{Masa biochar}/\text{Masa seca}) * 100 \qquad (1)$$

Bomba Calorimétrica

Se realizaron las pruebas en una bomba de oxígeno calorimétrica marca PARR, modelo 1341. Se pesaron tres muestras de 1 g de biochar y biomasa seca de cada especie. Cada muestra se agregó en pruebas separadas en el crisol metálico; luego, se conectó un alambre

de platino de 10 cm, el cual actuaría como fusible para dar inicio a la reacción de combustión dentro de la bomba. Después, se selló la cámara de reacción y se presurizó con 30 atm de oxígeno, para posteriormente ser introducida en una tina con 2000 mL de agua deionizada, la cual estaba en contacto con un termómetro digital PARR, modelo 6775, con sensibilidad ±0.001 °C, el cual sensaba la temperatura en todo momento, y una hélice que se encargaba de estabilizar la temperatura en todo el recinto. Se utilizó la Ec. 2 (Diez et al., 2010) para obtener los poderes caloríficos de las biomasas:



Figura 5- Pellet en bomba calorimétrica

$$PC = ((Tf - T0) * W - e1 - e2)/m \quad (2)$$

Donde:

PC= Calor de combustión de la muestra en cal/g
W= Equivalente energético del calorímetro en cal/ºC
m= Masa de la muestra en g
Tf = Temperatura final
T0 = Temperatura inicial
e1= Equivalente calórico de ácido nítrico (1 cal/ml de NaOH y/o Na2CO3 0.0725 N gastado)
e2= Equivalente calórico de fusible quemado (alrededor de 2.3 cal/cm)

RESULTADOS

Analisis proximal

Tabla 1- Resultados análisis proximal

Porcentajes	OP	NP
Humedad	91.9%	92.2%
Ceniza	20.3%	21.9%
Masa Volátil	72.2%	67%
Carbón Fijo	7.7%	11.1%

Los promedios de los resultados de las pruebas se pueden observar en la Tabla 1. Se observó que ambas biomasas presentan un alto contenido de humedad, lo que hace necesario un proceso previo de secado si se desea obtener una biomasa seca. Los resultados del análisis proximal indican que la biomasa de NP contiene un mayor porcentaje de carbón fijo en comparación con OP. Este hallazgo sugiere que NP podría ser una opción más favorable para la producción de biochar en cuanto aprovechar su energía, debido a su mayor contenido de carbono. Sin embargo, ambas especies también contienen una cantidad significativa de componentes inorgánicos, lo cual podría representar un desafío, ya que estos residuos deben ser recolectados y gestionados durante su utilización. En contraste, OP presenta una mayor cantidad de aceites, lo que se refleja en un mayor porcentaje de masa volátil, lo que podría aportar en su valor energético durante el proceso de combustión. Finalmente, el balance de masas, compuesto por la suma de las cenizas, el carbono fijo y la masa volátil, refleja la totalidad de la biomasa seca, lo que permite una evaluación integral de su composición y potencial energético.

Secador solar

El pretratamiento de secado tomó aproximadamente dos semanas para alcanzar un peso constante. Como se puede apreciar en la Figura 6, la especie OP comienza con un peso de aproximadamente 800 g en base húmeda y finaliza con alrededor de 200 g en base seca, perdiendo aproximadamente el 75% de su peso inicial. Por su parte, NP empieza con aproximadamente 1000 g en base húmeda y termina con 200 g en base seca, perdiendo el 80% de su peso inicial, siendo mayormente agua su composición.

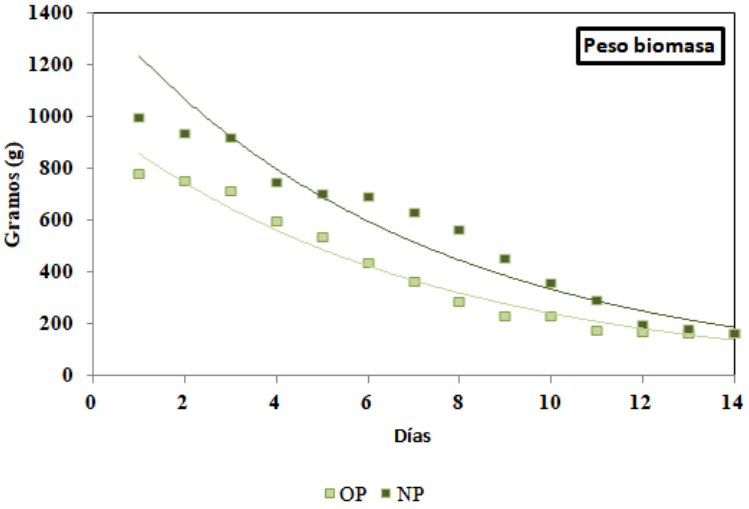


Figura 6- Gráfica pérdida de masa de especies seleccionadas

Pirolisis solar

La prueba tuvo una duración de 90 minutos en total, con 40 g de cada biomasa seca por reactor. En las Figuras

7 y 8 se observa el comportamiento de la temperatura durante el proceso. Inicialmente, la temperatura se mantuvo constante a 100°C, donde tomó cuatro minutos en ambas biomasas el expulsar completamente la humedad restante. Posteriormente, la temperatura fue incrementándose a una rampa de calentamiento de 44 °C/min para OP y 60 °C/min para NP hasta alcanzar los 500°C, nivel al que se mantuvo durante 35 minutos. Finalmente, tomó alrededor de 40 minutos en enfriarse a temperatura ambiente. Al finalizar, los pesos en biochar para OP y NP fueron de 18 g y 16 g, respectivamente. Esto nos da rendimientos en la producción de biochar del 45% para OP y 40% para NP, utilizando la Ec. 1.

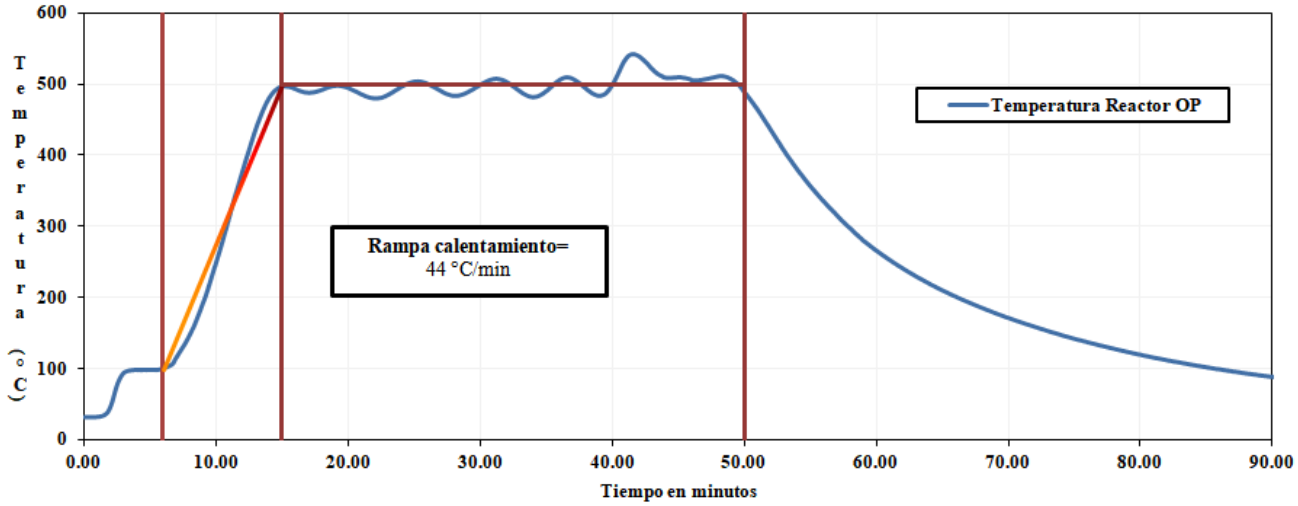


Figura 7- Gráfica Temperatura-Tiempo en reactor pirólisis con especie OP

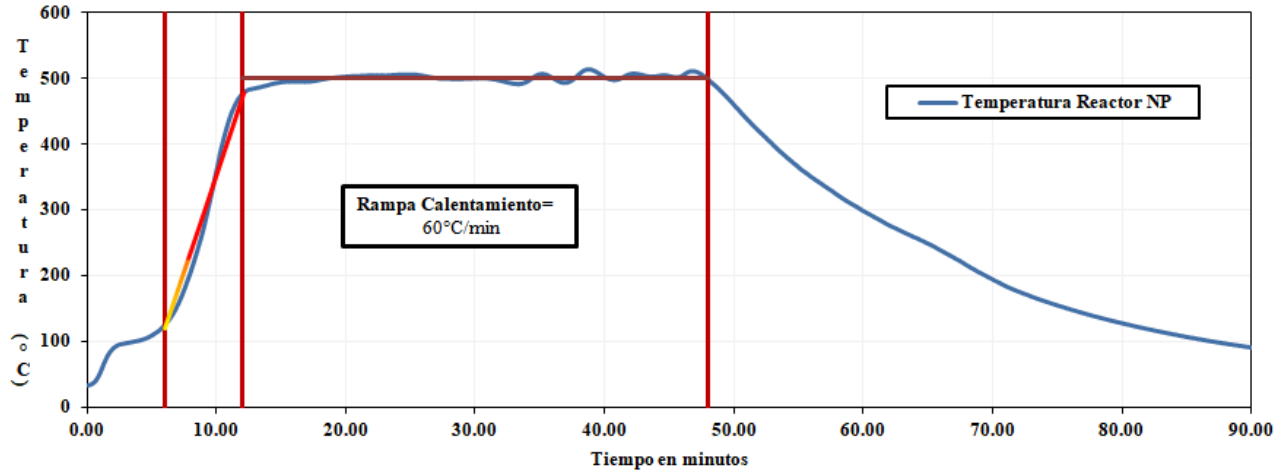


Figura 8- Gráfica Temperatura-Tiempo en reactor pirólisis con especie NP

Bomba Calorimétrica

Analizando los resultados del poder calorífico utilizando la Ec. 2, la especie NP destacó por su alto poder calorífico, tanto en el biochar como en la biomasa seca. Los mejores resultados se obtuvieron con NP en su estado seco, con un promedio de 13.55 MJ/kg, seguido del biochar producido de esta especie, con un poder calorífico de 11.07 MJ/kg. En segundo lugar quedó OP, ya que sus promedios de poder calorífico para biomasa seca y biochar fueron de 9.93 MJ/kg y 8.80 MJ/kg, respectivamente. En comparación, los biochars presentaron un poder calorífico inferior al de la biomasa seca, lo que sugiere que los aceites presentes en la biomasa contribuyen significativamente a la

liberación de energía durante su combustión. En la Figura 9 se observa una tabla comparativa de los poderes caloríficos para la biomasa cruda seca, biochar y carbón mineral.

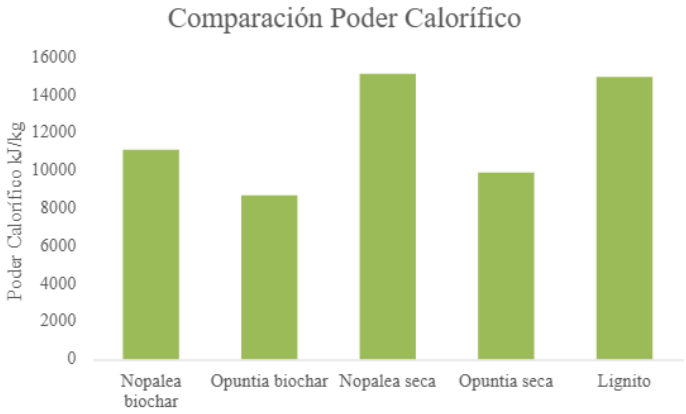


Figura 9- Poder Calorífico de biomasas comparadas con carbón mineral lignito

CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos en las pruebas, se nota una diferencia entre ambas biomasas. Empezando por el análisis proximal, se observa que la biomasa NP tiene un porcentaje de carbono más alto que OP. Esto, junto a los resultados obtenidos en la bomba calorimétrica, nos ayuda a entender por qué NP se convierte en una mejor opción al momento de producir combustibles sólidos, ya que tiene un mejor rendimiento en cuanto a masa/poder calorífico. Comparando los resultados de la biomasa seca contra el biochar, podemos notar una pérdida de poder calorífico. Esto se puede atribuir a los compuestos volátiles o aceites que se pierden al momento de hacer el biochar, los cuales contienen energía que no es aprovechada. Los resultados indican que la mejor alternativa al uso del carbón mineral lignito como combustible sería utilizarla biomasa NP, ya que su poder calorífico fue superior tanto en base seca como en biochar. Este poder calorífico es comparable al del lignito como se puede apreciar en la Figura 9, la cual muestra los promedios de los poderes caoríficos tanto en biomasa cruda seca y el biochar, lo que nos da una idea de qué tan buen biocombustible podría llegar a convertirse. Al tratarse de un cultivo, no se contarían con las contaminaciones que se encuentran habitualmente en las minasde carbón, siendo una opción más limpia que el este mineral. Tomando en cuenta que su poder calorífico, su eficiencia en climas áridos y dado que es un cultivo no genera contaminación a sus alrededores como lo haría una mina de carbón, se considera que la especie NP podría convertirse en una alternativa a el uso parcial o total del carbón mineral lignito.

Referencias:

1. Gobierno de México (2022) Día Nacional del Nopal 2022. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
2. Marco A. (2025) Impactos ambientales generados en minería artesanal de carbón en Sanagorán, Huamachuco. ISSN 1810-6781 Rev. Cienc. Tecnol. 21(1): 75-88
3. Rivera C. et al (2021) Compositional, thermal and microstructural characterization of the Nopal (opuntia ficus indica), for addition in commercial cement mixtures J. Phys.: Conf. Ser. 2046 012057
4. Vegas, L. (2021) El carbono y sus diferentes formas. Departamento de Química Orgánica y Farmacéutica. Universidad de Sevilla.
5. Gutiérrez-Ruacho, O. G., Brito-Castillo, L., Sahagún, L. V., & Troyo-Diéguez, E. (2012). Distribución espacial de la temperatura y precipitación y su relación con la vegetación del Estado de Sonora. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, 11(2), 106-111.
6. Statistical Review of World Energy (2024), Smil (2017) – with major processing by Our World in Data.
7. Conagua. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero costa de Hermosillo (2619), Estado de Sonora.
8. Medina-García, G., Zegbe, J. A., Ruiz-Corral, J. A., Casa-Flores, J. I., & Rodríguez-Moreno, V. M. (2021). Influencia del cambio climático en los requerimientos térmicos del nopal tunero (Opuntia spp.) en el Centro-Norte de México. Revista bio ciencias, 8, e1007.
9. Serafín, C. & Artemio, C. (2023) Capítulo 9: Caracterización Energética: Poder Calorífico, Compuestos Poliméricos. Aplicaciones Energéticas de la biomasa, 195.
10. Gaona, E. G., Martínez, L. A., Aguilar, L. P., Rubio, O. P., Munguía, A. M. G., & Ramos, K. V. D. L. (2024). El Nopal: ecofisiología del nopal en México. El Nopal: ecofisiología del nopal en México.
11. Diez, O.A., Cárdenas, G.J. y Mentz, L.F. (2010). Poder calorífico de bagazo, médula y sus mezclas, provenientes de la caña de azúcar de Tucumán, R. Argentina. Revista industrial y agrícola de Tucumán (1): 29-38.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

IMPACTO DE LAS PROPUESTAS DE CONTRAPRESTACIÓN DE SERVICIOS CON CFE PARA PLANTAS FOTOVOLTAICAS COLECTIVAS

Carlos E. Borjas Castillo, Rafael E. Cabanillas López.

Dirección General de Energía de la Secretaría de Economía y Turismo del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83270, México.
Correspondencia a Carlos E. Borjas Castillo (cbor1605@gmail.com)

RESUMEN

La generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos se ha consolidado como una alternativa tecnológica relevante por su versatilidad y disminución progresiva de costos. No obstante, su accesibilidad sigue siendo relativa, ya que muchos sistemas, si bien técnicamente viables, no resultan económicamente rentables bajo los actuales esquemas regulatorios que rigen el modelo de prestación de servicios eléctricos.

Para usuarios de suministro básico aquellos con consumo o capacidad limitada según los criterios regulatorios existen tres esquemas principales: net metering, net billing y venta total. Estos modelos se diferencian por la forma en que se compensa la energía generada frente al consumo, así como por los términos tarifarios y contractuales aplicables.

En este contexto, surge la propuesta de net metering colectivo, una extensión del esquema convencional, que permite que la energía generada por una planta solar se compense de forma compartida entre un padrón de beneficiarios. La energía acumulada se reparte proporcionalmente entre los usuarios, ya sea en kWh o mediante equivalencias monetarias si se opta por la venta a precio fijo.

Este modelo responde a la necesidad de reducir el costo energético en regiones rurales, donde la instalación individual de sistemas fotovoltaicos se ve limitada por barreras técnicas y administrativas. La creación de comunidades energéticas permite consolidar infraestructura común, facilitar la interconexión y maximizar el impacto social de la generación distribuida renovable.

Palabras claves: Net metering, energía solar, usuarios de suministro básico, energía.

ABSTRACT

Electricity generation through photovoltaic systems has established itself as a relevant technological alternative due to its versatility and progressive cost reduction. However, its accessibility remains relative, as many systems, while technically viable, are not economically viable under the current regulatory frameworks governing the electricity service provision model.

For basic supply users—those with limited consumption or capacity according to regulatory criteria—there are three main schemes: net metering, net billing, and total sale. These models differ in the way in which generated energy is offset against consumption, as well as in the applicable tariff and contractual terms.

In this context, the proposal for collective net metering emerges, an extension of the conventional scheme, which allows the energy generated by a solar plant to be offset on a shared basis among a list of beneficiaries. The accumulated energy is distributed proportionally among users, either in kWh or through monetary equivalents if the fixed-price sale option is chosen.

This model responds to the need to reduce energy costs in rural regions, where the individual installation of photovoltaic systems is limited by technical and administrative barriers. The creation of energy communities allows for the consolidation of common infrastructure, facilitates interconnection, and maximizes the social impact of distributed renewable generation.

Keywords: Net metering, solar energy, basic supply users, energy.

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 1). 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].

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 1. Planta Fotovoltaica del Municipio de Bacerac, Hermosillo, Sonora.

La región noroeste presenta los más altos valores de radiación solar de México (Figura 2). 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).

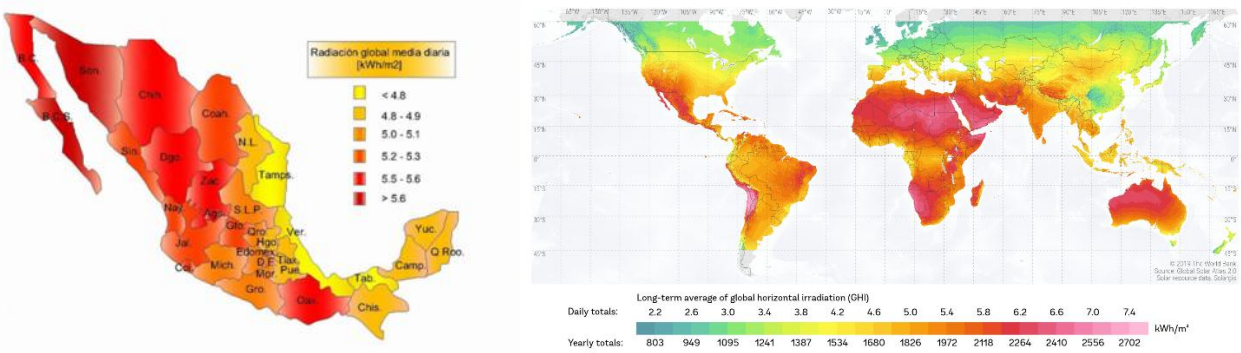


Figura 2. Potencial de Recurso Solar en México y el Mundo.

METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se basa en exponer el esquema actual de operación para este tipo de plantas fotovoltaicas, incluyendo los costos asociados a su instalación y el ingreso económico que generan bajo dicho esquema. Posteriormente, se plantea una propuesta que podría considerarse una variante del net metering, pero en la que, se pudiera manejarse como una bolsa de energía, o como una bolsa de dinero colectiva. En este modelo, el precio de la energía se fijaría de manera que se mantenga por debajo de las tarifas de la CFE, garantizando al mismo tiempo que sea rentable para el sistema y económicamente atractivo para los usuarios, en el caso de la bolsa de dinero.

Descripción General del Proyecto

En este trabajo se describe, de forma general, el procedimiento seguido para el desarrollo del proyecto (Figura 3), destacando especialmente la etapa final, la cual se centra en la distribución colectiva de los beneficios derivados de la instalación de una planta fotovoltaica con una capacidad de 499 kW en corriente directa. Esta fase no solo implica la puesta en marcha del sistema de generación, sino también la organización y asignación equitativa de los bienes y recursos que produce, buscando maximizar el impacto positivo en la comunidad beneficiaria. De este modo, se garantiza que la infraestructura instalada contribuya de manera sostenible al desarrollo local, promoviendo el acceso compartido a la energía limpia y fortaleciendo la participación colectiva en su gestión y aprovechamiento.

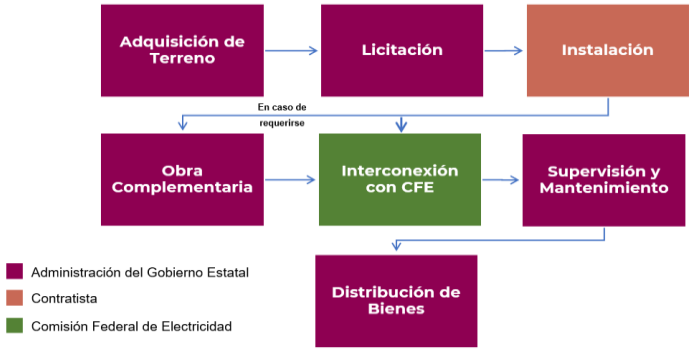


Figura 3. Diagrama del Procedimiento General para la Instalación de una Planta Fotovoltaica en el Sector Público.

En la Figura 3 se presenta el procedimiento general para el desarrollo de un proyecto de esta naturaleza. Cada uno de los recuadros que lo conforman representa una fase del proceso, la cual cuenta con su propio diagrama y puede variar según las particularidades del contexto o las necesidades específicas de la comunidad.

En el caso de este trabajo, se pone especial atención a la fase de distribución de bienes, que implica establecer los mecanismos mediante los cuales la población del municipio obtendrá beneficios directos del parque fotovoltaico instalado, los cuales se basan en un esquema de net metering colectivo, ya sea mediante una bolsa de recursos monetarios o de energía.. A continuación, en los apartados siguientes, se ejemplifica la aplicación del modelo propuesto mediante el análisis de cuatro municipios: Bacadéhuachi, Bacerac, Bavispe y Huachinera.

En relación con los esquemas de financiamiento, su evaluación exige la realización de un estudio de prefactibilidad que contemple el esquema económico aplicable, la estimación detallada de los costos del proyecto y las alternativas de financiamiento disponibles, con el objetivo de determinar su viabilidad económica. Adicionalmente, se recomienda que los gobiernos locales y las comunidades involucradas formalicen mecanismos de colaboración que optimicen los recursos, reduzcan costos y contribuyan a la sostenibilidad y atractivo financiero del proyecto.

Costos del Proyecto

Tabla 1. Costos de Instalación de Plantas Fotovoltaicas en 4 Municipios.

#	Capacidad Instalada (kW)	Municipio	Inversión ($)	Población Beneficiada
1	420	Bavispe	$ 12,859,261	1169
2	420	Bacerac	$ 13,792,003	1221
3	420	Huachinera	$ 14,252,074	1186
4	420	Bacadéhuachi	$ 14,370,777	979

Nota: Los costos presentados en la tabla se obtuvieron de licitaciones realizadas por la Secretaría de Economía del Estado de Sonora.

En la tabla anterior se muestran los costos asociados a la instalación de las plantas fotovoltaicas en los municipios del estado de Sonora, sin incluir los costos indirectos relacionados con la gestión por parte del Gobierno estatal. Además, aún falta considerar el costo del sistema de comunicación, cuyo monto se estima en 1.4 MDP para las cuatro plantas, según el estudio de mercado realizado por el gobierno del estado. Cabe destacar que estos gastos corresponden únicamente a la puesta en marcha del sistema, resultando en un promedio de 14.17 MDP por planta.

Esquema de Contraprestación de Servicio

El esquema actual disponible para plantas con estas características es el de venta total, que consiste en vender la energía generada a un precio que varía de manera horaria, dependiendo del nodo en el que se encuentre la planta. Este valor se conoce como precio marginal local (PML). En la Figura 4 se muestra el comportamiento de dicho precio para el nodo 04-NRI-230, donde se localizan las plantas.

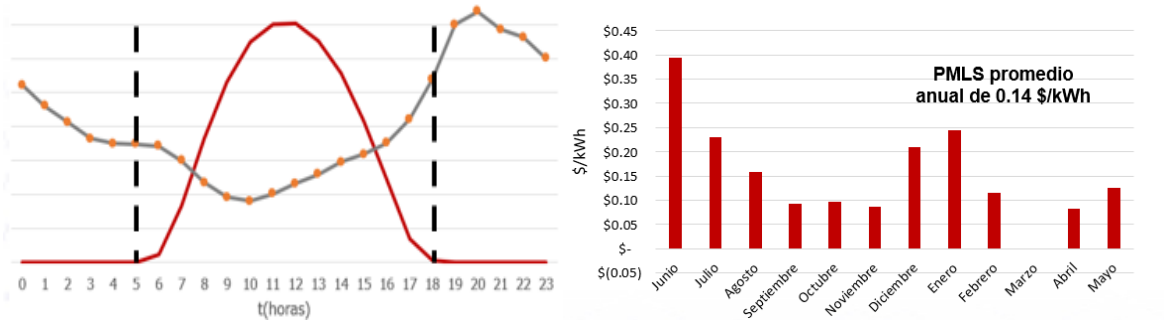


Figura 4. Comportamiento del Precio Marginal Local Promedio del nodo 04-NRI-230.

En la Figura 5 se presentan dos gráficos. El de la izquierda muestra dos comportamientos: la generación de electricidad estimada de una planta fotovoltaica, representada por una línea roja, y el Precio Marginal Local (PML), representado por una línea gris con puntos naranjas. Se observa claramente que el precio de la energía disminuye durante las horas de mayor producción de las plantas solares.

Para este trabajo, se estimó un PML Solar, ilustrado en el gráfico de la derecha de la misma figura. Este valor se determinó mediante un promedio ponderado, considerando tanto la cantidad de energía producida en cada hora como el precio correspondiente a ese momento.

Facturación Doméstica Municipal

La facturación doméstica total (FDT) se determinó como la suma de las facturaciones individuales (FI) de los servicios eléctricos domésticos del municipio, adicional para fin de distribuir los beneficios asociados de la planta se introduce el concepto de facturación doméstica filtrada (FDF) la cual consiste en intervenir en máximo el 80% de la FI siempre y cuando esta no exceda un máximo de $3000. A continuación, en la Figura 5 y Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para el municipio de Bavispe.

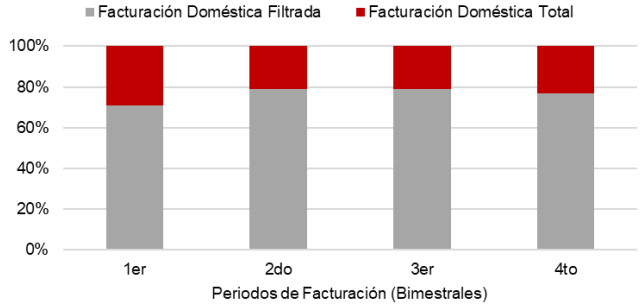


Figura 5. Facturación de Servicios Domésticos en Bavispe.

Tabla 2. Facturación de Servicios Domésticos.

Periodo	FDT	FDF
1er	$ 440,617	$ 311,526
2do	$ 237,663	$ 187,716
3er	$ 294,867	$ 232,234
4to	$ 406,470	$ 312,915
Total	**$ 1,379,617**	**$ 1,044,391**

Costos de Energía

Tabla 3. Costos de la Tarifa de Suministro Básico en la Región Noroeste 2024.

#	Mes	Transmisión	Distribución	CENACE	Suministro	SCnMEM	Generación	Capacidad	TOTAL
1	Enero	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.725	0.469	2.122
2	Febrero	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.73	0.472	2.13
3	Marzo	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.739	0.478	2.145
4	Abril	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.739	0.478	2.145
5	Mayo	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.739	0.478	2.145
6	Junio	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.739	0.478	2.145
7	Julio	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.76	0.491	2.179
8	Agosto	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.766	0.496	2.19
9	Septiembre	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.766	0.496	2.19
10	Octubre	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.766	0.496	2.19
11	Noviembre	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.766	0.496	2.19
12	Diciembre	0.1769	0.7384	0.0065	57.35	0.0062	0.754	0.487	2.169

En la Tabla 3 se presentan los costos que enfrenta la CFE para suministrar energía a los servicios domésticos mencionados, los cuales oscilan entre 2.12 $/kWh y 2.19 $/kWh. En el desglose de estos costos, se identifica que la mayor aportación corresponde a la generación, seguida por la distribución. La instalación de la planta fotovoltaica podría impactar directamente en algunos de estos rubros, particularmente en generación,

así como en otros conceptos como capacidad y transmisión. A Continuación, en la Tabla 4 se presentan los costos promedio de energía (CEP) por usuario en el municipio de Bavispe.

Tabla 4. Costos de Energía Promedio para Usuario Doméstico.

Periodo	Consumo (kWh)	CEP ($/kWh)	Costo ($)
1er	293	$2.18	$640
2do	226	$1.51	$342
3er	401	$1.06	$426
4to	533	$1.10	$587
Total	**1453**	**$1.37**	**$1,993**

Propuesta de Algoritmo de Distribución de Bienes

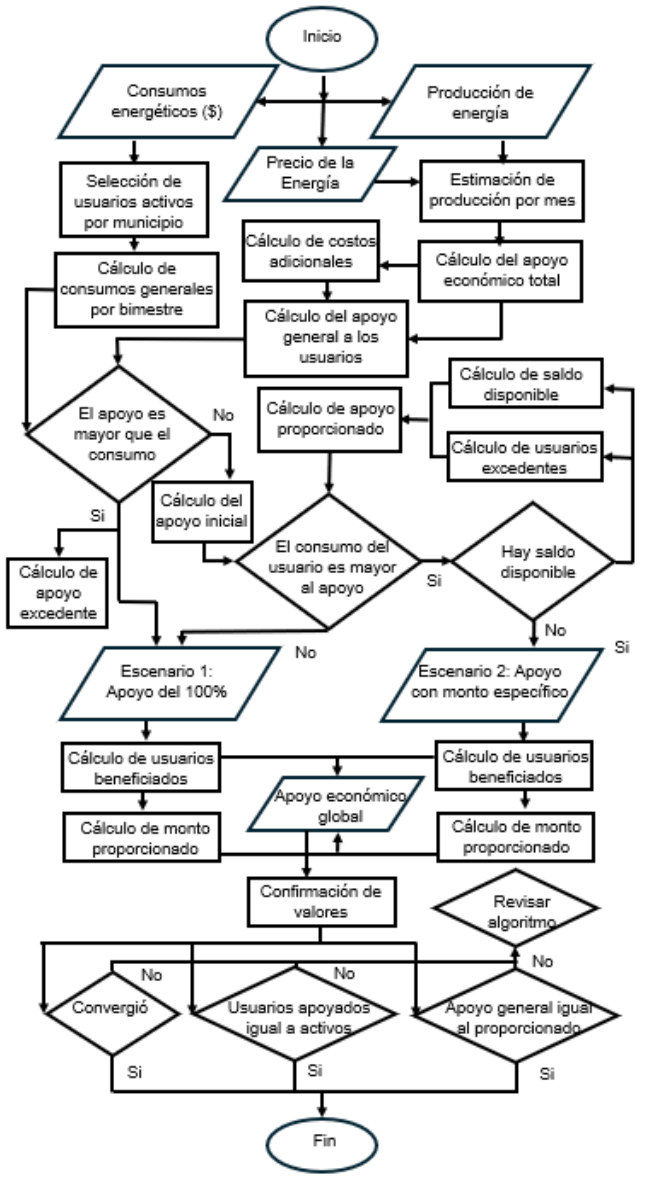


Figura 6. Algoritmo de Distribución.

RESULTADOS

Como se mencionó antes, actualmente no existe un modelo de contraprestación de servicios colectivos con un enfoque social, como el que plantea este programa.

Los esquemas vigentes penalizan en gran medida el precio de la energía, lo que limita el desarrollo de iniciativas de este tipo: aunque son técnicamente viables, resultan inviables desde el punto de vista administrativo.

Por ello, surge la necesidad de proponer un nuevo esquema, ilustrado en la Figura 6, que consiste en distribuir equitativamente los recursos mediante una bolsa colectiva de dinero.

En la presente propuesta, el alcance se limita al análisis numérico y al desarrollo de un algoritmo de distribución que permite evaluar la viabilidad económica y social del modelo, sin profundizar aún en la definición de un marco jurídico-administrativo. Bajo este enfoque, se plantea un mecanismo preliminar de operación sustentado en un padrón de beneficiarios validado por la CFE, el cual incluiría únicamente a usuarios con servicio eléctrico activo y residencia en el municipio donde se localice la planta interconectada.

El esquema contempla la celebración de un contrato o convenio especial con la CFE, a través del cual se formalice la distribución de los beneficios obtenidos de la planta. La denominada “bolsa colectiva” se fundamenta en un proceso de asignación iterativa y equitativa de los recursos, que pueden expresarse en dinero o en kilowatt-hora equivalentes, según lo que se establezca en el convenio. En caso de que un usuario registre un consumo menor al apoyo asignado, el excedente generado se acumula en una nueva bolsa que se redistribuye entre los usuarios con mayor consumo, repitiendo el procedimiento hasta que los recursos se agoten o se cubra el consumo filtrado de los beneficiarios.

En cuanto a la penetración de este modelo en México, cabe destacar que actualmente no existe un esquema operativo con estas características de impacto social. Por ello, esta propuesta se plantea como una prueba piloto impulsada desde el sector público, enfocada en el beneficio directo de la comunidad. Si bien su primera aplicación estaría orientada al sector doméstico, el modelo también tiene el potencial de ampliarse a servicios eléctricos administrados por los gobiernos municipales, tales como el alumbrado público, las instalaciones del palacio municipal o los sistemas de bombeo de agua potable.

En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos para el municipio de Bavispe, donde se muestra la variación de tres variables en función del precio de venta de la energía. Estas variables reflejan el nivel de apoyo que podría percibirse tanto de manera conjunta como individual, comparando dichos valores entre sí y con la facturación doméstica filtrada.

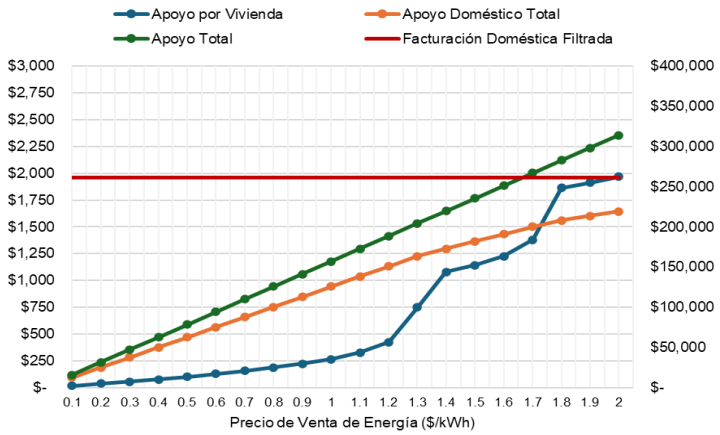


Figura 7. Variación del Apoyo Económico (caso Bavispe).

Tabla 5. Beneficio Energético del Net Metering Colectivo (caso Bavispe).

Periodo	Monto Máximo Proporcionado (kWh)	Impacto Energético en los UDM
Ene-Feb	772.94	94%
Mar-Abr	1500.00	141%
May-Jun	1174.14	98%
Jul-Ago	282.17	47%

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para el esquema de net metering colectivo mediante bolsa de energía, mostrando tanto la asignación potencial de energía a un usuario individual como el impacto agregado sobre los consumos domésticos del municipio. Para la estimación se consideró que el 80 % de la producción fotovoltaica se canalizaría hacia los usuarios residenciales, mientras que el 20 % restante se destinaría a cubrir la demanda de los servicios municipales.

Tabla 6. Precio de Energía por Municipio para Percibir Los Apoyos Indicados.

Municipios	Apoyo $ 200	Apoyo $ 300
Bavispe	$ 0.84	$ 1.05
Bacerac	$ 0.60	$ 0.73
Huachinera	$ 0.61	$ 0.67
Bacadéhuachi	$ 0.64	$ 0.80

En la Tabla 6 se presenta, para cada municipio, el precio de la energía necesario para alcanzar el mínimo apoyo bimestral proporcionado por la planta que se esperaría tener, sin que esto implique necesariamente su rentabilidad. Para determinar la viabilidad económica se requeriría un estudio de costo nivelado de la planta, que permita compararlo con los precios de venta bajo los distintos esquemas (venta total de energía, net metering colectivo o monetario) y con los costos de suministro de CFE en la región, con el fin de evaluar un esquema que resulte beneficioso para todos. Las bases para este análisis se presentan en las secciones previas.

CONCLUSIONES

El precio marginal local para el nodo donde se encuentran interconectadas las plantas fotovoltaicas se estimó en 0.14 $/kWh para los últimos 12 meses.

Por otro lado, el costo promedio de la energía eléctrica en los periodos analizados para los cuatro municipios oscila entre 1.21 y 1.37 $/kWh. El costo de que tiene CFE para suministrar esa energía en esa región ronda desde 2.12 $/kWh hasta 2.19 $/kWh.

Para que los usuarios de estos municipios reciban, en promedio, un apoyo económico bimestral de entre $200 y $300, el precio de la energía debería situarse entre 0.67 y 0.81 $/kWh.

El estudio presentado sienta las bases para realizar un análisis más profundo que contemple aspectos como los costos de la tarifa de suministro básico, el costo nivelado del proyecto, los costos residenciales de los usuarios y los precios de los esquemas actuales de contraprestación de servicios. Este enfoque permitirá negociar un esquema más benévolo para programas de carácter social, considerando de manera integral el panorama de todas las partes involucradas. De esta forma, se buscará generar beneficios mutuos y fomentar el desarrollo de políticas públicas adecuadas para proyectos de esta índole.

REFERENCIAS

[1] Durazo Montaño A. (2022). *Primer Informe de Gobierno 2021-2022, versión estenográfica*, 13 de octubre. Gobierno del Estado de Sonora, México. Disponible en: www.sonora.gob.mx

[2] Instituto Nacional de la Economía Social (s.f.). *Guía de cooperativas de energía sustentable en México*. Gobierno de México. Disponible en: www.gob.mx

[3] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (s.f.). *El estado de la generación distribuida solar fotovoltaica en América Latina y el Caribe*. UNEP, Nairobi, Kenia.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE LAS PARCELAS AGROVOLTAICAS DEL PROYECTO PASE

González-Camarillo Héctor, Ángel-Ruiz Edson O., Pérez-Rábago Carlos, Sánchez-Juárez Aarón**
** Instituto de Energías Renovables, UNAM, AP 34, Temixco, 62580, Morelos, México. E-mail capr@ier.unam.mx

Ruiz-Sánchez Teresa
Investigador independiente, truizsmx@gmail.com.

RESUMEN

El proyecto PASE (Parcela Agrovoltaica Sostenible y Educacional) surge como respuesta a la problemática de demanda energética bajo una premisa sustentable que permita el uso eficiente del suelo para producción eficiente de alimentos. Así, inspirado en los Objetivos de la Agenda 2030 y de las experiencias científicas y tecnológicas del IER-UNAM, se plantea un sistema agrovoltaico (SAFV) que combina la producción agrícola y generación de energía solar en un mismo terreno. Cabe recalcar que, a este proyecto se le incorporó la captación de agua, la cual no se ha reportado en otros SAFV desarrollados en el mundo. Para ello, PASE cuenta con infraestructura energética conformada básicamente por una estructura metálica de 3.5 m de altura con 72 módulos fotovoltaicos; instalaciones para cultivo que incluyen 24 microparcelas bajo cubierta y 6 a cielo abierto para poder hacer comparativas del desarrollo de las especies; y el sistema de captación de agua que, además de tuberías en el extremo inferior de los módulos, incluyen un tanque de almacenamiento de 140 m³ y riego automatizado por goteo. El sistema de riego por goteo controla 30 electroválvulas y monitorea humedad en tiempo real con sensores conectados a microcontroladores Arduino y un controlador CompactRIO. El sistema de adquisición de datos implementado en 2024, emplea dos estaciones Campbell CR6 y un multiplexor para registrar más de 32 variables (clima, radiación, humedad y temperatura del suelo, etc.), con almacenamiento y transmisión vía red inalámbrica. Los datos se gestionan con LabVIEW, que permite visualización, control remoto y almacenamiento en una base de datos. El seguimiento a dichas variables permitirá obtener información relevante para determinar la eficiencia energética debida al enfriamiento por evo transpiración de los cultivos, así como el aprovechamiento del recurso hídrico y el grado de afectación en las especies cultivadas.

ABSTRACT

The PASE project emerged as a response to the environmental effects of development and overpopulation: growing energy demand, agricultural land use changes, water scarcity, and greenhouse gas emissions. Inspired by the 2030 Agenda and previous experiences at IER-UNAM, the project proposes an agrovoltaic system (SAFV) that combines agricultural production, water harvesting, and solar energy generation on a single plot. The infrastructure includes a 3.5 m high metal structure with 72 photovoltaic modules, 24 covered microplots and 6 open sky control plots, as well as a water harvesting system with a 140 m³ storage water tank, automated drip irrigation, and a training and food processing shed. The data acquisition system, implemented in 2024, uses two Campbell CR6 stations and a multiplexer to record more than 32 variables (weather, radiation, soil humidity and temperature, etc.), with storage and transmission via a wireless network. The drip irrigation system controls 30 solenoid valves and monitors humidity in real time with sensors connected to Arduino microcontrollers and a CompactRIO controller. Data is managed with LabVIEW, which allows visualization, remote control, and storage in a database. Overall, PASE functions as a demonstration and educational project that seeks to improve agricultural productivity, resource efficiency, and the quality of life of farmers in Mexico City.

Palabras claves: Alimentos sustentables, Aprovechamiento del recurso hídrico, Agrovoltaico

INTRODUCCIÓN

Entre los efectos adversos que las acciones de desarrollo y sobrepoblación han generado en nuestro planeta, se encuentran una demanda excesiva de energía, con deficiencias en las zonas rurales de nuestro país. Así, la expansión de las zonas habitacionales e industriales que acaparan áreas de cultivo con afectaciones en el ciclo hídrico que han originado deficiencias de agua potable en diversas regiones de México. Adicionalmente, se producen altas emisiones de gases de efecto invernadero. Lo anterior, ha impulsado a nuestro gobierno, así como otros países consideran y proponen proyectos que fomenten el uso sustentable de los recursos naturales.

Por otra parte, los convenios internacionales que establecen como prioridad implementar acciones para mitigar los efectos del cambio climático, como la Agenda 2030 de la ONU, influyen en las políticas nacionales de diversos sectores. Como resultado de esta agenda, en

https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltaica-de-mexico/

2021, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México afirmó que "este sector está llamado a reinventar los sistemas agroalimentarios de manera sostenible y a abastecer de alimentos sanos, inocuos, nutritivos y, sobre todo, asequibles a toda la población".

Dentro de este marco, la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) de la Ciudad de México, en su búsqueda de proyectos que mejoren la calidad de vida de las poblaciones rurales, especialmente en zonas agrícolas sin acceso a la energía eléctrica, estableció una colaboración con el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM. El objetivo fue desarrollar un proyecto que combinara cultivos y generación de energía "*in situ*", contribuyendo a la conservación del suelo en la Ciudad de México.

Así, con base en la experiencia adquiridas por personal académico del IER-UNAM, se propuso a la SECTEI un proyecto que se basó en el concepto de **Sistemas Agrovoltaicos (SAFV)**. Esto significa el uso dual de la tierra: generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos **(SFV)** y cultivo de plantas debajo o alrededor de los módulos fotovoltaicos. Adicionalmente incrementando el espectro de sustentabilidad del sistema se añadió la captación de agua para el propio uso de los cultivos. Algo no reportado previamente en otros SAFV,o, representando así una innovación.

El concepto de agrovoltaico fue originalmente propuesto y desarrollado en Alemania en 1981 [1] [4] y ha ganado notoriedad en la última década, principalmente a partir de estudios en Francia que muestran que podría incrementarse la productividad global de la tierra en un 35 a 73% [2]. Además, un artículo de Nature (2019) señala que, para satisfacer la demanda energética mundial, sería suficiente con emplear solo el 1% de los terrenos cultivables para generación solar [3] [5].

PROYECTO PASE

El proyecto PASE es un laboratorio de investigación y formación de recursos humanos que busca contribuir a la conservación del suelo en la región y mejorar la calidad de vida de los productores del campo.Para cumplir con su objetivo de ser un SAFV, la infraestructura del PASE incluye: una **Estructura Metálica Reticular (EMR)**, sobre la cual se instalaron 72 Módulos Fotovoltaicos (MFV) en seis hileras separadas 1.45 m entre sí, formando la **Cubierta Fotovoltaica (Cub-FV)**. Para el cultivo de diferentes especies se situaron **Micro Parcelas (Mi-PA)** que consisten en cajones de madera cuadrados de 2.5 m de lado y 20 cm de altura. 24 **Mi-Pa** se colocaron en la Cub_FV y 6 **Mi-Pa** a cielo abierto que, sirven como "cultivos testigo" para fines de comparación de la fenología de los vegetales. Ver figura 1

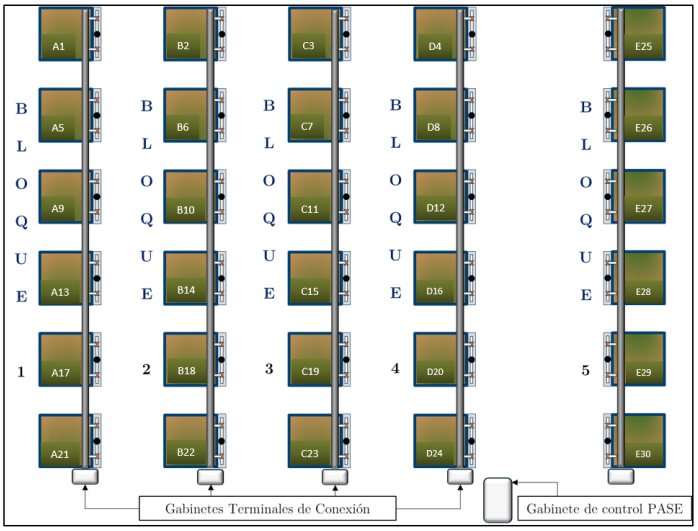


Figura 1: distribución de las parcelas agrovoltaicas PASE

Por otro lado, se cuenta con un sistema de aprovechamiento de agua. Éste se integra con un sistema de recolección en la **Cub-FV** a través de una serie de canalizaciones que recoge el agua de los paneles y se transporta a un **Tanque de Almacenamiento (TA)** de 140 m^3. Adicionalmente, incluye un sistema automatizado de monitoreo de la humedad del suelo y el control del riego por goteo, así como, un sistema de adquisición de datos (DAQ por sus siglas en inglés). El DAQ cuenta con sensores que permiten capturar información climatológica tanto fuera como dentro de la Cub-FV para determinar también el desempeño eléctrico del SFV. La Figura 2 muestra una fotografía de la infraestructura principal que integran al proyecto agrovoltaico **PASE**.

https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltaica-de-mexico/



Figura 2: Fotografía de la infraestructura que integra al proyecto agrovoltaico PASE

PASE cumplió con su objetivo inicial y actualmente se pretende que éste sea un laboratorio de investigación y formación de recursos humanos para lo cual se requirió la implementación de sistemas de control y adquisición de datos con el fin de obtener información relevante para determinar la eficiencia energética de estos sistemas, así como el aprovechamiento del recurso hídrico y el grado de afectación en las especies cultivadas. Por ello, a continuación, se describen los principales componentes.

..

SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO POR GOTEO Y MONITOREO DE HUMEDAD DEL SUELO

El sistema de riego por goteo consta del control de 30 electroválvulas de 24 Vdc (EV) que accionan el riego por goteo del mismo número de parcelas con base en el monitoreo en tiempo real a través de sensores de humedad (ver figura 3).

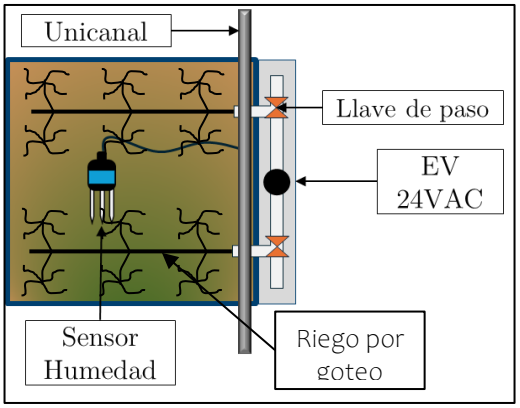


Figura 3: Esquema del sistema de riego por goteo

El gabinete de control del sistema de riego está diseñado para actuar dichas electroválvulas con un controlador embebido (CompactRIO 9066) de National Instruments. Estas señales de control se envían mediante 4 módulos de salidas digitales (NI 9474) de 24VDC de alta velocidad. Por otra parte, la señal los sensores de humedad (NPK Soil Sensor) cuentan con entradas analógicas de 8 bits con un rango de 0 – 5V, mediante dos Arduino 2560 R3 conectados a un Ethernet Shield v2 para transmisión de señales mediante protocolo TCP/IP.
Para realizar la adquisición de los datos de humedad se cuenta con dos microcontroladores Arduino MEGA2560 acoplados a una unidad Ethernet Shield para la comunicación. Estos microcontroladores se configuran en modo “Maestro – Esclavo” los cuales se comunican mediante bus I2C. El arduino “esclavo” adquiere las señales de 15 sensores de humedad y las envía al arduino “Maestro”, que a su vez adquiere las 15 señales de humedad restantes y las publica a una página web a través del protocolo TCP/IP usando el módulo Ethernet Shied. El diagrama de bloques que se presenta en la figura 4, muestra la configuración gráfica del proceso de adquisición y control del

https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltaica-de-mexico/

riego.

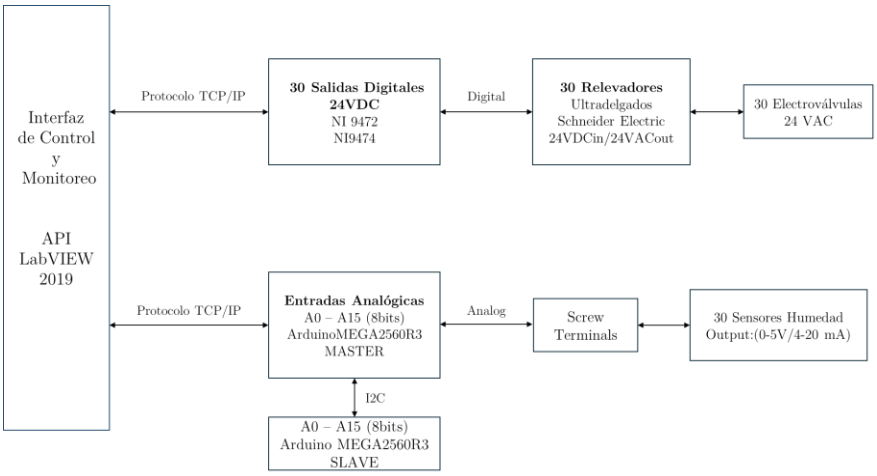


Figura 4: Diagrama de bloques del sistema de control del riego de las parcelas

Por otro lado, la interfaz de usuario para monitoreo y control de la PASE está diseñada en un entorno de programación gráfica LabVIEW 2019. Éste permite desarrollar interfaces integradas mediante la conectividad con controlares propios como cRIO-9066, y con externos tal como Arduino IDE. La figura 5 muestra una imagen de la pantalla típica del sistema de control del riego y monitoreo de la humedad de cada una de las parcelas.



Figura 5: Sistema SCADA del control del riego de las parcelas

Así mismo, una función dentro a la interfaz en LabVIEW permite grabar en tiempo real los datos adquiridos de las 30 señales de humedad y guardarlos en una hoja de datos en Excel. Este archivo se genera automáticamente al ejecutar la interfaz y registra los datos en un intervalo de tiempo determinado.

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Dado el número de sensores eléctricos y ambientales propuesto, se recomienda el uso de un adquisidor de datos robusto y confiable para el almacenamiento de los datos medidos, así como de un buen protocolo de comunicación para el envío de la información al servidor para el análisis y visualización.

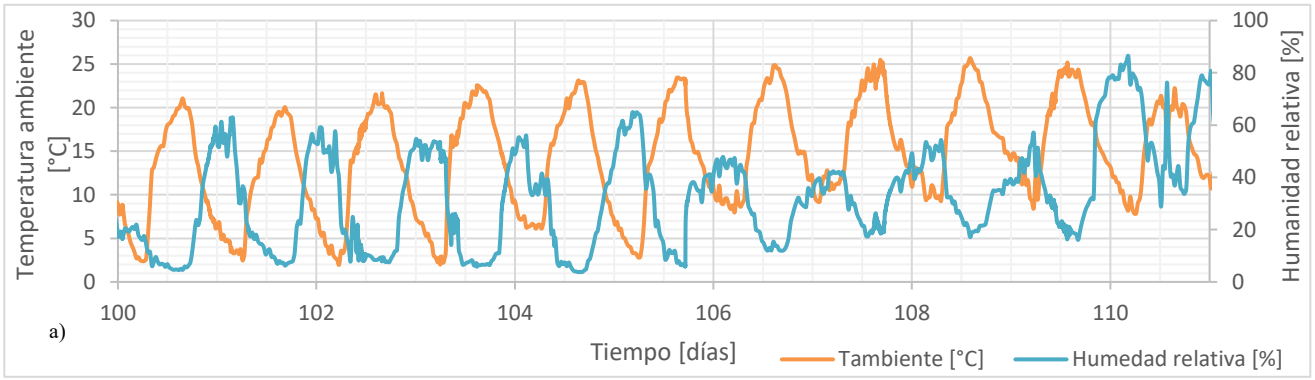
El número de entradas analógicas y digitales es soportado de manera adecuada por el adquisidor de la marca Campbell modelo CR6. El CR6 proporciona una comunicación rápida, bajos requisitos de energía, tamaño compacto. alta precisión y resolución de entrada analógica.

https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltaica-de-mexico/

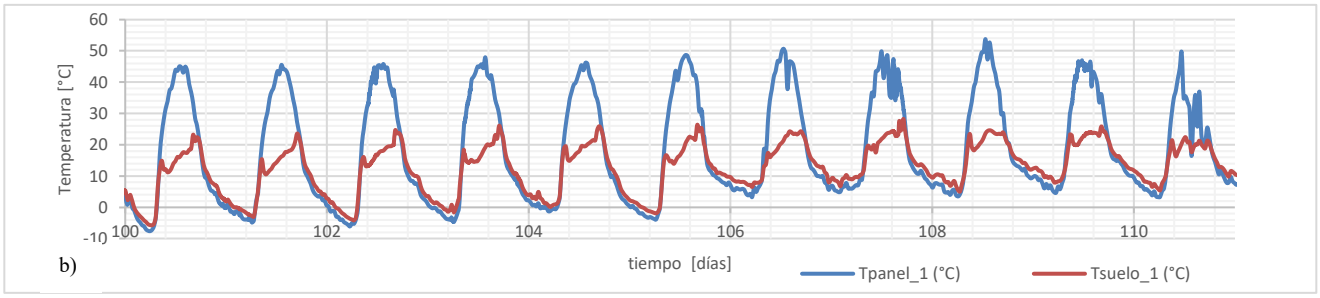
Utiliza terminales universales para permitir una conexión a prácticamente cualquier sensor: analógico, digital o inteligente. Puede operar en ambientes extremos con un rango de operación desde -40° a +70 °C. El adaptador se conecta directamente al puerto USB de una computadora, es capaz de detectar pequeños cambios en los valores de los datos con mediciones de alta resolución y también puede conectarse directamente a Ethernet por el protocolo RJ-45. Incluye una unidad de tarjeta microSD para requisitos de memoria extendida.

El acceso de la información se realiza a través de una página web, donde la propia tarjeta funciona como servidor con descarga a través de un navegador. Dado que la cantidad de parámetro a medir son más 32, se usa un multiplexor de la marca Campbell modelo AM16/32B. La adquisición de los datos se realiza con el promedio de cada minuto, las 24 horas del día, todo el año. Se hace un almacenamiento en las propias unidades CR6, y se tiene acceso a las estaciones, a través de una red inalámbrica. Las variables se clasificaron en: temperatura ambiente, humedad relativa, radiación global, precipitación, velocidad y dirección del viento; humedad y temperatura del suelo;, y estratificación de temperaturas debajo de la cubierta fotovoltaica. Este sistema se implementó en agosto del 2024, por lo que ya se cuenta con el histórico de más un año.

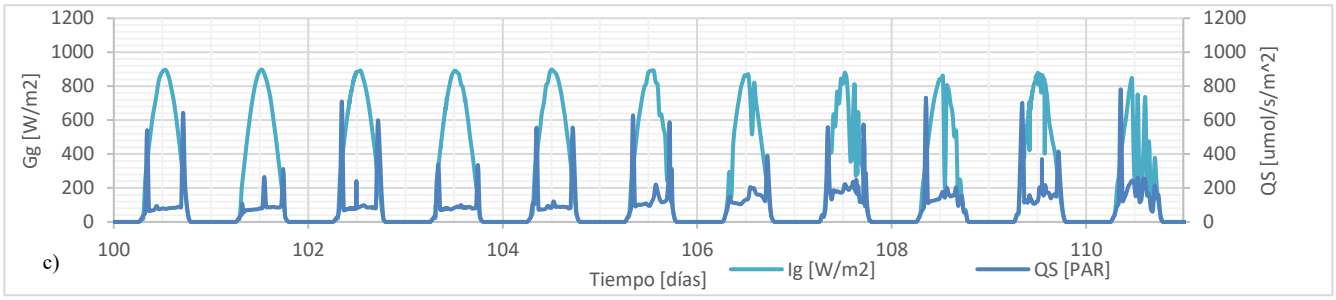
A manera representativa, en la figura 6 se muestran 11 días de las variables medidas y registradas por el sistema, del 11 al 22 de abril del 2025. Estas variables son: a) Temperatura ambiente (T ambiente) y humedad relativa (HR), b)Temperatura del panel numero 1 (T panel_1) y la temperatura del suelo de la parcela 1 (Tsuelo_1), c) Irradiancia global horizontal (G_G) y la radiación fotosintéticamente activa debajo de la cubierta fotovoltaica (QS), c), d) humedad del suelo de las parcelas de la 1 a la 4 (HS).



a)



b)



c)

https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltaica-de-mexico/

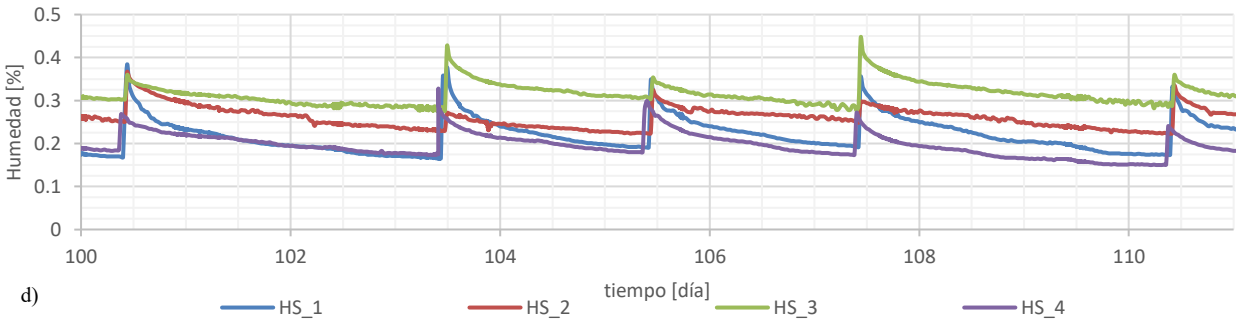


Figura 6: Gráficos de las variables de PASE del 11 al 22 de abril del 2025: a) T ambiente HR, b) Tpanel_1 y Tsuelo_1, c) Ig y QS, d) HS.

Debido a que este periodo de tiempo es de secas, en la figura 6.a se observa que la humedad ambiente es relativamente baja (menos de 80%) y la temperatura ambiente tiene un máximo de 25 °C y un mínimo de 4°C, lo que nos indica es un momento idóneo para la siembra de ciertas especies. Por otro lado, en la figura 6. b, se presentan las temperaturas de un panel y su respectiva temperatura de la parcela que cubre. En ella se ven registros de temperaturas en el panel por arriba de los 50 °C, mientras que, la del suelo no llega a los 25°C. Para poder desarrollar análisis comparativos del aumento de la eficiencia de producción de energía eléctrica por los paneles, se ha solicitado al SNM información de la estación meteorológica más cercana.

Por otro lado, en la figura 6.c, se observa la radiación global (Gg) en donde en los primeros cinco días se contaban condiciones de cielos despejados, por lo que se obtuvieron radiaciones cercanas a las 900 W/m^2. También se aprecia que, en el interior de la cubierta la radiación fotosintéticamente activa (PAR) se presentan dos picos, uno en el de amanecer y otro al atardecer, cuando hay radiación en el interior de la cubierta. Por último, en la figura 6.d, se muestra la humedad del suelo de cuatro parcelas. En esta gráfica se observa la permeabilidad del suelo para retener la humedad y con ello establecer los parámetros máximos y mínimos de humedad que requieren los cultivos.

CONCLUSIONES

PASE al ser un proyecto demostrativo y educativo de la tecnología agrovoltaica, cuenta con un sistema de monitoreo de todas las variables que intervienen en los cultivos, tanto meteorologías, de recurso solar, de producción de la energía eléctrica, así como las variables de los propios cultivos como temperatura y humedad de suelo. Como puede observarse, el análisis de los diversos parámetros que se monitorean en el SAFV, permitirá ajustar las condiciones de riego para cada especie a cultivada, el impacto de la cubierta fotovoltaica en los cultivos para optimizar el tiempo de cosecha, las especies que producen mayor evotranspiración para eficiencia de producción de energía, entre otros. Por lo anterior, el proyecto PASE se ha convertido en un laboratorio fenológico para obtener información que apoye a los productores agrícolas de la región e incentiven aplicaciones tecnológicas sustentables en nuestro país.

REFERENCIAS

[1]. Iberdrola. (s.f.). Energía agrovoltaica, cuando la agricultura y las renovables se dan la mano. Recuperado en feb. de 2024, de https://www.iberdrola.com/innovacion/energia- agrovoltaica

[2]. Fundeen. (s.f.). Energía agrovoltaica: cómo funciona y qué ventajas tiene - Cambio climático. Recuperado en feb. de 2024, de https://www.fundeen.com/blog-energias- renovables/energia-agrovoltaica-que-es-funcionamiento

[3]. Adeh, E.H., Good, S.P., Calaf, M. et al. (2019). Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. Sci. Report, 9 (11442). https://doi.org/10.1038/s41598-019-47803-3

[4]. Harshavardhan Dinesh, Joshua M. Pearce, (2016). The potential of agrivoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 54, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024

[5] Stefano Amaducci, Xinyou Yin, Michele Colauzzi, 2018, Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production, Applied Energy, Volume 220, Pages 545-561, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081.

https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltaica-de-mexico/

Edificios Bioclimáticos/ Instalaciones Solares de Baja Temperatura

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2175	Diseño, construcción e instrumentación de un concentrador solar lineal tipo Fresnel con seguimiento solar para aplicaciones térmicas de media temperatura	Francisco Salazar Onofre
1356	Estrategia para construir edificios bioclimáticos, energéticamente eficientes y/o con energías renovables en el actual escenario mexicano	Iván Oropeza Pérez
0123	Diseño de un edificio educativo demostrativo de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo	Guadalupe Huelsz

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE UN CONCENTRADOR SOLAR LINEAL TIPO FRESNEL CON SEGUIMIENTO SOLAR PARA APLICACIONES TÉRMICAS DE MEDIA TEMPERATURA

Richard A. Canche Juarez, Francisco Salazar Onofre, Ángel J. Fonseca Chávez, Andrea M. Koh Arguello, Jorge O. Aguilar Aguilar, Víctor M. Sánchez Huerta
Departamento de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Av. Boulevard Bahía s/n, Chetumal, Quintana Roo, 77098, México, 9838350300 ext. 5186,
2128555@uqroo.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño, construcción y evaluación experimental de un concentrador solar lineal tipo Fresnel de bajo costo, orientado a aplicaciones térmicas de media temperatura. El prototipo, con un área óptica de 0.3 × 0.4 m, incorporó un sistema de seguimiento solar de un solo eje y un circuito hidráulico con tubo absorbedor de cobre, con el fin de maximizar la captación y transferencia de energía solar hacia el fluido de trabajo. Para su fabricación se emplearon materiales accesibles y resistentes a condiciones ambientales, como acrílico con película reflectiva y estructura de madera, lo que permitió asegurar durabilidad, funcionalidad y bajo costo de construcción.

Las pruebas experimentales se realizaron el 17 de julio de 2025 en Chetumal, Quintana Roo, registrando parámetros clave como irradiancia solar, temperaturas de entrada y salida del fluido y caudal. Los resultados obtenidos mostraron una eficiencia térmica promedio del 39%, lo cual confirma la capacidad del sistema para transformar la radiación solar incidente en energía térmica útil. Asimismo, se lograron incrementos significativos en la temperatura del fluido, validando su potencial en aplicaciones prácticas como el precalentamiento de agua o procesos industriales de media temperatura.

El análisis de resultados permitió identificar factores limitantes en el desempeño, entre ellos la recirculación del fluido y pérdidas térmicas asociadas al diseño del receptor y a la conducción del calor. Se concluye que mejoras en la geometría del receptor y en la gestión del flujo hidráulico podrían incrementar la eficiencia en futuras iteraciones. En síntesis, este estudio demuestra la viabilidad técnica de los concentradores Fresnel como tecnologías limpias, sostenibles y accesibles, con un alto potencial de implementación en contextos educativos, comunitarios e industriales de pequeña y mediana escala.

ABSTRACT

This study presents the design, construction, and experimental evaluation of a low-cost linear Fresnel solar concentrator aimed at medium-temperature thermal applications. The prototype, with an optical area of 0.3 × 0.4 m, integrated a single-axis solar tracking system and a hydraulic circuit with a copper absorber tube to maximize solar energy collection and heat transfer to the working fluid. For its fabrication, accessible and weather-resistant materials were used, such as acrylic with reflective film and a wooden structure, ensuring durability, functionality, and low manufacturing cost.

Experimental tests were conducted on July 17, 2025, in Chetumal, Quintana Roo, recording key parameters such as solar irradiance, fluid inlet and outlet temperatures, and mass flow rate. The results showed an average thermal efficiency of 39%, confirming the system's capability to convert incident solar radiation into useful thermal energy. Significant increases in the working fluid temperature were also achieved, validating its potential for practical applications such as water preheating or medium-temperature industrial processes.

The analysis of results identified limiting factors in system performance, including fluid recirculation and thermal losses associated with the receiver design and heat conduction. It is concluded that improvements in the receiver geometry and fluid flow management could enhance efficiency in future designs. In summary, this study demonstrates the technical feasibility of Fresnel concentrators as clean, sustainable, and affordable technologies, with strong potential for implementation in educational, community, and small- to medium-scale industrial contexts.

Palabras claves: Energía solar fototérmica, concentrador Fresnel, eficiencia térmica, seguimiento solar, calentamiento de agua.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía solar térmica de concentración constituye una de las alternativas más prometedoras para la generación sostenible de calor y electricidad, especialmente en regiones con elevada radiación solar durante todo el año. Entre las distintas configuraciones tecnológicas, el concentrador solar tipo Fresnel se presenta como una opción viable para aplicaciones de pequeña y mediana escala, debido a su simplicidad constructiva, menor costo frente a sistemas parabólicos y facilidad de integración en entornos didácticos y de investigación (Kalogirou S. , 2009)

El principio de funcionamiento de un sistema Fresnel se basa en la disposición de múltiples espejos planos que reflejan la radiación solar hacia un receptor lineal fijo. La correcta orientación de cada espejo se calcula a partir de la geometría solar y la ley de la reflexión, de modo que el ángulo de incidencia entre el rayo solar y la normal al espejo se mantenga cercano a cero en la dirección del receptor. La posición aparente del sol se describe mediante parámetros como la latitud (φ), la declinación solar (δ), el ángulo horario (ω) y el ángulo cenital (θ_z), cuya determinación precisa es fundamental para optimizar la captación de energía ((Duffie J. A., 2013) (Goswami, 2015).

El diseño óptico de un concentrador Fresnel no solo requiere calcular las posiciones y orientaciones de los espejos, sino también considerar factores de eficiencia óptica como la reflectividad de la superficie (ρ), la transmisividad de posibles cubiertas (τ) y la absortividad del

receptor (α). Estos parámetros influyen directamente en la fracción de radiación útil que llega al fluido de trabajo, por lo que la selección de materiales y la limpieza de las superficies reflectoras son aspectos críticos para el rendimiento global del sistema (Kalogirou S. , 2014).

En el contexto térmico, la energía útil Q_u que el sistema transfiere al fluido se calcula a partir del caudal másico y la diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del receptor. Esto permite estimar la eficiencia térmica ηt del colector, que relaciona la energía aprovechada con la irradiancia media incidente y el área efectiva de captación. La medición de la irradiancia global, mediante un piranómetro calibrado, proporciona la referencia necesaria para evaluar el desempeño real frente a las condiciones teóricas previstas (Duffie J. A., 2020).

El presente trabajo describe el diseño, construcción, instrumentación y evaluación experimental de un prototipo de concentrador solar tipo Fresnel con seguimiento solar de un solo eje (este-oeste), implementado en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, México (latitud 18.5141° N, longitud −88.3033° O). Esta ubicación presenta condiciones favorables de radiación directa durante gran parte del año, lo que la convierte en un escenario idóneo para validar el funcionamiento del sistema. El proyecto integra herramientas de modelado CAD y simulación óptica para predecir el comportamiento del concentrador, así como un sistema de control automatizado mediante microcontrolador ESP32 y motor a pasos para garantizar el seguimiento solar continuo.

La evaluación experimental se centró en una jornada específica —el 17 de julio de 2025— con el objetivo de caracterizar el comportamiento térmico y óptico del prototipo en condiciones reales, comparando los resultados medidos con las predicciones obtenidas en la etapa de simulación. Los resultados permitirán identificar áreas de mejora en el diseño y operación del sistema, y servirán como referencia para futuras aplicaciones educativas y de generación distribuida de energía térmica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El prototipo de concentrador solar tipo Fresnel se construyó utilizando materiales de bajo costo, disponibilidad local y alta resistencia a las condiciones ambientales propias de la zona de Chetumal, donde la cercanía al mar y la humedad podrían afectar materiales menos resistentes a la corrosión. La estructura principal combinó acrílico y madera, siendo el acrílico elegido por su facilidad de corte y bajo peso, mientras que la madera proporcionó rigidez y estabilidad a la base y soportes del sistema.

Los espejos consistieron en piezas de acrílico recubiertas con película reflectiva altamente eficiente, montadas sobre baleros y tornillería que permitieron ajustes de inclinación precisos, fundamentales para garantizar la correcta concentración de la radiación solar en el receptor tubular. La elección de baleros para los espejos permitió minimizar la fricción durante el movimiento del sistema de seguimiento, incrementando la durabilidad y reduciendo el consumo energético del motor a pasos.

El receptor consistió en un tubo de cobre de 1” de diámetro, seleccionado por su excelente conductividad térmica y facilidad de conexión a sistemas de tubería estándar. Este tubo se integró a un circuito hidráulico con bomba y mangueras de ¼”, permitiendo un flujo constante y controlado del fluido térmico. Se emplearon recipientes de almacenamiento de agua para simular las condiciones de operación y facilitar la medición de energía útil.

Para la instrumentación y control del concentrador se utilizaron un motor a pasos 28BYJ-48 de 5 V DC, dos microcontroladores ESP32 (uno para el sistema de monitoreo y el otro para el sistema de seguimiento), Arduino Uno para programar los microcontroladores, además de protoboard y cables de conexión. El diseño y análisis previo se realizó mediante software de modelado CAD (SolidWorks 2024) y simulación óptica (Tonatiuh), garantizando que los componentes y ángulos de los espejos fueran óptimos antes de la fabricación física.

Diseño CAD y simulación óptica

En la figura 1 se muestra uno de los pasos iniciales y fundamentales, el modelado CAD, el cual permite representar con precisión los componentes del colector: espejos, soporte estructural, receptor y sistema de seguimiento. El diseño CAD fue esencial para planificar la manufactura, generar planos para corte láser de las piezas de acrílico y madera, y simular el comportamiento térmico y óptico del sistema. La estructura propuesta se diseñó para ser resistente a la corrosión, fácil de mantener y con un bajo costo de fabricación.

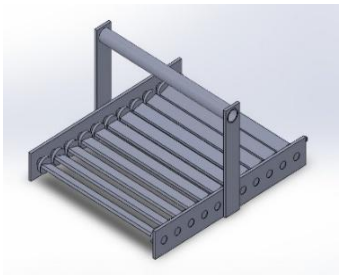


Figura 1. Diseño CAD del prototipo en el software SolidWorks 2024.

El trazado de rayos se muestra en la figura 2, este se realizó mediante el software Tonatiuh, basado en principios de geometría solar. Esta simulación permitió predecir la trayectoria de la radiación solar reflejada y evaluar la distribución de irradiancia sobre el receptor. Para la simulación se consideró la toma de mediciones, el 17 de julio de 2025 a las 9:00 h, configurando el azimut, el cenit y las coordenadas geográficas del sitio (18.5141, -88.3033). Se proyectaron 500 rayos para evaluar pérdidas por desviaciones angulares, sombras y errores de seguimiento, garantizando un diseño robusto y eficiente.

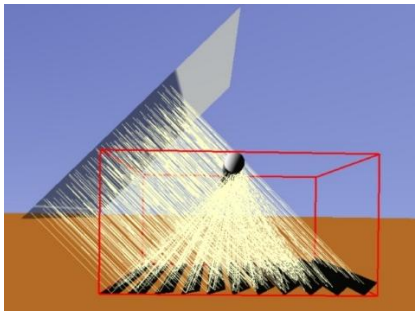


Figura 2. Trazado de rayos en el software Tonatiuh para las 9 horas del día 15 de mayo del 2025.

La caracterización del flujo solar incidente sobre el tubo receptor mostró un patrón ligeramente asimétrico, con flujo máximo de 5147.13 unidades, flujo promedio de 1730.86 y uniformidad de 0.97595. El punto de máxima concentración se localizó en (92.5631; 332.5), reflejando el efecto del ángulo de incidencia solar sobre la distribución del flujo y proporcionando información clave para ajustes finos en la posición del receptor.

Construcción

El montaje del concentrador se inició con la preparación de la base de madera, asegurando nivelación y estabilidad, ya que cualquier inclinación no deseada podría alterar la precisión de la concentración solar. Los soportes de acrílico y madera se instalaron cuidadosamente para sostener los espejos y el tubo receptor, permitiendo ajustes finos en los ángulos de inclinación de cada espejo según los resultados de simulación.

Se fijaron los espejos con tornillería y baleros, garantizando movilidad y resistencia, y se aplicó la película reflectiva de manera uniforme para evitar burbujas o irregularidades que afectaran la reflexión de la luz. El tubo de cobre se colocó sobre soportes de madera diseñados para mantener su posición exacta en el eje focal lineal, se conectó al sistema de bombeo y recirculación de agua, asegurando un flujo continuo del agua.

Finalmente, se integró el sistema de seguimiento solar de un solo eje debidamente calibrado, para garantizar la correcta orientación de los espejos durante todo el día. Este procedimiento incluyó pruebas de movimiento y ajustes para minimizar errores mecánicos y asegurar que el desplazamiento programado coincidiera con la irradiancia real del sol. El Concentrador Fresnel ya construido se muestra a continuación en la figura 3:

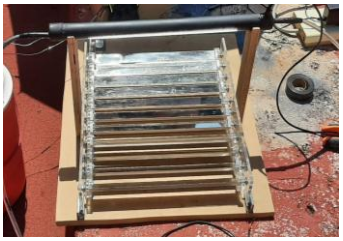


Figura 3. Concentrador Fresnel construido.

Instrumentación y mediciones

Sistema de seguimiento solar. Para garantizar que el plano de espejos estuviese constantemente alineado con el Sol, se empleó un sistema de seguimiento solar de un eje (orientación Este-Oeste), controlado electrónicamente. El sistema consistió en:

- Motor paso a paso 28BYJ-48, alimentado a 5 V DC.
- Driver ULN2003 para la gestión de las fases del motor.
- Microcontrolador ESP32, encargado de ejecutar el algoritmo de seguimiento.
- Programación en Arduino IDE, con una rutina que activaba el motor cada 4 minutos, generando un avance angular equivalente a 1 grado, lo que representó un desplazamiento total de 15 grados por hora, siguiendo el movimiento aparente del Sol.

Esta estrategia permitió mantener el foco solar sobre el absorbedor durante todo el experimento, minimizando pérdidas por desalineación y asegurando una concentración uniforme de la radiación.

Sistema de monitoreo y adquisición de datos. El registro de datos se realizó mediante sensores conectados al ESP32, que transmitían la información de forma inalámbrica hacia la plataforma ThingSpeak para almacenamiento y visualización en tiempo real. Las variables medidas fueron:

- Temperatura de entrada del fluido térmico (T_{in}) y temperatura de salida (T_{out}) mediante sensores posicionados a la entrada y salida del tubo receptor del concentrador Fresnel.
- Irradiancia solar directa (G) medida con un piranómetro
- Caudal de circulación ($\dot{m}$).

La frecuencia de muestreo fue de 1 registro cada 20 segundos durante las seis horas de ensayo, generando más de mil registros por variable para el análisis posterior.

Procedimiento Experimental. Las mediciones se llevaron a cabo el 17 de julio de 2025 en un periodo continuo de 09:30 h a 15:30 h, bajo condiciones de alta radiación solar y nubosidad variable.

Antes del inicio de la prueba, se verificó la inclinación adecuada inicial del sistema de seguimiento y el llenado del circuito con agua limpia a temperatura ambiente. La bomba de recirculación se encendió y se estabilizó el caudal durante cinco minutos antes de comenzar la adquisición de datos.

Durante el ensayo, el sistema de seguimiento solar operó de forma continua, desplazando el campo de espejos en intervalos de 4 minutos, mientras el sistema de monitoreo enviaba datos en tiempo real a la plataforma de almacenamiento.

Cada 20 segundos se registraron los valores de: irradiancia solar, temperaturas de entrada, temperatura de salida y caudal. Al finalizar las 6 horas de medición, se detuvo la bomba y se descargó toda la base de datos para su análisis en software de cálculo.



Figura 4. Concentrados Fresnel ya instrumentado y en prueba experimental.

Método de cálculo de la eficiencia térmica. (Kalogirou, 2009) define la eficiencia térmica media durante una prueba como:

$$\eta t = \frac{\dot{m} * c_p * (T_s - T_e)}{G * A_C} \quad (1)$$

Donde:

ηt = eficiencia térmica (adimensional o en %)

$\dot{m}$ = caudal másico kg/s

c_p = calor especifico del fluido (para agua ≈ 4186 $\frac{J}{kg*C}$

T_s = temperatura de salida (°C)

T_e = temperatura de entrada (°C)

G = irradiancia media durante la prueba (W/m^2)

A_c = área de captación del colector (m^2) (0.3m*0.4m=0.12m^2)

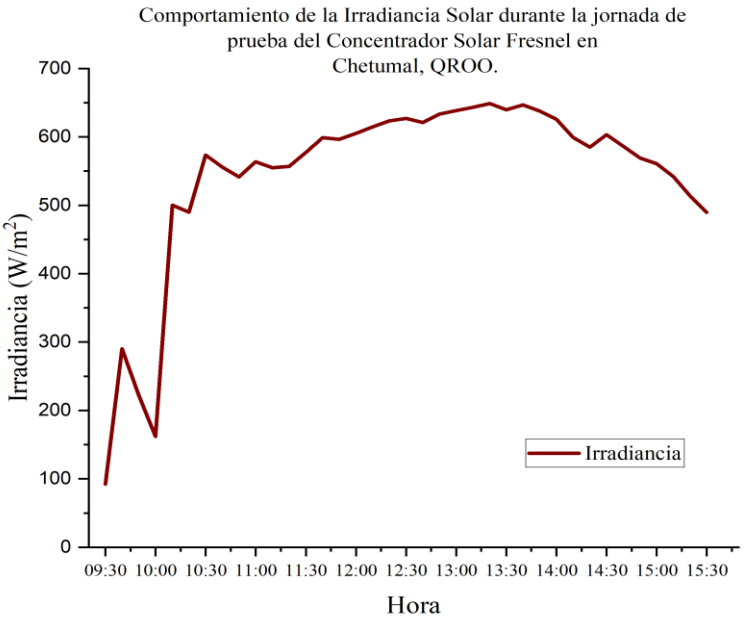
Para obtener el caudal másico $\dot{m}$, se multiplica el caudal volumétrico medido por el sensor de flujo (L/s) por la densidad del agua a la temperatura de operación. Posteriormente, se calcula la eficiencia para cada minuto de medición y se calcula el valor promedio de la jornada de medición.

Este análisis permite identificar el rendimiento real del sistema bajo condiciones operativas estables y determinar la influencia de la irradiancia sobre la producción de energía térmica.

RESULTADOS Y ANALISIS

Irradiancia solar obtenida

Para procesar los datos obtenidos se hizo un promedio, de cada 10 minutos para hacer las graficas de comportamiento de la irradiancia global durante la jornada de mediciones, ya que al registrar los datos cada 20 segundos se obtienen un total de 1080 datos, que al graficar no se pueden apreciar de la mejor manera, por eso se opto por promediar los datos cada determinado tiempo, la gráfica de comportamiento de la irradiancia que resulto de la jornada de prueba se hizo en el software OriginPro 2024b y se muestra a continuación (gráfica 1):

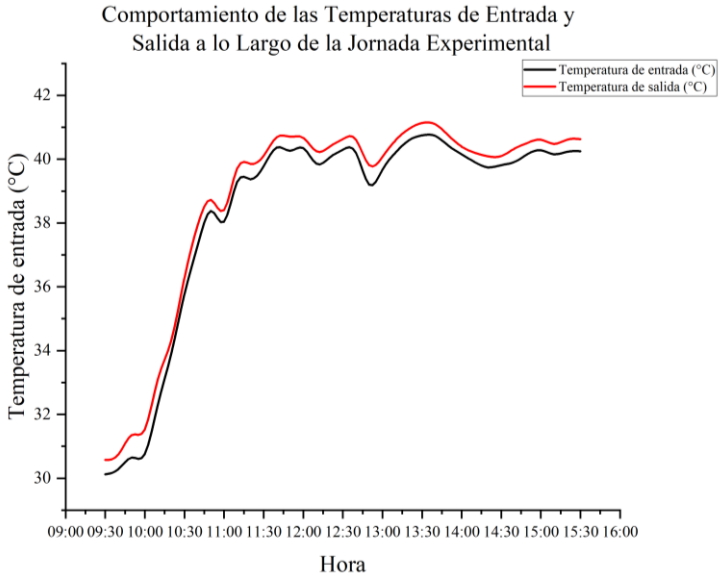


Grafica 1. Grafica hecha en OriginPro 2024b a partir del comportamiento de la irradiancia durante la prueba.

Los registros de irradiancia solar iniciaron alrededor de las 09:30 h con valores aproximados de 100 W/m² y mostró un incremento rápido hasta alcanzar valores superiores a 500 W/m² hacia las 10:00 h. Entre las 10:30 h y las 14:30 h se mantuvo mayormente estable en un rango de 550 a 650W/m², con un pico cercano a las 13:00 h, lo que indica condiciones atmosféricas favorables y mínima interferencia por nubosidad. Posteriormente, se observó un descenso progresivo de la irradiancia, llegando a valores por debajo de 500 W/m² a las 15:30 h, coincidiendo con la disminución natural de la altura solar. Las pequeñas fluctuaciones registradas en el tramo central de la curva pueden asociarse a paso de nubes o variaciones temporales en la posición relativa del sol respecto al sistema.

Temperaturas de entrada y salida

Para los datos de las temperaturas de entrada y salida se hizo el mismo procedimiento que para los datos de irradiancia, es decir que se hizo un promedio por cada 10 minutos transcurridos, con el mismo fin de agrupar los datos y obtener mejor visibilidad de los datos, estos datos se también se graficaron en OriginPro 2024b, la gráfica se muestra a continuación (gráfica 2):



Grafica 2. Grafica hecha en OriginPro 2024b a partir del comportamiento de las temperaturas de entrada y salida del tubo absorbedor.

Correlación Irradiancia-Temperatura

El comportamiento térmico del sistema muestra una correlación directa con la irradiancia registrada:

- Fase de incremento: El aumento rápido de irradiancia en la mañana generó un ascenso casi inmediato en las temperaturas de entrada y salida.
- Fase estable: La estabilidad en los valores de irradiancia durante el mediodía se reflejó en temperaturas constantes, indicando que el sistema alcanzó un régimen cuasi estacionario.
- Fase de descenso: La reducción de la irradiancia por la tarde provocó un enfriamiento progresivo del fluido, confirmando la dependencia del rendimiento térmico respecto a la disponibilidad de radiación solar.

Eficiencia térmica dada por el Concentrador solar Fresnel

Para el calculo de la eficiencia recurrimos a la fórmula 1, cálculo de la eficiencia térmica:

$$\eta t = \frac{\dot{m} * c_p * (T_s - T_e)}{G * A_C} \quad (1)$$

Recordemos que, para el cálculo de la eficiencia térmica, se requiere calcular para cada momento de la medición, es decir; un cálculo por cada vez que se tomó una medida, esto quiere decir que debemos hacer el cálculo 1080 veces y después promediar, como representación se hace el siguiente cálculo que corresponde a la eficiencia que se obtuvo a las 12 del día, antes de sustituir en la formula se calcula el caudal masico $\dot{m}$:

(Goswami, 2015) utiliza la siguiente fórmula para convertir un caudal volumétrico $\dot{V}$ (por ejemplo, L/min) a caudal másico ṁ:

Conversión a m³/s:

$$\dot{V}_{(\mathrm{m^3/s})} = \frac{\dot{V}_{(L/\mathrm{min})}}{1000 * 60} \quad (2)$$

Caudal Másico:

$$\dot{\mathrm{m}} = \rho * \dot{V} \quad (3)$$

Donde: ρ= es la densidad del fluido (1000kg/m3 para agua), $\dot{V}$ = caudal volumétrico = 0.67L/min (obtenido durante la prueba)

Teniendo estos cálculos podemos sustituir los valores en la ecuación 1:

$$\eta t = \frac{(1000\mathrm{kg/m^3})(\frac{0.67_{L/min}}{1000 * 60}) * 4186\ \frac{J}{kg * C} * (40.6668°C - 40.3444°\mathrm{C})}{605.3763\mathrm{W/m^2} * 0.12\mathrm{m^2}} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\eta t = 0.207457 \approx 20.7\%} \quad (5)$$

Como se mencionó esta eficiencia corresponde a las 12 p.m. del día 17 de julio, el calculo de la eficiencia térmica promedio se realizo en una hoja de cálculo de Excel, como resultado de esa eficiencia se obtuvo el siguiente resultado:

$$\boldsymbol{\eta t = 0.39 \approx 39\%}$$

Esto nos dice que durante la prueba de 6 horas del concentrador Fresnel, se obtuvo una eficiencia térmica promedio de 39 %, lo que indica que el sistema convierte de manera efectiva una fracción significativa de la energía solar incidente en energía térmica útil. Este valor demuestra el potencial del concentrador Fresnel para aplicaciones de media temperatura, aunque las pérdidas térmicas y ópticas identificadas sugieren que existe margen para optimizar el diseño y mejorar la captación de energía solar.

CONCLUSIÓN

El diseño, construcción y evaluación experimental del concentrador solar tipo Fresnel demostró su viabilidad como una tecnología eficiente y de bajo costo para aplicaciones térmicas de media temperatura. Durante las pruebas realizadas el 17 de julio de 2025, el prototipo alcanzó una eficiencia térmica promedio del 39%, evidenciando su capacidad para convertir la energía solar incidente en energía térmica útil y lograr incrementos significativos en la temperatura del fluido.

Se identificaron oportunidades de mejora, como la optimización del receptor, la gestión del flujo del fluido y la reducción de pérdidas térmicas, que podrían aumentar la eficiencia en futuras iteraciones. El uso de un sistema de seguimiento solar de un solo eje, materiales accesibles y resistentes, y herramientas de modelado CAD y simulación óptica contribuyó a un diseño robusto, operativo y duradero.

Este estudio establece una base para el desarrollo de concentradores Fresnel más eficientes y económicos, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y sostenibles en aplicaciones educativas, industriales y comunitarias, especialmente en regiones con alta irradiación solar.

REFERENCIAS

Duffie, J. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. Wiley.

Duffie, J. A. (2020). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. Wiley.

Goswami, D. Y. (2015). Principles of Solar Engineering. CRC Press.

Kalogirou, S. (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press.

Kalogirou, S. (2014). Solar Energy Engineering: Processes and systems. Academy Press. Obtenido de Solar Energy Engineering: Processes and systems.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTRATEGIA PARA CONSTRUIR EDIFICIOS BIOCLIMÁTICOS, ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES Y/O CON ENERGÍAS RENOVABLES EN EL ACTUAL ESCENARIO MEXICANO

Ivan Oropeza Perez
Coordinación de Arquitectura, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76017, México,4422574684, **ivan.oropeza@uaq.mx**

RESUMEN

Con un análisis de la situación actual en México con respecto a la construcción de edificios residenciales, en este documento se presenta una estrategia para la implementación de edificaciones bioclimáticas, eficientes energéticamente y/o con energías renovables a corto y mediano plazo, en el contexto del modelo de soluciones denominado de cuádruple hélice. El objetivo principal del documento es acortar las brechas entre los diferentes sectores, o hélices, (empresarial, social, gubernamental y académico) los cuales son comúnmente considerados en estrategias basadas en la ciencia, tecnológica e innovación, enfocadas a problemas y retos recurrentes, en este caso, el de edificios bioclimáticos, eficientes energéticamente y/o con energías renovables, y capaces de adaptarse al cambio climático. Con el análisis, se busca encontrar los puntos estratégicos de la construcción de edificios residenciales sustentables en México y así determinar el impacto ambiental, principalmente, de la construcción constante de edificios ambientalmente responsables y encaminados hacia la transición energética en el país.

ABSTRACT

Starting from an analysis of the current situation of the Mexican residential buildings, in this document it is presented a strategy for implementing bioclimatic buildings, energy efficient and/or with renewable energy for short and medium term, all this within the context of the model of solutions called quadruple helix. The main objective of the document is to getting short the gaps between the different sectors, or helixes, (industry, society, government, and academia) that are commonly considered in strategies based on science, technology and innovation, and focused on frequent issues and challenges, such as this case with bioclimatic buildings, energy efficient and/or with renewable energy, capable of adapting themselves to climate change. With the analysis, the purpose is to find out the strategic points for the construction of sustainable dwellings in Mexico and thus determining the environmental impact, mainly, of the frequent construction of buildings environmentally responsible and driven towards the energy transition of the country.

Palabras clave: Cuádruple hélice; edificios sustentables; sector residencial; autoconstrucción.

INTRODUCCIÓN

El contexto mundial actual ha estado marcado por la incertidumbre y la inestabilidad política. Los gobiernos de las principales fuerzas comerciales, militares y económicas del mundo están pasando por conflictos bélicos, guerras comerciales y transiciones democráticas. Baste mencionar la reelección de Donald J. Trump en Estados Unidos, su guerra arancelaria con el mundo, el conflicto Irán-Israel, y la guerra de Ucrania con Rusia, como muestra de los retos que la humanidad enfrenta hoy en día, sumado a la etapa post-covid que el mundo atraviesa por medio de una recuperación económica y de salud pública.

En medio de esta situación global, los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para el año 2030, entre ellos la transición energética, corren el riesgo de ser demorados. La falta de certidumbre jurídica, económica e incluso social en muchos países del mundo, incluidos Latinoamérica y México, obligan a establecer mecanismos más estrictos que aseguren un futuro más sustentable, equitativo y justo con respecto al medioambiente, el crecimiento económico, la conservación de la cultura de los pueblos, y la justicia social.

Un modelo basado en la ciencia, tecnología e innovación (STI, por sus siglas en inglés) para dar soluciones a los problemas propios de la situación actual es el modelo de la cuádruple hélice, el cual establece que cuatro sectores, u organismos, como los son el sector académico, empresarial, de gobierno, y la sociedad civil, pueden trabajar en conjunto para encontrar caminos que ayuden a dar dichas soluciones.

Así, por ejemplo, en la pandemia de COVID-19 suscitada a principios del año 2020, estableció, en mayor o menor medida en los diferentes países, una estrategia de cuádruple hélice para encontrar una vacuna efectiva no sólo concebida y desarrollada por las universidades, sino un apoyo real por parte de los distintos gobiernos, sector empresarial y la sociedad en general. Esto se pudo ver en el desarrollo de vacunas tales como AztraZeneca, Sputnik, Pfizer-Moderna, CanSino, a una velocidad inusitada por la urgencia del momento. Este desarrollo fue hecho por científicos y académicos, pero respaldado por gobiernos y empresas, y apoyado en la sociedad con su distribución y aceptación.

Así como este ejemplo, y sin contar necesariamente con la premura de las circunstancias, se espera que los ODS puedan ser desarrollados en la mayor parte del mundo, y así alcanzar una sociedad más equitativa, con acceso al agua, energías limpias, educación, salud, y frenando los efectos del cambio climático.

En México, y específicamente en el sector de edificios residenciales, este documento se enfoca en utilizar el modelo de cuádruple hélice para alcanzar la sustentabilidad y lograr una transición energética al uso de energías renovables, de eficiencia energética y de diseño bioclimático, que ofrezca confort interior, ahorro energético y de agua, y así estar alineado al ODS-11 Ciudades y Comunidades Sustentables, principalmente.

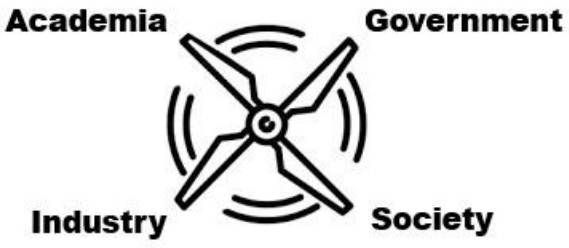


Figura 1. Modelo de solución basado en ciencia, tecnología e innovación de cuádruple hélice (Fuente: propia).

Para lograr tal propósito se establecen líneas de investigación ya propuestas en diferentes documentos, tales como González-Martínez et al. (2023) que propone a la sociedad civil como mediadora entre las otras tres hélices, Clement et al. (2022), que estudia el rol de los gobiernos locales para el establecimiento de comunidades sostenibles pequeñas en Europa, y Gouvea et al. (2013), que establece el concepto de economía verde y estudia como productores verdes, apoyados en nuevas tecnologías y en políticas gubernamentales, ayudan al consumo de productos sustentables, siempre y cuando los consumidores lo adopten voluntariamente.

Según los documentos analizados, que incluyen también laboratorios vivos como los estudios de Nguyen et al. (2022) y Compagnucci et al. (2021), y análisis en economía emergentes como Malik et al. (2021), los cuatro sectores de la cuádruple hélice no siempre tienen el mismo rol ni la misma influencia. La influencia de las cuatro hélices depende de muchos factores tales como el nivel de desarrollo socioeconómico del país o región analizada, su madurez jurídica, el objetivo principal de la solución y nivel de innovación del país analizado, entre otros muchos.

Para el caso mexicano con respecto a edificios residenciales se evalúan las principales características de las cuatro hélices. Para el caso de la academia, se analizan los programas de estudios de las principales universidades y centros de educación superior de arquitectura del país, incluyendo solamente posgrados. Para la hélice de gobierno, se estudia la normatividad vigente con relación a edificaciones sustentables. En el caso del sector empresarial, se hace una investigación de las principales empresas privadas dedicadas a la construcción de edificaciones amigables con el ambiente y similares, incluyendo despachos arquitectónicos, empresas constructoras y fabricantes de ecotecnologías. Y en el caso de la sociedad, se analizan las principales prácticas que se presentan en la sociedad civil con respecto a la adquisición de edificios residenciales.

METODOLOGÍA

Sector académico

La mayoría de las universidades y centros de educación superior del país cuentan con al menos una licenciatura en arquitectura o similar en el área de espacio construido. Hacer un análisis exhaustivo de sus planes de estudio sería una tarea larga e improductiva, ya que para evaluar el nivel de sostenibilidad de un plan de estudios en arquitectura o similar se tendría que considerar como una especialidad. Es por esto que se analizan los principales programas de posgrado que se enfocan en temas como habitabilidad, sustentabilidad, eficiencia energética y arquitectura bioclimática.

De esta manera, de acuerdo con el Sistema Nacional de Posgrados (SNP) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del año 2025, existen 39 programas de maestría y doctorado cuyos planes de estudio están enfocados en arquitectura verde, diseño bioclimático, ambiente interior, planeación urbana sustentable, hábitat sustentable y/o eficiencia energética en edificios. Estos programas están dentro de 24 instituciones de educación superior y centros de investigación a lo largo del país. Al pertenecer al SNP se asegura que su calidad en docencia e investigación tiene altos estándares y son evaluados periódicamente.

Sin embargo, si se considera el número de arquitectas y arquitectos que existen en el país, el cuál fue 147 mil en 2023, de acuerdo con la Secretaría de Economía, el total de programas especializados en arquitectura sustentable no sería suficientes para implementar de una manera ágil y extensiva las buenas prácticas de edificios ahorradores, sustentables y confortables. En un cálculo rápido, cada programa de posgrado especializado supondría recibir a cerca de 3 mil ochocientos arquitectas y arquitectos licenciados en un programa de pregrado del país. Claramente se ve que el número de programas de calidad sobre arquitectura sustentable y afines debe de crecer en los próximos años. Este crecimiento se establece hasta que al menos el 10% del total de arquitectas y arquitectos del país cuenten con conocimientos especializados sobre el tema en los próximos 10 años.

Esto es, de acuerdo con la Ecuación 1:

$$\frac{14700\ arquitectas\ y\ arquitectos\ sustentables}{20\ estudiantes\ por\ programa\ de\ posgrado} = 735\ programas\ especializados \quad (1)$$

Hay que mencionar que en la Ecuación 1 se asumieron condiciones consideras arbitrarias ya que no se encontraron parámetros confiables sobre las estimaciones requeridas. En ese sentido, el 10% de arquitectas y arquitectos con conocimientos avanzados sobre arquitectura sustentable fue considerado como un porcentaje a corto plazo, mientras que 20 de estudiantes por programa fue estimado con base al promedio de alumnas y alumnos a los que se tuvo acceso a su información general.

Así pues, se puede decir que, aunque existen esfuerzos por parte del sector académico para extender los conocimientos sobre espacios urbanos y construidos sustentables, energéticamente eficientes, confortables y habitables, el número de programas debería aumentar a por lo menos 20 veces la cantidad de programas disponibles hoy en día en México. Vale la pena comentar que el aumento de estos programas de posgrado debe realizarse bajo estrictos procesos de calidad académica, y no permitir que centros educativos predadores ofrezcan programas educativos de baja calidad académica y de investigación.

Sector gubernamental

Con respecto al trabajo que el gobierno mexicano ha realizado para que más viviendas en el país apliquen procesos constructivos, de operación y desecho de edificios considerados como amigables para el ambiente. Se hizo una búsqueda de las principales normas con referencia al tema, encontrándose las siguientes:

- **NMX-AA-164-SCFI-2013: EDIFICACIÓN SUSTENTABLE - CRITERIOS Y REQUERIMIENTOS AMBIENTALES MÍNIMOS**. Esta Norma Mexicana especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos de una edificación sustentable para contribuir en la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sin descuidar los aspectos socioeconómicos que aseguran su viabilidad, habitabilidad e integración al entorno urbano y natural. Es de aplicación voluntaria para todas las edificaciones que se ubiquen dentro del territorio nacional, públicas o privadas, destinadas en su totalidad o en uso mixto a diferentes actividades de índole habitacional, comercial, de servicios o industrial. Aplica a las edificaciones y sus obras exteriores. Ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre uno o varios predios, en arrendamiento o propias. Se aplica a una o varias de sus fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición, incluyendo proyectos de remodelación, renovación o reacondicionamiento del edificio. Esta norma mexicana esta basada en la siguiente normatividad:
- **NOM-021-ENER/SCFI-2008** Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto. Límites, métodos de prueba y etiquetado, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 4 de agosto de 2008.
- **NOM-020-ENER-2011**, Eficiencia energética en edificaciones.- Envolvente de edificios para uso habitacional. Esta Norma Oficial Mexicana limita la ganancia de calor de los edificios para uso habitacional a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento.
- **NOM-012-SCFI-1994** Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos - Medidores para agua potable fría. Especificaciones. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de octubre de 1997.
- **NOM-233-SSA1-2003** Que establece los requisitos arquitectónicos para facilitar el acceso, tránsito, uso y permanencia de las personas con discapacidad en establecimientos de atención médica ambulatoria y hospitalaria del Sistema Nacional de Salud, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de septiembre de 2004.
- **NMX-C-423-ONNCCE-2003** Industria de la construcción â pinturas -pinturas de látex (antes pinturas vinílicas) â especificaciones y métodos de prueba (cancela a la NMX-U-097-1981). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de octubre de 2003.
- **NMX-ES-001-NORMEX-2005** Energía solar - Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua - Métodos de prueba y etiquetado. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de agosto de 2005.
- **NMX-ES-002-NORMEX-2007** Energía solar - Definiciones y terminología. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de abril de 2007.
- **NMX-ES-003-NORMEX-2008** Energía solar- Requerimientos mínimos para la instalación de sistemas solares térmicos, para calentamiento de agua. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de julio de 2008.
- **NMX-ES-004-NORMEX-2010** Energía Solar - Evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua - Método de prueba. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 12 de abril de 2010.
- **NMX-R-050-SCFI-2006** Accesibilidad de las personas con discapacidad a espacios construidos de servicio al público. Especificaciones de seguridad. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 9 de enero de 2007.

Haciendo una lectura de las normas relativas a prácticas sustentables en las edificaciones sustentables en México, se puede concluir que existen especificaciones claras con respecto al uso de energía solar, tanto fotovoltaica como para calentamiento de agua. Asimismo, el uso de aire acondicionado puede reducirse tanto por la operación de equipos eficientes como por el aislamiento de la envolvente térmica de las viviendas. También existen normas específicas para el acceso universal de personas con alguna discapacidad psicomotriz, visual o auditiva.

Sin embargo, la principal limitante que cuenta la normatividad mexicana con respecto a edificios sustentables es su calidad de carácter voluntario. Autores como Norberg et al. (2020) y Boulogiorgou et al. (2020) plantean que una normatividad vigente voluntaria para que existan comunidades sustentables requiere un mayor compromiso tanto de la sociedad civil como de las empresas privadas. Sin embargo, también plantean que para que el modelo de la cuádruple hélice funcione con una amalgama entre estas dos hélices sin una participación fuerte del gobierno es necesario que exista un interés económico atractivo tanto para el consumidor como para el vendedor. En otras palabras, si se quisieran construir viviendas sostenibles en México sabiendo que la normatividad de construcción es débil, se debe de tener en cuenta que las prácticas sustentables tienen que ser económicamente atractivas, es decir, abrir un mercado que permita ganar tanto a los consumidores como a los vendedores (empresas privadas).

Sector privado

El sector empresarial ligado a las prácticas sostenibles en la vivienda es múltiple y variado. Se pueden contabilizar empresas mexicanas que manufacturan calentadores solares de agua como Modulo Solar, celdas fotovoltaicas como Solarever, o sistemas de captación de agua de lluvia como Isla Urbana. Estas son empresas reconocidas a nivel nacional e internacional las cuales tienen un crecimiento significativo. Sin embargo, hay que considerar que, en México, de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda del INEGI (2021), el país cuenta con 35 millones de viviendas habitadas, con una tasa de crecimiento anual de 1.2% (400 mil casas al año). Esto significa que empresas como las mencionadas anteriormente deben de multiplicarse a lo largo y ancho del territorio nacional para poder cubrir la demanda actual y de los próximos años. Un ejemplo claro de esto es el uso de calentadores solares residenciales de agua. De acuerdo con la Figura 2, el crecimiento ha sido sostenido, alcanzando un 13.4% del total de viviendas en 2022 (4.7 millones de calentadores solares).

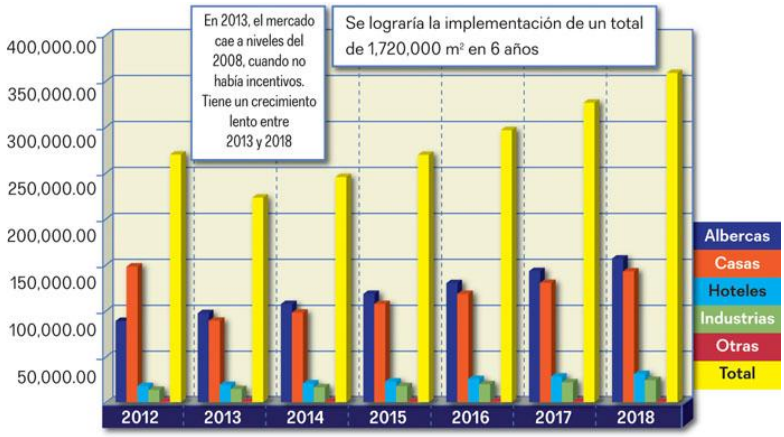


Figura 2. Crecimiento de calentadores solares planos, de tubos al vacío y no vidriados en México (fuente: mundo HVACR)

Así pues, se puede decir que el mercado, por lo menos de calentadores de agua, es muy atractivo, considerando también que no existe una estrategia mercadológica definida, y que la compra de este tipo de ecotecnologías se da prácticamente de boca en boca, con el principal argumento del ahorro energético por no consumir gas LP, principal fuente de combustible para el calentamiento de agua residencial en México. Por lo tanto, se recomienda ampliamente le difusión de los beneficios, principalmente económicos, de las diferentes estrategias de ahorro energético y agua, principalmente, siempre exponiendo que la inversión inicial tendrá un periodo de amortización a corto y/o mediano plazo.

Por parte de despachos y empresas constructoras que brinden no solamente ecotecnologías, sino diseños que se puedan ser clasificados como bioclimáticos, la investigación derivó en unos pocos despachos a nivel nacional, los cuales se enlistan a continuación, junto con su principal descripción, dada por ellos mismos:

- Tatiana Bilbao Estudio. Esta firma ha diseñado proyectos en toda Europa, China y México y, aunque su trabajo suele enfocarse en el paisaje, la sustentabilidad y las viviendas de bajo costo son una de las especialidades de esta arquitecta.
- Alberto Kalach. En coordinación con Conaculta y el Instituto de Biología de la UNAM, este arquitecto diseñó la Biblioteca Vasconcelos, una biblioteca pública con un jardín botánico que funciona como un pulmón de esta urbe. Este espacio aprovecha al máximo la iluminación y la ventilación natural, cuenta con un techo “verde” y un invernadero para promover una vida cultural y sustentable.
- LBR & A Arquitectos. La firma ha desarrollado proyectos destacados por su diseño contemporáneo, alta tecnología y la flexibilidad en los espacios. Un ejemplo es la Torre Reforma, la cual es la primera en su tipo que adquirió la certificación internacional LEED, en la que se le acredita oficialmente como uno de los edificios más altos 100% sustentables de México y el mundo.
- Legorreta Arquitectos. A través de sus proyectos, como la Torre BBVA Bancomer un ícono arquitectónico y un ejemplo de sostenibilidad en el país. Diseñada de la mano de Rogers Stirk Harbour + Partners, esta torre se distingue por contar con una certificación LEED Platino en la categoría de Building Design and Construction (BD+C), uno de los estándares de construcción sostenible más exigentes del mundo, amigable con el ambiente, ya que esta ahorra un 40% de agua y 25% de energía.
- BNKR Arquitectura. En un intento por cambiar el hacinamiento y falta de espacio, BNRK Arquitectura diseñó un puente que puede ser habitable y atravesar toda la bahía de Acapulco. Esta estructura tendrá un enorme techo verde que funcionará como pulmón urbano y, a lo largo de los tres kilómetros de extensión, habrá viviendas, parques, comercias y más. Aún no hay fecha de inauguración, pero se presume que será uno de los proyectos sustentables más importantes del país.
- Grupo Sustenthabit. Se enfoca en soluciones innovadoras que combinan la belleza arquitectónica con la responsabilidad ambiental.
- Itaca Proyectos Sustentables. Se dedica a crear espacios sensibles y comprometidos con la sustentabilidad,

- Aida Traconis Arquitectos. Se especializa en la construcción de proyectos de arquitectura sustentable en Mérida y otras partes de México.
- ABM - Arquitectura Biosustentable de México. Ofrece servicios alineados con las mejores prácticas globales en construcción sustentable.

Se entiende que otros despachos arquitectónicos en México pueden también argumentar su experiencia en proyectos sustentables (en México existen aproximadamente 7 200 oficinas arquitectónicas). Sin embargo, aunque el número de firmas arquitectónicas aumente considerablemente, este número será insuficiente si se considera que, sin contar con renovaciones, el número de viviendas nuevas en México es de 400 mil cada año, de las cuales, de acuerdo con la Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) del INEGI 2020, que indica que el 57.3% de las viviendas propias en México se adquirieron por autoconstrucción. Esto es, 160 mil viviendas son construidas por arquitectos profesionales, ya sea en un despacho o por una compañía constructora.

Así pues, el reto que enfrenta el sector empresarial en México se puede definir en dos formas: capacitar a las más de 7 mil firmas de arquitectos para que introduzcan procesos bioclimáticos y ecotecnologías reales, confiables y medibles, y aumentar el número de despachos especializados, ya que si determinamos cuantos proyectos por oficina son en promedio, estos serían 22 viviendas al año, lo que se considera un número difícil de manejar, considerando aún más que muchos despachos son considerados pequeños, con menos de cinco miembros.

Sector social

Como se ha mencionado antes, casi el 60% de la vivienda en México se elabora con base a la autoconstrucción. Esto es, la dueña o dueño del predio a construir diseña y ejecuta su construcción. La gran mayoría de veces, ellos se apoyan en trabajadores que, aunque no cuentan con una experiencia profesional, cuentan con conocimientos empíricos que permiten hacer diseños funcionales y confiables. Desafortunadamente, no existen normas rígidas que eviten malas prácticas que puedan inclusive terminar en tragedias como la sucedidas en la Ciudad de México en 2017. Sin embargo, la población en general, es decir, la sociedad civil, confía en estos trabajadores y hasta el momento no existen datos alarmantes por ejercer la autoconstrucción en México.

Si se parte desde este punto, se puede suponer que construir una vivienda en México por autoconstrucción no conlleva altos riesgos de confiabilidad, al menos estructural. Sin embargo, esta práctica sí conlleva una falta de cultura sustentable con casas con alto consumo energético, de agua y un diseño que no responde a las condiciones exteriores (climatológicas) ni interiores (confort interior). Una prueba de ello es el consumo de aire acondicionado en el sector residencial mexicano, que según la Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) del INEGI 2018, 7 millones de viviendas en México contaban con un equipo de climatización activa.

De acuerdo con Oropeza-Perez et al. (2014) una vivienda climatizada en México consume aproximadamente 1.8 MWh al año por el uso de aire acondicionado solamente. Esto quiere decir que, en 2018, el último año con registros actualizados, en el país se consumieron 12.5 TWh por uso de aire acondicionado residencial. Esto equivale a 6.3 millones de toneladas de CO_2 equivalente, de acuerdo con el factor de emisión eléctrica del mismo año (0.505 tonCO_2eq/MWh). Por lo tanto, se puede plantear que el diseño bioclimático en edificaciones es una estrategia fundamental para reducir el consumo eléctrico, y por ende las emisiones de gases de efecto invernadero.

Modelo de cuádruple hélice para el sector residencial mexicano

En este documento se plantea un modelo de cuádruple hélice que fortalezca la relación entre el sector académico y el social, considerando al sector gubernamental y empresarial como apoyo. Esto se explica al considerar que de 400 mil casas que se construyen al año, 240 mil serán por autoconstrucción.

Se entiende que el Programa de Vivienda para el Bienestar del actual Gobierno Federal planea la construcción de 1 millón de viviendas en un sexenio, pero de acuerdo con el mismo programa “Se fomenta el uso de tecnologías para el ahorro de energía y agua, como focos ahorradores, calentadores de paso, aislamiento térmico y regaderas ecológicas” CONAVI (2025). Así pues, se da por sentado que las prácticas sustentables para la vivienda mexicana ya son cubiertas por este programa en específico.

Así, para el caso del fortalecimiento entre sector civil y académico, se plantea la necesidad de realizar un programa de divulgación donde se expliquen, de una manera fácil y sencilla, las diferentes estrategias bioclimáticas y ecotecnológicas que pueden ser aplicadas en una vivienda, siempre manteniendo un lenguaje simple y dinámico, así como propuestas fáciles y económicas de aplicar. A continuación, se presentan algunas:

- **Focos LED.** Planteando el cambio a focos ahorradores, mostrando un tiempo de amortización de la inversión inicial.
- **Iluminación natural.** Mostrando diversos métodos de iluminación natural, incluyendo domos, tubos de luz, iluminación anidólica y repisas de luz.
- **Calentador solar.** Presentando el tiempo de amortización de su inversión inicial enfatizando el ahorro de gas.
- **Aparatos ahorradores de agua.** Presentando el tiempo de amortización de su inversión inicial enfatizando el ahorro de agua.
- **Colector de agua pluvial.** Presentando esquemas sencillos, manuales de instalación y costos generales.
- **Gestión de residuos sólidos.** Incluyendo preparación de composta, reutilización, reuso, reducción y reciclaje.
- **Diseño bioclimático.** Métodos sencillos tales como ventilación natural cruzada, alta reflectividad de la envolvente (incluyendo los techos), elementos de control solar, enfriamiento evaporativo, sumideros de calor, aislamiento térmico de la envolvente, ventanas de doble y triple vidriado, control de infiltración de aire, ente otros. Todos los elementos de deben de presentar con manuelas de instalación, costos iniciales, y un manual para su funcionamiento en la etapa de operación.
- **Manuales de usuario.** Presentando técnicas que los mismos ocupantes pueden aplicar en sus viviendas. Esto incluye apagar

los aparatos eléctricos, métodos de ahorro de agua y gas, manejo adecuado de aparatos de aire acondicionado, manejo de los elementos de diseño bioclimático y gestión de residuos sólidos.

Además de estas propuestas, se plantean propuestas que pueden aplicarse pero que necesitan circunstancias especiales. Estas circunstancias son dadas principalmente por los costos iniciales e instalaciones especiales:

- **Celdas fotovoltaicas.** Propuesta idónea para viviendas que tienen un alto consumo energético, incluyendo la tarifa de alto consumo (CAD).
- **Sistemas híbridos de generación.** Sus altos costos impiden que la mayoría de la población puedan adquirirlo de manera extensiva.
- **Tratamiento de aguas negras.** Incluyendo biodigestores y biorreactores. Se consideran para condiciones especiales por sus altos costos, instalaciones especiales y mantenimiento riguroso.
- **Tratamiento de aguas grises.** Igualmente, se consideran especiales por sus requerimientos de espacio, costos iniciales, y mantenimiento periódico.
- **Tratamiento de aguas mixtas.** Por sus altos costos, mantenimiento y poca disponibilidad en el mercado mexicano.

Como se dijo anteriormente, el principal objetivo es que esta información llegue a la población en general de una manera ágil y sencilla. Es importante que estos elementos de divulgación sean recibidos por los trabajadores de la construcción, que al final son las perdonas más importantes en la cadena de la autoconstrucción, ya que su conocimiento empírico prácticamente es el pilar de la construcción de las viviendas.

Además, en el caso del diseño bioclimático, se propone hacer una división del clima mexicano al menos en tres condiciones generales: templado, cálido seco, y cálido húmedo. Cada una de estas condiciones tendrían sus estrategias particulares de enfriamiento y calefacción. Como se dijo anteriormente, la idea es mantener la divulgación sencilla de entender. Sin embargo, esto no significa que no haya rigor científico en las propuestas. Es por esto que el vínculo con el sector académico debe de ser fuerte y dinámico, para que toda la información dada de costos, instalaciones, resultados etc, sea verídico y confiable.

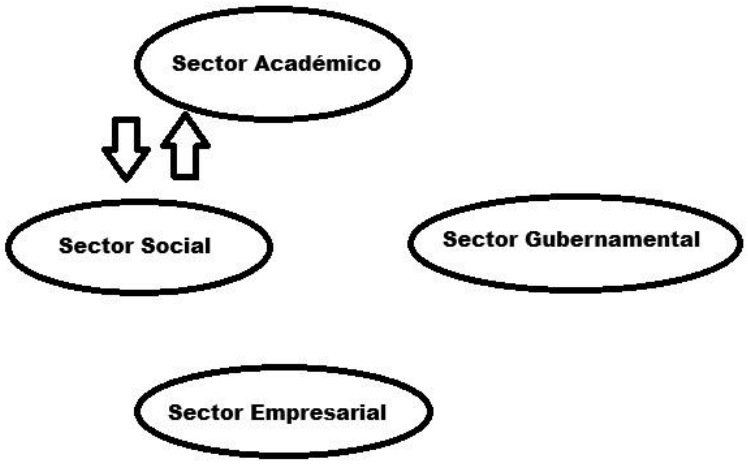


Figura 3. Propuesta de modelo de cuádruple hélice para la implementación de vivienda sustentable en México (Fuente: propia).

Con respecto a las otras dos hélices, se entiende que el gobierno de México ya ha dado la normatividad sobre vivienda sustentable. Se espera que estas normas tengan una alineación con las propuestas hacia la sociedad civil. Asimismo, las empresas productoras de ecotecnologías y sistemas bioclimáticos, así como las oficinas arquitectónicas, pueden servir como enlaces entre la normatividad vigente y las propuestas presentadas desde el sector académico. Esto es difundiendo las buenas prácticas de la sustentabilidad en la vivienda mexicana y mostrando los beneficios económicos y ambientales, principalmente.

Por último, se propone que las estrategias sean medidas y evaluadas regularmente. Esto con el objetivo que las personas, ya sea como constructoras, compradoras e inclusive diseñadoras, tengan una certeza que los sistemas sustentables planteados son eficientes, confiables y dan los beneficios argumentados.

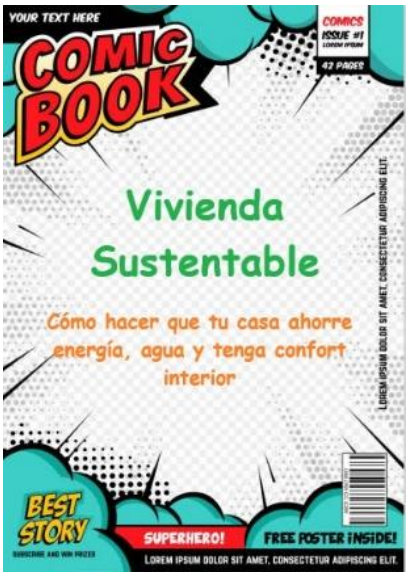


Figura 4. Propuesta de un elemento de divulgación para la población en general con respecto a la construcción de vivienda sustentable en México (Fuente: propia a partir de una imagen de gettyimages.com)

Como comentario final se propone que el desarrollo, producción y distribución de los elementos de divulgación sean llevados a cabo a través de programas universitarios y de investigación. Esto es con apoyo de las oficinas editoriales de las universidades y a través de proyectos tales como los convocados por la SECIHTI.

CONCLUSIONES

Ante el actual panorama de cambio climático, se plantea que la sustentabilidad en el sector residencial en México sea acelerada a través de un modelo de cuádruple hélice. Se plantea la participación de los sectores, gubernamental, académico, social y empresarial. Después de analizar todos los sectores, se concluye que el sector social, que es responsable del 60% de la construcción de casas en el país, debe de apoyarse fuertemente del sector académico, a través de medios de divulgación sencillos y fáciles de entender, pero también científicamente confiables.

Por parte de los sectores gubernamental y empresarial, juegan un papel importante también. El primero al proponer las normas orientadas a prácticas sostenibles en el sector residencial, así como la observación de su implementación y operación. El segundo a través de su participación en el mercado, en el caso de fabricantes y distribuidores, y en el caso de despechos arquitectónicos, a través de su especialización e implementación en sus diseños y obras.

Por último, se plantea la necesidad de ampliar programas de calidad, especialmente a nivel licenciatura (que no fue analizado en este documento) y posgrado. Se recomienda enfáticamente que la calidad académica y de investigación se siempre alta y no se caiga en malas prácticas como el desarrollo de programas de estudio de calidad cuestionable.

REFERENCIAS

Gonzalez-Martinez P., Garcia-Perez-de-Lema D., Castillo-Vergara M. and Hansen P.B. (2023). Determinants and performance of the quadruple helix model and the mediating role of civil society, Technology in Society, Vol 75, p. 102058.

Clement J., Manjon M. and Crutzen N. (2022). Factors for collaboration amongst smart city stakeholders: A local government perspective, Government Information Quartely, Vol 39, p. 101746.

Gouvea R., Kassicieh S. and Montoya M.J.R. (2013). Using the quadruple helix to design strategies for the green economy, Technological Forecasting & Social Change, Vol 80, p. 221-230.

Nguyen H.T., Marques P. and Benneworth P. (2022). Living labs: challenging and changing the smart city power relations?, Technological Forecasting & Social Change, Vol 183, p. 121866.

Compagnucci L., Spigarelli F., Coelho J. and Duarte D. (2021). Living labs and user engagement for innovation and sustainability, Journal of Cleaner Production, Vol 289, p. 125721.

Malik A., Sharma P., Pereira V. and Temouri Y. (2021). From regional innovation systems to global innovation hubs: Evidence of a Quadruple Helix from an emerging economy, Journal of Business Research, Vol 128, p. 587-598.

Norberg K., Mariussen A. and Virkkala S. (2020). Community-driven social innovation and quadruple helix coordination in rural development. Case study on LEADER group Aktion Österbotten, Journal of Rural Studies, Vol 79, p. 157-168.

Boulogiorgou D. and Ktenidis P. (2020). TILOS local scale Technology Innovation enabling low carbon energy transition, Renewable Energy, Vol 146, p. 397-403.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO DE UN EDIFICIO EDUCATIVO DEMOSTRATIVO DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO

Guadalupe Huelsz, Jorge Rojas, Guillermo Barrios
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,
Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62580, México,
ghl@ier.unam.mx, jrm@ier.unam.mx, gbv@ier.unam.mx

José Manuel Ochoa e Irene Marincic
Depto. de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Bv. Luis Encinas y Rosales s/n, colonia Centro, Hermosillo, Sonora, 83000, México.
josemanuel.ochoa@unison.mx, irene.marincic@unison.mx

RESUMEN

Se presenta el diseño y la implementación de sistemas pasivos de un edificio educativo para el Instituto de Energías Renovables de la UNAM en Temixco, Morelos, cuyo diseño arquitectónico tuvo como eje rector contar con un edificio demostrativo de diseño bioclimático en clima cálido semihúmedo. Este edificio albergará la Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables (LIER). El proceso de diseño se realizó con un enfoque participativo, donde autoridades de la LIER y futuros usuarios manifestaron su visión de las necesidades a cumplir y sus expectativas. La geometría es rectangular con fachadas largas con ventanas al norte y al sur, esto disminuye cargas térmicas por radiación solar y permite el aprovechamiento del viento que en horario de ocupación proviene del sur. El color de los muros es blanco al exterior e interior, al exterior reduce la absorción de la radiación solar incidente y al interior aumenta la iluminación. Se diseñaron protecciones solares con aleros y quiebrasoles en ventanas y pantallas en las fachadas este y oeste. Se ubicaron árboles en la plaza del edificio y plantas en los pasillos. Todos los espacios cuentan con ventilación natural e iluminación natural. En la mayoría de los espacios la ventilación es cruzada, que proporciona mayor velocidad de flujo, aumentando el confort térmico de los ocupantes en condiciones de calor. En planta baja y nivel 1 la ventilación cruzada se da con ventanas al norte y al sur, en el nivel 2 se ubicaron las aulas de menor tamaño en dos crujías separadas por un pasillo, donde la ventilación cruzada se logra con el empleo de intercambiadores de viento en la losa y una ventana. En todos los espacios se incorporaron ventilas que permiten la ventilación nocturna, que junto con el empleo de sistemas constructivos de alta masa térmica reducen la temperatura del aire al interior.

ABSTRACT

The design and implementation of passive systems for an educational building for the UNAM Institute of Renewable Energies in Temixco, Morelos, is presented. The architectural design had as its guiding principle the creation of a demonstration building with a bioclimatic design in a warm, semi-humid climate. This building will house the Bachelor of Renewable Energy Engineering (LIER). The design process was carried out with a participatory approach, where LIER authorities and future users expressed their vision of the needs to be met and their expectations. The geometry is rectangular with long facades with windows to the north and south, this reduces thermal loads due to solar radiation and allows the use of the wind that comes from the south during occupancy hours. The color of the walls is white on the outside and inside, on the outside it reduces the absorption of incident solar radiation and on the inside, it increases lighting. Solar protections were designed with eaves and sunshades on windows and screens on the east and west facades. Trees were located in the building's plaza and plants in the hallways. All spaces have natural ventilation and daylighting. In most spaces, cross ventilation provides greater flow speed, increasing the thermal comfort of occupants in hot conditions. On the ground floor and level 1, cross ventilation occurs with windows to the north and south. On level 2, the smaller classrooms were located in two bays separated by a hallway, where cross ventilation is achieved with the use of wind exchangers on the slab and windows. Vents were incorporated in all spaces that allow night ventilation, which together with the use of high thermal mass construction systems reduce the air temperature inside.

Palabras claves: diseño bioclimático; edificio demostrativo; sistemas pasivos; ventilación natural; iluminación natural; geometría; protecciones solares; masa térmica.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que el consumo de energía para la operación de las edificaciones en México representa cerca del 25% del consumo nacional (SENER 2023, Chateller & McNeil 2020). Por ello es relevante reducir este consumo de energía. El diseño de las edificaciones de acuerdo al clima del lugar, es decir el diseño bioclimático, es fundamental para lograr este objetivo.

En 2018 se inició el proyecto "Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM", financiado por el entonces Fondo de Sustentabilidad Energética del CONACYT y SENER, la UNAM y el Gobierno del Estado de Morelos en México. En este proyecto participaron el Grupo de Energía en Edificaciones del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Laboratorio de Energía, Medio Ambiente y Arquitectura (LEMA) de la Universidad de Sonora (UNISON) y el Lawrence Berkeley National Laboratory (LNBL) ligado a la University of California. El proyecto se

desarrollaría en un nuevo terreno adyacente al área original del IER, lo que permitiría la ampliación de su infraestructura educativa y de investigación.

El proyecto, fue planteado para desarrollarse en cuatro etapas. En la primera se realizó el anteproyecto arquitectónico del Plan Maestro (PM) de desarrollo del nuevo terreno del IER, el cual contempló la construcción de dos edificios, un auditorio con sala de exhibiciones, acceso al IER y comunicación entre el área original del IER y el nuevo predio. También en la primera etapa se hizo el anteproyecto arquitectónico y el proyecto ejecutivo del primer edificio, llamado Edificio de Docencia. En la segunda etapa se realizó el proyecto ejecutivo del acceso al IER y la comunicación entre el área original del IER y el nuevo predio, se inició la construcción del Edificio de Docencia, se diseñaron sistemas de medición y adquisición de variables relevantes para la evaluación de su desempeño, así mismo se diseñaron sistemas de enfriamiento de bajo consumo de energía para el Edificio de Docencia. En la tercera etapa se concluiría la construcción del Edificio de Docencia y se construirían e instalarían los sistemas de medición y de adquisición de variables relevantes, así como los sistemas de enfriamiento de bajo consumo de energía. En la cuarta etapa se realizaría la evaluación del Edificio de Docencia y la difusión de resultados. Lamentablemente el Fondo de Sustentabilidad Energética fue disuelto y el CONAHCYT no pudo ministrar lo correspondiente a las dos últimas etapas.

En este artículo se reseña el diseño y la implementación de sistemas pasivos del Edificio de Docencia, esto con el fin de socializar en la comunidad el proceso de diseño y las estrategias de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo, que tiene la particularidad de producir el mayor disconfort térmico en la temporada cálida seca.

2. PROCESO DE DISEÑO PARTICIPATIVO

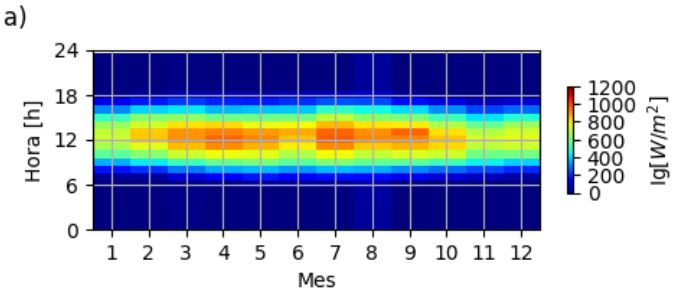
La participación activa de usuarios, diseñadores y especialistas fue clave en este proyecto. Involucrarse en todas las etapas, desde la programación arquitectónica hasta la evaluación post construcción, hace posible el aprovechamiento del potencial de las estrategias bioclimáticas y otros sistemas de acondicionamiento ambiental, optimizando la funcionalidad, la eficiencia energética y el confort. Esta metodología participativa ha demostrado ser una herramienta valiosa para crear edificios más sostenibles y adaptados a las necesidades de sus usuarios.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS ESPACIOS DEL EDIFICIO

El edificio contempla cuatro niveles y azotea. El semisótano tiene estacionamiento e instalaciones. Las escaleras, elevador y servicios separan al edificio en alas este y oeste. La planta baja tiene al oeste un comedor con cocina cuyas fachadas sur y oeste están completamente abiertas y al este se encuentran el área administrativa; una sala de trabajo; un aula de cómputo y un cuarto para impresión 3D. En el nivel 1, al oeste hay un laboratorio y al este se tienen cuatro aulas para 40 personas cada una. En el nivel 2, al oeste tienen dos laboratorios y en el ala este al sur hay tres aulas para 10 personas y al norte tres aulas para 20 personas, separados por un pasillo central. Al final hay una sala de trabajo para 40 personas. La azotea cuenta con espacios para realizar prácticas de energías renovables y un cuarto de máquinas. El edificio cuenta con una escalera de emergencia en el extremo este.

4. ANÁLISIS DEL CLIMA DEL LUGAR

Según la clasificación de bioclimas de CONAVI (2010) e INFONAVIT (2020), Temixco tiene clima cálido subhúmedo. De acuerdo con la clasificación de grados día que ha propuesto CONUEE (2020) le corresponde un clima 2. En este proyecto se realizó un análisis detallado a partir de datos recabados en la estación meteorológica del IER del año 2018. En la Figura 1 se presentan gráficos de promedios mensuales por hora de la irradiancia global solar, la temperatura del aire y la humedad relativa del aire. Se observa que Temixco tiene una alta irradiancia solar durante los meses de febrero a octubre y como es de esperarse, los datos de temperatura del aire indican que la temporada cálida va de febrero a octubre. Cuando se analizan los datos de humedad relativa del aire se nota que existen dos temporadas muy diferenciadas, de lluvias y de secas o estiaje. Es decir, la clasificación de subhúmedo se da por el promedio anual, lo que enmascara la característica del clima. La temporada cálida se divide en cálida seca que va de febrero a mayo y la temperada cálida húmeda de junio a octubre. Toda la temporada fría es de secas y va de noviembre a enero, es fría en términos relativos, ya que la temperatura mínima es de 10ºC y la máxima es de 27ºC, por lo que no ocasiona disconfort térmico. La temporada en la que se presenta mayor disconfort térmico en las personas es la temporada cálida seca, por lo que las estrategias bioclimáticas se enfocan principalmente a dicha temporada. Dicha temporada se caracteriza por la gran amplitud de las oscilaciones de la temperatura del aire, cercana a los 15ºC (Figura 2). Ya que una de las estrategias de diseño bioclimático para climas cálidos es el empleo de la ventilación natural, se analizan la magnitud y dirección del viento a través de rosas de viento con promedios anuales para las 24 horas y separados durante el día y durante la noche, los cuales se presentan en la Figura 3. Se observa un patrón típico de colina con una pendiente de sur a norte con vientos de día desde el sur y vientos de noche desde el norte.



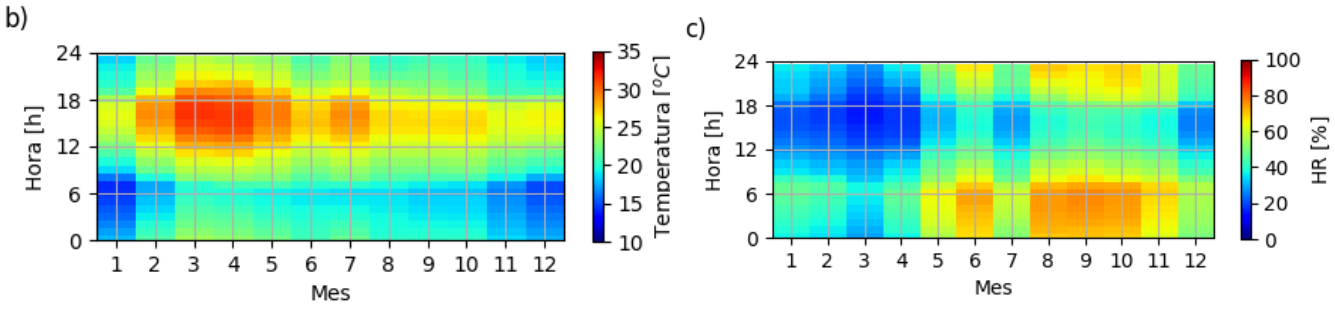


Figura 1. Análisis del clima de Temixco, Morelos: a) Irradiancia global solar, b) temperatura del aire y c) humedad relativa del aire.

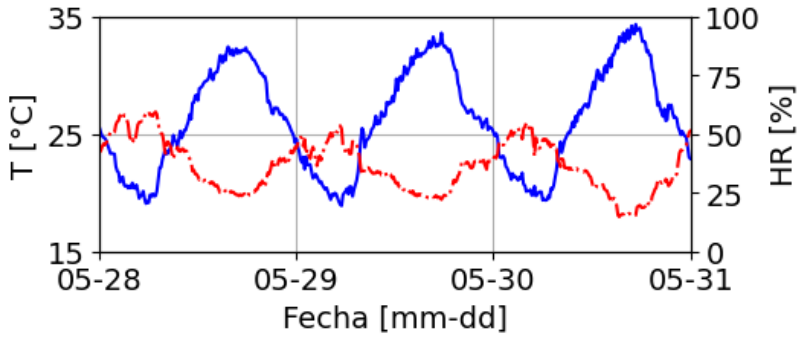


Figura 2. Temperatura y humedad relativa del aire como función del tiempo en la época cálida seca.

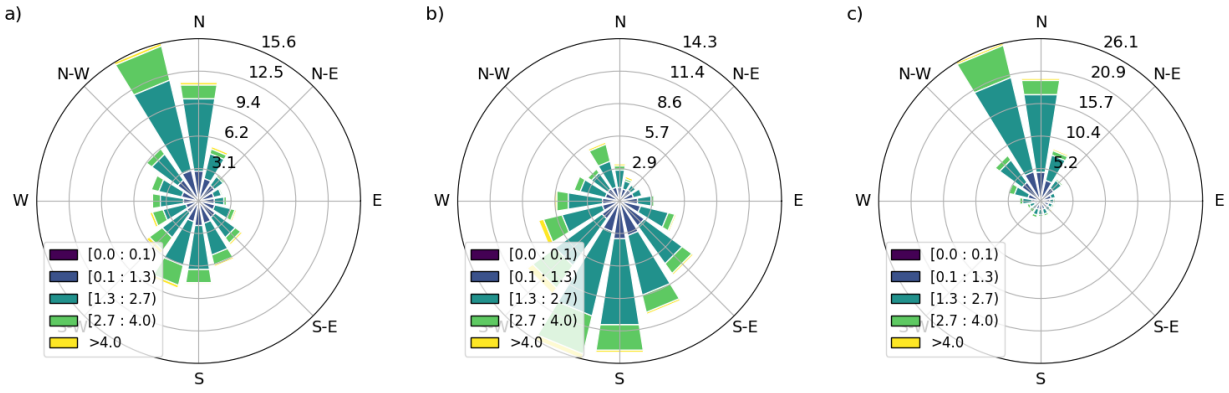


Figura 3. Rosas de viento en Temixco, Morelos, promedios anuales: a) día y noche, b) día y c) noche.

5. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS

La estrategia básica fundamental de diseño bioclimático para todos los climas cálidos es reducir las ganancias de calor por la radiación solar incidente en la envolvente. Para conseguir esto, varias estrategias específicas se deben seguir.

La primera estrategia es la selección de la geometría del edificio que logre dicha reducción. Se optó por una geometría rectangular con las fachadas largas orientadas al norte y al sur geográficos, esto permite que las ventanas de las aulas, laboratorios y oficinas se encuentren en dichas fachadas y sean más fáciles de proteger del ingreso de radiación solar directa, con respecto a otras orientaciones (Figura 4). Otra estrategia importante para reducir las ganancias de calor solar es emplear colores claros en las superficies exteriores de los elementos opacos de la envolvente, por lo que se seleccionó el blanco para muros y azoteas (Figura 4). Cabe señalar que las superficies de los muros al interior también son blancas para aumentar la iluminación al interior.

a) b)



Figura 4. Fachadas: a) sur y b) norte., se observan los muros y azotea de color exterior blanco.

Además, se incluye como estrategia para reducir la ganancia de calor solar la utilización de protecciones solares para las ventanas y para muros. En este caso las ventanas se encuentran en las fachadas norte y sur, donde se utilizaron ventanas grandes para favorecer la iluminación natural y la ventilación natural (Figura 5). En la fachada sur, la mayoría de las ventanas dan a un pasillo ancho techado, el techo constituye un gran alero, la protección se complementó con quiebrasoles en lamas, en las ventanas del segundo nivel que dan a un pasillo angosto se agregaron al alero del techo aleros en lamas y quiebrasoles en lamas. En la fachada norte se emplearon quiebrasoles en lamas. Las fachadas este y oeste serán protegidas con pantallas, que tendrán en la planta baja una malla para el crecimiento de enredaderas y en los niveles 1 y 2 se colocarán en las fachadas mencionadas módulos fotovoltaicos (Figura 6).

a) b) c)



Figura 5. Protecciones solares en ventanas: a) fachada sur con pasillo ancho, b) fachada sur con pasillo angosto y c) fachada norte.

Colocar plantas que produzcan sombra también reduce las ganancias de calor solar al edificio, al mismo tiempo que las plantas reducen la temperatura del aire por el efecto de evapotranspiración. En el Edifico de Docencia, se colocarán enredaderas (ciso) en las pantallas este y oeste y plantas cubresuelos (gudelia) en maceteros en los pasillos sur de los niveles 1 y 2, árboles (tecoma) y plantas (gudelia) en jardineras de la plaza al sur del edificio y plantas (gudelia) en áreas de la azotea (Figura 7). El tipo de vegetación se escogió por su fácil crecimiento y mantenimiento en Temixco, en particular el árbol por su capacidad de dar sombra, ser adecuado para poner en jardinera y ser nativo de México. Además, la gudelia y el tecoma tienen floraciones amarillas, color que se seleccionó por ser uno de los colores de identidad del IER.

a)



Figura 6. Protecciones solares tipo pantalla en fachadas a) este y b) oeste.



Figura 7. Plantas en el Edificio de Docencia, vistas de la fachada sur.

Tomando en cuenta que la época de mayor disconfort térmico es la época cálida seca, se emplearon estrategias de diseño bioclimático para el bioclima cálido seco. La primera estrategia es el uso de masa térmica en los sistemas constructivos del edificio, por lo que se utilizaron losas de concreto y muros de ladrillo hueco extruido esmaltado blanco (tipo Santa Julia). La segunda estrategia es el empleo de la ventilación natural nocturna, para ello se colocaron ventilas inferiores y superiores en las fachadas norte y sur, estas ventilas serán movidas por motores automatizados para su apertura durante la noche. Otra estrategia es la ventilación natural durante la ocupación de los espacios. En todos los espacios se procuró la ventilación natural cruzada. Coincidentemente la geometría adecuada para evitar las ganancias de calor por radiación solar, dada la dirección del viento en Temixco, también es la geometría adecuada para ventilación natural. Las aulas grandes se ubicaron en la planta baja y en el nivel 1 donde la ventilación cruzada en ocupación se da a través de ventanas en las fachadas norte y sur y la ventilación nocturna a través de las ventilas en ambas fachadas (Figura 8). Las aulas pequeñas en dos crujías separadas por un pasillo se ubicaron en el nivel 2 cuyo techo es la losa de azotea donde se colocaron estructuras denominadas intercambiadores de viento (Cruz-Salas et al. 2014) para permitir la ventilación natural cruzada, en ocupación a través de ventanas en una fachada y el intercambiador de viento, cuyas aperturas permanecen abiertas todo el tiempo, y para la ventilación nocturna a través de las ventilas en una fachada y el intercambiador de viento (Figura 9).

a)



Figura 8. Ventilación cruzada en aulas grandes y en laboratorios: a) ventilación en ocupación y b) ventilación nocturna.

a)

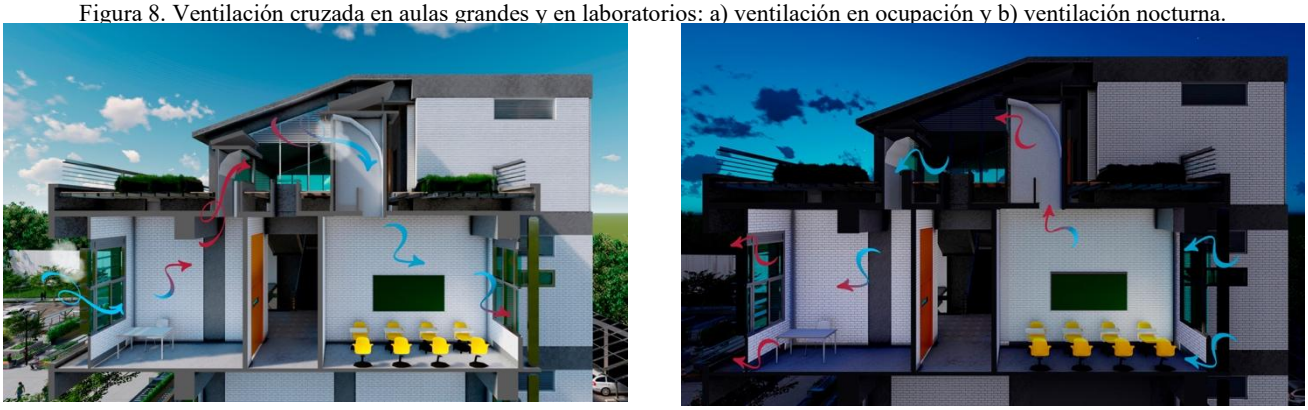


Figura 9. Ventilación cruzada en aulas pequeñas: a) ventilación en ocupación y b) ventilación nocturna.

6. CONCLUSIONES

El socializar el proceso de diseño de un edificio que será demostrativo de diseño bioclimático tiene por objetivo que este edificio realmente se convierta en un referente y un ejemplo para que en nuestro país cada vez más se diseñen y construyan edificaciones con estrategias de diseño bioclimático. Con ello se contribuiría al uso eficiente de la energía y a aumentar la sustentabilidad de las edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocemos la contribución a esta investigación de los participantes y de las instituciones financiadoras del proyecto "Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables UNAM". Fondo Sectorial CONACYT-SENER Sustentabilidad energética. Número de Registro: FSE-2017-01-291600.

REFERENCIAS

Comisión Nacional de Vivienda, CONAVI (2010). Código de Edificación de Vivienda. Consultado: 28/07/2024. Disponible en: **https://www.academia.edu/11169377/C%C3%B3digo_de_edificaci%C3%B3n_de_la_vivienda_en_M%C3%A9xico_CONAVI**

Comisión Nacional de Uso Eficiente de la Energía, CONUEE (2020). Clasificación de climas y su aplicación a la norma para envolvente de viviendas: notas para discusión. Cuadernos de la CONUEE, Número 6/Nuevo ciclo. Consultado:28/07/2024. Disponible en: https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno6NvoCiclo.pdf

Cruz-Salas M.V., Castillo J.A., Huelsz G. (2014). Experimental study on natural ventilation of a room with a windward window and different windexchangers. Energy and Buildings 84,458-465. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.033 (ISSN: 03787788)

Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, INFONAVIT (2020). Listado de municipios de México por Bioclimas. Consultado: 28/07/2024. Disponible en: **https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/005dcf74-d918-41aa-acfa-927e7b33d98a/12.+Anexo%2B1.%2BListado%2Bde%2Bregiones%2Bbioclim%C3%A1ticas.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT_TO=url&CACHEID=ROOTWORKSPACE-005dcf74-d918-41aa-acfa-927e7b33d98a-mmCFC0**

Eficiencia Energética/ Género y Energía/ Energía y Medio Ambiente

SESIONES TÉCNICAS

ID	TÍTULO	PONENTE
2171	Estado del conocimiento sobre mujeres, género y energía en México	Ana Gabriela Rincón Rubio
2041	Sintonización del control PID del convertidor Buck: una metodología didáctica de simulación	Pablo Colorado Posadas

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE MUJERES, GÉNERO Y ENERGÍA EN MÉXICO

Ana Gabriela Rincón Rubio
Área: Estudios Urbanos y Regionales, Instituto de Investigaciones Sociales-UNAM, Circuito Maestro Mario de la Cueva s/n Ciudad de la Investigación en Humanidades, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México, teléfono: 5560722414.
ana.rincon@sociales.unam.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta una revisión de literatura en curso sobre el estado del conocimiento en torno a mujeres, género y energía en México. El objetivo es trazar un panorama del campo a partir del análisis de investigaciones desarrolladas en distintos niveles y contextos dentro del territorio nacional. Se realiza un mapeo de la producción académica, destacando los avances teóricos y empíricos más significativos, así como las principales lagunas que persisten en el tema. Los hallazgos preliminares muestran que, aunque el vínculo entre género y energía constituye una línea de investigación emergente, aún presenta limitaciones importantes. Así, se propone un enfoque teórico-político que articule las necesidades de las mujeres en torno a la energía, a la vez que amplíe los horizontes de este campo de estudio. La investigación evidencia que el análisis de género en la energía se encuentra en consolidación en México. Este ha contribuido a visibilizar cómo las desigualdades de género, atravesadas por la clase, la etnicidad y el territorio, influyen en el acceso, uso y gestión de la energía. Sin embargo, se identifican vacíos significativos: la ausencia de estudios de alcance nacional y comparativo, la débil incorporación de la perspectiva de género en las políticas energéticas y la falta de marcos analíticos que conecten lo local con lo global. Ante este panorama, se plantean siete líneas estratégicas de investigación: (1) reconstruir históricamente las transiciones energéticas desde un enfoque feminista; (2) realizar estudios comparativos a nivel nacional y regional; (3) transformar las agendas científicas mediante enfoques feministas y transdisciplinarios; (4) vincular la justicia energética con críticas al modelo civilizatorio dominante; (5) impulsar programas de educación energética con perspectiva de género; (6) diseñar modelos que fortalezcan la participación de las mujeres en la gobernanza energética; y, (7) vincular los debates sobre género y energía con el marco de análisis sobre economía feminista y cuidados.

ABSTRACT

This paper presents an ongoing literature review on the state of knowledge regarding women, gender, and energy in Mexico. Its aim is to outline an overview of the field through the analysis of research conducted at different levels and contexts within the national territory. The study maps existing academic production, highlighting the most significant theoretical and empirical contributions, as well as the main gaps that remain. Preliminary findings reveal that, although the relationship between gender and energy is emerging as a line of inquiry, it still faces significant limitations. Accordingly, a theoretical-political framework is proposed to address women's energy-related needs while expanding the horizons of this field of study. The research indicates that gender analysis in the energy sector is still in a process of consolidation in Mexico. It has contributed to making visible how gender inequalities—intersecting with class, ethnicity, and territory—shape access to, use of, and control over energy. Nonetheless, critical gaps persist: the lack of nationwide and comparative studies, the weak integration of gender perspectives into energy policies, and the absence of analytical frameworks that connect local dynamics with global debates. In response, seven strategic research lines are proposed: (1) historically reconstruct energy transitions from a feminist perspective; (2) conduct comparative studies at national and regional levels; (3) reorient scientific agendas through feminist and transdisciplinary approaches; (4) link energy justice with critiques of the dominant civilizational model; (5) promote gender-sensitive energy education and literacy programs; (6) design models that strengthen women's participation in energy governance; and (7) connect debates on gender and energy with the analytical frameworks of feminist economics and care.

Palabras claves: Género y energía, estudios rurales, estudios periurbanos, ecología política feminista, economía feminista, trabajo de cuidados.

PANORAMA EN MÉXICO DEL VÍNCULO GÉNERO Y ENERGÍA

Introducción

El campo de los estudios sobre género y energía en México es emergente, heterogéneo y se encuentra en construcción. A diferencia de los países del norte global, donde predominan los análisis del consumo energético diferenciado por sexo en los hogares, en América Latina los enfoques tienden a situarse en la complejidad de los contextos territoriales, sociales y culturales. Desde la publicación de De Luca et al. (2018), que marcó un punto de partida al visibilizar la dimensión de género en la movilidad, las tecnologías renovables y los proyectos energéticos financiados por organismos multinacionales, los debates se han orientado hacia la necesidad de construir miradas críticas, capaces de cuestionar tanto la dependencia de los combustibles fósiles como las relaciones de poder que median la transición energética. Este manuscrito bosqueja la línea base desde la que pueden partir las investigaciones sobre este nexo en México.

Principales hallazgos sobre el vínculo género y energía en contextos mexicanos

El libro colectivo, coordinado por De Luca et al. (2018), enfatizó que la división sexual del trabajo y los roles de género condicionan la

manera en que mujeres y hombres acceden, usan y significan la energía, y que esta desigualdad debe ser entendida como parte estructural del sistema energético. Posteriores investigaciones han fortalecido el marco de la justicia energética con perspectiva de género, como la de Jiménez (2024). Esta línea propone entender la transición energética no solo como un cambio más que tecnológico, es decir, una oportunidad para redistribuir poder y recursos. Sin embargo, los hallazgos muestran que, en la práctica, los megaproyectos de energías renovables en México han tendido a reproducir desigualdades históricas, al excluir a las mujeres de la toma de decisiones, del acceso a beneficios y del control sobre el territorio (Vásquez y Sosa, 2020; Gómez, 2022). Desde enfoques interseccionales, otros estudios advierten que los impactos diferenciados de estos proyectos no pueden comprenderse sin atender simultáneamente las dimensiones de clase, etnia y raza, en tanto condicionan las posibilidades de propiedad, empleo y autonomía (Gay-Antaki, 2016; Yanes y Vera, 2025). La crítica feminista señala, además, que una parte de la literatura limita su alcance al no problematizar la lógica extractivista y mercantilizada de la transición energética, lo que oscurece las formas en que el modelo global de desarrollo perpetúa desigualdades de género.

En el terreno histórico y económico, los aportes de la Economía Feminista han visibilizado cómo las transiciones energéticas en México, desde mediados del siglo XX hasta la actualidad, se han orientado a la expansión mercantil sin considerar la sostenibilidad de la vida (Sánchez, 2024). Este enfoque revela que las desigualdades de género en el sector energético reproducen los patrones estructurales del mercado laboral, donde la presencia de las mujeres sigue siendo marginal, y propone que las energías renovables podrían abrir espacios para modificar estas exclusiones si se diseñan bajo criterios de equidad. En paralelo, el análisis institucional de Reynel et al. (2025) evidencia que la producción de conocimiento científico sobre energía reproduce también brechas de género: menos del 20% de quienes investigan en este campo son mujeres, con una concentración temática en bioenergía, planeación energética y energías renovables. Tal hallazgo confirma que las desigualdades no se limitan al acceso a la energía, sino que atraviesan también la investigación, la gobernanza y la política pública.

Otros trabajos se han centrado en los espacios domésticos y comunitarios, donde las mujeres son las principales transformadoras de la energía en actividades de cuidado, alimentación y reproducción cotidiana de la vida (Olvera, 2022; Vásquez y Sosa, 2019). La evidencia muestra que la división sexual del trabajo energético se traduce en que los hombres asumen el rol de proveedores de energéticos, mientras que las mujeres son responsables de su uso en el hogar. Estudios como los de Buechler et al. (2020), Alvarado et al. (2025) y Pampillón et al. (2025) documentan que las mujeres han encontrado en la gestión comunitaria de tecnologías renovables y en el aprovechamiento de recursos locales una vía para ampliar su autonomía, aunque continúan enfrentando barreras estructurales derivadas de la pobreza energética, la petrolización de las economías locales y la persistencia de estereotipos de género. La Economía Social y Solidaria y la Ecología Política Feminista han sido usadas como un marco analítico por su posibilidad para visibilizar cómo las experiencias energéticas comunitarias desafían la concentración del poder energético y abren espacios para modelos más democráticos e inclusivos.

Finalmente, investigaciones recientes en contextos periurbanos (Lara, Castro y Cedano, 2025) y educativos (Hernández y Hernández, 2025) apuntan a que la transformación de las desigualdades de género en el sector energético requiere estrategias de empoderamiento desde abajo: alfabetización energética, co-selección tecnológica, apropiación comunitaria y políticas que reconozcan las diferencias territoriales. Estos trabajos coinciden en que las mujeres no solo son usuarias pasivas de energía, sino que poseen saberes y prácticas clave para redefinir la transición energética de manera justa, sostenible y culturalmente situada. La inclusión de conocimientos locales —como la noción de "energía luna" identificada por Yanes y Vera (2025)— confirma que una transición energética feminista e interseccional debe reconocer las múltiples epistemologías que existen en el país, en lugar de imponer modelos homogéneos.

En suma, los diversos enfoque, aunque diversos, confluyen en una crítica común: la transición energética no será justa si no incorpora de manera explícita la dimensión de género y si no cuestiona la lógica extractivista que sustenta el modelo energético dominante. Las investigaciones revisadas coinciden en que los aportes de la economía feminista, la justicia energética, la ecología política feminista y la economía social y solidaria son fundamentales para replantear la relación entre energía, las mujeres y los territorios. El desafío pendiente es traducir estas perspectivas críticas en políticas públicas y marcos institucionales que garanticen no solamente el empleo de tecnologías de energía renovable, sino también la justicia y la democratización de la energía en México.

Retos y oportunidades para las investigaciones sobre género y energía en México

Los estudios sobre género y energía en México se concentran en experiencias puntuales —parques eólicos, comunidades rurales y periurbanas— y han usado principalmente metodologías cualitativas y participativas. Si bien aportan un conocimiento valioso sobre la forma en que las mujeres viven, resisten o se apropian de la transición energética, también ponen de relieve los principales vacíos en el campo: la falta de estudios comparativos de alcance nacional, la limitada integración de los hallazgos en las políticas públicas, y la ausencia de un marco que incorpore de manera sistemática la perspectiva de género. Además, la mayoría de investigaciones se concentran en la escala comunitaria o local, mientras que queda pendiente un análisis más profundo de las dinámicas urbanas, de las desigualdades en el acceso a energías renovables en los hogares, y de las tensiones entre los discursos globales de sostenibilidad y las realidades de exclusión en los territorios. Esto último limita la posibilidad de comprender cómo las desigualdades de género se reproducen o transforman bajo distintos modelos de gobernanza energética.

Además, a nivel histórico persiste la falta de investigaciones que rastreen los impactos diferenciados de las sucesivas transiciones energéticas en la vida de las mujeres y en la organización social del trabajo de cuidados a escalas hogar y comunitaria. Otro vacío relevante

se encuentra en la producción científica y técnica: las mujeres continúan subrepresentadas en la investigación sobre energía, y los enfoques feministas permanecen en los márgenes de las agendas institucionales. Esta brecha restringe la diversidad epistemológica necesaria para reorientar las políticas energéticas hacia horizontes más justos. A ello se suma que, aunque varios trabajos integran perspectivas interseccionales, su alcance suele ser descriptivo y no siempre se acompaña de una crítica profunda al carácter extractivista y mercantil de la transición energética dominante.

Asimismo, las investigaciones sobre educación y cultura energética con perspectiva de género son todavía incipientes. Si bien existen esfuerzos por medir la alfabetización energética con enfoque de género, es necesario ampliar este campo para formar una ciudadanía energética crítica y equitativa desde las primeras etapas educativas. Finalmente, aunque se han documentado experiencias de empoderamiento de mujeres a través de tecnologías renovables en contextos rurales y periurbanos, aún falta generar mecanismos de evaluación que permitan consolidar su impacto en términos de autonomía económica y participación política de las mujeres.

Líneas de estudio estratégicas para investigar sobre género y energía

De cara al escenario anteriormente descrito, convendría que las investigaciones se orientaran hacia siete líneas estratégicas: (1) reconstruir históricamente los efectos de las transiciones energéticas desde una perspectiva feminista; (2) realizar estudios comparativos de alcance nacional y regional; (3) transformar las agendas científicas para integrar enfoques feministas y transdisciplinarios; (4) articular la justicia energética con críticas al modelo civilizatorio actual; (5) desarrollar programas de alfabetización y educación energética con perspectiva de género; (6) diseñar modelos energéticos que fortalezcan la participación de las mujeres en la gestión y gobernanza de la energía; y, (7) vincular los debates sobre género y energía con el marco de análisis sobre economía feminista y cuidados.

CONCLUSIONES

El estado del conocimiento sobre género y energía en México es un campo de estudio emergente, aún en consolidación, que ha logrado visibilizar cómo las desigualdades de género, articuladas con clase, etnia y territorio, configuran de manera decisiva el acceso, uso y gestión de la energía. Sin embargo, persisten vacíos significativos: la falta de estudios de alcance nacional y comparativo, la escasa integración de la perspectiva de género en las políticas energéticas y la necesidad de marcos analíticos que conecten las escalas locales con los debates globales sobre transición y justicia energética. Seguir desarrollando estudios en esta línea de investigación es necesario para lograr que en las políticas y proyectos energéticos que integre la perspectiva feminista como condición indispensable para una transición verdaderamente justa y sostenible en México.

REFERENCIAS

Alvarado, M., Chávez, M., Uribe, A., Wal, H. (2025). Género y energía. Hans van der Wal, Maritza Xitlaly Alvarado Rodríguez, editores. En *Pobreza y democratización energéticas en Tabasco*. El Colegio de la Frontera Sur: Alternativas de Vida Solidaria para el Desarrollo y la Paz A. C.: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Alvarado, M., Chávez, M., Uribe, A., Wal, H., Yanes, M. (2025). *Democratizar la energía con perspectiva de género.* El Colegio de la Frontera Sur: Alternativas de Vida Solidaria para el Desarrollo y la Paz A.C.: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 83.

Buechler, S., Vázquez, Verónica, Martínez, K. y Dulce Sosa (2020) Patriarchy and (electric) power? A feminist political ecology of solar energy use in Mexico and the United States. *Energy Research & Social Science,* 70.

Cellini, M., Loos, S., Mirenda, C, Pisacane, L., Striebing, C., Tagliacozzo, S., (2024). "Exploring the nexus of gender and energy transitions: A systematic literature review". *Energy Research & Social Science*. Doi: 10.1016/j.erss.2024.103887.

De Luca, Ana, Vázquez, Verónica, Bose, Purabi y Velázquez, Margarita (Coords.) (2018). *Género, energía y sustentabilidad: aproximaciones desde la academia*. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM.

Gay-Antaki, M. (2016). "Now We Have Equality": A Feminist Political Ecology Analysis of Carbon Markets in Oaxaca, Mexico", Journal of Latin American Geography, vol. 15(3): 49–66.

Gomez, D. (2022). *"Renewable energy and the right of Indigenous women to participate:a gender perspective and human rights approach to the Unión Hidalgo Case, Oaxaca, México." degree of Master of Arts, Columbia University* https://academiccommons.columbia.edu/doi/10.7916/ta9f-hs12/download

Hernández, M., y Hernández, S. (2025). Alfabetización energética en estudiantes de Bachillerato en Veracruz, México: diferencia por género. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad (TERYS),* 4(1):17-21

Jiménez. P. (2024). Transición energética y género: ¿dónde estamos? (Ed) *Crónicas de la Bifurcación. Boletín del LET*, 3(7): 37.

Lara, D., Castro, J., y Karla Cedano (2025). "Community Empowerment in Peri-Urban Areas through Solar Technologies: A Case Study in Central Mexico". *Adv Environ Eng Res 2025*; 6(1): 010; Doi:10.21926/aeer.2501010.

Olvera, G. (2022). "Descubriendo relaciones entre el género y energía en datos de encuesta nacional de hogares". Tesis de Maestría en Ingeniería (Energía), Universidad Nacional Autónoma de México.

Pampillón- L., González, N., Ek, J., Wal, H. (2025). *Democratizar la energía: peletizar biomasa residual de carpinterías y talleres de artesanías*. El Colegio de la Frontera Sur: Alternativas de Vida Solidaria para el Desarrollo y la Paz A.C.: Universidad Juárez

Autónoma de Tabasco, 2025.

Reynel, H., Mendoza, D., Moreno, M., Moreno, J., Bonilla. A. (2025). "¿Cuál es el grado de participación de las científicas mexicanas en el campo de transición energética?" *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad (TERYS),* 4 (1): 12-16.

Sánchez, A. (2024). "La desigual participación de las mujeres en el sector energía de México Una mirada desde las transiciones Energéticas 1940-2020" *El semestre de las especializaciones* 5-2. 227-262.

Vásquez, Verónica y Dulce Sosa (2020). Extractivismo, género y energía eólica en el municipio de Zacatecas. ¿Desarrollo para quién?, *Estudios Críticos del Desarrollo,* X(19):239-271.

Vásquez, Verónica y Dulce Sosa (2019). Seguridad energética e interseccionalidad de género en Zacatecas, México. *Sociedad Y Ambiente,* (21): 131–154. Doi: 10.31840/sya.v0i21.204

Yanes, M., y Vera, G., (2025). "Experiencias energéticas desde una perspectiva interseccional en comunidades de Tabasco". *Revista Mexicana de Sociología*, 87(2): 369-400. pub 02 de mayo de 2025 Doi: 10.22201/iis.01882503p.2025.2.62741

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

SINTONIZACIÓN DEL CONTROL PID DEL CONVERTIDOR BUCK: UNA METODOLOGÍA DIDÁCTICA DE SIMULACIÓN

Pablo Colorado Posadas, David Lara Alabazares, Luis Guillermo Carreto Hernández y Jair Galicia Santiago.
Área académica, Tecnológico Nacional de México, Campus Misantla, Km. 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz, 93821, México, (235) 323 1545, **pcoloradop@itsm.edu.mx.**

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología que pretende ser una opción práctica en el control en lazo cerrado de un Convertidor reductor (Buck Converter), aplicando un proceso de sintonización de ganancia de Control PID con voltaje de alimentación directa variable, suministrada por una fuente de energía Eólica que induce a un generador síncrono de imán permanente (PMSG) y carga resistiva variable.

El proyecto fue desarrollado y simulado por medio de la herramienta Simulink/Simscape de MATLAB R2022b. El control por sintonización "Proporcional-Integral-Derivativo (PID)", consiste en determinar el ajuste de los parámetros "K_c, T_i, T_d" que permiten disponer de un sistema de control robusto con criterios de rendimientos aceptables. El proceso de sintonización del Control PID pretende facilitar el control en lazo cerrado del convertidor reductor evitando procedimientos matemáticos complejos.

La sintonización del Control PID se realiza a partir de la identificación de la planta del sistema, la linealización del modelo ya no es necesaria para sintonizar automáticamente las ganancias del controlador PID. La modulación por ancho de pulsos (PWM) se utiliza para encender y apagar rápidamente el transistor que lleva el circuito convertidor, en este caso es un MOSFET PNP de canal abierto. Los resultados obtenidos son validados por cálculos matemáticos y un análisis de señal de la respuesta del convertidor ante las variaciones de voltaje y carga resistiva.

ABSTRACT

This paper presents a methodology that aims to be a practical option in the closed-loop control of a Buck Converter, applying a PID Control gain tuning process with variable direct supply voltage, supplied by a wind power source that induces a permanent magnet synchronous generator (PMSG) and variable resistive load.

The project was developed and simulated using MATLAB R2022b Simulink/Simscape tool. Proportional-Integral-Derivative (PID) tuning control consists of determining the adjustment of the following parameters "K_c, T_i, T_d" that allow to have a robust control system with acceptable performance criteria.

The PID Control tuning process is intended to facilitate the closed-loop control of the step-down converter avoiding complex mathematical procedures. The PID Control tuning is performed from the identification of the system plant, the linearization of the model is no longer necessary to automatically tune the gains of the PID controller. Pulse Width Modulation (PWM) is used to quickly turn on and off the transistor carrying the converter circuit, in this case it is an open channel PNP MOSFET. The results obtained are validated by mathematical calculations and a signal analysis of the converter response to voltage and resistive load variations.

Palabras claves: Sintonización, Control PID, Convertidor reductor, Turbina Eólica, Simulación, Metodología.

INTRODUCCIÓN

Los convertidores DC-DC son sistemas electrónicos de potencia ampliamente utilizados en fuentes de alimentación reguladas que realizan diferentes tareas y aplicaciones dentro del área eléctrica o electrónica [1][2][3]. Aplicaciones en las que controla el flujo de energía eléctrica para obtener la mayor eficiencia posible [4]. El convertidor reductor (Buck) por su sencillez y bajo costo, es muy utilizado en aplicaciones donde es necesario reducir la tensión de salida con respecto a la entrada [5][6]. Existe una amplia oferta comercial de convertidores reductores, sin embargo, muchos de ellos tienen problemas para cumplir los requisitos de regulación y demanda de corriente eléctrica [7] , así como una baja generación de ruido y ondulación de la tensión. Factores como la generación de ruido y el rizado de tensión impiden mejorar el rendimiento del convertidor [8][9] [10]. El objetivo de estos modelos es obtener una representación lo más cercana posible al funcionamiento real del convertidor, que facilite el diseño de estrategias de control eficientes y fáciles de implementar en dispositivos de bajo costo [11].

Existen diferentes estudios en el desarrollo de modelos matemáticos que faciliten el análisis y simulación de convertidores DC-DC, entre los que destacan [12], donde se hace una revisión no lineal del estado del arte de la modelización y simulación no lineal aplicada a este tipo de convertidores. En esta investigación, Nogueiras señala la dificultad de encontrar un patrón de clasificación para los métodos de modelado y simulación. Muchos de los métodos analizados presentan una elevada complejidad y considerable consumo de recursos computacionales.

En aplicaciones reales, la tensión de salida de los convertidores CC-CC debe ser controlada para obtener un valor deseado, teniendo variaciones en la tensión de entrada y en la corriente de carga [13]. Una de las técnicas más aplicadas en el control de convertidores conmutados es el control de tensión mediante modulación por ancho de pulsos PWM [14] [15] que originaron estrategias de control eficientes para convertidores de potencia y en especial para el convertidor reductor, siendo de fácil implementación y bajo costo. Algunos de estos artículos de investigación son de [16] [17] [18] [19] [20]. El estudio de [20] se resalta, el cual presenta un procedimiento simple y sistemático de un controlador PID para el convertidor reductor.

Debido a lo anterior descrito, la dificultad que implica obtener un modelo matemático y llevar a cabo su implementación, requiere de análisis y tiempo para su validación utilizando alguna herramienta de software. El presente artículo presenta una metodología para aplicar el procedimiento de sintonización para obtener el ajuste del controlador PID del convertidor reductor. El control por sintonización "*Proporcional-Integral-Derivativo* (PID)", consiste en determinar el ajuste de los parámetros "K_c, T_i, T_d" que permiten disponer de un sistema de control robusto con criterios de rendimiento aceptables. Los métodos de sintonización se han desarrollado desde que Ziegler y Nichols propusieron su procedimiento en 1942, entre otros métodos están los de: *Cohen y Coon, Kaya y Sheib* [21] [22] [23] [24] [25]. Con el proceso de sintonización el convertidor Buck debe ser capaz de mantener la tensión de salida esperada ante las variaciones de voltaje de entrada y carga resistiva. Como validación del uso de un controlador PID, más del 97 % de los controladores industriales se basan en algoritmos PID debido a su funcionalidad, sencillez de diseño y facilidad de implementación [26] [27] [28] [29] [16].

ESQUEMA GENERAL DE METODOLOGÍA: TURBINA EÓLICA, CONVERTIDOR REDUCTOR Y SINTONIZACIÓN PID

La Figura 1, muestra un esquema general del proceso de la metodología que se desarrolla para la sintonización PID control del convertidor reductor.

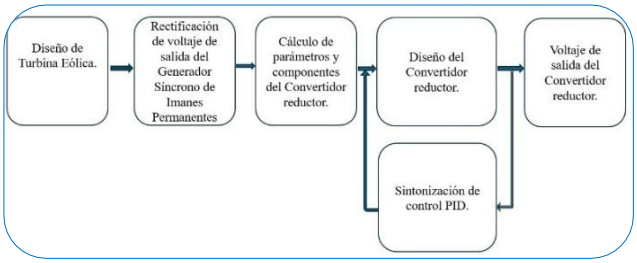


Figura 1. Esquema general para la aplicación de la metodología PID sintonización control.

Diseño y funcionamiento de Turbina Eólica

La turbina tólica se realizó con la herramienta Simulink/Simscape, se selecciona "*generador de inducción de turbina eólica (tipo fasor)*", esta turbina trabaja con diferentes perfiles de viento que se introducen en la entrada "*velocidad del viento* (m/s)" y se configura a en el bloque de "*Stair Generator Win*". El par mecánico (Tm) representa el momento de fuerza ejercido por el viento sobre el rotor de la turbina para hacerlo girar, y se conecta a la entrada del generador PMSG, el cual genera una tensión alterna trifásica. La tensión del $PMSG$ se rectifica mediante un puente de diodos universal, se aplica un filtro resistivo capacitivo para limpiar la tensión rectificada, como se muestra en la Figura 2.

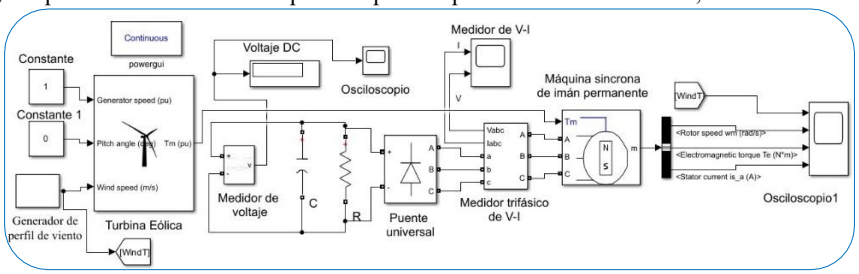


Figura 2. Esquema de Turbina Eólica, PMSG y rectificador universal.

Convertidor reductor (Buck Converter)

El convertidor reductor se encarga de reducir la tensión de salida respecto a la entrada, su funcionamiento se define por la estructura de su diseño y el valor de los parámetros y componentes del circuito: "*tensión de entrada, inductancia, capacitancia, resistencia de carga y ciclo de trabajo* D". El ciclo D, es el que controla el tiempo de encendido y apagado del interruptor $MOSFET$. Otros parámetros que se deben de calcular para el diseño del convertidor Buck son: "*corriente máxima de salida, incremento de la corriente en la bobina, incremento de la tensión de salida y potencia*" Los convertidores DC-DC tienen dos modos de trabajo: a) Modo de conducción continua (CCM) y modo de conducción discontinua (DCM), en este caso estará en modo de conducción continua (CCM).

Sintonización PID control del convertidor reductor

El valor de los componentes y parámetros del convertidos, se muestran en la Tabla 1, las ecuaciones utilizadas para los valores encontrados se muestran en la Tabla 2. El proceso de sintonización PID de control para el convertidor reductor, consiste en una serie de pasos que se muestran a continuación.

Tabla 1. Valores de los parámetros eléctricos y componentes del convertidor reductor.

Concepto	Valor	Unidad de medida
Potencia	250	Watts (W)
Voltaje de entrada (V_{in})	40	Volts (V)
Frecuencia de trabajo (f_s)	10	Kilohertz (kHz)
Voltaje de salida (v_o)	20	Volts (V)
Corriente máxima de salida (I_{outmax})	12.5	Amperes (A)
Variación de corriente en la bobina ($delIL$)	125	Milivolts (mV)
Variación de voltaje de salida ($delV_{out}$)	2000	Milivolts (mV)
Bobina	8.0	Milihenrios (mH)
Capacitor	7.8125	Microfaradios (μF)
Carga resistiva	1.6	Ohms (Ω)
Ciclo de trabajo	0.5 (50%)	D

Tabla 2. Cálculo de componentes y parámetros del convertidor reductor.

Concepto	Ecuación	Variable
Corriente máxima de salida	$I_{outmax} = P/V_{out}$	I_{outmax}
Variación de corriente en la bobina	$delIL = 0.01 * I_{outmax}$	$delIL$
Variación de voltaje de salida	$delV_{out} = 0.01 * V_{out}$	$delV_{out}$
Inductor	$L = \frac{V_{out} * (V_{in} - V_{out})}{delIL * fs * V_{in}}$	L
Capacitor	$C = \frac{delIL}{8 * fs * delV_{out}}$	C
Carga resistiva (R)	$R = \frac{V_{out}}{I_{outmax}}$	R
Ciclo de trabajo	$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$	D

Convertidor reductor con control PID de lazo cerrado. Con los datos de la Tabla 1 y aplicando la herramienta de *Simulink/Simscape*, se diseña el convertidor reductor, Figura 3. El diseño tiene dos etapas, la etapa 1 indicada en línea punteada azul, se encuentra el convertidor reductor, la etapa 2 marcada en línea punteada verde, se encuentra la retroalimentación del control PID por sintonización que ajusta automáticamente a "D" ante las variaciones del voltaje de entrada y la carga resistiva, para que el convertidor reductor responda eficientemente.

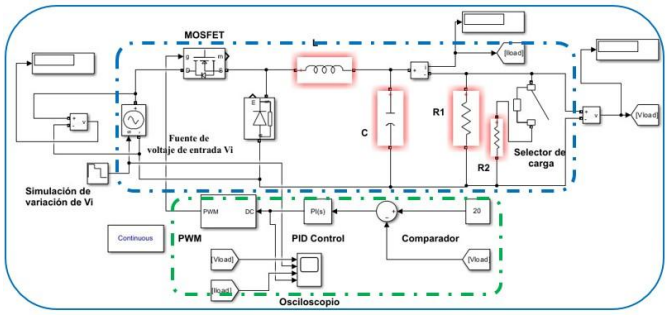


Figura 3. Convertidor reductor con control de Sintonización PID en lazo cerrado

Configuración de carga resistiva. Se realiza por medio del componente selector o Breaker1 (Figura 3), en un determinado tiempo tiene un valor de carga y pasando este primer tiempo hace la selección de la otra carga, simulando con esto tener una variación de carga resistiva. En este caso $R1$ se selecciona del tiempo $[0 - 0.25]$ y $R2$ de $[26 - 1]$ en segundos.

Configuración de sintonización del control PID. El proceso inicia dando doble clic en el componente PID control que está en la etapa de control de la Figura 3, se abre una ventana la cual se muestra en la Figura 4a. Se selecciona "*Tune*" aparece una ventana de advertencia, dar clic en *ok,* se abre otra ventana, seleccionar $Plant$, se abre otra venta con tres opciones, seleccionar $Identify\ New\ plant$, dar clic en $Get\ I/O\ Data$, seleccionar $Simulate\ Data$, en esta opción se abre una ventana que debe ser configurada con los datos de la Figura 4b. El valor de la amplitud se ingresa dando clic en el grane que está a un lado de la opción *step,* introducir el valor y cerrar ventana. Posteriormente seleccionar $Run\ simulation \rightarrow Apply \rightarrow Close$. De la figura 4c, seleccionar $Underdamped\ Pair$ y dentro de esta opción seleccionar

Structure One Pole, en este último proceso se obtiene la primera identificación de planta de los valores de $k = 24.275, T_w = 0.025$ *y* $zeta = 0.2$. En esta misma Figura 4c, seleccionar *Auto Estimate*, se abre una ventana con datos del proceso de identificación del modelo, al finalizar se debe de cerrar la ventana. Se tendrá otra ventana como se muestra en la Figura 4d, seleccionar *Apply*, el cual dará como resultado los valores del controlador PID del sistema del convertidor reductor, siendo: $P = 0.0879, I = 80971$ como se muestra en la Figura 4e, el gráfico de lado izquierdo muestra el seguimiento de la referencia y el del lado derecho muestra la estructura final de identificación de la planta del sistema. Posteriormente en esta misma Figura, seleccionar la pestaña *PID TURNER*, seleccionar "*Update Block*", para actualizar los parámetros del controlador PID, cerrar ventana y finalmente solo quedará la ventana de inicio mostrada en la Figura 4a, con los valores finales del control PID por sintonización, los cuales son: $P = 0.87903, I = 8.71489$, como se muestra en la Figura 4f, dar clic en ok y con esto se finaliza el proceso de sintonización de control PID.

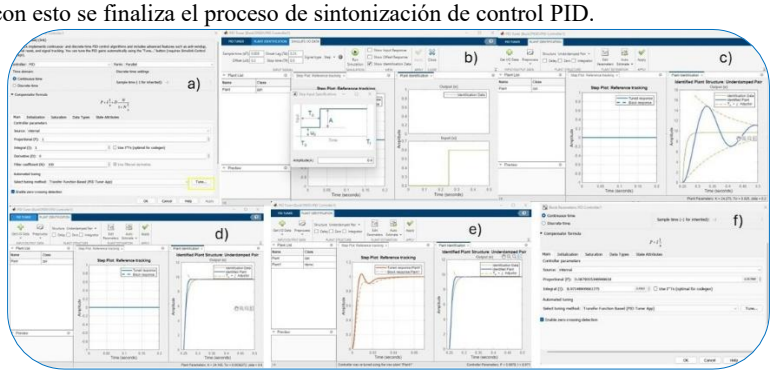


Figura 4: a) Selección de Tune, b) Simulate Data, c) Underdamped Pair, d) Apply, e) Valores de PI, f) Valores finales de PI.

ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL CONVERTIDOR REDUCTOR

El voltaje de salida del convertidor está en función del ciclo de trabajo D y el modo de conducción del interruptor; la relación del tiempo del estado alto t_{on} y el tiempo del periodo T_s, se conoce como el ciclo de trabajo D. El voltaje de salida del convertidor se obtiene aplicando una integral definida en el estado alto y bajo del periodo de la señal PWM, la cual se muestra en la ecuación (1), en la ecuación (2) se muestra el ciclo de trabajo como la relación del tiempo del estado alto y el tiempo del periodo del PWM. También se puede presentar el voltaje de salida como el producto del ciclo de trabajo y el voltaje de entrada (v_{in}), como se muestra en la ecuación (3).

$$v_{out} = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} v_{in}(t)dt = \frac{1}{T_s}\left[\int_0^{t_{on}} v_{in}(t)dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0dt\right] = \frac{t_{on}}{T_s}v_{in} = Dv_{in} \quad (1)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = t_{on}f \quad (2)$$

$$v_{out} = Dv_{in} \quad (3)$$

La función de transferencia del convertidor reductor se presenta en la ecuación (4), la cual es la relación del voltaje de salida v_o y el ciclo de trabajo D.

$$G_{vd} = \frac{v_o(s)}{D(s)} = \frac{v_{in}}{LC} * \frac{1}{s^2+\left(\frac{1}{RC}\right)s+\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

Donde:

v_{in}= Voltaje de entrada, R= Resistencia de carga, L= Inductancia, C= Capacitancia

La función de control PI del convertidor reductor se muestra en la ecuación (5)

$$Gc(S) = K_p + \frac{K_I}{S} = \frac{K_p s+K_i}{s} \quad (5)$$

Donde:

K_p=Ganancia proporcional, K_i= Ganancia Integral

La función de transferencia de lazo cerrado es la retroalimentación del error $e(s) = v_{ref}(s) - v_o(s)$, el error pasa a través del control PI, dando como resultado la ecuación (6).

$$T(s) = \frac{v_o(s)}{v_{ref}(s)} = \frac{Gc(s)*Gvd(s)}{1+Gc(s)*Gvd(s)} \quad (6)$$

Haciendo sustitución de funciones, se tiene:

$$T(s) = \frac{\left(\frac{K_p s+Ki}{s}\right)*\left(\frac{v_{in}}{LC}*\frac{1}{s^2+\left(\frac{1}{RC}\right)s+\frac{1}{LC}}\right)}{1+\left(\frac{K_p s+Ki}{s}\right)*\left(\frac{v_{in}}{LC}*\frac{1}{s^2+\left(\frac{1}{RC}\right)s+\left(\frac{1}{LC}\right)}\right)} \quad (7)$$

Multiplicando numerador y denominador se obtiene de forma general la función de transferencia del sistema, se muestra en (8)

$$T(s) = \frac{(K_p s+K_i)*\frac{v_{in}}{LC}}{s\left[s^2+\frac{1}{RC}s+\frac{1}{LC}\right]+(K_p s+K_i)*\frac{v_{in}}{LC}} \quad (8)$$

RESULTADOS

Las pruebas realizadas al convertidor reductor ante las variaciones de voltaje de entrada y de la carga resistiva, la cual varía entre valores de 1.6 y 0.8 $ohms$ para cada prueba realizada, Tabla 3. El convertidor fue diseñado para tener un voltaje de salida de 20 $volts$, esta condición se cumple si el voltaje de entrada es mayor a este valor, de lo contrario no realizará la función de convertidor reductor, como se puede observar cuando la velocidad del viento es de 8 m/s, se tiene un voltaje de entrada de 17.7 $votls$. La condición se cumple a partir de cuando se tiene una velocidad del viento de 9 m/s hasta 11 m/s, el voltaje de entrada en el convertidor tiene un rango de [32.33 a 60.21] volts, dando un voltaje promedio a la salida de 9.43 $volts$, este valor es aceptable dentro del voltaje calculado y esperado. Cuando la velocidad del viento es de 12 m/s, se tiene un voltaje de entrada en el convertidor de 72.93 $volts$, siendo un valor de magnitud fuera del rango de operación del convertidor lo que da como resultado un voltaje de salida de 18.76 $volts$.

Tabla 3. Resultados del convertidor reductor ante variaciones de vi y Rl

Velocidad del viento en m/s	Voltaje de entrada vi en volts	Carga resistiva Rl en homs	Voltaje de salida vo en volts
8	17.7	1.6/0.8	17.23
9	32.33	1.6/0.8	19.59
10	43.25	1.6/0.8	19.59
11	60.21	1.6/0.8	19.12
12	72.93	1.6/0.8	18.76

En la Figura 5a se muestra el diseño completo del convertidor reductor con control de lazo cerrado PID por sintonización, voltaje de entrada suministrado por el generador de imán permanente inducido por la turbina eólica y el rectificador universal. En la Figura 5b se muestra gráficamente los perfiles de viento en la turbina eólica, el voltaje en el PMSG, el voltaje de salida (vo) del convertidor reductor y el PID control.

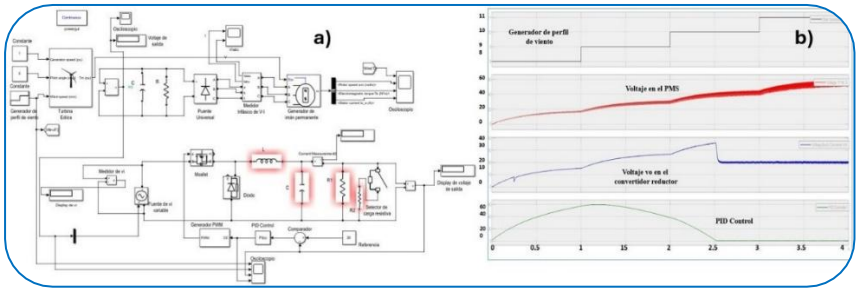


Figura 5: a) Diseño de convertidor reductor con entrada de energía eólica, b) Comportamiento de perfiles de viento, vo del PMSG, vo del convertidor y PID control.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos y mostrados en la Tabla 3 se concluye que la metodología aplicada para realizar el control PID por sintonización al convertidor reductor en lazo cerrado, es eficiente y robusto ante las variaciones en la carga resistiva y el voltaje de entrada suministrado por el generador síncrono de imán permanente inducido por la Turbina eólica la cual fue simulada bajo diferentes perfiles o velocidades de viento. Esta metodología es práctica ante otros métodos que necesitan procedimientos complejos matemáticos para realizar la misma tarea de control en los convertidores reductores. En futuros trabajos se propone trabajar en el control de *convertidores elevadores y elevadores/reductores* aplicando algoritmos de control "*difuso*, *modos deslizantes, robusto y paramétrico",* aplicados al uso de la tecnología en energías renovables específicamente eólica y solar fotovoltaica.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al TECNM por el apoyo brindado. Pablo Colorado y Jair Santiago, agradecen al SECIHTI por las becas CVU- 675016 y CVU-2039271, respectivamente.

REFERENCIAS

[1] M. W. a. P. S. A.J. Korn, «"Low output frequency operation of the modular multi-level converter",» *Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE,* pp. 3993-3997, 2010.

[2] M. G. V. a. A. A. Gómez, «"Diseño estático de un convertidor dc/dc reductor-elevador bidireccional",» vol. 14, nº 26, pp. 7-14, Tecnuca.

[3] M. J. S. P. M. a. G. S. S. Sivakumar, «"An assesment on performance of dc-dc converters for renewable energy applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 58, nº 1, pp. 1475-1485, 2016.

[4] R. V.-M. a. A. F.-T. E. Martínez-Rosas, «"Modeling and simulationn of lithium-ion batteries",» *Computers & Chemical Engineering,* vol. 35, nº 9, pp. 1937-1948, 2011.

[5] D. Czarkowski, «"Dc-Dc Converters",» *Power electronics handbook, Elsevier,* pp. 249-263, 2011.

[6] Z. J. a. R. J. I. Jamil, «"Analysis, design and implementation of zero-current-switching resonant converter dc-dc buck converter",» *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEEE),* vol. 2, pp. 1-12, 2014.

[7] B. P. K. I. M. C. a. H. Y. D. Murthy-Bellur, «"Comercial dc-dc converters: A survey of isolated low-voltage very-high-current systems for transportation electrification",» *IEEE Power and Energy Conference at Illinos (PECI),* pp. 1-8, 2017.

[8] A. P. Álamos, «"Análisis de pérdidas del convertidor buck síncrono para aplicaciones móviles",» *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México,* 2007.

[9] Y. L. a. Y. W. Li, «"Power management of inverter interface autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame",» *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 2, nº 1, pp. 30-40, 2011.

[10] S. S. a. S. Matsunaga, «"Fundamental study of influence of ripple noise from dc-dc converter on spurious noise of wireless portable equipment",» *IEEE Transactions on Power Electronics,* vol. 31, nº 3, pp. 2111-2119, 2015.

[11] H. M. M. a. E. Babaei, «"Mathematical modeling of buck.boost dc-dc converter and investigation of converter elements on transientand estady state responses",» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* vol. 44, nº 1, pp. 949-963, 2013.

[12] A. A. N. Meléndez, «"Nueva metodología de modelado y simulación no lineal, aplicación a convertidores pwm continua/discontinua en paralelo de alto rendimiento",» *PhD dissertration, Universidad de Vigo,* 2003.

[13] T. M. F. H. R. A. a. M. N. Baharudin, «"Performance analysis of dc-dc converter for renewable energy application",» *Journal of Physics: Conference Series,* vol. 1019, pp. 12-20, 2018.

[14] R. W. E. a. D. Maksimovic, «"Fundamentals of power electronics,» *Springer Science & Business Media,* 2007.

[15] Y. S. R. D. a. A. B. D. Ounnas D. Guiza, «"Design and implementation of a digital pid controller for dc-dc buck converter",» *1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA). IEEE,* pp. 1-4, 2019.

[16] S. K. a. P. T. Krein, «"PID controller tuning in a dc-dc converter: A geometric approach for minimum transient recovery time",» *IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL),* pp. 1-6, 2010.

[17] L. Guo, «"Implementation of digital PID controllers for dc-dc converters using digital signal processors",» *IEEE International Conference on Electro/Information Technology,* pp. 306-311, 2007.

[18] J. Y. H. a. R. M. N. L. Guo, «"Evaluation of dsp-based PID and fuzzy controllers for d-dc converters",» *IEEE transactions on industrial electronics,* vol. 56, nº 6, pp. 2237-2248, 2009.

[19] M. F. N. T. a. N. A. Rahim, «"Small-signal ac modeling technique of buck converter with dsp based proportional-integral-derivative (PID) controller",» *IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications",* vol. 2, pp. 904-909, 2009.

[20] N. R. I. D. B. I. a. M. M. M. F. N. Tajuddin, «"State space averaging tecnique of power converter with digital PID controller",» *TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference,* pp. 1-6, 2009.

[21] R. S. a. P. S. H. O. Bansal, «"PID controller tuning techniques: a review",» *Journal of control engineering and technology,* vol. 2, nº 4, 2012.

[22] Y. V. H. a. S. S. V. Siddhartha, «"Non-ideal modelling and imc based PID controller design of pwm dc-dc buck converter",» *IFAC PapersOnLine,* vol. 51, nº 4, pp. 639-644, 2018.

[23] D. M. S. S. a. S. P. R. P. Borase, «"A review of PID control, tuning methods and applications",» *International Journal of Dynamics and Control,* vol. 9, pp. 818-827, 2021.

[24] K. A. a. F. D. O. A. Somefun, «"The dilemma of PID tuning",» *Annueal Reviews in Control,* vol. 52, pp. 65-74, 2021.

[25] T. S. a. L. M. A. S. Samosir, «"Simple formula for designing the PID controller of a dc-dc buck converter",» *International Journal of Power Electronics and Drive Systems,* vol. 14, nº 1, p. 327, 2023.

[26] P. A. a. I. G. S. Chander, «"Auto-tuned, discrete PID controller for dc-dc converter for fast transient response",» *International Conference on Power Electronics (IICPE2010),* pp. 1-7, 2010.

[27] S. B. a. A. Kozáková, «"Advanced methods of PID controller tuning for specified performance",» *PID Control for Industrial Processes,* pp. 73-119, 2018.

[28] Z. A. a. K. Q. K. Nouman, «"Comprehensive study on performance of PID controller and its applications",» *2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC),* pp. 1574-1579, 2018.

[29] S. H. a. S. P. B. I. D. Díaz-Rodríguez, «"Analytical design of PID controllers,» *Springer ,* 2019.

SESIONES POSTER

ID	TÍTULO	PONENTE
2197	Simulación Teórica por Trazados de Rayos de la Reconversión Óptica del Campo de Heliostatos de Torre Central de la Plataforma Solar de Hermosillo	Carlos Eduardo Borjas Castillo
2182	Perovskita de múltiples sustituciones para la fabricación de celdas solares por la técnica de dispersión por barra en condiciones ambientales	Carlos Arias Ramos
2162	Análisis comparativo de una mezcla binaria con respecto al agua como fluido de trabajo en un concentrador cilíndrico parabólico	Selene Flores Cajero
2161	Determinación del flujo radiactivo para un concentrador cilindro parabólico utilizando el software Tonatiuh	Daniel Briseño Garduño

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

SIMULACIÓN TEÓRICA POR TRAZADOS DE RAYOS DE LA RECONVERSIÓN ÓPTICA DEL CAMPO DE HELIOSTATOS DE TORRE CENTRAL DE LA PLATAFORMA SOLAR DE HERMOSILLO

Carlos Eduardo Borjas Castillo[1], 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

Con la finalidad de usar reactores solares experimentales de alta temperatura en la Plataforma Solar Hermosillo, se iniciaron los trabajos de reconversión óptica de un conjunto de siete heliostatos.

Este trabajo presenta el análisis óptico de un conjunto de nueve helióstatos pertenecientes al Campo Experimental de Torre Central (CEToC), ubicado en la Plataforma Solar de Hermosillo. Mediante cálculos matemáticos y simulaciones de trazado de rayos, se busca replicar y comprender el comportamiento óptico observado experimentalmente. El estudio incluye la optimización del canteo de facetas, la estimación del error óptico global y la caracterización de la distribución solar en distintos momentos del día y del año.

Una de las particularidades de este conjunto es la incorporación de facetas con geometrías diversas planas, esféricas y mecánicamente deformadas diseñadas para mejorar la concentración de la radiación solar. Los resultados obtenidos tienen como finalidad servir de base para el diseño de una segunda etapa óptica de reconcentración que se integrará en un futuro reactor termoquímico en el CEToC.

La simulación se llevó a cabo utilizando el software de código abierto Tonatiuh, el cual permitió evaluar la configuración geométrica y el desempeño óptico de los helióstatos. Se obtuvo un flujo pico promedio de 260 kW/m² concentrado en una imagen solar de 3.14 m² (radio de 1 metro), logrando un factor de concentración promedio de 71.55 soles. Estos resultados son clave para el desarrollo de tecnologías solares avanzadas aplicadas a procesos termoquímicos.

Palabras claves: Torre central, tonatiuh, heliostato, facetas, trazado de rayos.

ABSTRACT

To implement experimental high-temperature solar reactors at the Hermosillo Solar Platform, optical conversion work began on an array of seven heliostats.

This work presents the optical analysis of an array of nine heliostats belonging to the Central Tower Experimental Field (CEToC), located at the Hermosillo Solar Platform. Through mathematical calculations and ray tracing simulations, the objective is to replicate and understand the experimentally observed optical behavior. The study includes the optimization of facet edging, the estimation of global optical error, and the characterization of solar distribution at different times of the day and year.

One of the unique features of this array is the incorporation of facets with diverse geometries—planar, spherical, and mechanically deformed—designed to improve the concentration of solar radiation. The results obtained are intended to serve as a basis for the design of a second optical reconcentration stage to be integrated into a future thermochemical reactor at the CEToC.

The simulation was carried out using the open-source software Tonatiuh, which allowed the geometric configuration and optical performance of the heliostats to be evaluated. An average peak flux of 260 kW/m² was obtained, concentrated in a 3.14 m² solar image (radius of 1 meter), achieving an average concentration factor of 71.55 suns. These results are key to the development of advanced solar technologies applied to thermochemical processes.

Keywords: Central tower, tonatiuh, heliostat, facets, ray tracing.

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 la reconversión óptica del CEToC que para este trabajo se consideran 9 heliostatos, donde 7 de estos se modificaron sus superficies reflectantes. 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.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

La metodología del trabajo se desarrolla en siete etapas (Figura 2), desde la identificación del problema hasta la obtención de resultados.

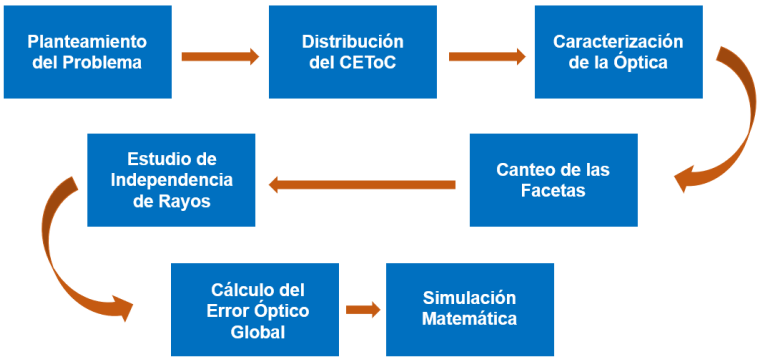


Figura 2. Diagrama de Flujo del Procedimiento General de la Metodología.

Primero, se reconocen los heliostatos del CEToC (Figura 3) y sus particularidades, clasificando las superficies en planas, esféricas y deformadas según su geometría y propiedades ópticas. Luego, se analizan las dimensiones y disposición del campo para definir los parámetros de simulación.

Se determina el canteo de las facetas, factor clave para la proyección de la imagen solar, y se evalúa el error óptico global tras un estudio de independencia de rayos.

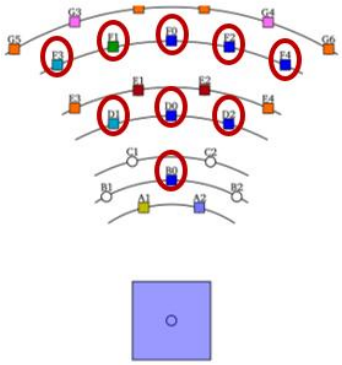


Figura 3. Distribución de los Heliostatos del Campo de la Plataforma Solar de Hermosillo

Dado que el software no cuenta con un modelo para simular facetas deformadas, se plantea una metodología teórica que aproxima superficies cóncavas a esféricas. Esta se valida comparando imágenes fotónicas experimentales con simulaciones, ajustando los modelos para reflejar con mayor precisión el comportamiento óptico real.

Finalmente, se integran las variaciones estacionales y horarias para representar el funcionamiento anual del sistema, lo que permite estimar la imagen solar proyectada y definir el radio de apertura óptimo del reconcentrador.
A continuación, se presentan de forma general los pasos más relevantes del trabajo.

2.1 Caracterización de la Óptica

El sistema óptico está compuesto por 9 heliostatos con dos tipos de secciones de facetas (cuadradas y rectangulares) y tres tipos de superficies reflectantes (planas, esféricas y deformadas) (Figura 4).

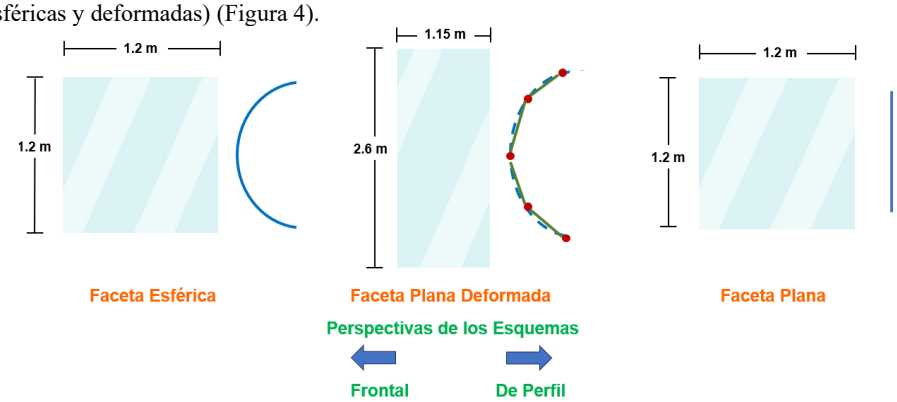


Figura 4. Esquema Representativo de las Ópticas de las Facetas

La distribución de las facetas en los heliostatos se presenta de dos maneras distintas, como se muestra en la Figura 5. Estos criterios de diseño inciden directamente en aspectos como el canteo de las facetas, mientras que la geometría de estas determina su capacidad para reconcentrar el flujo radiativo.

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 de sección cuadrada, y el heliostato F2 tiene facetas planas de sección cuadrada (1.2m x 1.2m para ambos casos). El área total de la superficie reflectiva de cada uno de los heliostatos es de 36m².

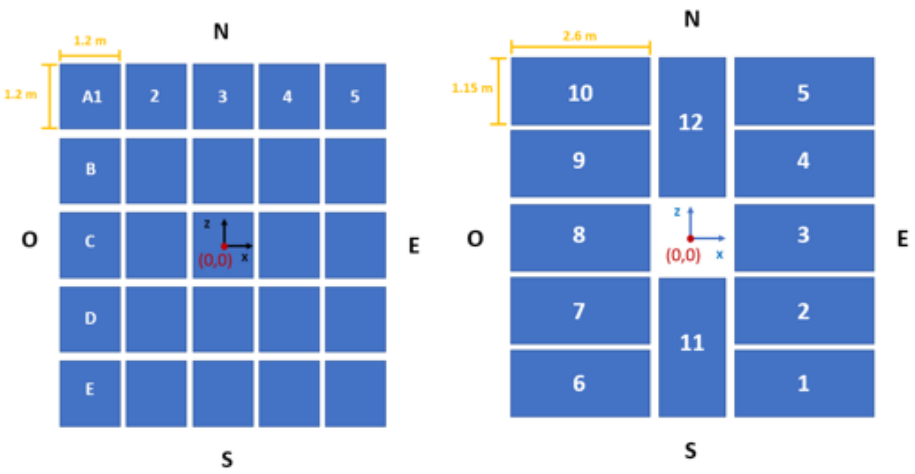


Figura 5. Bosquejo Ilustrativo de las Facetas Planas Deformadas Rectangulares.

2.2 Canteo de Facetas

El canteo de las facetas es un elemento clave en el diseño de un heliostato, ya que permite mantener su alineación precisa y constante con el objetivo, lo que asegura una alta densidad energética en la concentración de la radiación solar y, por ende, un mayor aprovechamiento de energía en sistemas de concentración solar. En el caso del CEToC, el canteo se determina a partir del eje óptico, el cual no considera la posición del sol, sino la ubicación global y local de cada elemento del sistema óptico, como se muestra en la Figura 6. Este enfoque permite uniformar la proyección de la radiación reflejada hacia el blanco, independientemente de la trayectoria solar, optimizando así la eficiencia del sistema. Las ecuaciones utilizadas para definir el canteo se presentan a continuación.

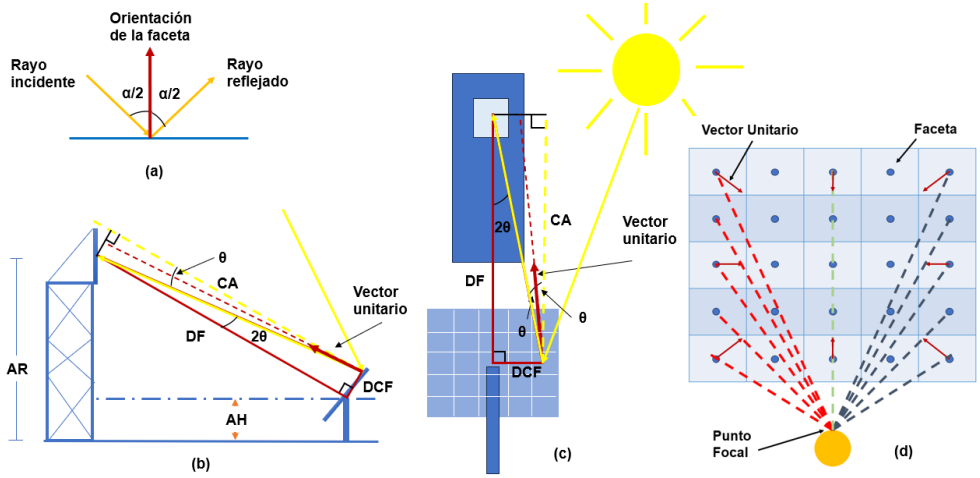


Figura 6. Representación esquemática de la determinación del canteo de facetas: a) Ley de la reflexión de la luz, b) Perspectiva de plano YZ, c) Perspectiva en el plano XZ y d) Demostración representativa del canteo.

2.3 Determinación del Error Óptico Global

El análisis se realizó para tres configuraciones ópticas —facetas planas, esféricas y deformadas—, dado que las diferencias en sus superficies influyen directamente en el error global. Para cada caso, se compararon las distribuciones fotónicas experimentales y simuladas, ambas con una resolución de 1 cm² por píxel, analizando los perfiles fotónicos en los planos XZ y YZ a partir del punto de máxima radiación (Figura 7).

Este método permitió graficar y contrastar cualitativa y cuantitativamente los resultados, asegurando la misma fecha y hora en las simulaciones y experimentos para reflejar condiciones solares reales. Con ello, se logró ajustar los modelos para mejorar su precisión y aproximarlos al comportamiento óptico observado.

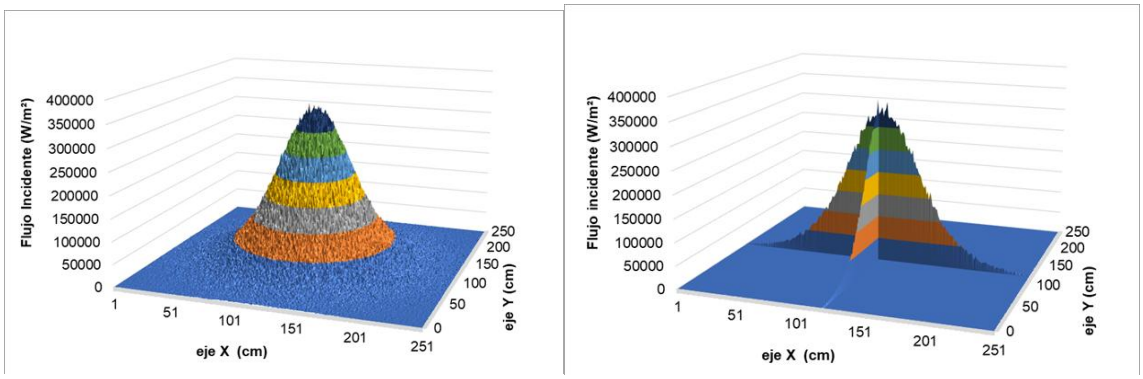


Figura 7. Matrices representativas en 3D de la radiación solar concentrada del CEToC.

2.4 Simulación Matemática

Como se muestra en la Figura 8, el procedimiento inicia con el diseño geométrico del CEToC, compuesto por nueve heliostatos en tres configuraciones ópticas. Luego, se aplica el canteo a cada faceta para optimizar su orientación y se definen los parámetros de modelación, incluyendo condiciones solarimétricas y características ópticas de las facetas. Finalmente, se realizan simulaciones en distintas fechas y horarios para evaluar el desempeño del sistema a lo largo de su operación, considerando tanto posiciones solares máximas como intermedias.

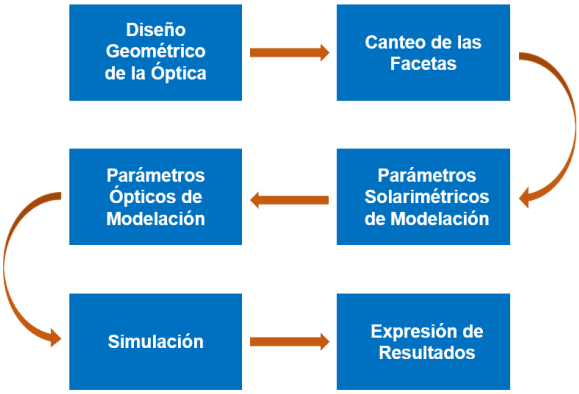


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología de simulación en Tonatiuh.

3. RESULTADOS

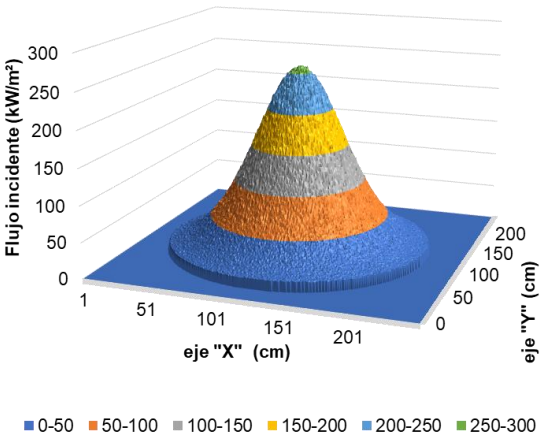


Figura 9. Distribución solar promedio.

Las simulaciones del CEToC evaluaron el comportamiento conjunto de sus nueve heliostatos en cinco fechas representativas de la trayectoria solar anual y en horarios de 9:00 a.m. a 12:00 p.m., obteniendo una imagen solar promedio (Figura 9) con las siguientes características:

- Radio de 1.01 m
- Potencia total de 225.3 kW,
- Potencia máxima de 259.5 kW/m²,
- Potencia promedio de 70.4 kW/m²,
- Concentración media de 7.8 soles/heliostato.
- Área de spot de 3.20 m².

Estos valores representan el rendimiento óptico promedio del sistema, evidenciando su alta capacidad de concentración solar en superficies reducidas.

Tabla 1. Variación de la imagen solar promedio en función de la potencia desestimada.

Potencia Desestimada		Radio (m)	Área (m^2)	Potencia (kW)	Potencia Promedio (soles)	Concentración por Heliostato	Aprovechamiento de la Energía	Radio (%)
%	kW							
0%	0	1.01	3.20	225.3	70	8	100%	100%
10%	26	0.85	2.27	208.8	92	10	93%	84%
20%	52	0.69	1.47	180.9	123	14	80%	68%
30%	78	0.58	1.05	153.6	147	16	68%	57%
40%	104	0.50	0.79	129.4	165	18	58%	50%
50%	130	0.43	0.57	106.1	185	21	47%	42%
60%	156	0.36	0.41	81.6	198	22	36%	36%
70%	182	0.30	0.29	60.7	211	23	27%	30%
80%	208	0.24	0.18	41.1	232	26	18%	24%
90%	234	0.17	0.09	21.6	253	28	10%	16%
100%	259	0.00	0.00	0.0	0	0	0%	0%

Los resultados toman como referencia un radio base de 1.01 m y una potencia máxima de 259.5 kW/m², lo que indica que el diseño del radio de apertura del reconcentrador podría optimizarse equilibrando reducción de radio, aumento de concentración promedio y pérdidas por desbordamiento. No obstante, este punto debe validarse asegurando que satisfaga la demanda energética del sistema.

4. CONCLUSIONES

El estudio caracterizó la reconversión óptica del CEToC, evaluando la proyección y distribución solar en nueve heliostatos a lo largo del año. Los principales hallazgos fueron:

- Canteo: Es esencial para maximizar la concentración solar; las facetas esféricas sin canteo generan múltiples puntos focales, mientras que las planas no alcanzan concentraciones significativas.
- Error óptico global: Las facetas esféricas lograron la mayor precisión (4 mrad), seguidas por las deformadas (5 mrad) y las planas (9 mrad).
- Facetas planas deformadas: Presentaron un desempeño óptico cercano al de las esféricas, validado con resultados experimentales.
- Distribución solar promedio: Se determinó un radio de imagen de 1.01 m, potencia máxima de 259.5 kW/m², potencia total de 225.3 kW y concentración media de 7.8 soles/heliostato.
- Variación estacional: El radio de imagen varió entre 1.28 m y 0.88 m, la concentración entre 4.6 y 12.8 soles, y la potencia máxima entre 115.9 kW/m² y 365.2 kW/m², evidenciando la necesidad de diseños adaptables.
- Niveles de concentración excluidos: Reducir el radio de imagen aumenta la concentración, pero con pérdidas energéticas; el radio óptimo estimado es 0.58 m para equilibrar rendimiento y concentración.

REFERENCIAS

[1] Centro Nacional de Energías Renovables. (2017). Tonatiuh. (https://www.cener.com/documentacion/TONATIUH.pdf).
[2] González - López, J. P., Pérez-Enciso, R. A., Pérez-Rábago, C. A., & Estrada, C. A. (n.d.). Development of Concentrating Heliostats for High Temperature Solar Chemical Applications.
[3] Salas R., & Pérez R., Desarrollo de Espejos Curvos Concentradores para un Heliostato de Torre Central, p. 18. -344.
[4] Duffie J. & Beckman W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, 4th edición, p. 337.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

PEROVSKITA DE MÚLTIPLES SUSTITUCIONES PARA LA FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES POR LA TÉCNICA DE DISPERSIÓN POR BARRA EN CONDICIONES AMBIENTALES

Carlos F. Arias-Ramos, Francisco E. Cancino-Gordillo, Hailin Hu
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.
cafaar@ier.unam.mx

Asiel N. Corpus-Mendoza
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Av. Insurgentes Sur 1582 Col. Crédito Constructor, Demarcación Territorial, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México.

RESUMEN

Existe un gran interés en mejorar las celdas solares de silicio (Si), las cuales tienen la barrera teórica de su eficiencia de conversión de carga (*ECC*). Dicha barrera puede ser superada a partir de unir al silicio y a la perovskita hibrida (orgánica/inorgánica) (PVKH) para formar una celda de mayor *ECC*, mejor conocida como celda solar tipo tándem (PVKH/Si). A pesar de que las celdas tipo tándem han demostrado formar dispositivos de mayor eficiencia, estas aún presentan obstáculos importantes. Parte de estas limitantes radican en la inestabilidad inherente por la parte orgánica presente en la PVKH, así como en su escalamiento. En los últimos años diversos trabajos se han enfocado en estas áreas de oportunidad, surgiendo técnicas de depósito de escala industrial en combinación con una de las perovskitas híbridas más atractiva para su aplicación en celdas tipo tándem compuesta por $(FAPbI_3)_{1-x}(MAPbBr_3)_x$, o perovskita FAMA. La FAMA no solo ha permitido aumentar la estabilidad del material, sino además posibilita un mejor aprovechamiento de la luz en combinación con el silicio. Avances en el área de Celdas Solares de Perovskita Híbrida (CSPH) realizados en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM nos han permitido integrar la perovskita FAMA al método de depósito escalable de Dispersión por Barra (DBr) sin la necesidad de un ambiente controlado (cámara de guantes). A partir de este método de depósito con una temperatura de 60 ºC de la plancha de depósito, logramos fabricar celdas a base de perovskita FAMA con una *ECC* de casi 10% en condiciones ambientales (Humedad = 40 % y Temperatura = 25 ºC), lo cual permite establecer un proceso de bajo costo, más compatible con los requerimientos de la industria, para su futura aplicación en celdas tipo tándem.

ABSTRACT

There is great interest in improving silicon (Si) solar cells, which have a theoretical barrier for their power conversion efficiency (*PCE*). This barrier can be overcome by combining silicon and hybrid perovskite (organic/inorganic) (HPVK) to form a cell with higher *PCE*, better known as tandem cell (HPVK/Si). Although tandem cells have obtained highly efficient devices, they still present significant obstacles. Some of these limitations lie in the inherent instability caused by the organic component of HPVK, as well as in its scaling. In recent years, various works have focused on these areas of opportunity, with the emergence of industrial-scale deposition techniques in combination with one of the most attractive hybrid perovskites for application in tandem cells, composed by $(FAPbI_3)_{1-x}(MAPbBr_3)_x$, or FAMA perovskite. FAMA does not only increase the material's stability but also enables improved light harvesting in combination with silicon. Advances in Hybrid Perovskite Solar Cells (HPSC) conducted at the Renewable Energy Institute of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) have allowed us to integrate FAMA perovskite into the scalable D-Bar-Coating (DBr) deposition method without the need of a controlled environment (glove box). Using this deposition method, we were able to fabricate FAMA perovskite solar cells with a *PCE* of 10% under ambient conditions (Humidity = 40% and Temperature = 25°C), with a deposition plate temperature of 60°C, allowing us to establish a low-cost process more compatible with industry requirements for future application in tandem cells.

Palabras claves: Celdas Tándem, Perovskita FAMA, Dispersión por Barra, Técnica escalable, Condiciones Ambientales.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética mundial y los compromisos de reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero han promovido la generación de energía eléctrica a partir de fuentes más amigables con el medio ambiente (Sayed et al., 2023). Una de las fuentes de mayor interés es la solar fotovoltaica que utiliza a las celdas solares como mecanismo de aprovechamiento para convertir la energía luminosa, proveniente de sol, en energía eléctrica (Sayed et al., 2023). Hoy en día, el mercado de celdas solares está dominado por las celdas de silicio (Sayed et al., 2023), que, pese a ser una gran alternativa para la generación de energía eléctrica limpia tienen una limitación teórica de capacidad de conversión de la luz en electricidad, mejor conocido como eficiencia de conversión de carga (*ECC*), del 29.4 % (J. Zhou et al., 2022). Esta limitante teórica ha podido ser superada a partir de la incorporación de una película delgada de Perovskita Híbrida (PVKH) a las celdas de silicio, formando un nuevo tipo de celdas conocidas como celdas solares tipo tándem (Si/PVKH) (J. Zhou et al., 2022). Las celdas tipo tándem ya han logrado *ECC* de hasta 34.5% (Kazaishvili, 2025), y se proyecta una mayor generación eléctrica, a menor costo y huella ambiental cuando se logren superar algunos desafíos de durabilidad y escalamiento de la PVKH (J. Zhou et al., 2022).

Originalmente se nombró perovskita al mineral de titanato de calcio ($CaTiO_3$), el cual posee un arreglo cristalino ABX_3, donde A y B son los cationes (átomos o moléculas de carga positiva), y X los aniones (átomos de carga negativa) (Zhang et al., 2025). Hoy en día existe una amplia gama de materiales que conservan el mismo arreglo cristalino del mineral original, a los que se les conoce como materiales con estructura de PVK (Y. Zhou et al., 2022). Entre ellos, la primera perovskita orgánica-inorgánica (PVKH) compuesta por Tri-Yoduro de Plomo Metilamonio ($MAPbI_3$), la cual fue reportada en el año 1978. (Y. Zhou et al., 2022). Sin embargo, fue hasta el año 2009 que se fabrica la primera celda solar a base de perovskita orgánica-inorgánica, que recibe el nombre de celda solar a base de perovskita híbrida (CSPH) (Y. Zhou et al., 2022), que en un tiempo relativamente corto han pasado de 3.8% a 26.95% (Kazaishvili, 2025) de *ECC*. Este avance se debe en parte a sus excelentes propiedades ópticas, eléctricas, alta tolerancia a los defectos estructurales, abundancia de los materiales que las componen y su facilidad para ser depositadas por diferentes técnicas (Zhang et al., 2025). A pesar de sus grandes propiedades físico-químicas, el componente orgánico inherente del $MAPbI_3$ la vuelve susceptible a la degradación en presencia de humedad (Zhang et al., 2025). En atención a ello, han surgido diversas investigaciones enfocadas en su modificación química para aumentar su estabilidad, emergiendo la PVKH de múltiples sustituciones con formulación $(FAPbI_3)_{1-X}(MAPbBr_3)_X$, nombrada por su abreviación FAMA(Jung et al., 2021). La FAMA aplicada en CSPH ha logrado una ECE del 22 %(Jung et al., 2021), en condiciones controladas de baja humedad (menor de 40 %), permitiendo aumentar la estabilidad del material por la presencia de Formamidinio (*FA*) y Bromo (*Br*), optimizando el aprovechamiento de la luz en combinación con el silicio (Jung et al., 2021).

Pese al éxito de la composición FAMA para reducir la degradación de la perovskita, el reto de esta formulación radica en lograr la fase fotoactiva (Fase cúbica) que permite la adecuada respuesta del material en presencia de la luz (Jung et al., 2021). Alcanzar la fase cúbica en la PVK FAMA es posible a partir de la ingeniería de disolventes, la cual consiste en la combinación de disolventes utilizados en la solución base de la perovskita (Jung et al., 2021), (Y. Zhou et al., 2022). Esto involucra el uso de: disolvente primario (disolvente mayoritario en una solución), co-disolvente (disolvente que se encuentra en menor volumen al primario y mejora la solubilidad), anti-disolvente (disolvente que retira al disolvente primario y parte del co-disolvente) y la implementación de aditivos (disolvente que se encuentra en un volumen muy pequeño y modifica las propiedades del material). Sin importar las estrategias de ingeniería de disolventes que se utilicen, de manera general los disolventes en la solución base deben cumplir dos etapas al momento de formar una película delgada de perovskita (Arias-Ramos et al., 2020): 1) evaporarse rápido para dar lugar a la formación de núcleos, y 2) una evaporación lenta que permita la formación de cristales de perovskita de manera grande, compacta y homogénea en toda la superficie.

La evaporación en etapas de los disolventes es un reto que se magnifica cuando se busca el escalamiento de las películas FAMA por métodos más industrializados, siendo otra área importante para superar en esta tecnología. Actualmente, se han empleado diversas metodologías para la fabricación de películas delgadas de perovskita de área grande, entre las que destaca el depósito de dispersión por barra o D-Bar-coating (DBr) (Chen et al., 2023), que es la técnica más cercana al método de rollo a rollo (Chen et al., 2023). La transición de métodos de fabricación de películas de perovskita en escala de laboratorio al método DBr implica la adaptación de las variables de control de la velocidad de cambio de estado líquido a estado sólido cristalino de la solución de FAMA, debido a que se carece principalmente del uso de un anti-disolvente (Chen et al., 2023). Por lo tanto, se depende de otros factores, tales como la temperatura de calentamiento de la plancha de depósito, que promueve la evaporación del disolvente primario en la etapa 1 de la formación de películas de PVK, mientras que, la etapa 2 se logra gracias a la sinergia entre la temperatura de calentamiento de la plancha y un co-disolvente. Los disolventes primario y co-disolvente más estudiados en la solución de perovskita son la Dimetilformamida (DMF) y el Dimetilsulfóxido (DMSO) (Y. Zhou et al., 2022), que entre otras propiedades cuentan con un punto de ebullición (*PE*) de 153 ºC y 189 ºC, respectivamente. Esto último, ha llevado a que algunos métodos de escalamiento como el de dispersión por cuchilla puedan formar CSPH de aproximadamente 18 a 19% de *ECC* en dispositivos de 0.09 cm^2 de área (Li et al., 2018). Dicha eficiencia fue posible alcanzarla a partir de una temperatura de plancha de 150 ºC debido a la mezcla de DMF con DMSO como disolventes de la solución de perovskita, bajo condiciones de fabricación de baja humedad para evitar que el agua limite el potencial eléctrico de las celdas.

Avances en el área de *CSPH* realizados en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM nos han permitido fabricar $MAPbI_3$ sin la necesidad de una cámara de guantes (Arias-Ramos et al., 2020) y una formulación de FAMA de fase cúbica estable a partir de métodos de fabricación de escala laboratorio. Hoy esos avances nos llevan a presentar este trabajo, donde integramos la perovskita FAMA al método de depósito escalable DBr sin la necesidad de un ambiente controlado (cámara de guantes), con variaciones de la temperatura de la plancha de depósito. A partir de esta metodología logramos fabricar celdas a base de la perovskita híbrida FAMA a 60 ºC con una *ECC* de casi 10 % en condiciones ambientales (Humedad ≈ 43 % y Temperatura ≈ 26 ºC), las cuales se espera sean empleadas en la futura fabricación de celdas tipo tándem.

METODOLOGÍA

Solución FAMA

Todos los reactivos se utilizaron sin una purificación previa. La solución fue sintetizada sin el uso de una cámara de guantes, a una humedad ≈ 35 % y temperatura de ≈ 28 ºC. La solución de FAMA compuesta en un 70% por $FAPbI_3$ un 30% $MAPbBr_3$, se utilizó en una concentración de 1.6 M a partir de una relación en porcentaje en volumen de DMF:DMSO de 1:12, puesta en agitación magnética a 550 rpm, 24 h antes de su uso.

Depósito de películas FAMA

Las películas fueron fabricadas bajo condiciones de humedad (42 %) y temperatura (26 ºC) ambiente, a partir de un sustrato de 6.25 cm^2, con una separación de la barra de dispersión respecto al sustrato de 5 µm, a una velocidad de paso de 20 mm/s y una presión de la cuchilla de nitrógeno (N_2) de 25 psi. La temperatura de la plancha de depósito se estabilizo por 25 min previo a la formación de las películas FAMA, variándose la temperatura como objeto de estudio en 60, 80, 100 y 120 ºC.

Fabricación de celdas solares de perovskita híbrida FAMA

Los dispositivos fueron fabricados a partir de la configuración que se muestra en la Figura 1a, donde la perovskita FAMA se deposita sobre la capa transportadora de electrones (CTE) conforme a las mismas condiciones de las películas descritas anteriormente. La CTE está compuesta por óxido de titanio en fase anatasa en una morfología compacta (CTE-c) y una de morfología mesoporosa (CTE-mp). Posterior a la FAMA se colocó la capa transportadora de huecos (CTH) formada por el polímero SPIRO-OMeTAD, y para finalizar se evaporaron los contactos metálicos de oro (80 nm).

Caracterización

La capacidad de absorción de la luz (absorbancia) de las películas fabricadas fue medida en un espectrofotómetro (Shimadzu UV-1800) en un rango de 300 a 1000 nm. El espesor de las películas se determinó con ayuda de un perfilómetro (Ambios Technology XP-200 Sylus).

Las celdas solares fabricadas fueron caracterizadas en un simulador solar (Oriel LCS-100) bajo un estándar de iluminación AM 1.5G, con un adquisidor de datos Keithley 2400 SourceMeter. Con él se pudieron obtener las curvas de la densidad de corriente contra voltaje (*J-V*) de las celdas bajo iluminación con un área activa de 1.04 cm^2, de las que se pudieron extraer los cuatro parámetros eléctricos principales de un dispositivo fotovoltaico: Voltaje a Circuito Abierto (*Vca*), Densidad de Corriente de Corto Circuito (*Jcc*), Facto de Forma (*FF*) y la Eficiencia de Conversión de Carga (*ECC*).

RESULTADOS

Películas delgadas de FAMA por la técnica de escala industrial de dispersión por barra (DBr).

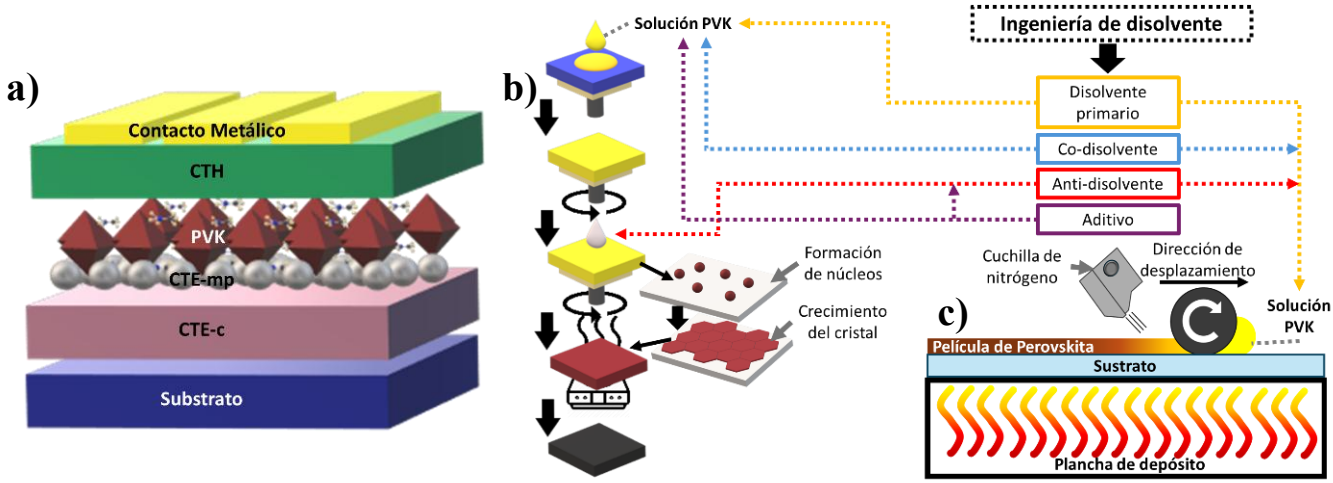


Figura 1. a) Arquitectura de las celdas solares de perovskita híbrida FAMA. Diagrama de depósito con las diferentes estrategias de ingeniería de disolvente para la de la fabricación de películas delgadas de perovskita híbrida FAMA en ambiente, por el b) método de escala laboratorio de depósito por rotación (SPIN) y c) método de depósito de escala industrial de dispersión por barra (DBr).

La fabricación de las películas de perovskita de escala laboratorio más reportada es la técnica de dispersión por rotación o SPIN(Y. Zhou et al., 2022) (Figura 1b). La técnica de SPIN se apoya de las fuerzas de rotación junto con las estrategias de la ingeniería de disolventes para el control de las etapas de evaporación de los disolventes de la solución base de perovskita (Zhang et al., 2025). Dentro de estas estrategias, la de mayor importancia es la del uso de un anti-disolvente (Arias-Ramos et al., 2020), ya que permite definir en un tiempo controlado el momento exacto de transición entre las etapas 1 y 2 de evaporación, al retirar el disolvente primario en su totalidad y parte del co-disolvente mientras la película aún está en formación. En la técnica de depósito de escala industrial, como lo es la de dispersión por barra o DBr (Figura 1c), las estrategias para segmentar las etapas de evaporación de los disolventes se concentran en su mayoría en la solución de perovskita, careciéndose de las fuerzas de rotación y del anti-disolvente. En atención a ello, se han implementado otras variables dentro de la metodología de depósito, entre las que destaca la temperatura de calentamiento de la plancha de depósito (Li et al., 2018). El objetivo de esta temperatura es permitir que se evapore el disolvente primario y parte del co-disolvente, al paso de la barra de dispersión, para posteriormente continuar con la evaporación del co-disolvente que de inicio al crecimiento de cristales de perovskita.

En la gráfica de absorbancia normalizada respecto al espesor (Figura 2) pudimos visualizar que película FAMA interacciona mejor con la luz, en un comparativo de muestras fabricadas por SPIN en ambiente a 5000rpm con anti-disolvente, y las fabricadas con DBr como se describe en la metodología. En esta destaca una mayor capacidad de absorción de la luz en las películas FAMA a medida que la temperatura de la plancha pasa de 120ºC a 60ºC en el depósito por DBr. Este resultado es opuesto a lo ya reportado sobre el uso de DMF:DMSO en otras técnicas de escalamiento de dispersión por cuchilla (Li et al., 2018), donde se tuvo que alcanzar una temperatura de la plancha de depósito de hasta 150 ºC para lograr un mejor resultado. Este resultado cruzado lo relacionamos con las diferencias de la condición de depósito, principalmente de la humedad ambiental en la que fueron fabricadas, siendo más elevada para nuestras muestras. En este caso, la humedad circundante se integra a la solución de perovskita (Arias-Ramos et al., 2020), comportándose como un disolvente adicional, teniendo su influencia en el momento de fabricación de las películas. El agua, al estar presente en la solución y tener un punto de ebullición más bajo que el DMF y el DMSO, junto con el uso de una cuchilla de nitrógeno (N_2), facilita la extracción de disolventes durante la formación de las películas. Por ello, al aumentarse la temperatura se incrementa la velocidad de extracción de ambos disolventes, perjudicando la etapa 2 de evaporación, aumentando la cantidad defectos en la superficie, lo que impacta en la capacidad de absorción del material. A pesar de la mejora de la absorbancia conforme la temperatura de la plancha disminuye para las muestras por DBr, cuando estas se comparan con la fabricada por SPIN, la diferencia en intensidad es notable, siendo mayor para las muestras en SPIN principalmente entre los 300-650 nm. Esta diferencia entre la película preparada por medio de SPIN y la de DBR a 60 ºC puede radicar en una conversión limitada de la perovskita FAMA (Jung et al., 2021). Abriendo con ello un margen para la optimización de las variables de depósito, y poder aumentar la capacidad de absorción de la luz del material, que está altamente relacionado con la capacidad de generación eléctrica final.

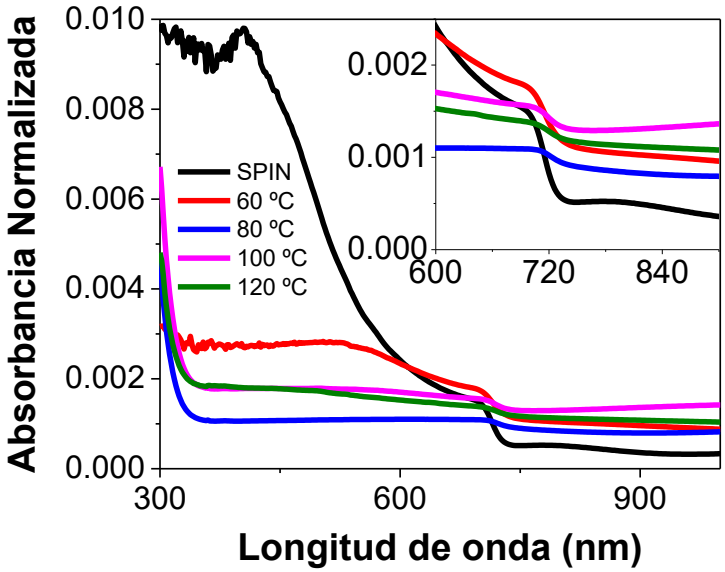


Figura 2. Gráfica de absorbancia normalizada respecto al espesor de la película de FAMA fabricadas en ambiente (Humedad = 42 %, Temperatura = 26ºC) por SPIN y por DBr, variando la temperatura de la plancha de depósito en 60, 80, 100 y 120 ºC.

De películas a celdas fotovoltaicas de perovskita híbrida (CSPH).

Las películas fabricadas se utilizaron para formar CSPH, en un comparativo de método de depósito de la FAMA por SPIN y por DBr en ambiente (Temperatura = 25 ºC, Humedad = 42 %), variando la temperatura de calentamiento de la plancha de depósito. La estadística de los parámetros eléctricos de las celdas solares se muestra en la Figura 2b. En este análisis la tendencia de los parámetros eléctricos de las CSPH por DBr es igual al obtenido en las curvas de absorbancia normalizada (Figura 2), donde la *ECC* va en aumento conforme la temperatura de calentamiento de la plancha de depósito disminuye. Esto demuestra que la evaporación acelerada por efecto del aumento de la temperatura en la plancha de depósito disminuye la calidad de la película impactando de manera negativa en su capacidad eléctrica final. Los valores máximos en CSPH por DBr alcanzados se observan en la prueba a 60ºC, donde se logra un *Vac* = 0.98V, *Jcc* = 17.23 mA/cm^2 y un *FF* = 57.9%, para una *ECC* = 9.73%. A pesar de este resultado, la *ECC* máxima de las muestras por DBr a 60 ºC tiene una diferencia de solo 0.47% en comparación con la fabricada por SPIN. Esta diferencia entre contactos máxima no se esperaba por el resultado obtenido en las mediciones de absorbancia normalizada, donde existen indicios de una posible conversión parcial de la FAMA, dejando zonas de $FAPbI_3$, $MAPbBr_3$ y otras que si logran convertir en $(FAPbI_3)_{0.7}(MAPbBr_3)_{0.3}$, que se esperaba afectaran en mayor medida a los parámetros eléctricos finales. Siendo el *Vca* y el *FF* los parámetros eléctricos más afectados por la posible conversión parcial de la FAMA, llegando a reducirse 0.13 V del *Vca* y de casi 7% del *FF*. Caso contrario para la *Jcc* que no solo muestra valores máximos por encima de las muestras por SPIN, sino además el promedio es por encima de los valores máximos de otras pruebas. Este resultado deja la puerta abierta a la optimización del depósito de la FAMA por DBr para superar a su contraparte, concentrado los futuros esfuerzos en mejorar el *Vca* a partir de reducir la velocidad de evaporación por efecto de una menor temperatura de la plancha de depósito y/o aumentar el volumen del co-disolvente para ampliar el tiempo de la etapa 2 de evaporación en el proceso de fabricación de la película.

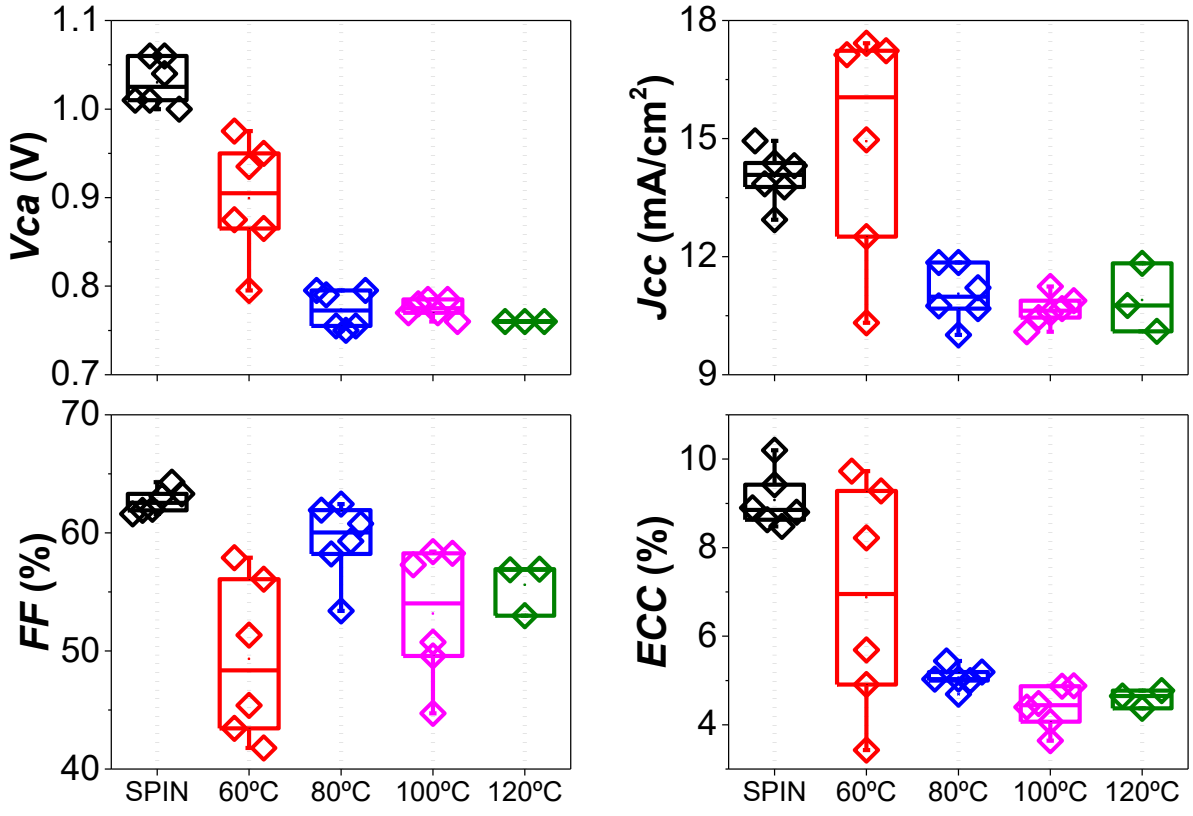


Figura 2. Concentrado de los parámetros eléctricos de las celdas solares de perovskita híbrida FAMA fabricadas en ambiente (Humedad = 40 %, Temperatura = 25ºC), por SPIN y DBr, variando la temperatura de la plancha de depósito en 60, 80, 100 y 120 ºC

CONCLUSIÓN

Logramos integrar la formulación de la perovskita FAMA a una metodología de escala industrial como lo es la de DBr en condiciones de humedad (42 %) y temperatura (26 ºC) ambiente a partir de una mezcla de disolventes de la solución base de perovskita de DMF:DMSO. La etapa de evaporación lenta en el proceso de cristalización se logró optimizar a partir de la variación de la temperatura de calentamiento de la plancha de depósito, permitiendo eliminar el uso de un anti-disolvente. Las películas fabricadas presentan una posible conversión parcial de la perovskita FAMA, dejando zonas de $FAPbI_3$, $MAPbBr_3$ y $(FAPbI_3)_{0.7}(MAPbBr_3)_{0.3}$ limitando la capacidad de absorción del material a medida que se acelera la evaporación de los disolventes por efecto del incremento de la temperatura de la plancha de depósito. La película de mayor capacidad de absorción se presentó a los 60 ºC de temperatura de la plancha, misma que al ser utilizada para fabricar CSPH de 0.104 cm^2 logran una *ECC* máxima de 9.73%. El comparativo con dispositivos donde la FAMA fue fabricada por un método de escala laboratorio como lo es por SPIN, las celdas por DBr aún se encuentran 0.43% de *ECC* por debajo de su contraparte, por efecto de un *Vca* y *FF* más bajos por la posible presencia de una conversión parcial de la perovskita FAMA. Este resultado son los primeros pasos que hemos dado para fabricar una película delgada de perovskita FAMA a partir de una propuesta sólida de fabricación, más afín con los requerimientos industriales, para su futura aplicación en celdas tipo tándem

AGRADECIMIENTOS

CFAR y FECG agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México, por la beca postdoctoral (CVU # 709010 y # 784149), ANCM agradece el apoyo de SECIHTI bajo el programa de Investigadores por México, proyecto 7193. Se agradece el apoyo financiero de PAPIIT-UNAM (IA102625) y SECIHTI (CF-2023-I-725), así como la infraestructura proporcionada por Laboratorios Nacionales de SECIHTI (APOYOS LNC 2023-33 Innovación y Desarrollo de prototipos de módulos fotovoltaicos con celdas solares experimentales LIFYCS-IER-UNAM).

REFERENCIAS

Arias-Ramos, C. F., Kumar, Y., Abrego-Martínez, P. G., & Hu, H. (2020). Efficient and stable hybrid perovskite prepared at 60% relative humidity with a hydrophobic additive in anti-solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *215*. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110625

Chen, Y., Zhang, M., Li, F., & Yang, Z. (2023). Recent Progress in Perovskite Solar Cells: Status and Future. In *Coatings* (Vol. 13, Issue 3). MDPI. https://doi.org/10.3390/coatings13030644

Jung, K., Oh, K., Kim, D. H., Choi, J. W., Kim, K. C., & Lee, M. J. (2021). Ambient-air fabrication of stable mixed cation perovskite planar solar cells with efficiencies exceeding 22% using a synergistic mixed antisolvent with complementary properties. *Nano Energy*, *89*. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106387

Kazaishvili, B. (2025). *NREL Best Research-Cell PV Efficiency Chart*.

Li, J., Munir, R., Fan, Y., Niu, T., Liu, Y., Zhong, Y., Yang, Z., Tian, Y., Liu, B., Sun, J., Smilgies, D. M., Thoroddsen, S., Amassian, A., Zhao, K., & Liu, S. (Frank). (2018). Phase Transition Control for High-Performance Blade-Coated Perovskite Solar Cells. *Joule*, *2*(7), 1313–1330. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.011

Sayed, E. T., Olabi, A. G., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. A. (2023). Renewable Energy and Energy Storage Systems. In *Energies* (Vol. 16, Issue 3). MDPI. https://doi.org/10.3390/en16031415

Zhang, P., Yang, H., Zheng, Q., Nie, G., Abdullah Alzahrani, A. Y., Al-Buriahi, M. S., Alsaiari, N. S., Raza, S., & Orooji, Y. (2025). Next-generation solar energy: Progress, stability, and prospects of polymer-modified Perovskite solar cells; A review. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 106, pp. 1088–1113). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.280

Zhou, J., Huang, Q., Ding, Y., Hou, G., & Zhao, Y. (2022). Passivating contacts for high-efficiency silicon-based solar cells: From single-junction to tandem architecture. In *Nano Energy* (Vol. 92). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106712

Zhou, Y., Lu, F., Fang, T., Gu, D., Feng, X., Song, T., & Liu, W. (2022). A brief review on metal halide perovskite photocatalysts: History, applications and prospects. In *Journal of Alloys and Compounds* (Vol. 911). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165062

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS COMPARATIVO DE UNA MEZCLA BINARIA CON RESPECTO AL AGUA COMO FLUIDO DE TRABAJO EN UN CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO

Selene Flores Cajero, Yuridiana R. Galindo Luna
Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Licenciatura Ingeniería 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,
Cbi2162014808@izt.uam.mx

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,
ygalindo@izt.uam.mx

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta una comparativa entre una mezcla binaria de agua-etilenglicol (15 % de etilenglicol) y agua como fluidos de trabajo en un concentrador cilíndrico parabólico (CCP). Las pruebas se realizaron en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Iztapalapa, durante el mes de abril de 2025, en un horario de 10:00 a 13:06 horas. El CCP utilizado tiene una longitud de 2.44 m, un ancho de apertura de 1.22 m, una relación de concentración (CR) de aproximadamente 15.28, y un tubo receptor de cobre con recubrimiento selectivo, con radio exterior de 0.0127 m y protegido por una cubierta de vidrio borosilicato. El sistema incluye un termotanque de 80 L y espejos de aluminio pulido, comúnmente utilizados por su reflectividad. Se evaluaron dos flujos másicos de 0.067 kg/s y 0.100 kg/s, registrando temperaturas de entrada y salida, así como irradiancia difusa y global mediante piranómetros. A partir de estos datos se determinó la irradiancia directa y la eficiencia térmica del sistema. La mezcla binaria se comparó con agua bajo condiciones similares. Para 0.067 kg/s, la mezcla binaria alcanzó eficiencias térmicas máximas de 56.42 % y 54.88 %, se obtuvo un ΔTmax de entrada y salida del fluido de 5.40 °C y 4.40 °C. El agua logró 45.12 % y 44.12 %, con un ΔTmax de 3.3 °C y 3.5 °C. La irradianciadirecta fue de 879.23 W/m² y 763.20 W/m² (mezcla), y 545.56 W/m² y 707.76 W/m² (agua). Para 0.100 kg/s, la mezcla logró eficiencias de 61.95 % y 36.30 %, y ΔTmax de 3.40 °C y 2.60 °C, mientras que el agua alcanzo una eficiencia de 45.12 % y 44.12 %, con ΔTmax de 2.20 °C y 1.90 °C. Se concluye que el uso de la mezcla binaria incrementa la eficiencia térmica del CCP bajo las condiciones evaluadas.

ABSTRACT

The following work presents a comparison between a binary mixture of water-ethylene glycol (15% ethylene glycol) and water as working fluids in a parabolic trough concentrator (PCC). The tests were carried out at the Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Iztapalapa Unit, during the month of April 2025, from 10:00 a.m. to 1:06 p.m. The PCC used has a length of 2.44 m, an aperture width of 1.22 m, a concentration ratio (CR) of approximately 15.28, and a selectively coated copper receiver tube with an outer radius of 0.0127 m and protected by a borosilicate glass cover. The system includes an 80 L water heater and polished aluminum mirrors, commonly used for their reflectivity. Two mass flow rates of 0.067 kg/s and 0.100 kg/s were evaluated, recording inlet and outlet temperatures, as well as diffuse and global irradiance using pyranometers. From these data, the direct irradiance and thermal efficiency of the system were determined. The binary mixture was compared with water under similar conditions. For 0.067 kg/s, the binary mixture reached maximum thermal efficiencies of 56.42% and 54.88%, with fluid inlet and outlet ΔTmax of 5.40 °C and 4.40 °C. Water achieved 45.12% and 44.12%, with ΔTmax of 3.3 °C and 3.5 °C. The direct irradiance was 879.23 W/m² and 763.20 W/m² (mixture), and 545.56 W/m² and 707.76 W/m² (water). At 0.100 kg/s, the mixture achieved efficiencies of 61.95% and 43.82%, and ΔTmax of 3.40 °C and 2.60 °C, while water reached an efficiency of 45.12% and 44.12%, with ΔTmax of 2.20 °C and 1.90 °C. It is concluded that the use of the binary mixture increases the thermal efficiency of the CCP under the evaluated conditions.

Palabras claves: Concentrador cilindro parabólico, eficiencia térmica, energía solar, Irradiancia, mezcla binaria, ΔTmax (diferencia de temperatura entrada y salida del fluido de trabajo).

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial y la creciente demanda de energía plantean desafíos significativos en términos de sostenibilidad ambiental y seguridad energética. Se estima que para el año 2050 la población global superará los 9 mil millones de personas, lo cual implica un incremento considerable en el consumo de energía. Esta situación intensifica la presión sobre los recursos energéticos tradicionales y agrava el impacto ambiental, particularmente debido a la continua dependencia de los combustibles fósiles, responsables de más del 75 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y cerca del 90 % del CO_2 emitido a nivel mundial. Estas emisiones han sido identificadas como uno de los principales factores que impulsan el cambio climático [1].

Ante este panorama, la transición energética hacia fuentes renovables se presenta como una necesidad urgente. Sustituir los combustibles fósiles por alternativas más limpias no solo permitiría una reducción fundamental de las emisiones contaminantes, sino que también contribuiría al cumplimiento de acuerdos internacionales como el Protocolo de Kioto, que propone metas claras para mitigar el cambio climático. Las tecnologías de energía renovable (TER), tales como la solar térmica, representan una de las vías más efectivas para alcanzar

la neutralidad de carbono y promover un modelo energético más sostenible, especialmente en países en desarrollo donde las inversiones en este tipo de tecnologías pueden generar beneficios tanto ambientales como socioeconómicos [1].

La energía solar se puede aprovechar principalmente a través de dos vías: la fotovoltaica, que transforma directamente la radiación solar en electricidad, y la térmica, que convierte dicha radiación en calor útil. Dentro de esta última, existen distintos tipos de colectores, como los planos (CSP), los de tubos evacuados (CTEV), los Fresnel lineales (CLF), los parabólicos compuestos (CPC) y los colectores cilindro-parabólicos (CCP). Entre todos ellos, el CCP destaca por ser el más eficiente para aplicaciones de temperatura media (150 °C a 400 °C), gracias a su capacidad para concentrar la radiación solar en una línea focal, lo que permite alcanzar temperaturas elevadas. Esta tecnología ha alcanzado un grado de madurez comercial y se ha convertido en una de las más utilizadas en sistemas de generación térmica, no solo por su eficiencia, sino también por su compatibilidad con recubrimientos selectivos, aislamiento al vacío y sistemas de almacenamiento térmico. Estas características permiten mantener un suministro energético estable incluso en condiciones ambientales variables [2].

Diversos estudios han evidenciado variaciones importantes en la eficiencia de los CCP según el diseño, flujo másico y tipo de fluido de trabajo, por ejemplo, Chamorro Páez et al. [3] y realizaron un estudio de un colector solar cilíndrico parabólico (CCP), donde se utilizó agua como fluido de trabajo, El CCP tiene las siguientes características: longitud de 2.44 m, ancho de 1 m, diámetro del tubo receptor es de 0.0254 m. y la capacidad de su termotanque de 50 L, la experimentación se realizó en un periodo de 9:00 am a 4:00 pm, la velocidad fue de 1.5 kg/s. De acuerdo con los resultados se determinó una eficiencia máxima de 35.84 %. Por otro lado, Carbajal Cano [4] estudio un CCP con agua como fluido de trabajo. El CCP tiene las siguientes características: el área es de 1.712 m^2, la experimentación se realizó en un Periodo de 9:00 y 16:00 horas, logrando una temperatura de 44.3 °C, se determinó un flujo másico de 0.00467 kg/s y una eficiencia térmica máxima de 71%.

En cuanto al uso de mezclas binarias de agua con etilenglicol en los CCP, aún existen poca investigación , lo que representa una oportunidad relevante de estudio. Anu Kumar Naik et al. [5] llevaron a cabo un estudio experimental en un CCP utilizado una mezcla de agua y etilenglicol (50 % agua – 50 % etilenglicol), el propósito fue determinar la mayor capacidad de absorción térmica comparando agua donde se obtuvo una eficiencia del 36% y eficiencia de la mezcla binaria mejoro hasta 44.7 %. De forma similar Galindo et al. [6] comparo el rendimiento térmico de un CCP utilizando como fluido de trabajo el agua y una mezcla binaria de agua con 5 % de etilenglicol. Las pruebas se llevaron a cabo el mes de abril, se utilizó un flujo masico en ambos casos de 0.1 kg/s, dando una irradiancia promedio de 598.45 W/m^2 para el agua y 603.09 W/m^2 para la mezcla binaria. La efiencia máxima para el agua fue de 26.00 % y para la mezcla de 27.23 % esto representa un incremento de temperatura del 1.23 %.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como propósito realizar un análisis comparativo entre el agua y una mezcla binaria de agua con 15 % de etilenglicol como fluido de trabajo en un CCP experimental durante el mes de abril de 2025. Se analizarán variables clave como la temperatura de entrada y salida, el flujo volumétrico y la radiación solar, con el objetivo de evaluar el desempeño térmico del sistema bajo condiciones climáticas. Este estudio busca determinar cual de los dos fluidos ofrece mayor eficiencia térmica y, con ello, establecer criterios técnicos que orienten la selección del fluido de trabajo más adecuado en futuras aplicaciones de concentración solar térmica.

METODOLOGÍA

Descripción del sistema

El presente trabajo se enfoca en analizar el comportamiento térmico de un concentrador cilíndrico parabólico (CCP) mediante mediciones experimentales bajo condiciones ambientales reales. El sistema cuenta con un reflector geométrico parabólico que concentra la radiación solar directa sobre un tubo receptor absorbente de cobre recubierto con material selectivo, el cual se encuentra ubicado a lo largo del eje focal. A través de este tubo circula el fluido de trabajo, que absorbe la energía térmica captada y eleva su temperatura. El CCP está instalado en la azotea del edificio AT, dentro de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, sobre una estructura fija orientada Norte-Sur, con seguimiento solar en dirección Este-Oeste para maximizar la captación solar diaria. Las dimensiones del colector son 2.44 m de longitud y 1.22 m de ancho, con un tubo receptor de radio 0.0127 m protegido con una cubierta de borosilicato. El sistema cuenta con un circuito hidráulico cerrado que permite la recirculación continua del fluido de trabajo, impulsado mediante una bomba centrífuga de medio caballo de fuerza desde un termotanque de 80 L de capacidad. El circuito incluye un flujómetro para medir el flujo masico del fluido y válvulas de control a la entrada y salida del tubo receptor que permiten regular el flujo durante la operación. El espejo concentrador está fabricado con aluminio pulido, comúnmente utilizado por su buena reflectividad en aplicaciones solares. El conjunto de estos componentes asegura una operación estable y controlada del sistema, permitiendo obtener datos confiables para la evaluación de su rendimiento térmico. Se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando dos tipos de fluidos: agua y una mezcla binaria conformada por 85 % de agua y 15 % de etilenglicol, manteniendo un volumen total de 80 L en el termotanque.

La instalación del concentrador puede observarse en la Figura 1, donde se aprecia su ubicación en la azotea, así como su configuración estructural.

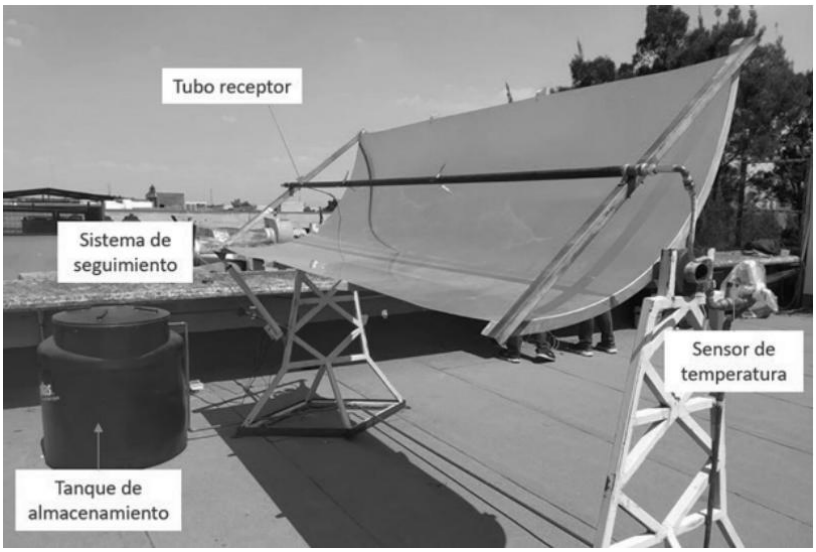


Figura 1. Concentrador cilindro parabólico (CCP) instalado en la azotea del edificio AT, UAM-Iztapalapa [6].

Pruebas experimentales.

Las pruebas experimentales se realizaron durante el mes de abril de 2025, en un horario comprendido entre las 10:00 am y la 1:06 pm. Durante este periodo se presentaron condiciones climáticas variables, incluyendo nubosidad, viento ligero y cielos mayormente despejados, lo que permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes niveles de radiación solar. Las mediciones se centraron en variables clave como la temperatura del fluido a la entrada y salida del tubo receptor, el flujo masico y la irradiancia solar global y difusa.

Para la adquisición de datos se utilizaron dos piranómetros para registrar la radiación solar global y difusa, dos termómetros digitales para medir las temperaturas del fluido y un flujómetro para fijar y monitorear el flujo másico. Las pruebas se llevaron a cabo durante dos semanas empelando un fluido base (agua) y una mezcla de agua-etilenglicol. En ambos casos se aplicaron dos flujos masicos: 0.067 kg/s y 0.100 kg/s, manteniendo un volumen constante de 80 litros en el sistema. Durante cada jornada experimental se realizaron mediciones con un intervalo de un minuto, manteniendo condiciones operativas estables mediante el ajuste del seguidor solar.

Modelo matemático.

Para ambos fluidos se aplicaron modelos matemáticos que permiten calcular parámetros claves. En primer lugar, el flujo volumétrico medido en LPM fue convertido a m^3/s, como se muestra en la ecuación (1). A partir de este valor, y utilizando la densidad del fluido, se obtuvo el flujo másico como se muestra en la ecuación (2).

- Volumen

$$V = \text{LPM}\left(\frac{0.001}{60}\right) \quad (1)$$

- Flujo másico

$$\dot{m} = V \cdot \rho \quad (2)$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo másico (kg/s), LPM representa los litros por minuto, ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), y V el volumen (m^3). Para el caso del agua, se utilizaron las propiedades termodinámicas reportadas en la tabla de *Termodinámica* de Çengel (2007) [7], y se calculó un promedio entre las temperaturas de entrada y salida del sistema con el fin de obtener la capacidad calorífica del agua (CP). La Tabla 1 muestra los valores de densidad (kg/m^3) de la solución agua-etilenglicol en un rango de 0 a 0.2 de fracción masa y temperaturas de 0 °C a 100 °C, los valores completos están disponible en CoreChem lnc [8]. Como se observa, la densidad de la mezcla incrementa con el aumento de la concentración de etilenglicol y disminuye conforme se eleva la temperatura.

Tabla 1. Valores de densidad de una mezcla de agua-etilenglicol.

Fracción de masa de EG en solución	0°C (32°F)	20°C (68°F)	40°C (104°F)	60°C (140°F)	80°C (176°F)	100 °C (212 °F)
0	1000	998	992	983	972	958
0.1	1018	1014	1008	1000	992	984
0.2	1036	1030	1022	1014	1005	995

Para calcular la capacidad calorífica de la mezcla binaria agua-etilenglicol, se utilizó la ecuación polinómica de segundo orden:

$$Cp(T) = A + BT + CT^2 \quad (3)$$

Donde los valores de las constantes A, B y C fueron tomados del catálogo del proveedor MEGlobal [9]. Estos coeficientes fueron obtenidos mediante interpolación lineal entre dos valores correspondientes a concentraciones del 10 % y 20 % de etilenglicol. Se considera una temperatura promedio entre la entrada y salida del fluido para el cálculo de los coeficientes en la ecuación 3. En la Tabla 2 se muestran los coeficientes utilizados.

Tabla 2. Coeficientes A, B y C para el cálculo de la capacidad calorífica del agua-etilenglicol en función de la concentración y temperatura [9].

Wt (%)	A	B	C
0	1.0038	-2.25E-04	2.63E-06
10	0.97236	1.80E-04	5.70E-07
20	0.93576	4.00E-04	0

Se calculo la eficiencia térmica ($\eta_{termica}$), como la relación del calor útil (Q_u) y el calor absorbido (Q_a), se expresa de la siguiente forma:

$$\eta_{termica} = \frac{Qu}{Qa} \quad (4)$$

El calor útil entregado se determinó en función del flujo másico y la capacidad calorífica de cada fluido de trabajo, utilizando la siguiente expresión:

$$Qu = \dot{m}\, Cp\, (Tout - Tin) \quad (5)$$

Por otra parte, el calor absorbido del sistema es el producto de la irradiación solar directa y el área del CCP, como se muestra a continuación:

$$Qa = Gb \cdot \cos(\theta) * Ac \quad (6)$$

RESULTADOS.

Las pruebas fueron realizadas durante el mes de abril, considerando dos flujos masicos: 0.100 kg/s y 0.067 kg/s, tanto para el agua como para la mezcla binaria (agua-etilenglicol) como fluido de trabajo. Para el flujo másico de 0.067 kg/s, en el caso del agua la irradiancia directa máxima estimada fue de 545.56 W/m^2 y 707.76 W/m^2, para las dos pruebas. Se obtuvo un incremento de temperatura (ΔT) entre la entrada y salida del tubo receptor de 3.3 °C y 3.5 °C. En el caso de la mezcla binaria, la irradiancia fue de 879.23 W/m² y 763.20 W/m², se registraron incrementos de temperatura de 5.40 °C y 4.40 °C. Para el flujo masico de 0.100 kg/s la irradiancia directa máxima para el agua fue de 752.89 W/m^2 y 515.07 W/m^2, para cada prueba, con incremento de temperatura de 2.20 °C y 1.90 °C. Para la mezcla binaria, la irradiancia fue de 733.15 W/m^2 y 680.25 W/m^2, alcanzando un incremento de temperatura de 3.40 °C y 2.60 °C. Para el procesamiento de los datos, se promediaron los valores registrados cada 10 minutos. Esto permitió obtener una mejor evaluación del comportamiento térmico del sistema.

En la figura 2 se muestran las variaciones de la irradiancia directa (W/m^2) registrado a lo largo del tiempo durante las 4 pruebas, empleando ambos fluidos de trabajo. Las mediciones se realizaron en intervalos promedios de 10 minutos entre las 10:06 am y 1:13 pm, permitiendo observar las condiciones de irradiancia durante el periodo de mayor disponibilidad solar. Se observa una irradiancia más alta para el día 1 con la mezcla binaria a 0.067 kg/s, alcanzando un valor máximo de 879.23 W/m^2, lo cual sugiere mejores condiciones en comparación con los del resto de los días. El día 4 con agua a 0.100 kg/s presento la irradiancia más baja, con un valor de 515.07 W/m^2, debido a nubosidad y viento. Para el agua con un flujo de 0.067 kg/s, la irradiancia fue de 545.56 W/m^2 en el día 1 y 707.76 W/m^2 en el día 2, mientras que con la mezcla (agua-etilenglicol) se obtuvieron valores de 879.23 W/m^2 en el día 1 y 763.20 W/m^2 en el día 2, destacando un comportamiento más estable. Con un flujo de 0.100 kg/s, los valores obtenidos con la mezcla fueron 733.15 W/m^2 en el día 3 y 680.25 W/m^2 en el día 4. Se nota una ligera disminución en la irradiancia en ciertos días conforme avanza el horario, como se mencionó anteriormente por las condiciones de viento y nubosidad.

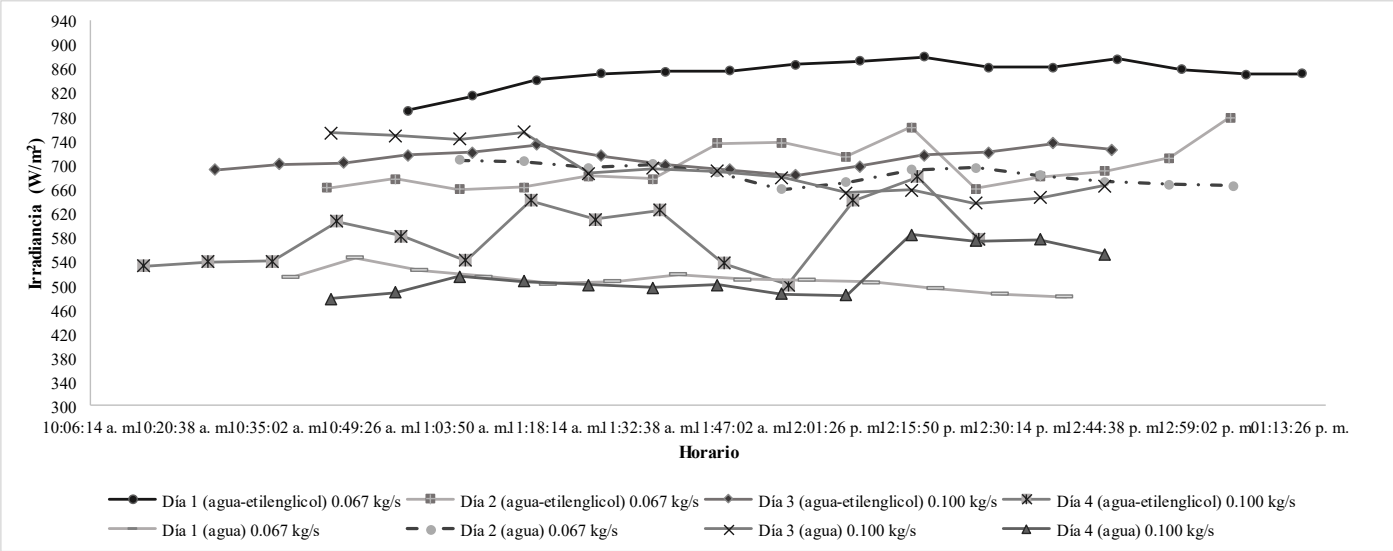


Figura 2. Irradiancia directa en función del horario para diferentes flujos masicos y fluidos de trabajo.

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la eficiencia térmica ($\eta_{termica}$) respecto al tiempo, para un flujo masico de 0.067 kg/s. Se presentan los resultados obtenidos en los dos mejores días del mes de abril, tanto para el agua como para la mezcla binaria de agua-etilenglicol. Se observa que en ambos días la mezcla binaria presenta una mayor eficiencia térmica en comparación con el agua, especialmente entre las 11:30 am y las 12:15 pm, cuando la irradiancia solar fue más intensa. Así mismo, se aprecia que la eficiencia de la mezcla alcanza un valor máximo de 54.88 % durante el segundo día, mientras que el agua muestra una tendencia decreciente en ambas pruebas. Estas diferencias pueden atribuirse a las propiedades térmicas del etilenglicol, como su mayor capacidad calorífica. En ambos casos los valores de irradiancia solar disminuyen después del mediodía solar y debido a la presencia de viento.

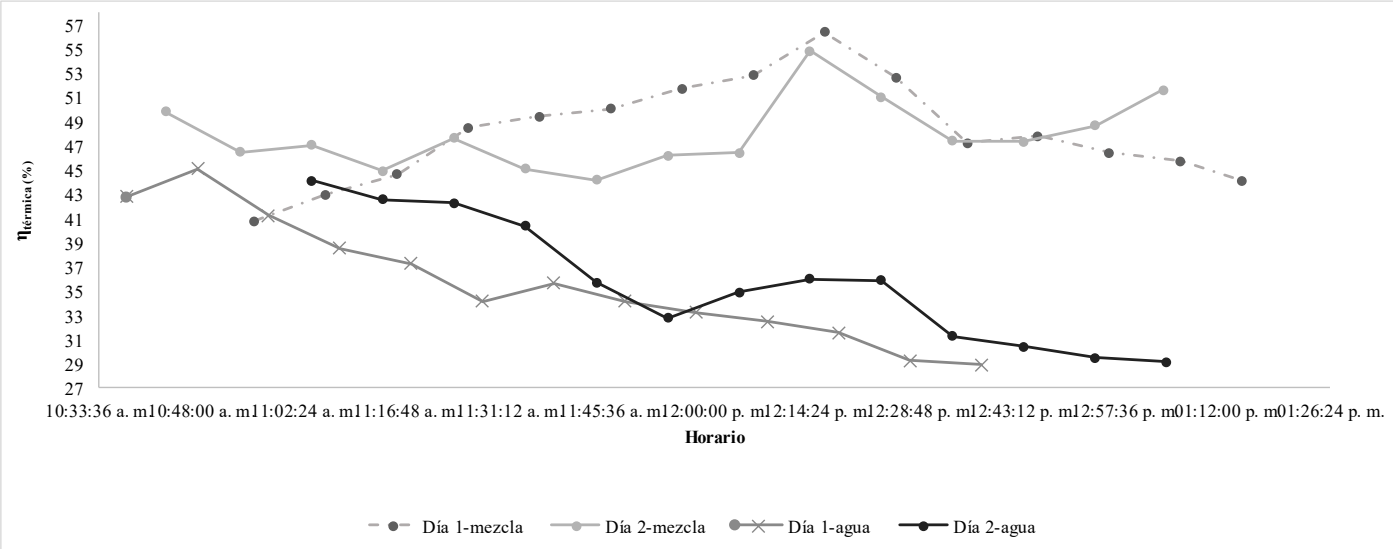


Figura 3. Comparativa de la eficiencia térmica con respecto al tiempo de los días 1 y 2 con un fluido base y una mezcla binaria.

En la Figura 4 se muestra la evolución de la eficiencia térmica a lo largo del tiempo para un flujo de 0.100 kg/s, evaluando agua y una mezcla binaria de agua-etilenglicol durante dos días distintos de prueba experimental. Los datos muestran un comportamiento diferente entre los fluidos de trabajo; la mezcla binaria tiende a ofrecer un mejor desempeño térmico comparado con el agua, sobre todo en el horario de 11:00 am a 12:30 pm, especialmente en el día 4 donde se alcanzó una eficiencia máxima de 61.95 %. En contraste con el agua que mantuvo un comportamiento más constante en ambos días, con valores de 53.45 % y 49.90 % y una ligera tendencia descendente hacia el mediodía. Se observa también que, durante el día 3, la eficiencia de la mezcla experimento un aumento sostenido alrededor de las 11:10 am, seguido de una

caída progresiva. Esto se relaciona con las condiciones ambientales como nubosidad y viento.

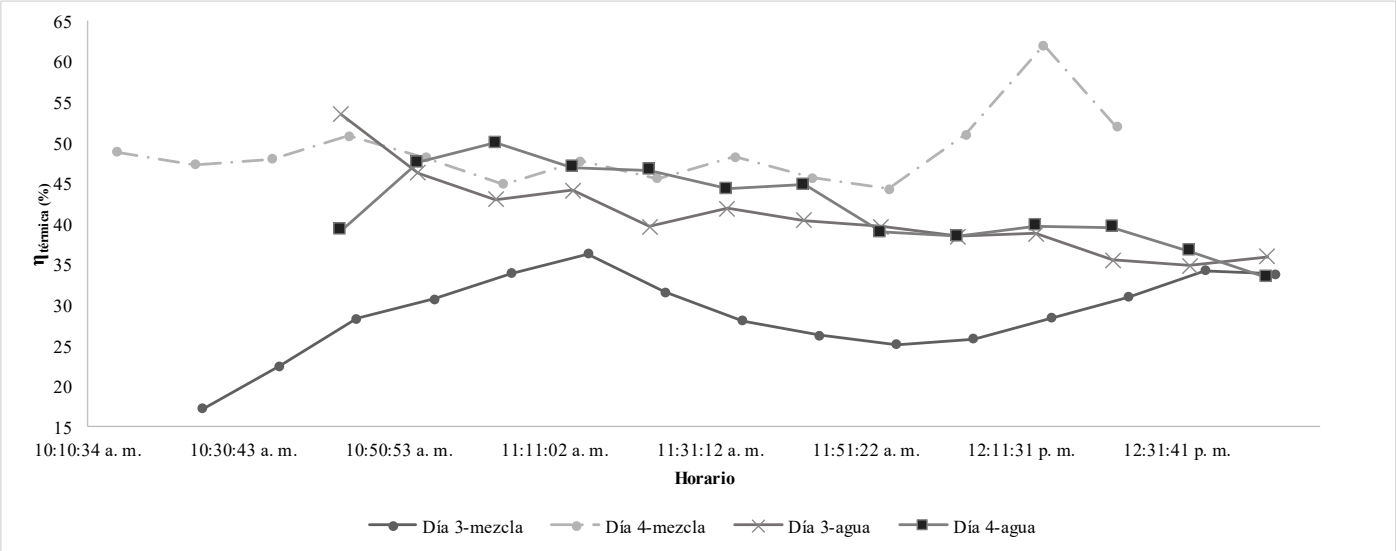


Figura 4. Eficiencia térmica con respecto al tiempo de los días 3 y 4 del mes de abril con un fluido base y una mezcla binaria.

CONCLUSION

A partir del análisis comparativo realizado entre el agua y la mezcla binaria agua-etilenglicol al 15 % como fluidos de trabajo en un concentrador cilindro parabólico, se observaron diferencias en la eficiencia térmica en función de la irradiancia directa, bajo condiciones similares de operación y flujos másicos de 0.067 kg/s y 0.100 kg/s.

- En términos de irradiancia directa, los días en los que se utiliza la mezcla con un flujo masico de 0.067 kg/s alcanzo una irradiancia máxima de 879.23 W/m^2 en comparación con el agua cuyo valor máximo fue de 545.56 W/m^2.
- Los resultados muestran que la mezcla de agua-etilenglicol alcanzo mayores eficiencias térmicas con un valor de 61.95 %, esto se atribuye a sus propiedades termo-físicas, como una mayor capacidad calorífica y mejor retención de calor.
- Mientras que el agua bajo condiciones similares mantuvo valores promedio de eficiencia térmica entre 40 % a 50 % mostrando una ligera tendencia descendente a lo largo del día.

Por lo tanto, la mezcla agua-etilenglicol ha demostrado ser un fluido más eficiente en cuanto a la transferencia de calor, lo que permite continuar con la fase experimental de esta mezcla.

REFERENCIAS

[1] Sgouridis, S., El-Kaissy, M., & Auffhammer, M. (2024). Renewable energy as a solution to climate change: A panel data analysis of 138 countries from 1995 to 2021. *PLOS ONE*. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299807.

[2] Jassim, A. M. (2024). *Thermal performance of parabolic trough solar collector*. *Al-Salam Journal for Engineering and Technology*

[3]Chamorro Páez, A. L., Arellano Mancheno, V. P., Ordoñez Viñán, M. A., Orozco Cantos, L. S., Viteri Núñez, E. F., & Jácome Domínguez, E. A. (2017). Rev. Pol. Conocimiento, Volumen 2, No. 7, p. 958-979.

[4]Carbajal Cano, J. K. (2018). Construcción e implementación de un concentrador solar cilíndrico parabólico para el pre-calentamiento de agua requerida por el intercambiador de calor a contraflujo del Laboratorio de Termo-Fluidos de la Universidad Nacional del Santa.

[12]referencia del servicio

[6] Galindo Luna, Y. R., Luna Jaime, J. J., & Ramos Sierra, J. (2024). Comparación de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico con distintas mezclas. *Contactos, Revista De Educación En Ciencias E Ingeniería*, (138), 15 - 21. Recuperado a partir de https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/454.

[7] Cengel, Y. A. (2007). Termodinámica. McGraw-Hill Interamericana.

[8] CoreChem Inc. (n.d.). *Ethylene glycol/water mixture properties*. https://corecheminc.com/ethylene-glycol-water-mixture-properties/

[9] MEGlobal. (2013). *Ethylene glycol product guide* (p. 19). MEGlob

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

DETERMINACIÓN DEL FLUJO RADIATIVO PARA UN CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO UTILIZANDO EL SOFTWARE TONATIUH

Daniel Briseño Garduño, Yuridiana R. Galindo Luna
Licenciatura en Ingeniería 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, cbi21730483560@izt.uam.mx

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

Este estudio combina datos de irradiancia estacional con simulaciones de trazado de rayos en Tonatiuh para analizar un concentrador cilindro parabólico (CCP). Se evaluó la viabilidad del CCP instalado en la UAM Iztapalapa y se comparó la distribución del flujo radiativo en siete estados de México: Ciudad de México, Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán. Se recopilaron datos de irradiancia global horizontal y temperaturas máximas y mínimas durante cinco años (2020-2024), utilizando el banco de datos de la SENER y NASA. En Tonatiuh se modeló un reflector parabólico de 2.44 m de longitud y 1.22 m de apertura, reflectividad 0.92 y un tubo receptor cilíndrico de 0.0127 m de radio. Se consideró dividir el tubo receptor, en cuatro secciones para evaluar la distribución de flujo radiativo. Cada simulación utilizó la irradiancia directa de cada estado, durante 3 horas (11:00 h-13:00 h) y la fecha. De acuerdo con los resultados, en verano, Coahuila y Quintana Roo alcanzaron valores máximos de flujo radiativo cercanos a 90 000 W/m², en un rango de 8 % a 11 % superiores a los de CDMX. En invierno, Baja California, Campeche, Yucatán y Chihuahua registraron valores del 50 % inferior a los de CDMX. Por otro lado, Campeche mantuvo un comportamiento constante durante todo el año. Con respecto a la distribución en las secciones del tubo, la zona donde más se recolectó la irradiancia se situó entre 0.055 m y 0.065 m del perímetro del tubo, con algunas variaciones en cada caso. Coahuila y Quintana Roo mostraron mayor potencial anual, mientras que Baja California y Chihuahua exhibieron elevada variabilidad estacional. Finalmente, los resultados obtenidos, nos permiten demostrar que el CCP es capaz de operar en diferentes zonas de nuestro país confirmando la viabilidad gracias a las simulaciones obtenidas en el software Tonatiuh.

ABSTRACT

This study combines seasonal irradiance data with ray-tracing simulations in Tonatiuh to analyze a parabolic trough concentrator (CCP). The feasibility of the CCP installed at UAM Iztapalapa was evaluated, and the distribution of radiative flux was compared across seven Mexican states: Mexico City, Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo, and Yucatán. Data on global horizontal irradiance and maximum and minimum temperatures were collected over five years (2020–2024) using the SENER and NASA databases. In Tonatiuh, a parabolic reflector measuring 2.44 m in length and 1.22 m in aperture, with a reflectivity of 0.92, and a cylindrical receiver tube with a radius of 0.0127 m was modeled. The receiver tube was divided into four sections to assess the distribution of radiative flux. Each simulation used the direct irradiance for each state, over a 3-hour period (11:00 a.m.–1:00 p.m.) on the selected date. According to the results, in summer, Coahuila and Quintana Roo reached maximum radiative flux values close to 90,000 W/m², between 8% and 11% higher than those in Mexico City. In winter, Baja California, Campeche, Yucatán, and Chihuahua recorded values 50% lower than those in Mexico City. Campeche, on the other hand, maintained a consistent performance throughout the year. Regarding the distribution across the receiver tube sections, the area with the highest irradiance collection was located between 0.055 m and 0.065 m from the perimeter of the tube, with some variations in each case. Coahuila and Quintana Roo showed the highest annual potential, while Baja California and Chihuahua exhibited high seasonal variability. Finally, the results obtained demonstrate that the CCP is capable of operating in different regions of the country, confirming its feasibility based on the simulations obtained with the Tonatiuh software.

Palabras claves: Tonatiuh, energía solar, concentrador cilindro parabólico, flujo radiativo, eficiencia térmica.

INTRODUCCIÓN

México registró un crecimiento del 0.2 % en su producción industrial durante 2024 en comparación con el año anterior. Entre los sectores con mayor impulso destacan la construcción, la industria manufacturera, la generación de energía, el suministro de agua y gas, mientras que el sector minero presentó una disminución en su actividad (INEGI, 2024). Aunque este crecimiento es moderado, refleja una tendencia sostenida que implica una mayor demanda energética. En este contexto, se vuelve fundamental fortalecer la capacidad de generación eléctrica y al mismo tiempo, orientar nuestras prácticas hacia fuentes más limpias y sostenible que permitan atender el incremento en el consumo energético sin comprometer el medio ambiente. De acuerdo con el Balance Nacional de Energía de la Secretaría de Energía (SENER 2023) las fuentes renovables se agrupan en hidráulica, biocombustibles, geotermia, eólica y solar en todas sus modalidades. De manera equivalente, la Agencia Internacional de Energía reconoce estas energías renovables subrayando su papel fundamental en la descarbonización de los sectores eléctrico y térmico. Dentro de ese marco, la energía solar se posiciona como la principal fuente renovable: no solo por su abundancia, sino por la amplitud de sus aplicaciones y su adaptabilidad, la cual abarca desde la generación de electricidad tanto fotovoltaica como termosolar, hasta usos térmicos directos como el calentamiento de agua y la climatización de espacios, pudiendo implementarse tanto en proyectos a gran escala

como en soluciones distribuidas y de autoconsumo. Por estas características, la energía solar es clave para reducir emisiones y transformar los sistemas energéticos hacia modelos más limpios. Ahora bien, con base a los datos obtenidos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2023), México presenta un valor promedio de irradiación global horizontal de aproximadamente 5 $kWh \cdot m^{-2} \cdot$día, y más del 70 % del territorio recibe en promedio más de 4.5 $kWh \cdot m^{-2} \cdot$día; en estados del norte, como Sonora y Chihuahua, este indicador puede superar los 6 $kWh \cdot m^{-2} \cdot$día. Al cierre de 2023 la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en el país alcanzó 10.8 GW (Intersolar, 2023), y la generación solar neta aumentó de 9.96 TWh en 2019 a 27.4 TWh en 2023, representando cerca del 7.6 % de la producción eléctrica nacional (Reglobal, 2023). Estos niveles de irradiación y el crecimiento de la capacidad instalada hacen particularmente relevante el estudio y la evaluación de tecnologías de concentración solar. A través de los concentradores solares los cuales son dispositivos que emplean superficies reflectantes para redirigir y concentrar los rayos solares sobre un receptor, incrementando así la densidad energética y permitiendo alcanzar temperaturas superiores a las obtenidas con sistemas planos convencionales. Entre los principales tipos se encuentran:

- Concentradores de tipo Fresnel (CLF): Los concentradores de Fresnel emplean lentes o espejos segmentados en franjas conocidos como “zonas” que replican la curvatura de una lente convencional, pero con menor espesor y peso. Estos prototipos pueden ser de foco puntual (usando lentes) o lineal (cilindro de lentes), y suelen ir montados sobre un seguidor solar de uno o dos ejes para maximizar la captación. Modelos experimentales han demostrado eficiencias ópticas superiores al 74 % a temperaturas de hasta 120 °C, gracias a receptores lineales de tubo evacuado y recubrimientos antirreflectantes. (Zhang et al., 2023).
- Disco Parabólico (DP): Este sistema usa un reflector parabólico de revolución para concentrar la radiación solar en un receptor puntual situado en el foco. Un seguidor de dos ejes mantiene el disco siempre perpendicular al Sol, lo que permite alcanzar temperaturas del receptor superiores a 400 °C, (Abed et al., 2024).
- Concentrador Cilíndrico Parabólico (CCP): Consiste en reflectores parabólicos alargados que enfocan la radiación sobre un tubo receptor lineal. Un seguidor de un eje orienta los reflectores de Este a Oeste, facilitando la construcción de campos modulares (Melo, 2018).

Aunque existen distintos tipos de concentradores solares (Fresnel, disco parabólico, cilindro parabólico), todos operan bajo el principio común de captar radiación solar directa y concentrarla en un receptor, incrementando así la densidad de energía térmica disponible. Están diseñados con geometrías ópticas precisas, materiales reflectantes de alta calidad y sistemas de seguimiento solar (de uno o dos ejes), factores que en conjunto determinan su eficiencia en función del nivel de irradiancia local. Entre estos, los concentradores cilindro parabólicos (CCP) han emergido como la tecnología más práctica y escalable en aplicaciones de mediana y gran escala. Su adopción ha sido impulsada por mejoras constantes en el diseño óptico, los materiales, y los mecanismos de seguimiento solar. (Duffie, 2013)
En los últimos años se han desarrollado herramientas de simulación como Tonatiuh, un software libre que utiliza métodos de Monte Carlo para trazado de rayos. Tonatiuh permite modelar fenómenos de reflexión, transmisión y absorción en geometrías complejas, y genera mapas de irradiancia focal que son esenciales para el análisis térmico del sistema. Esto resulta especialmente útil para adaptar los diseños de CCP a la diversidad climática de regiones como las de México, obteniendo la distribución del flujo radiante sobre el receptor.

A continuación, se mencionan diferentes estudios que demuestran la versatilidad de Tonatiuh para adaptar diseños de CCP a distintos climas y latitudes mexicanas, así como la necesidad de continuar generando datos localizados que sirvan de base para la implementación de sistemas solares térmicos eficientes y replicables en comunidades y procesos industriales. Wassila Ajbar en su “tesis” de maestría, modeló un concentrador cilindro parabólico (CCP) y se realizó trazado de rayos con Tonatiuh para generar mapas de irradiancia. El perfil de flujo muestra una distribución aproximadamente simétrica, con un pico máximo de concentración térmica promedio que alcanza valores de 41,000 W/ m^2 (Ajbar, 2018). González Martínez y Villabona Niño, realizaron un análisis óptico térmico de un prototipo artesanal de CCP, aplicando Soltrace y Tonatiuh para identificar mejoras en el diseño geométrico y optimizar la concentración de irradiancia sobre el receptor. El patrón de irradiancia obtenido mediante simulación en el software mostró una distribución más homogénea en la superficie del receptor. Las pruebas experimentales indicaron que, al minimizar la formación de puntos calientes y reducir el riesgo de sobrecalentamiento localizado, se logró un flujo promedio de 18,670 W/m^2 a lo largo del tubo receptor, optimizando así el desempeño térmico del sistema (González Martínez y Villabona Niño, 2021). Hernández Muñoz en su “tesis” didáctica de concentrador parabólico presentó la implementación de Tonatiuh, para estimar el error óptico de la superficie reflectiva y validar las trayectorias de los rayos en un montaje pedagógico. El análisis de trazado de rayos mostró que, bajo condiciones de irradiancia directa normal de 850 W/m^2, el flujo máximo incidente sobre el tubo absorbedor alcanzó un valor de 22,140 W/m^2, mientras que el flujo promedio se mantuvo en 14,600 W/m^2 a lo largo de la sección focal (Hernández Muñoz, 2015). En 2021, Sánchez Espejel y Flores Lara, restauraron un disco parabólico de 1.80 m en el Instituto Tecnológico de Apizaco (Tlaxcala) y emplearon Tonatiuh para cuantificar la distribución del flujo y la potencia máxima en el receptor, analizando además los efectos de errores angulares. En las pruebas experimentales para un radio de 0.025 m se estimó un flujo promedio de aproximadamente 8.5×10^5 W/m^2, mientras que con radios de 0.06 m y 0.075 m se obtuvieron flujos de 1.62×10^5 W/m^2 y 1.03×10^5 W/m^2, respectivamente (Sánchez Espejel D, Flores Lara, M 2021).

El presente trabajo se justifica por la necesidad de determinar el potencial de captación de energía solar de cada región seleccionada. Esto permite diseñar concentradores cilindro parabólicos (CCP) que no solo sean eficientes, sino también adaptables y reproducibles en diferentes zonas del país, favoreciendo su aplicación práctica.
Aunque la abundante irradiancia del país favorece la adopción de tecnologías de concentración solar, existe una brecha entre las simulaciones y el desempeño real en campo: la falta de estudios integrados que combinen datos climáticos, el trazado de rayos y modelación térmica para caracterizar cómo varía la distribución del flujo radiativo de acuerdo con la región y temporada del año.

METODOLOGÍA

Descripción del sistema

La configuración geométrica se basa en el concentrador cilindro parabólico (CCP) instalado en la azotea del edificio AT de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAM-I). Este CCP está orientado en dirección Este-Oeste y cuenta con un sistema de seguimiento solar en el eje Norte-Sur.

En la Figura 1 se muestra el concentrador cilindro parabólico presenta las siguientes especificaciones y sistema de operación:

- Geometría y materiales: reflector de 2.44 m de longitud y 1.22 m de apertura, con espejo de aluminio pulido (reflectividad elevada) y tubo absorbente de cobre con recubrimiento selectivo protegido por una cubierta de vidrio de borosilicato.
- Óptica y seguimiento: eficiencia óptica aproximada del 65 % y mecanismo de seguimiento de un solo eje que orienta el reflector según la posición solar horaria.
- Circuito hidráulico: utiliza agua como fluido térmico, bombeada por una unidad de 0.5 HP que garantiza el caudal necesario; un manómetro controla la presión interna y un flujómetro para variar los litros por minuto a utilizar; el fluido se recluye en un depósito de almacenamiento que asegura suministro continuo y regulado.



Figura 1. Concentrador cilindro parabólico en UAM Iztapalapa.

La integración de estos componentes permite un control preciso de las condiciones operativas, maximizando la eficiencia del concentrador cilíndrico parabólico.

Descripción de la simulación

Se recopilaron datos climatológicos de 2020 a 2024 para la Ciudad de México y los estados de Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán, centrándose en los niveles de radiación solar. El propósito fue construir un conjunto de datos que permita comparar la irradiancia entre distintas regiones. La información proviene de fuentes oficiales como la Secretaría de Energía (SENER) y principalmente de la NASA, cuya base de datos histórica y estructurada facilita el acceso a registros detallados. Estos datos permiten comparar el potencial solar para realizar simulaciones precisas en el software especializado Tonatiuh. La información recopilada servirá como insumo para configurar las condiciones iniciales de la simulación, garantizando que los resultados reflejen escenarios aplicables a cada región.

Para la simulación en Tonatiuh se diseñó un Concentrador Cilindro Parabólico (CCP) con las especificaciones base del concentrador descrito y los valores del receptor cilíndrico de 1.22 m de longitud y radio de 0.0127 m. En primer lugar, se modeló la geometría del reflector generando la parábola con las dimensiones indicadas, garantizando una apertura óptima para la captación de radiación solar. A continuación, el cilindro receptor se posicionó exactamente en la línea focal, alineado horizontalmente a lo largo del eje de la parábola, de modo que su ubicación y dimensiones maximicen la concentración de los rayos reflejados, se define la posición aparente del Sol para la ubicación (latitud, longitud) hora de interés (fecha y hora). Se establece la densidad de rayos emitidos por la fuente solar (número de rayos) para asegurar precisión estadística en los mapas de irradiancia. Con esta configuración geométrica de la simulación se llevaron a cabo simulaciones en diferentes fechas clave del año para evaluar comparativamente la radiación solar incidente. En la Tabla 1 se muestra el diámetro del tubo receptor dividido

en cuatro sectores de 90° para caracterizar con detalle la distribución de flujo térmico en el receptor cilíndrico.

Tabla 1. Distribución del tubo receptor para las secciones 1-4

Nombre	Ubicación	Longitud(m)	Nombre	Ubicación	Longitud(m)
Sección 1	 0° - 90°	0.0 - 0.01995	Sección 3	 180° - 270°	0.0399 - 0.05985
Sección 2	 90° - 180°	0.01995 - 0.0399	Sección 4	 270° - 360°	0.05984 - 0.0798

Las simulaciones consideran el día donde se presenta el valor máximo de irradiancia durante primavera, verano, otoño e invierno y se promedian tres horas del mismo, alrededor del mediodía solar (11:00 h-13:00 h), en un periodo de 5 años (2020–2024). Este procedimiento se realiza para los estados seleccionados. La simulación permite calcular un promedio del flujo térmico en la superficie del tubo receptor, este enfoque proporciona una comparativa del recurso solar en las distintas ubicaciones geográficas. Además, se establece un valor promedio para

RESULTADOS

A partir de la simulación en Tonatiuh se obtuvieron los valores de flujo térmico para cada uno de estas secciones, lo que permite visualizar y cuantificar con precisión cómo varía la concentración de energía a lo largo de la superficie del tubo receptor.

La Figura 2 muestra la comparativa total de los cuatro periodos estacionales. En cada panel se muestra la densidad de flujo térmico (en W/m²) interceptado a lo largo de la longitud del tubo receptor (en metros), para siete ubicaciones en México: Ciudad de México, Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán.

- a) Primavera: todas las curvas poseen valores de flujo cercanos de entre 55,000 a 65,000 W/m² en un rango de entre 0.055 a 0.065 m. Quintana Roo muestra el valor más elevado de 65,000 W/m², mientras que Baja California posee un valor por debajo de 55,000 W/m².
- b) Verano: el valor máximo corresponde a Coahuila y Chihuahua con un valor de 93,000 W/m², alrededor de 0.058 m. Campeche alcanza valores de 75,000 W/m² que corresponden al nivel de irradiancia más baja.
- c) Otoño: los valores máximos van desde 70,000 a 85,000 W/m² en un rango de 0.055 a 0.065 m. CDMX y Quintana Roo exhiben los valores máximos aproximadamente de 85,000 W/m².
- d) Invierno: su máximo valor se reduce sustancialmente y se ubica cerca de 0.06 m, con valores de flujo en el rango de entre 20,000 a 40,000 W/m². CDMX alcanza el mayor (42,000 W/m²), mientras que Baja California y Chihuahua permanecen por debajo de 25,000 W/m².

Por último, se obtuvieron los resultados promedios y picos máximos para cada estación del año.

Primavera: flujo promedio ≈ 23,679 W/m²; flujo pico ≈ 58,517 W/m².
Verano: flujo promedio ≈ 33,703 W/m²; flujo pico ≈ 93,738 W/m².
Otoño: flujo promedio ≈ 35,060 W/m²; flujo pico ≈ 94,141 W/m².
Invierno: flujo promedio ≈ 13,385 W/m²; flujo pico ≈ 37,961 W/m².

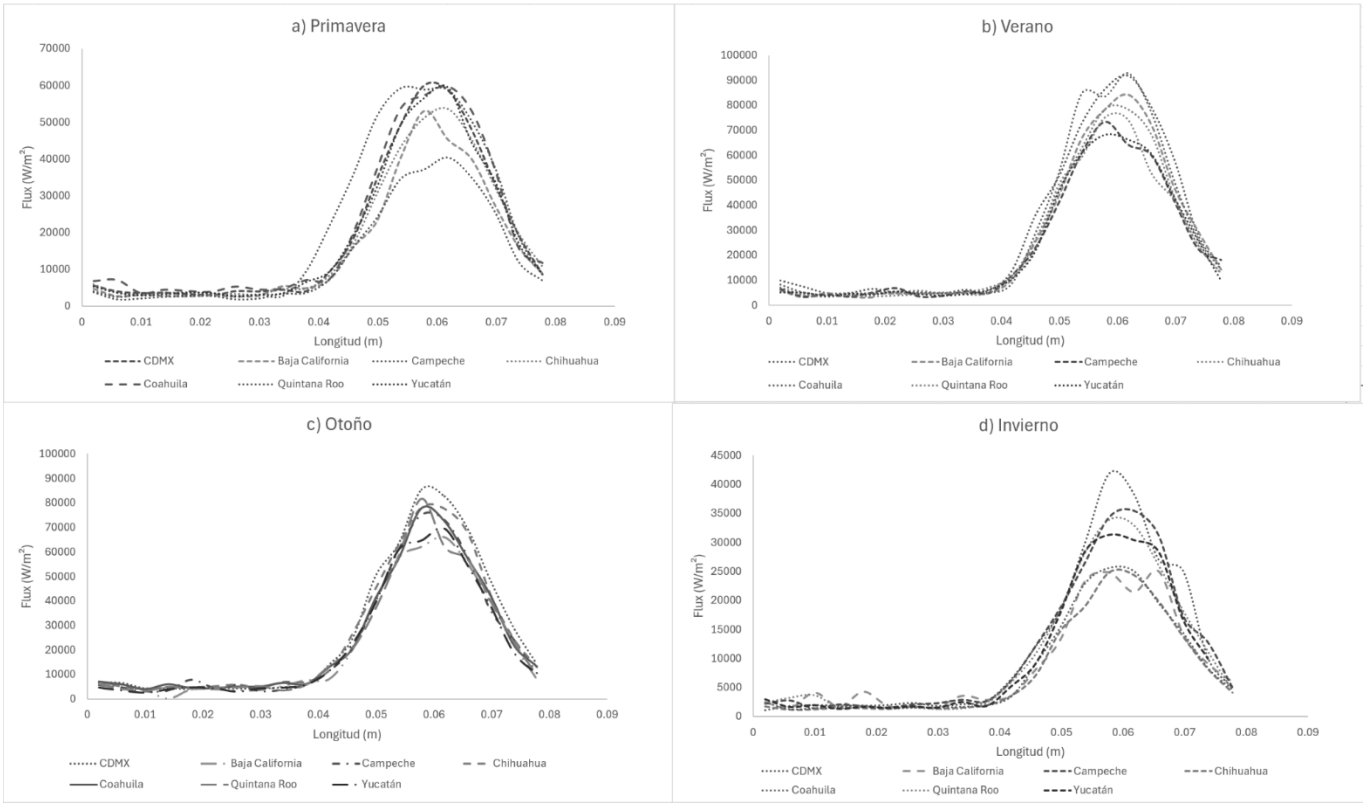


Figura 2. Flujos de calor promedio obtenidos para las diferentes estaciones del año.

CONCLUSIÓN

Con base al análisis comparativo de las distribuciones promedio del flujo térmico concentrado, sobre el tubo receptor para siete regiones de México (Ciudad de México, Baja California, Campeche, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Yucatán) durante el periodo 2020–2024, y considerando cada una de las cuatro estaciones del año, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los valores máximos durante el periodo de análisis (2020-2024) se determinaron en verano, los valores fueron de entre 60,000 a 90,000 W/m². Incrementando la concentración en 10,000 W/m² sobre primavera y otoño. Coahuila alcanza valores máximos de 95,000 W/m², este resultado hace susceptible a la implementación de estos concentradores.
- Durante otoño y primavera se determinaron los valores máximos en un rango de 55,000 a 90,000 W/m², en un intervalo de 0.038 a 0.072 m. Lo que implica una concentración menor y un perfil de temperatura más homogéneo en el receptor. La diferencia de hasta 35,000 W/m² corresponde a la variación entre las condiciones simuladas dentro de este rango, así como el perfil térmico resultante muestra una menor concentración y una mayor homogeneidad térmica.
- En invierno, los valores máximos alcanzan 25,000 a 42,000 W/m², localizándose principalmente entre 0.045 y 0.075 m del perímetro del receptor, estos indican una baja obtención de la distribución del flujo de calor siendo menor a la mínima obtenida en promedio para este tipo de concentradores.
- Finalmente, los valores obtenidos presentan un desempeño claramente influenciado por la estacionalidad de la irradiancia solar. Durante el verano y el otoño, se alcanzaron los mayores niveles de concentración con flujos pico cercanos a 94,000 W/m² y promedios superiores a 33,000 W/m². En la primavera se determinan valores pico de 58,000 W/ m² y promedio de 24,000 W/m², mientras que en el invierno evidencia una disminución significativa en el flujo radiativo con valores pico de 38,000 W/m² y un promedio de 13,000 W/m².

El uso del software Tonatiuh permitió obtener estimaciones aproximadas del comportamiento de los CCP en distintas ubicaciones del país. Esto refuerza la utilidad del software de trazado de rayos como una metodología confiable para evaluar la viabilidad de proyectos solares. En conclusión, las simulaciones muestran un potencial técnico para la utilización de CCP en los estados evaluados y puede ser una estrategia efectiva para aprovechar la energía solar térmica en México. No obstante, su éxito depende de un diseño adecuado, estrategias de

mantenimiento apropiadas y un monitoreo constante para optimizar su desempeño según las características climáticas específicas de cada estado. El desarrollo de tecnologías eficientes para la conversión de energía solar tiene implicaciones significativas en la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la mitigación del cambio climático.

REFERENCIAS

INEGI (enero, 2024) Indicador Mensual De La Actividad Industrial (IMAI) https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/imai/imai2024_03.pdf

Gobierno de México (2023) Balance Nacional de Energía de la Secretaría de Energía (SENER) https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energ_a_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf

International Energy Agency (2023) Energy system of Mexico https://www.iea.org/countries/mexico?

Intersolar (2023) Información de mercado: México https://www.intersolar.mx/informacion-de-mercado

Reglobal (2023) Renewables point the way to Mexico's energy security https://reglobal.org/renewables-point-the-way-to-mexicos-energy-security/

(Zhang et al. 2023). Experimental study of a linear Fresnel reflection solar concentrating system. *Frontiers in energy research*, *11*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1268687

Abed, A. A., El-Marghany, M. R., El-Awady, W. M., & Hamed, A. M. (2024). Recent advances in parabolic dish solar concentrators: Receiver design, heat loss reduction, and nanofluid optimization for enhanced efficiency and applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 273*, 112930. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112930

Melo M. (2018). reporte de inteligencia: energía termosolar. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/341706/IT_termosolar_Final_Rev_1.pdf

Ajbar Wassila (2018). "Sistema de concentradores solares de canal parabólico para la generación de calor de proceso: diseño, construcción y modelado matemático. Universidad Autónoma del Estado de Morelos

González Martínez, J. M., & Villabona Niño, L. F. (2021). Análisis óptico-térmico de un prototipo artesanal de concentrador cilindro-parabólico mediante SolTrace y Tonatiuh (Tesis de Ingeniería). Universidad Tecnológica de Sinaloa (UTS).

Hernández Muñoz, J. D. (2015). Sistema de seguimiento solar y caracterización térmica de un concentrador cilíndrico-parabólico didáctico [Tesis de Ingeniería]. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Sánchez Espejel, M., & Flores Lara, V. (2021). Simulación de un concentrador solar a partir de la restauración de un disco parabólico. Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 25(2), 75–88

Palacin, Luis Mutuberria, Amaia Les, Íñigo Burisch, Michael Bernardos, Ana Sánchez, Marcelino. (2022). Tonatiuh, un trazador de rayos basado en simulación de Monte Carlo y con licencia GNU GPL. 1229-1236.

Blanco, M., Mutuberria, A., Garcia, P., Gastesi, R., Martin, V., (2009) "Preliminary validation of Tonatiuh", SolarPACES, Berlin, Germany.

Stackhouse, P. (s/f). POWER. Nasa.gov. https://power.larc.nasa.gov/data-access- viewer/

Tonatiuh - Monte Carlo ray tracer for the optical simulation of CSP systems. (s/f). https://groups.google.com/g/tonatiuh-raytracer?pli=152.

SESIONES POSTER

ID	TÍTULO	PONENTE
2160	Evaluación del secado solar indirecto de espinaca en la Ciudad de México	Castañeda Zuluaga
2135	Análisis térmico de un receptor solar tubular optimizado con óptica secundaria para pirólisis solar mediante calentamiento de nitrógeno	Víctor M. Maytorena
2061	Aplicaciones de las aleaciones de alta entropía en la energía solar: ventajas y desafíos	Juan C. Casas Gámez

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DEL SECADO SOLAR INDIRECTO DE ESPINACA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

C. Castañeda Zuluaga[1], L. Domínguez Aguilar[2], Y.R. Galindo Luna[3], A. Domínguez Niño[4], F.G. Arroyo Cabañas[5] y G. Espinosa Paredes[6]

[1,3 y 6]Departamento de Posgrado en Energía y Medio Ambiente, UAM-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ra Secc, Iztapalapa, 09340 Ciudad de México, CDMX.
zuluagacarlos12@gmail.com

[2 y 5]Programa de Energía-Posgrado en Ingeniería Energética, UACM-San Lorenzo Tezonco, Prol. San Isidro 151, San Lorenzo Tezonco, Iztapalapa, 09790 Ciudad de México, CDMX.
lilianadominguezaguilar@gmail.com

[4]Departamento de sistemas energéticos, Instituto de Energías Renovables, UNAM, Iztapala, Xochicalco s/n, Azteca, 62580 Temixco, Morelos.
aldoni@ier.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se analizó el secado solar indirecto de espinaca de hoja rizada, una hortaliza de alto valor nutricional, rica en vitaminas, minerales y antioxidantes, con amplia disponibilidad en el territorio mexicano. Sin embargo, su elevado contenido de agua la convierte en un producto altamente perecedero, por lo que su aprovechamiento resulta fundamental para optimizar el uso de los recursos locales. El secado se llevó a cabo bajo las condiciones climáticas características de Iztapalapa, Ciudad de México. El objetivo fue evaluar la calidad del secado de la espinaca como parte de una estrategia para fomentar el consumo de vegetales, reducir el desperdicio y promover nuevas formas de consumo. Los ensayos experimentales se realizaron en abril y mayo de 2025, utilizando medidores termo-anemométricos para el registro de parámetros térmicos. Las condiciones promedio fueron de 30 °C de temperatura y una humedad relativa del 10 % al 30 %, trabajando en dos modos de operación: convección natural y convección forzada. El tiempo de secado para un kilogramo de espinaca fue de aproximadamente 6 horas. El deshidratador solar indirecto resultó viable y sustentable para conservar espinaca americana. Con convección forzada se logró un secado en tiempos de 6 h, con humedad final menor a 10 % y actividad de agua menor a 0.45, mientras que la convección pasiva mostró limitaciones. El cambio de color (6.8–11.27) indicó oxidación. La eficiencia global del colector alcanzó 34 % en forzada y menor a 5 % en pasiva. El modelo de Midilli-Kucuk fue el que mejor se ajustó (R^2=0.998). El producto final presentó cambios en sus propiedades organolépticas (color, textura y olor). Los resultados evidencian un uso eficiente de la energía solar para el procesamiento de alimentos en zonas urbanas de la Ciudad de México, lo que puede contribuir a incrementar la adopción de fuentes renovables en el país.

Palabras claves: Secado solar, ecotecnología, energías renovables, conservación de alimentos y sostenibilidad

ABSTRACT

This study analyzed the indirect solar drying of curly leaf spinach, a vegetable with high nutritional value, rich in vitamins, minerals, and antioxidants, and widely available in Mexico. However, its high water content makes it a highly perishable product, so its use is essential to optimize the use of local resources. Drying was carried out under the climatic conditions characteristic of Iztapalapa, Mexico City. The objective was to evaluate the quality of spinach drying as part of a strategy to encourage vegetable consumption, reduce waste, and promote new forms of consumption. The experimental trials were carried out in April and May 2025, using thermo-anemometric meters to record thermal parameters. The average conditions were 30 °C temperature and 10% to 30% relative humidity, working in two modes of operation: natural convection and forced convection. The drying time for one kilogram of spinach was approximately 6 hours. The indirect solar dryer proved to be a viable and sustainable option for preserving American spinach. With forced convection, drying was achieved in 6 hours, reaching final moisture content below 10% and water activity under 0.45, while passive convection showed limitations. The observed color change (6.8–11.27) indicated oxidation. The overall collector efficiency reached 34% with forced convection and less than 5% with passive mode. The Midilli-Kucuk model provided the best fit (R^2=0.998). The final product showed changes in its organoleptic properties (color, texture, and odor). The results demonstrate efficient use of solar energy for food processing in urban areas of Mexico City, which can contribute to greater adoption of renewable sources in the country.

Keywords: Solar drying, ecotechnology, renewable energy, food preservation and sustainability.

1.INTRODUCCIÓN

Actualmente México enfrenta problemas de salud pública relacionados con la alimentación, cerca del 12 % de la población presentar problemas relacionado con la insuficiencia nutricional [1]. El consumo per cápita de verduras aún está por debajo de los 400 gramos al día recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Una manera de afrontar esta problemática es impulsar el consumo de verduras y reduciendo el desperdicio de alimentos. México posee una amplia variedad de las hortalizas con 70 variedades a causa de la diversidad de climas que

caracterizan al país [2]. Dentro de este marco, la espinaca destaca como una de las verduras (hoja verde) con un alto contenido nutricional, vitaminas y minerales, pigmentos y fitonutrientes [3].

Se estima que en la CDMX existe un desperdicio de alrededor de 1,300 millones de toneladas de alimentos en general cada año [4]. De los cuales se estima que el 45% son frutas y vegetales cosechados [5]. El manejo de la postcosecha de alimentos perecederos tal como la espinaca (Spinacia oleracea), ha representado un reto significativo dentro del contexto urbano. Al usar ecotecnologías de deshidrato solar indirecto se ofrece una solución sostenible y que extiende la vida útil de los vegetales, reduciendo pérdidas de las hortalizas y promoviendo otra forma del consumo de los vegetales.

El empleo de estas tecnologías permite reducir la utilización del consumo de fuentes de energía no renovable. Su fuente de energía es limpia, inagotable y de una alta disponibilidad a lo largo del año. Los alimentos procesados con este método siguen conservando gran parte de su valor nutricional, reducen la huella de carbono contribuyendo a la mitigación del cambio climático, aprovechamiento de los recursos de la zona y promueven la economía local. Algunas de las ventajas de los deshidratadores solares indirectos son:

1. Existe un control en el secado, por lo que el producto terminado es de mejor calidad que los deshidratados al aire libre.
2. Los deshidratadores solares indirectos reducen notablemente problemas como la caramelización y el golpe térmico localizado, ya que evitan que los alimentos reciban radiación solar directa.
3. Los deshidratadores solares indirectos son muy recomendables para productos fotosensibles.
4. los deshidratadores solares indirectos ofrecen mayor eficiencia, mejor conservación de calidad, mejor aprovechamiento energético, protección frente a contaminantes y reducción de deterioro, en comparación con los sistemas directos.

La conservación de alimentos ha ido creciendo con nuevas formas en las que se procesan los alimentos, el deshidratado por medio de un deshidratador solar indirecto, consiste en la eliminación parcial o total del contenido de agua en la espinaca, lo que reduce el crecimiento microbiano [6]. Este método de deshidratado permite extender la vida útil del alimento y una forma de facilitar el almacenamiento. En particular, el secado solar ha surgido como una alternativa sostenible a métodos industriales, especialmente en zonas con alta radiación solar.

En la investigación de Matus Morales et al. [7], se evaluó un deshidratador solar indirecto de tipo pasivo construido en madera para el secado de mango Ataulfo en Chiapas. El prototipo, con un colector solar de 1.77 m² y una cámara de secado de 2.88 m³, operó durante seis horas con temperaturas entre 38 °C y 53 °C, logrando una pérdida de 278 g de agua en el producto final. Por otro lado, el estudio de Radhia Ferhat et al. [8]desarrolló un deshidratador solar indirecto de convección forzada para deshidratar espinaca, equipado con un colector de 2 m², extractor de 8 m³/min y sistema de recirculación de aire de escape. Operando bajo condiciones más controladas, alcanzaron una reducción de humedad del 93.2 % al 2 % en seis horas, con temperaturas en cámara de hasta 65 °C y mejoras en la eficiencia térmica al aumentar la fracción de aire reciclado. Ambos estudios demuestran la viabilidad del secado solar indirecto, resaltando la eficiencia superior del sistema con convección forzada y recirculación de aire en comparación con el sistema pasivo.

En el estudio se presentan los resultados del estudio de secado de espinaca en un deshidratador solar indirecto en la zona de Iztapalapa de la CMDX. El prototipo que fue utilizado se muestra en la Figura1. Para llevar a cabo el estudio, se utilizaron herramientas de medición, tal como anemómetro Amprobe TMA5, para las mediciones de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa, humedad ambiental, medición de temperatura del colector y temperatura de salida, con la finalidad de monitorear y registro de las condiciones del proceso. El dispositivo en un rango de temperatura ambiental de 0 a 70 °C, funciona en condiciones de humedad relativa de 0% a 80% RH. Cuenta con un rango de medición complementario que incluye punto de roció entre -20 y 59.9 °C, bulbo húmedo de –5 a 59.9 °C y una resolución de 0.1 °C con una precisión de ±1 °C. Se realizaron mediciones de la pérdida de masa con ayuda de una balanza digital, que tiene un error de aproximadamente un gramo. Los datos de radiación solar de registraron en un piranómetro con un error del 1%. Durante la experimentación, se registraron mediciones y comparaciones del peso del producto a intervalos regulares de 30 minutos, con la finalidad de analizar su pérdida de humedad a lo largo del tiempo. Así como el registro de la temperatura en los puntos de entrada, salida y en el interior de la cámara de secado (entre cada charola). con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema a través de su funcionamiento en convección natural y forzada.



Figura 1. Prototipo de deshidratador solar indirecto. Fotografía tomada en marzo de 2025, en las instalaciones de la UACM, plantel San Lorenzo Tezonco.

2. Métodos y materiales

La presente investigación se llevó a cabo en la Ciudad de México, en el plantel San Lorenzo Tezonco de la UACM, alcaldía Iztapalapa. El estudio consistió en evaluar el comportamiento del deshidratado de espinaca mediante un deshidratador solar indirecto, aplicando mediciones de pérdida de masa, temperatura, humedad y velocidad del aire durante el proceso. Para la preparación del producto antes del secado, se utilizaron tabla de corte, cuchillos, regla y desinfectante, asegurando condiciones higiénicas y uniformes en el tamaño de las muestras. Inicialmente se realizó la recolección y desinfección de la espinaca previo al secado, donde solo se requirió el uso de las hojas de la espinaca. Posteriormente, se pesó un kilogramo de producto y se procedió a cortar las hojas en julianas de aproximadamente 1 cm de grosor. Se colocaron 100 gramos de espinaca en cada una de las tres sub-charolas de prueba, las cuales fueron distribuidas de manera uniforme en el interior del deshidratador, el equipo se operó tanto en convección forzada como en convección natural.

Las pruebas iniciaron a las 10:00 h durante seis días distintos. Tres de ellas se realizaron mediante convección forzada, y las tres restantes mediante convección pasiva. Cada toma de datos se efectuó en intervalos de 30 minutos, aunque hubo variaciones en la hora de término de cada prueba se pesaron volúmenes de control de 300 gramos para evaluar la cinética de secado. En cada una de las pruebas se registraron mediciones de pérdida de peso del producto, así como temperaturas de entrada y salida del aire, temperatura dentro de las charolas, del colector solar, y la temperatura ambiente. También se midió el porcentaje de humedad relativa del ambiente y del aire de salida del secador, así como la velocidad del aire tanto de entrada como de salida en la cámara de secado.

Para llevar a cabo el experimento, se utilizaron diversos instrumentos y materiales que permitieron registrar con precisión las condiciones y variables del proceso de secado. El equipo principal fue un deshidratador solar indirecto, utilizado como sistema principal de secado, el cual evita la exposición directa del producto a la radiación solar. La velocidad del aire de entrada y salida, así como las temperaturas internas y ambientales, fueron registradas mediante el termoanemómetro, instrumento que también permitió calcular la humedad relativa tanto del ambiente como del aire en la cámara de secado. Asimismo, se utilizó una cámara termográfica FLIR E6 para monitorear la temperatura de la placa absortiva del colector solar de aire. Las muestras de espinaca fueron colocadas sobre charolas y sub-charolas de malla, dispuestas dentro de la cámara de secado.

2.1 Sistema Estudiado

El sistema estudiado fue un deshidratador solar de tipo indirecto, diseñado para la deshidratación de productos alimenticios mediante el uso de energía solar. Este equipo opera a partir del calentamiento del aire en un colector solar, el cual luego se dirige hacia una cámara de secado donde se encuentran colocadas las bandejas con el producto. Con una capacidad de funcionar tanto por convección natural como por convección forzada, lo que permite adaptar su operación según las condiciones climáticas o para las necesidades requeridas del proceso. En el modo de convección natural, el aire caliente se desplaza de manera pasiva a través del sistema debido a la diferencia de densidades, mientras que en el modo forzado se utiliza un ventilador para impulsar el flujo de aire y mejorar la eficiencia del secado. En la Figura 2 se presenta los puntos de estudio y el instrumental utilizado en el trabajo de campo.

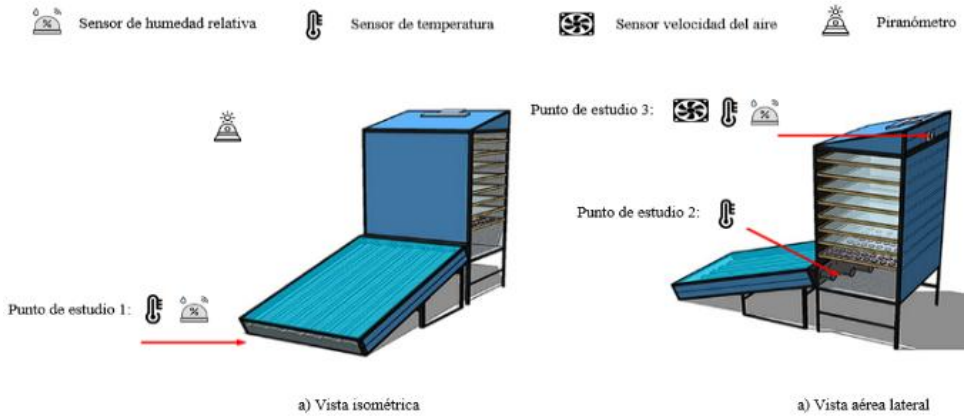


Figura 2. Puntos de medición e instrumentación del secador.

Este tipo de deshidratador ofrece ventajas significativas, como la protección del producto frente a la radiación solar directa, una distribución más uniforme del calor, y la posibilidad de controlar variables clave como la velocidad del aire y la temperatura interna. Su estudio permite evaluar el comportamiento térmico del sistema, la pérdida de humedad del producto y la eficiencia del proceso de deshidratación.

2.2 Características de la espinaca

La espinaca americana perteneciente a la familia Quenopodiáceas y de la familia taxonómica amarantáceas, disponible todo el año en

distintas variedades (lisa, rizada y baby) en promedio con un porcentaje de humedad del 95%. Es consumida cruda o cocida, siendo una verdura popular llena de nutrientes con vitaminas tales como K, A, C, ácido fólico, hierro y calcio. Sus variedades se distinguen por: Espinaca de hoja lisa, Espinaca Baby y la del producto estudiado, Espinaca de hoja rizada o savoy (ver Figura 3), variedad más popular es consumida por su textura firma, hojas onduladas, crujientes y color verde oscuro [11].



Figura 3. Espinaca de hoja rizada.

2.3 Modelos y parámetros de estudio

En esta sección se presentan los parámetros en los que se evaluado el secado final y los modelos matemáticos de análisis energético del secador, con el objetivo de caracterizar su funcionamiento, rendimiento, eficiencia y cinética de secado.

2.3.1 Parámetros de secado

La calidad del secado se evaluado mediante 3 parámetros de calidad de secado:

1) Humedad final: Contenido residual de agua (menor a 10 % para considerarse deshidratado) [12].
2) Actividad de agua (aw): indicador clave de la estabilidad microbiológica del producto (menor a 0.45 para una buena calidad y conservación) [12].
3) Colorimetría: Se analizó el color antes y después del secado utilizando un colorímetro digital bajo el sistema CIELAB (L*, a*, b*), con el fin de identificar cambios visuales [13].

2.3.2 Modelos de análisis energético.

El funcionamiento del secador se evaluó mediante la eficiencia del colector solar en ambos modos, la eficiencia global de secado y la velocidad de secado del sistema

El balance energético del colector es:

$$GA_C + P_t = \dot{Q}_u + \dot{Q}_P \tag{1}$$

Para el calor útil del aire.

$$Q_U = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \tag{2}$$

Para determinar la eficiencia del colector para convección pasiva.

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{da} Cp_{da} (T_2 - T_1)}{A_C I_T} \tag{3}$$

Para determinar la eficiencia del colector para convección forzada.

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{da} Cp_{da} (T_2 - T_2)}{A_C I_T} \tag{3}$$

La eficiencia de energía global, relaciona la energía utilizada para la evaporación de la humedad contenida en los alimentos a una temperatura determinada, con la energía total suministrada al secador.

$$\eta_E = \frac{\left(\frac{m_w h_{fg}}{t}\right)}{(A_C * I_{PI}) + A_{G_V} (I_{PV} * F_{EI}) + P_{vent}} \tag{4}$$

Para determinar la diferencia total de color en las coordenadas se usa la siguiente formula.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \tag{5}$$

Como modelo general para este proceso de cinética de secado se tiene a velocidad de secado.

$$R = -\frac{S_s}{A}\left(\frac{d\omega}{dt}\right) \tag{6}$$

4. Resultados

Los resultados de la calidad de secado se muestran en la Tabla 1, donde se observa que tanto para la convección forzada y la convección pasiva, exceptuando la prueba 3 de pasiva, se alcanzó el parámetro de secado de secado de calidad de deshidratado como una actividad de agua menor a lo establecido para su idónea conservación.

Tabla 1. Resultados de secado.

Convección forzada				
Número	**%humedad**	**Aw**	**AE**	**Fecha**
1	5.61%	0.26	6.80	18/03/2025
2	8.62%	0.41	7.25	24/04/2025
3	6.94%	0.43	5.95	08/05/2025
Convección pasiva				
1	10.09%	0.47	8.13	10/04/2025
2	6.19%	0.43	7.62	06/05/2025
3	20.67%	0.77	11.27	13/05/2025

Las tonalidades y sus cambios de productos se observan en la Figura 4, en donde su puntaje mayor a 6 puntos indica un cambio de color muy notorio, el cambio de croma indica presencia de oxidación durante el proceso.

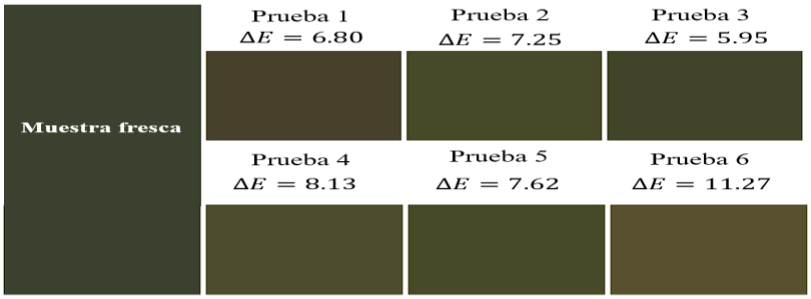


Figura 4. Colorimetría.

Para los análisis energéticos del secador, los resultados se presentan en la Tabla 2, donde se muestra: la energía necesaria para cambiar de fase el agua contenida en el producto, la energía total útil para el proceso de secado, la radiación incidente en el secador, las eficiencias globales del colector en todas las pruebas, la eficiencia global de secado, el tiempo total de las pruebas (en horas) y la velocidad de secado (R de secado).Debido a las condiciones climáticas durante las pruebas, el rendimiento del colector presentó variaciones a lo largo del día. Esto se reflejó en jornadas con mayor intermitencia, como en las pruebas 1 y 2 en el modo de convección forzada, así como en las pruebas 2 y 3 en convección pasiva.

Tabla 2. Resultados energéticos de las pruebas.

	Convección forzada			Convección pasiva			
	Prueba 1	**Prueba 2**	**Prueba 3**	**Prueba 1**	**Prueba 2**	**Prueba 3**	**Unidad**
Energía para la vaporización	0.61	0.60	0.60	0.59	0.58	0.56	kWh
Energía útil total	5.19	3.86	3.34	1.87	1.74	1.59	kWh
Irradiancia	8.06	9.35	6.82	9.68	9.87	9.87	kWh
eficiencia del colector	34.13	19.20	21.31	3.79	2.59	1.93	%
eficiencia global	3.81	3.19	4.42	3.02	2.59	2.47	%
Tiempo de secado	6.00	6.00	6.50	6.00	7.50	7.50	h

R de secado	86.24	83.93	72.68	82.28	72.20	64.49	g agua/h m^2

El modelo de la cinética de secado, con más concordancia y menos error para las pruebas de convección forzada es el modelo de Midilli-Kucuk, con la ecuación siguiente:

$$MR = 0.9834e^{-0.0011338t^{1.5245}} - 0.00000283t \quad (7)$$

Para el caso de la convección pasiva, el modelo cinético con más concordancia y menos error predictivo, igual mente fue el de Midillli-Kucuk, con diferentes coeficientes, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$MR = 0.947e^{-1.12\times10^{-4}t^{2.06}} - 5.7\times10^{-5}t \quad (8)$$

5. Conclusiones

El presente estudio demostró que esta tecnología es una alternativa viable y eficiente para la conservación de hortalizas de alto valor nutricional. El uso eficiente de un secador solar indirecto por medio de convección forzada y convección natural es sustentable en condiciones climáticas de Iztapalapa, Ciudad de México. Los resultados experimentales indicaron que, bajo las condiciones de la zona, de 30 °C promedio y humedades entre 10 % y 30 %, es posible llevar a cabo un proceso exitoso de secado, principalmente en el modo de convección forzada con un promedio de 6 horas.

En términos de calidad, la mayoría de las pruebas alcanzaron parámetros óptimos de actividad de agua (menores a 0.45) y humedad final (menor a 10 %), lo que garantiza un secado de calidad para la conservación del alimento. Sin embargo, en el modo de convección pasiva se registraron casos donde la humedad final no alcanzó los parámetros planteados, lo que demuestra que forzar el aire garantiza de mejor manera el secado en las condiciones climáticas variables de la CDMX. Los análisis colorimétricos arrojaron puntajes de cambio de entre 6.8 y 11.27; en términos de percepción, se considera un cambio perceptible y considerable. Esto se debe principalmente a que el producto presentó tonos cafés, indicando oxidación durante el proceso de secado.

En los resultados energéticos, el sistema presentó eficiencias en el colector solar de hasta 34.13 % en convección forzada, mientras que en convección pasiva los valores cayeron por debajo del 5 %. Esto demuestra que el uso de ventiladores mejora el aprovechamiento energético solar y acelera la tasa de secado. Para el modelo de la cinética de secado, el que mejor se acopló, con un ajuste mayor de 0.998, fue el modelo de Midilli-Kucuk.

El empleo de esta ecotecnología contribuye a reducir pérdidas postcosecha, promover el consumo de vegetales deshidratados y fomentar el uso de energías renovables en el procesamiento de alimentos. El empleo de secadores solares indirectos representa una estrategia sostenible para el manejo postcosecha, promoviendo el aprovechamiento de recursos locales y ofreciendo un método de conservación que favorece el cumplimiento de la seguridad alimentaria y la posibilidad de economías circulares.

REFERENCIAS

[1] Secretaría de Salud. (2023, 25 de febrero). 044. Cerca de 12 % de la población en México presenta insuficiencia nutricional. Gobierno de México. https://www.gob.mx/salud/prensa/044-cerca-de-12-de-la-poblacion-en-mexico-presenta-insuficiencia-nutricional

[2] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Representación AGRICULTURA Puebla. (2024, 31 de octubre). Hortalizas, un motor de desarrollo económico. Gobierno de México. https://www.gob.mx/agricultura/puebla/es/articulos/hortalizas-un-motor-de-desarrollo-economico?idiom=es

[3] Castro Pérez, B. (2015, 19 de enero). Espinacas, una verdura excepcional que nos ayuda a prevenir el envejecimiento. Farmacia Quintalegre Granada. https://farmaciaquintalegregranada.es/farmacia/nutricion-y-diet%C3%A9tica/espinacas-verdura-prevenir-envejecimiento/#:~:text=Las%20espinacas%20son%20una%20verdura%20excepcional%20y%20muy%20saludable&text=Su%20alto%20contenido%20en%20fibra,%2C%20potasio%2C%20magnesio%2C%20manganeso.

[4] Secretaría de Bienestar. (2013, 13 de noviembre). Se desperdician más de diez mil toneladas de alimentos cada año en México. Gobierno de México. https://www.gob.mx/bienestar/prensa/se-desperdician-mas-de-diez-mil-toneladas-de-alimentos-cada-ano-en-mexico

[5] SECTEI Ciudad de México. (2023, 2 de abril). En el mundo se desperdicia casi la mitad de frutas y vegetales cosechados. Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México. Recuperado de https://www.sectei.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/en-el-mundo-se-desperdicia-casi-la-mitad-de-frutas-y-vegetales-cosechados

[6] Fellows, P. J. (2007). Tecnología del procesado de los alimentos: principios y práctica (2.ª ed.). Zaragoza, España: Editorial Acribia.

[7] Matus Morales., et al. (2024). Evaluación de un deshidratador solar indirecto para mango Ataúlfo (Mangifera indica L.). Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital, 16(4), 1534–1545. https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2024/09/3_50_evaluaciac2b3n-de-un-deshidratador-solar-indirecto-para-mango-ataaolfo-mangifera-indica-l.1.pdf

[8] Ferhat, R., et al. (2019). Convective solar drying of spinach leaves. MOJ Food Processing & Technology, 7(1), 22–25. https://doi.org/10.15406/mojfpt.2019.07.00214

[9]Karaaslan, S. N., & Tunçer, İ. K. (2008). Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. Biosystems Engineering, 100(1), 44–52. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.012

[10] Lokhande, R. S., Chand, K., Krishna, K. ., & Shahi, N. C. (2014). Drying characteristics of spinach (spinacia oleracea L.) in solar tunnel dryer. International Agricultural Engineering Journal., 23

[11] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023, 11 de marzo). Conoce la espinaca, el producto más nutritivo. Gobierno de México. Recuperado de https://www.gob.mx/agricultura/articulos/conoce-la-espinaca-el-producto-mas-nutritivo

[12] Colina Irezabal, M. L. (2009). Deshidratación de alimentos. Editorial Trillas.Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (Eds.). (2010).

[13] Drying of Foods, Vegetables and Fruits: Volume 1. Univer
sidad Nacional de Singapur. https://arunmujumdar.com/wp-content/uploads/2020/03/Drying-of-Foods-Vegetables-and-Fruits-Volume-1.pdf

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS TÉRMICO DE UN RECEPTOR SOLAR TUBULAR OPTIMIZADO CON ÓPTICA SECUNDARIA PARA PIRÓLISIS SOLAR MEDIANTE CALENTAMIENTO DE NITRÓGENO

Cuitláhuac Iriarte-Cornejo, Resty L. Duran, Saul F. Moreno, Jesus F. Hinojosa, Víctor M. Maytorena
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

El presente trabajo evalúa el comportamiento térmico de un receptor solar tubular acoplado a un campo de mini heliostatos biomiméticos, diseñado para calentar nitrógeno hasta 577 °C (850 K). El análisis comparativo se realizó entre un caso sin reflectores secundarios (Convencional) y un caso modificado con optica secundaria en geometría "V" (SO), usando simulación CFD con condiciones de frontera impuestas mediante trazado de rayos. Los resultados muestran que la configuración con reflectores de 4 mm logra una reducción de 80 °C en la temperatura máxima de la superficie frontal del receptor (de 951 °C a 871 °C), lo que representa una disminución del 8 %. Esta mitigación contribuye a reducir los gradientes térmicos transversales, pasando de 44 °C/mm (Convencional) a 41 °C/mm en la cara frontal, y mejora la simetría térmica en el espesor del tubo, reduciendo el índice de asimetría R de 1.32 a 1.22, esto para la parte central del tubo receptor. En cuanto al desempeño del fluido, el perfil axial promedio de temperatura del nitrógeno muestra un aumento más controlado en la zona de calentamiento activo, con una temperatura de salida de 588 °C con el sistema SO, ligeramente superior al valor objetivo de diseño y al alcanzado por el sistema convencional (579 °C). Estos hallazgos indican que la implementación de reflectores secundarios con una separación de 4 mm mejora la homogeneidad térmica del receptor sin comprometer las temperaturas requeridas, posicionándose como una alternativa viable para aplicaciones termoquímicas solares, donde se requiera el uso de un fluido caloportador inerte, como aplicaciones de pirolisis solar.

Palabras claves: Pirolisis solar, Segunda optica, Receptor solar, Torre solar.

ABSTRACT

This work evaluates the thermal behavior of a tubular solar receiver coupled to a biomimetic mini-heliostat field, designed to heat nitrogen up to 577 °C (850 K). A comparative analysis was performed between a case without secondary reflectors (Conventional) and a modified case with rear "V" (SO), using CFD with boundary conditions imposed via ray tracing. The results show that the 4 mm reflector configuration achieves an 80 °C reduction in the maximum front-surface temperature of the receiver (from 951 °C to 871 °C), i.e., an 8% decrease. This mitigation helps reduce transverse thermal gradients—from 44 °C/mm (Conventional) to 41 °C/mm on the front face—and improves through-thickness thermal symmetry, lowering the asymmetry index R from 1.32 to 1.22 at the mid-height of the receiver tube. Regarding fluid performance, the cross-section-averaged axial nitrogen temperature exhibits a more controlled rise in the active-heating zone, with an outlet temperature of 588 °C for the secondary-optics system, slightly above both the design target and the value reached by the conventional system (579 °C). These findings indicate that implementing 4 mm secondary reflectors enhances the receiver's thermal homogeneity without compromising the required temperatures, positioning it as a viable alternative for solar thermochemical applications that require an inert heat-transfer fluid, such as solar pyrolysis.

Keywords: Solar pyrolysis, Secondary reflector, Solar receivers, Solar tower system, Solar gas heating.

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles aportan en torno al 80 % de la energía mundial (IEA, 2023) y generan impactos ambientales severos, entre ellos el cambio climático (Raimi et al., 2023). Ante este escenario, las tecnologías renovables surgen como alternativas sostenibles. En particular, los sistemas de energía solar de concentración (Concentrated Solar Power, CSP) concentran la radiación solar para calentar, a altas temperaturas, un fluido caloportador dentro de un receptor térmico. Sus configuraciones principales incluyen torre central, canal parabólico, Fresnel lineal y disco-Stirling. La literatura reporta que la tecnología de torre central es especialmente idónea para producir energía térmica por encima de 900 °C (Parthasarathy et al., 2022), habilitando múltiples aplicaciones industriales por ejemplo la pirolisis y gasificación e biomasa. Un sistema de torre central integra un campo de heliostatos, una torre y un receptor; los heliostatos redirigen la radiación hacia el receptor ubicado en la parte superior, donde la energía solar concentrada se transfiere al fluido (Behar et al., 2013). Los receptores pueden clasificarse por presión de operación, tipo de fluido caloportador y diseño estructural (He et al., 2019).

En los sistemas de torre central, los receptores que emplean gases como medio de transferencia de calor constituyen una solución prometedora por su inercia química, menor riesgo ambiental y capacidad de operación estable a altas temperaturas (Mehos et al., 2017). No obstante, las limitaciones térmicas de los gases (bajo calor específico y conductividad) favorecen la aparición de flujos de calor no uniformes sobre el tubo, que derivan en fuertes gradientes de temperatura y esfuerzos térmicos significativos (Mehos et al., 2017; Ho, 2017; Maytorena & Hinojosa, 2023).

Una estrategia efectiva para mitigar estos efectos es la incorporación de óptica secundaria, que mejora la homogeneidad del flujo solar

concentrado sobre la superficie del receptor, disminuye los gradientes térmicos y reduce el riesgo de deformaciones o fallas estructurales (He et al., 2019; Bharti et al., 2019; Tang et al., 2021). El principio consiste en redistribuir parte del flujo incidente en la cara frontal hacia la cara posterior del tubo, logrando una temperatura más uniforme y alargando la vida útil del receptor. Si bien se han documentado mejoras relevantes en colectores cilindro-parabólicos y en sistemas de disco (Sookramoon, 2014; Widyolar et al., 2019; Mandal et al., 2024), persiste una brecha de estudios centrados en receptores tubulares de torre central para calentamiento de gases mediante óptica secundaria.

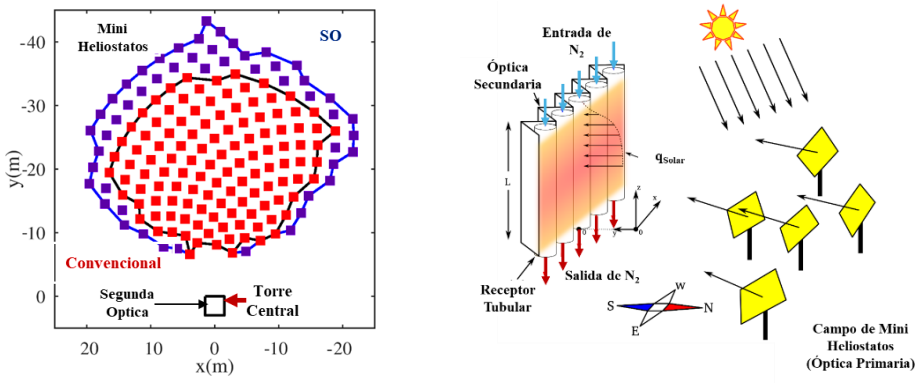
En este contexto, el presente trabajo analiza el desempeño térmico de un receptor solar tubular acoplado a un campo de mini-heliostatos biomiméticos, diseñado para calentar nitrógeno hasta 850 K (577 °C), temperatura objetivo en aplicaciones de pirólisis solar (Maytorena et al., 2023). Se comparan dos configuraciones: un receptor convencional (sin óptica secundaria) y otro con óptica secundaria (SO), evaluando su impacto en la distribución de temperaturas del tubo y del fluido. La metodología se basa en un acoplamiento óptico–térmico: el flujo solar concentrado obtenido mediante trazado de rayos se impone como condición de frontera en simulaciones CFD, permitiendo cuantificar la homogenización del flujo y sus efectos térmicos en el receptor.

METODOLOGÍA

Definición del problema físico

El sistema solar estudiado está conformado por un receptor tubular externo y un campo de miniheliostatos biomimético orientado al norte, diseñado para operar en Hermosillo, Sonora (LAT: 29° 04′ 52″, LON: –110° 57′ 47″). El receptor tiene como objetivo calentar nitrógeno hasta 850 K para aplicaciones térmicas y termoquímicas. La geometría y disposición del campo se optimizaron mediante un algoritmo iterativo de trazado de rayos acoplado a dinámica de fluidos computacional (IARCC–CFD), priorizando la eficiencia óptica y la homogeneidad de flujo. La implementación de una óptica secundaria en forma de reflector posterior permitió redistribuir el 40 % del flujo solar incidente en la cara frontal hacia la posterior, reduciendo el número de heliostatos requeridos de 170 a 119 y mejorando la uniformidad térmica (Figura 1a). El campo optimizado cuenta con un área total de 661.5 m² y una superficie reflectante de 243.34 m².

El receptor (2 m × 2 m) está compuesto por 76 tubos para el caso sin óptica secundaria (convencional) y 54 tubos para el caso con óptica secundaria, todos fabricados en aleación HAYNES 230 (ρ = 8,970 kg/m³, Cp = 473 J/kg·K, k = 18.4 W/m·K). Cada tubo presenta un diámetro exterior de 25.4 mm, espesor de 2.2 mm y longitud de 2 m (Figura 1b). El fluido de trabajo es nitrógeno (gas ideal) con propiedades termofísicas dependientes de la temperatura, que ingresa por la parte superior a 300 K con un caudal másico de 0.0071 kg/s y sale por la parte inferior a 577 °C, operando a una presión de 1 atm (Figura 1b). La separación entre tubos es de 0.01138 m y la distancia entre centros de 0.03678 m. La posición del vértice del reflector secundario se varió para evaluar su influencia en la distribución de flujo y temperatura (Figura 2).



(a) (b)

Figura 1. (a) Esquema de los campos de mini heliostatos estudiados y (b) Esquema del sistema físico.

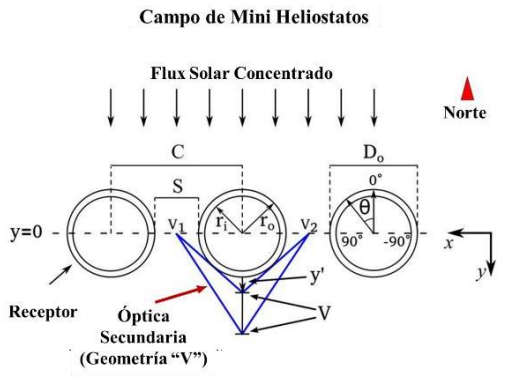


Figura 2. Variables de diseño del receptor solar con segunda optica.

Modelos matemáticos

Se aplicaron las siguientes suposiciones para modelar la transferencia de calor en el receptor solar térmico: Comportamiento de gas ideal para el nitrógeno. Propiedades termofísicas dependientes de la temperatura. Régimen de flujo turbulento, se implementó el modelo de k_t-ε_t estándar (Launder & Spalding, 1974). Las ecuaciones gobernantes se expresan mediante la formulación RANS (ANSYS, 2013).

Continuidad: (1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Cantidad de movimiento (Momento): (2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (t) + \rho g$$

Ecuación de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T + t_{eff} \cdot \vec{v}) \quad (3)$$

Correlación de Gnielinski (1976). (4)

$$Nu = \frac{(\frac{f}{8})(Re_b - 1000)Pr_b}{1.07 + 12.7\sqrt{(\frac{f}{8})}(Pr_b^{2/3} - 1)}$$

Factor de fricción (Darcy) (5)

$$f = [1.82 log_{10}(Re_b) - 1.64]^{-2}$$

Números adimensionales (6)

$$Nu = \frac{hD}{k_b}, Re_b = \frac{\rho_b v_b D}{\mu_b}, Pr_b = \frac{c_{p_b}\mu_b}{k_b},$$

Índice de asimetría (7)

$$R = \frac{\Delta T/t_{\theta=0°}}{\Delta T/t_{\theta=180°}}$$

Condiciones de frontera

Para completar la formulación del modelo matemático se definieron las siguientes condiciones de frontera. La Figura 3 resume la implementación de la condición térmica, datos generados para el equinoccio a la 12:00 h: En la Figura 3a y 3b se presenta la distribución espacial del flux solar sobre la superficie del receptor convencional y con segunda optica (SO), respectivamente, perfiles obtenidos mediante

simulaciones de trazado de rayos en Tonatiuh; en la Figura 3c se muestran los valores del flujo sobre el tubo central, seleccionado para este estudio; y en la Figura 3c se verifica el acoplamiento entre los resultados ópticos y la malla superficial del receptor en ANSYS Fluent, realizado mediante rutinas de mapeo e interpolación en Python. Esta distribución se impuso como término fuente de calor en las celdas de fluido adyacentes a la pared (superficie del receptor). Para asegurar la correcta inyección de energía y la simetría radial, se empleó una función definida por el usuario (UDF), comprobándose la concordancia entre los perfiles impuestos y los esperados (Figura 3d). En cuanto a las condiciones hidrodinámicas en pared, se aplicó la condición de no deslizamiento (todas las componentes de velocidad iguales a cero). En la entrada de nitrógeno se prescribió un flujo másico constante de 7.1×10^{-3} kg/s y una temperatura constante de 27 °C.

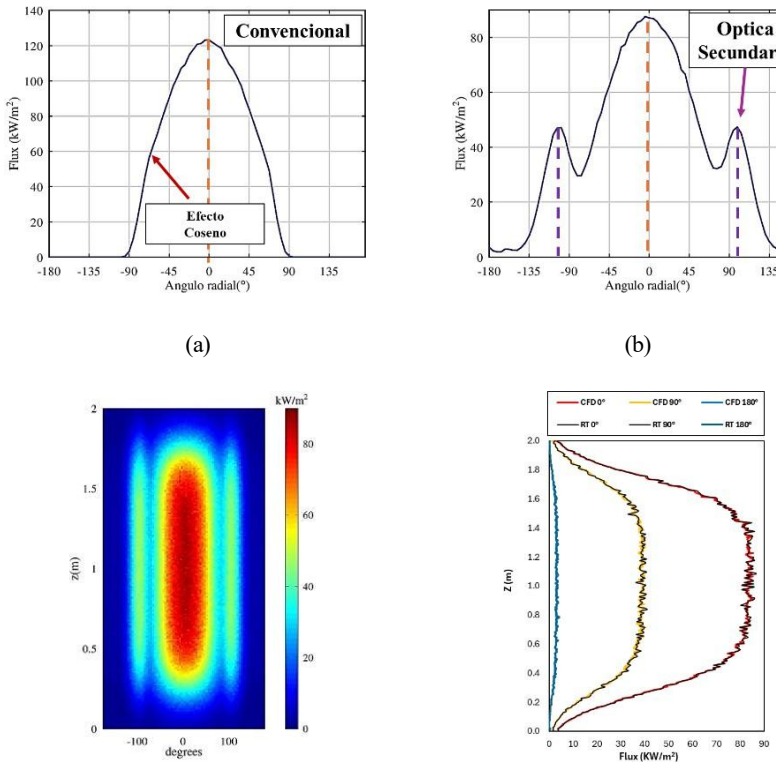
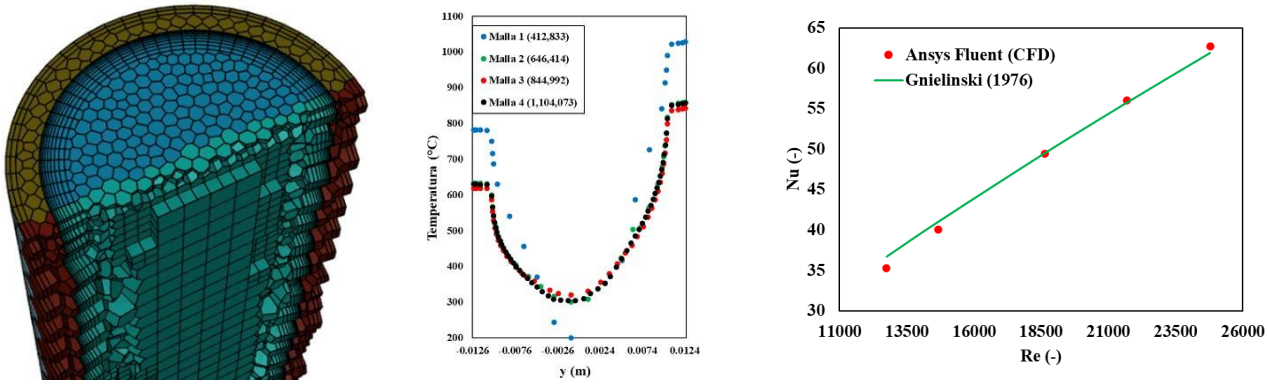


Figura 3. Flux solar generado por Tonatiuh para los sistemas estudiados: (a) perfil del Flux solar sobre el receptor convencional a z=1m, (b) perfil del Flux solar sobre el receptor SO a z=1m, (x) Flux solar sobre el tubo receptor SO y (c) Concordancia entre los perfiles generados por Tonatiuh y los impuestos en ANSYS Fluent.

Metodología computacional

Los sistemas estudiados se simularon con ANSYS Fluent, con formulación basada en presión y doble precisión, bajo régimen estacionario. El acoplamiento presión–velocidad se trató con el esquema SIMPLE y se emplearon discretizaciones de segundo orden para presión, densidad, momento, turbulencia y energía. Como criterio de convergencia, los residuos globales de todas las ecuaciones de transporte se mantuvieron por debajo de 1×10^{-3}, excepto el de energía, fijado en 1×10^{-6}. Se generó una malla híbrida no estructurada compuesta por elementos poliédricos y hexaédricos, con capas de inflación sobre la superficie del receptor y en la interfaz sólido–fluido (Figura 4a). La independencia de malla se evaluó mediante cuatro configuraciones con 412 833, 646 414, 844 992 y 1 104 073 elementos, denominadas malla 1, 2, 3, y 4, respectivamente. La comparación de un perfil de temperatura en una zona crítica del receptor (z = 0,7 m y θ = 0°) mostró diferencias despreciables entre las mallas 2 a 4, mientras que la malla 1 arrojó una sobrepredicción de la temperatura en el sólido y un perfil más estrecho en la región de fluido (Figura 4b). Con base en estos resultados, se seleccionó la malla 3 para el desarrollo del presente trabajo.



(a) (b) (c)

Figura 4. (a) Topología de la malla computacional, (b) Estudio de Independencia de malla y (c) Validación numérica con respecto a la correlación de Gnielinski.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del método computacional

El modelo computacional se validó analizando la transferencia de calor en una tubería circular utilizando nitrógeno (N_2) como fluido de transferencia de calor. Se impuso un flujo de calor uniforme de 27 kW/m² en la pared de la tubería, con una temperatura de entrada del gas de 300 K. La densidad del fluido se evaluó bajo la hipótesis de gas ideal, mientras que la viscosidad dinámica, la conductividad térmica y la capacidad calorífica específica se definieron como funciones polinómicas dependientes de la temperatura. El número de Reynolds se varió modificando el caudal másico, lo que permitió analizar el comportamiento térmico en diferentes regímenes de flujo turbulento. Los resultados se compararon con los obtenidos mediante la Ec.4 (Figura 4c), la cual corresponde a la correlación empírica de Gnielinski (1976), mostrando un excelente acuerdo con una R^2=0.999. El error promedio fue del 2%, con un máximo del 4% para el menor valor de Reynolds (12747), lo que valida la fiabilidad del modelo CFD para simular la transferencia de calor en flujo turbulento. La desviación media entre los resultados de la simulación y la correlación de Gnielinski se mantuvo por debajo del 2%, dentro del rango aceptado para simulaciones de transferencia de calor turbulenta en tubos circulares. Esto valida la robustez del modelo CFD para su aplicación prevista a altas temperaturas.

Comportamiento térmico en la cara frontal del receptor solar

La Figura 5a muestra los perfiles de temperatura a lo largo de la altura del tubo del receptor (0–2 m), medidos en su superficie externa (r_o) en la cara frontal ($\theta = 0°$), que está directamente expuesta al flujo solar concentrado del arreglo de mini heliostatos. La comparación se realiza entre el sistema convencional y la configuración con segunda óptica (SO). En general, los perfiles muestran un aumento de temperatura desde la entrada (~38 °C), alcanzando un valor máximo entre 0.5 y 1.5 m y disminuyendo suavemente hacia la salida del tubo receptor (600 °C). Este comportamiento se asocia con el patrón característico de distribución de flujo solar de la tecnología estudiada (Figura 1c). El sistema convencional alcanza la temperatura máxima más alta (951 °C en z = 0.66 m), atribuida a una alta concentración localizada (~82 kW/m²) en la cara frontal. En contraste, el sistema SO presenta una temperatura máxima de 871°C. lo que representan una reducción del 8% en comparación con el caso convencional, lo que demuestra la capacidad de los reflectores para atenuar picos térmicos y promover una distribución más homogénea del flujo solar.

La Figura 5b presenta la temperatura axial del N_2, promediada en la sección transversal del tubo receptor, para cada configuración. El cálculo se realizó en planos transversales separados $\Delta z = 0.25$ m, desde la entrada (z = 2.00 m, T = 27 °C) hasta la salida (z = 0.00 m). Se identifican tres tramos característicos: Precalentamiento (2.00–1.75 m): las curvas prácticamente coinciden entre configuraciones, con tasas de calentamiento axiales de 1.29 y 1.33 °C/cm para el caso convencional y con segunda óptica de 4 mm, respectivamente. Calentamiento activo (1.75–0.25 m): al atravesar la zona de mayor flujo solar concentrado, el N_2 alcanza sus mayores tasas de calentamiento, con ~3.43 °C/cm (convencional) y ~3.45 °C/cm (segunda óptica). Saturación térmica (0.25–0.00 m): las variaciones de temperatura son pequeñas a lo largo del recorrido, reflejando la aproximación al equilibrio térmico; las tasas de calentamiento se reducen a 0.23 y 0.27 °C/cm, y se obtienen temperaturas medias de salida de 578 °C (convencional) y 584 °C (segunda óptica).

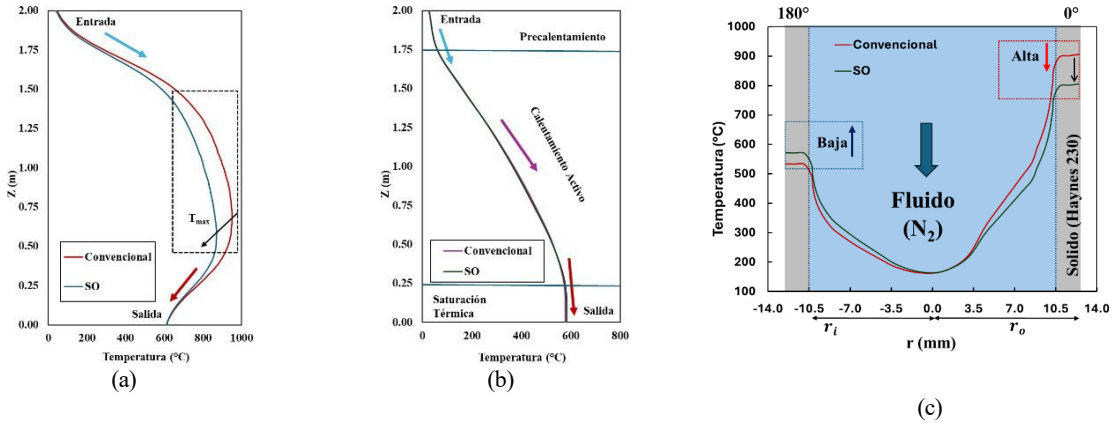


Figura 5. Comparación de los perfiles de temperatura, (a) Pared externa del receptor, (b) Temperatura media del N_2 y (c) a lo largo del diámetro del tubo del receptor en z = 1 m.

La Figura 5c muestra los perfiles de temperatura a lo largo del diámetro del tubo del receptor a una altura fija de z = 1 m, para analizar la distribución térmica transversal en función de los dos sistemas estudiados. En el sistema convencional se evidencia una marcada asimetría térmica: la temperatura máxima en la cara frontal alcanza aproximadamente 906 °C, mientras que en la posterior apenas supera los 534°C. Esta diferencia se debe a la alta concentración de flujo solar en la cara expuesta (Figura 3a), que genera fuertes gradientes térmicos a través de la pared del receptor convencional (Figura 6). Con la incorporación de segundas ópticas, parte del flujo solar incidente se redistribuye hacia las caras lateral y posterior del receptor (Figura 3b), lo que atenúa el sobrecalentamiento en la cara frontal. Esta redistribución provoca una disminución de la temperatura del fluido y del tubo en la zona de alta temperatura (Alta) y, simultáneamente, un incremento en la cara opuesta, elevando la temperatura en la zona de baja temperatura (Baja). Como resultado, la temperatura máxima en la cara frontal disminuye progresivamente, alcanzando valores de 805°C, mientras que en la cara posterior aumenta hasta 572 °C, aproximadamente. La implementación de la segunda optica genero una reducción del 11 % en la temperatura máxima respecto al sistema convencional, en esta sección del receptor.

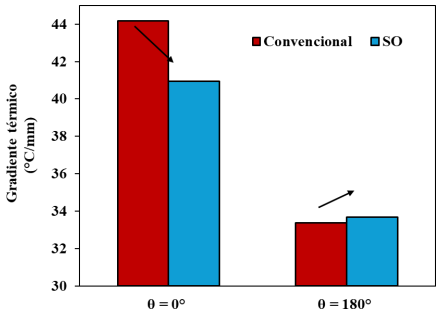


Figura 6. Comparación de los gradientes térmicos radiales en la pared frontal (θ=0°) y posterior del tubo receptor (θ=180°) a una altura de z=1 m.

Finalmente, la Figura 6 presenta el análisis comparativo de los gradientes térmicos radiales en z = 1 m, para las distintas configuraciones de reflectores posteriores. Los gradientes se evaluaron en dos posiciones angulares críticas: θ = 0° y θ = 180°. El sistema convencional registra un gradiente de 44 °C·mm^{-1} en la cara frontal y un índice de simetría térmica de R = 1.32, lo que evidencia una marcada asimetría. R se define como la razón entre el gradiente térmico en la cara frontal y el correspondiente en la cara posterior (ec. 7); valores más próximos a la unidad indican una distribución del flujo de calor más homogénea alrededor del tubo. Con la incorporación de óptica secundaria, el gradiente frontal disminuye y el posterior aumenta ligeramente, reduciendo R y mejorando la uniformidad radial. En la configuración con óptica secundaria (SO) se obtuvieron 41 °C·mm^{-1} (frontal) y 34 °C·mm^{-1} (posterior), con R = 1.22.

CONCLUSIONES

En síntesis, se presentó una metodología acoplada óptico–térmica para receptores de torre central y se validó numéricamente con la correlación de Gnielinski (98 % de precisión), confirmando la solidez del modelo. La incorporación de reflectores posteriores mejora la distribución térmica

y la simetría radial: la segunda optica estudiada ofrece una reducción de 11 % la temperatura máxima de pared, conservar la temperatura media de salida del N_2 de diseño y mejora la simetría térmica frente al caso sin óptica secundaria. Los reflectores secundarios se confirman como una alternativa viable y recomendable para aplicaciones termosolares de alta temperatura, al mejorar la homogeneidad de la distribución térmica y reducir los picos de temperatura sin comprometer los requerimientos térmicos del proceso; en el caso analizado, satisfacen las exigencias de la pirólisis solar.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio forma parte del proyecto CBF-2025-I-3929, “Proyecto apoyado por la “Secihti” en el año 2025”.

REFERENCIAS

1. ANSYS Inc. (US), ANSYS Fluent Theory Guide 15–16 (2013) 47.
2. Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K., 2013. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. Renewable and sustainable energy reviews 23, 12–39.
3. Bharti, A., Mishra, A., Paul, B., 2019. Thermal performance analysis of small-sized solar parabolic trough collector using secondary reflectors. International Journal of Sustainable Energy 38, 1002–1022.
4. Gnielinski, V., “New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow,” *International Chemical Engineering*, Vol. 16, No. 2, 1976, pp. 359-68.
5. He, Y.-L., Wang, K., Qiu, Y., Du, B.-C., Liang, Q., Du, S., 2019. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions. Appl Therm Eng 149, 448–474. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.006
6. Ho, C.K., Ortega, J.D., Christian, J.M., Yellowhair, J.E., Ray, D.A., Kelton, J.W., Peacock, G., Andraka, C.E., Shinde, S., 2016. Fractal-Like Materials Design with Optimized Radiative Properties for High-Efficiency Solar Energy Conversion. https://doi.org/10.2172/1431480
7. International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. OECD/IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023
8. Launder, B.E. & Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(2), 269–289. https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2
9. Mandal, P., Rajan, A., Reddy, K.S., 2024. Optical and thermal investigation of hyperbolic cavity receiver with secondary reflector for solar parabolic dish collector. Thermal Science and Engineering Progress 47, 102350.
10. Maytorena, V.M., Hinojosa, J.F., 2023. Computational analysis of passive strategies to reduce thermal stresses in vertical tubular solar receivers for safety direct steam generation. Renew Energy 204, 605–616. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.043
11. Maytorena, V.M., Hinojosa, J.F., Iriarte-Cornejo, C., Orozco, D.A., 2023. Biomass solar fast pyrolysis with a biomimetic mini heliostat field and thermal receiver for nitrogen heating. Energy Convers Manag 291, 117307. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117307
12. Mehos, M., Turchi, C., Gomez-Vidal, J., Wagner, M., Ma, Z., Ho, C., Kolb, W., Andraka, C., Kruizenga, A., 2017. Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap. https://docs.nrel.gov/docs/fy17osti/67464.pdf
13. Parthasarathy, P., Al-Ansari, T., Mackey, H.R., Sheeba Narayanan, K., McKay, G. A review on prominent animal and municipal wastes as potential feedstocks for solar pyrolysis for biochar production, Fuel 316 (May 2022), https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123378.
14. Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R.G., Prest, B.C., Bergman, A., 2023. Global energy outlook 2023: sowing the seeds of an energy transition. Resources for the future 1, 1–44.
15. Sookramoon, K., 2014. Design, constructand performance evaluation of a 2-stage parabolic through solar concentrator in PathumThani. Advanced Materials Research 931, 1291–1297.
16. Tang, X.Y., Yang, W.W., Yang, Y., Jiao, Y.H., Zhang, T., 2021. A design method for optimizing the secondary reflector of a parabolic trough solar concentrator to achieve uniform heat flux distribution. Energy 229, 120749.
17. Widyolar, B., Jiang, L., Ferry, J., Winston, R., Kirk, A., Osowski, M., Cygan, D., Abbasi, H., 2019. Theoretical and experimental performance of a two-stage (50X) hybrid spectrum splitting solar collector tested to 600 C. Applied energy 239, 514–525.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

APLICACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALTA ENTROPÍA EN LA ENERGÍA SOLAR: VENTAJAS Y DESAFÍOS

Juan C. Casas Gámez, Laura G. Ceballos Mendívil, Guadalupe D. Ávila Rubio
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, **21443629.casas@ms.uas.edu.mx, laura.ceballos@uas.edu.mx, daniel.avila@uas.edu.mx**

RESUMEN

La creciente necesidad global de una transición energética hacia fuentes de energías renovables que reduzca la dependencia a los combustibles fósiles ha motivado el desarrollo de nuevos avances tecnológicos que fortalezcan el sector energético. El campo de la ciencia de materiales es crucial en la investigación de nuevos compuestos capaces de mejorar la eficiencia y rendimiento de las tecnologías actuales dedicadas al aprovechamiento de fuentes de energías renovables. Las aleaciones de alta entropía (HEAs, por sus siglas en inglés) representan una nueva clase de materiales que desafían los principios tradicionales de diseño de aleaciones al incorporar cinco o más elementos principales en proporciones casi equiatómicas, emergiendo como materiales innovadores en diversas aplicaciones energéticas, destacando en el área de la energía solar y demostrando ser prometedoras en el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos y termoeléctricos debido a sus excepcionales propiedades como su alta estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y eficiencia en la conversión de energía. En este trabajo se realizará un análisis sobre las ventajas de las HEAs en el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia de la energía solar, así como los principales retos encontrados para su uso.

Palabras claves: HEAs, energía solar, fotovoltaica, fototérmica, ciencia de materiales.

ABSTRACT

The growing global need for an energy transition towards renewable energy sources that reduces dependence on fossil fuels has motivated the development of new technological advances that strengthen the energy sector. The field of materials science is crucial in the research of new compounds capable of improving the efficiency and performance of current technologies dedicated to the use of renewable energy sources. High-entropy alloys (HEAs) represent a new class of materials that challenge traditional alloy design principles by incorporating five or more major elements in near-equiatomic proportions, emerging as innovative materials in various energy applications, excelling in the area of solar energy, and showing promise in the development of photovoltaic and thermoelectric devices due to their exceptional properties such as its high thermal stability, corrosion resistance, and energy conversion efficiency. In this work, an analysis will be made of the advantages of HEAs in the development of new technologies to improve the efficiency of solar energy, as well as the main challenges encountered for their use.

Keywords: HEAs, solar energy, photovoltaics, photothermal, materials science

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha hecho evidente la importancia de las energías renovables y la urgencia de una transición energética hacia fuentes de energía limpias y seguras con el fin de dejar la dependencia de los combustibles fósiles y reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero. El aprovechamiento del sol como fuente de energía y calor se ha presentado como una de las alternativas más prometedoras para lograr el objetivo.

La energía solar se divide en dos ramas principales, la energía fotovoltaica y la energía fototérmica. La primera se centra en transformar la radiación solar en energía eléctrica aprovechando el efecto fotovoltaico, el cual consiste en que un material semiconductor emite electrones al incidir fotones sobre él generando corriente eléctrica[1]. Por otro lado, la fototérmica se basa en la captación de calor a través de la luz solar utilizando materiales que absorben la radiación generando energía térmica. Es útil para calentar agua, generar vapor para mover turbinas y generar electricidad[2]. Sin embargo, ambas presentan problemas similares, teniendo un costo de inversión inicial alto, eficiencia limitada, dependencia climática y problemas de infraestructura.

La ciencia de los materiales, un pilar en el avance tecnológico que ha realizado esfuerzos en las últimas décadas para desarrollar materiales con capacidades únicas y aplicaciones sorprendentes. Un material que ha captado la atención para su aplicación en la energía solar son las aleaciones de alta entropía, caracterizadas por su composición equimolar de múltiples elementos, presentan propiedades excepcionales como alta estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y eficiencia en la conversión de energía[3]. En este artículo, se explorarán algunas de sus aplicaciones más importantes en la energía solar fotovoltaica y la energía solar fototérmica.

ALEACIONES DE ALTA ENTROPÍA.

Las aleaciones de alta entropía han emergido como materiales innovadores en diversas aplicaciones energéticas, incluyendo la energía solar. Estas aleaciones están formadas por 5 o más elementos principales cuya composición se encuentra entre: 5 % at. $\leq$ Ci $\leq$ 35 % at (donde Ci es un elemento específico y % at. el porcentaje atómico del elemento). La combinación de varios elementos aumenta la entropía

del material, sin embargo, para que un material se considere de alta entropía debe poseer una entropía de mezcla ≥1.5R (R siendo la constante de los gases ideales)[4]. Asimismo, las HEAs se caracterizan por solidificar en estructuras cristalinas simples como cúbica centrada en las caras (FCC), cúbica centrada en el cuerpo (BCC) o hexagonal compacta (HCP), incluso presentando más fases como FCC+BCC. Dicha microestructura es clave para definir las propiedades de la aleación como su alta estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y al desgaste, y una notable dureza[3]. Cabe mencionar que la microestructura no es la única responsable de las propiedades excepcionales de las HEAs, en realidad, se debe a la combinación de cuatro efectos determinantes, los cuales son mostrados en la Figura 1[4-5].

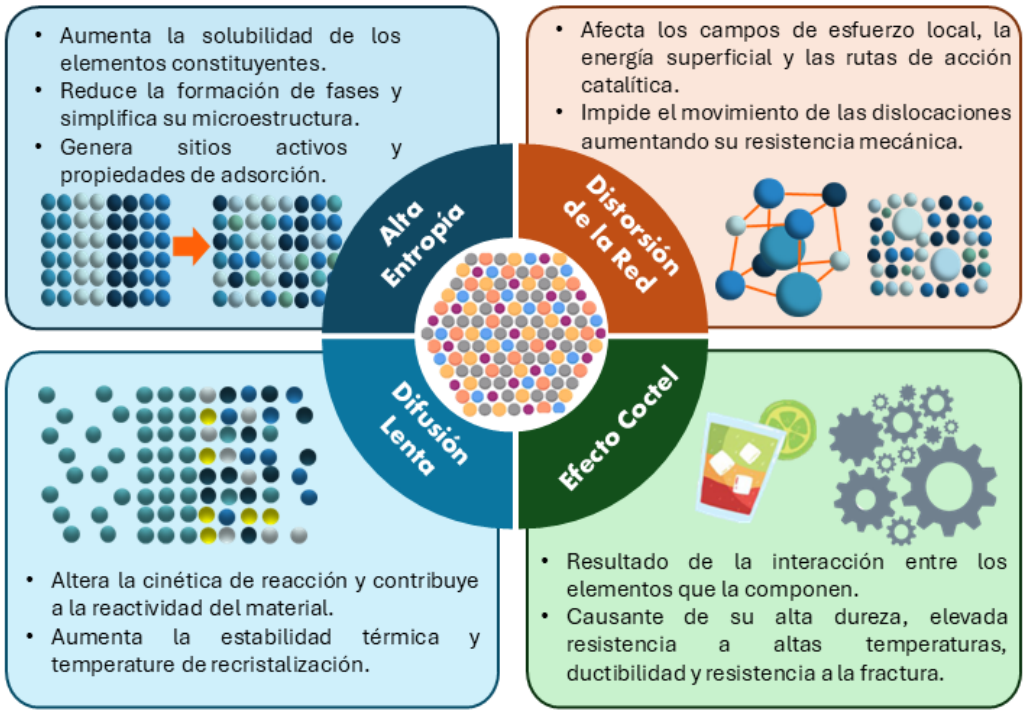


Figura 1. Principales efectos causantes de las propiedades de las aleaciones de alta entropía.

La resistencia a la corrosión usualmente se debe a la composición química de la aleación, ya que algunos elementos como el titanio y el aluminio forman óxidos superficiales que le confieren dicha propiedad[4].

APLICACIONES DE LAS HEAs EN LA ENERGÍA SOLAR FOTOTÉRMICA

Alta eficiencia en sistemas de energía solar concentrada a alta temperatura

Ahora nos centraremos en mostrar como las HEAs han surgido para mejorar la tecnología fototérmica. Uno de los principales retos encontrados en los sistemas de energía de energía solar concentrada (CSP) es su capacidad para funcionar a temperaturas mayores a 700 °C sin perder eficiencia y dañar la infraestructura. Aquí es donde entra una aleación de alta entropía de FeMnNiAlCr que tiene aplicaciones tanto estructurales como funcionales que resuelven este problema en un sistema CSP. Su función estructural está en que han demostrado tener resistencias al rendimiento de 2 a 3 veces mayores que las del acero inoxidable a 700 °C y una vida útil por fluencia superior a 800 horas a 700 °C bajo una carga mecánica típica de tubería CSP de 35 MPa. Además, en comparación a materiales como acero inoxidable 316 destaca en su resistencia al ser sumergida en sales fundidas de bromuro no purificadas, ya que presenta una pérdida de peso inferior al 2% al sumergirse por 14 días a 750 °C en dicha sal, en contraste al acero, que pierde el 70% de su peso en las mismas condiciones. Por otra parte, su aplicación funcional radica en la formación de un óxido superficial rico en manganeso que contribuye a la absorción solar sin necesidad de agregar recubrimientos solares. Este óxido de manganeso mantiene una alta eficiencia de conversión óptica a térmica de aproximadamente 87 % bajo una concentración solar de 1000× durante 20 ciclos térmicos simulados día-noche entre 750 °C y la temperatura ambiental. Además, gracias al aluminio presente en la HEA se forma un óxido de aluminio capaz de proteger la aleación subyacente de oxidación excesiva[6].

Mejora en la conversión fototérmica en calentadores solares o sistemas híbridos

Otro reto es mejorar la eficiencia con la que un calentador recibe luz solar para convertirla a calor. Para ello es necesario que el material sea capaz de absorber el mayor porcentaje posible del espectro solar (250 a 2500 nm) y baja conductividad térmica. Una posible solución al problema puede estar en nanopartículas (NP's) de HEAs de siete elementos (FeCoNiTiVCrCu) que demostraron tener una absortividad promedio superior al 95% en todo el espectro solar. Incluso, al encapsular el núcleo de HEA con una capa de grafito (obteniendo NP's de

FeCoNiTiVCrMnCu@C) se mejoró el rendimiento al disminuir la conductividad térmica en un 26% en comparación a la original, logrando alcanzar una eficiencia de utilización energética del 98.2% bajo el sol. Asimismo, la absorción de luz en HEAs es mejorada gracias a la adición estratégica de elementos específicos y la mejora del llenado electrónico 3d. En cuanto a la reducción de la conductividad térmica en HEAs, se ha demostrado que la modulación elemental no equimolar y la capa de grafito juegan un papel clave en su reducción. En conjunto gracias a su absorción solar >95% y eficiencia energética cercana al 98% se puede maximizar la captación de radiación solar. Por lo que HEAs con dichas propiedades pueden ser de gran utilidad en calentadores solares de agua, que gracias a su capacidad para concentrar el calor mediante encapsulamiento con grafito las hace ideales para sistemas de calentamiento directo de agua, incluso en condiciones de baja irradiación. Asimismo, es posible utilizarlos en sistemas híbridos fototérmicos-fotovoltaicos donde su capacidad de absorber el espectro completo (250–2500 nm) permite usar el calor residual de los paneles solares para ser reutilizado para procesos térmicos[5].

Recubrimientos solares absorbente selectivos de alto rendimiento

Un ingrediente fundamental para la captación de energía son los recubrimientos solares absorbentes selectivos, no obstante, para que estos sean útiles deben tener propiedades ópticas excepcionales y una estabilidad térmica sobresaliente. En busca de desarrollar un recubrimiento solar con estas características, se utilizó una aleación de alta entropía en forma de nitruro (AlCrTaTiZrN) añadiendo capas antirreflejantes de SiO_2 y Si_3N_4 que al probarse mostró una selectividad espectral excelente con un 92.8% de absorbancia solar y emisividad térmica de solo 5.1%. Asimismo, exhibió baja reflectancia en el espectro visible y alta reflectancia en el infrarrojo y una eficiencia de conversión fototérmica de 87.7 % a 600 °C y 84.6 % a 650 °C bajo irradiación de 100 soles. Además, mantuvo su rendimiento óptico tras 300 horas de recocido a 650 °C. Todas las características anteriormente mencionadas, demuestran que la HEA en forma de nitruro (AlCrTaTiZrN) tiene el potencial de ser aplicada en revestimientos solares selectivos absorbentes para mejorar la conversión fototérmica en dispositivos solares, gracias a su alta estabilidad térmica y sus propiedades ópticas que maximizan la captación de radiación solar[7].

APLICACIONES DE LAS HEAs EN LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Mejora en la eficiencia de celdas solares de perovskita

Las celdas solares son una pieza clave de los sistemas fotovoltaicos y es importante buscar maneras de mejorar su eficiencia. Para ello han surgido celdas solares de perovskita que buscan reemplazar a las celdas solares de silicio convencionales. Sin embargo, aún se encuentran lejos de alcanzar los niveles de rendimiento de las celdas de silicio, por lo que, en búsqueda de una solución, se encontró que se pueden dopar con aleaciones de alta entropía. Para ilustrar, una celda completamente inorgánica de perovskita de $CsPbI_3$ fue adicionada con pequeñas cantidades de diferentes elementos, donde el dopaje con Sn^{2+} y Ge^{2+} influye significativamente en la eficiencia y estabilidad de la celda, lo cual se ha demostrado que en cantidades adecuadas de Sn^{2+} y Ge^{2+}, es posible aumentar la eficiencia y estabilidad de las celdas de $CsPbI_3$. Por su parte, el Sn^{2+} mejora la eficiencia de las celdas solares basadas en $CsPbI_3$ al modificar la energía del bandgap y mejorar el coeficiente de absorción óptica mientras que el Ge^{2+} mantiene un bandgap estrecho y mejora la absorción óptica, además de mejorar la estabilidad al mejorar la cristalinidad y reducir los defectos en los granos de la red[8]. Este es solo un ejemplo de tantos de como las HEAs puede ser utilizadas para mejorar la eficiencia y estabilidad de las celdas de perovskita.

.

Mejora en la eficiencia de celdas solares sensibilizadas por colorante

Además de las celdas de perovskita, también han surgido celdas solares sensibilizadas por colorante como una manera de reemplazar las celdas de silicio y mejorar el aspecto visual y estético de los paneles. Sin embargo, al igual que las celdas de perovskita su eficiencia sigue siendo un reto.

Estudios recientes, han demostrado que el uso de HEAs como contraelectrodo puede ser una opción más viable que aquellas usadas con platino. En dicho estudio, se incorporaron elementos de gran radio atómico (Nb, Ta, W) en la matriz FeCoNiMo generando una distorsión de red significativa, lo que induce una redistribución de carga y modifica la densidad electrónica local. El material FeCoNiMoNb/C mostró una eficiencia de conversión de potencia (PCE) del 8.50%, superando al platino (7.30%). Además, presentó una mayor densidad de corriente (Jsc), voltaje de circuito abierto (Voc) y factor de llenado (FF)[9].

De esta manera, se puede observar como las HEAs son una alternativa económica y eficiente para las celdas sensibilizadas por colorante, gracias a que son materiales con alta actividad catalítica y estabilidad, y en algunos casos de bajo costo. En resumen, observamos como las HEA pueden llegar a tener aplicaciones significativas en el campo de la energía solar gracias a sus excelentes propiedades, aunque aún es un campo al cual le falta mucha investigación por ser relativamente nuevo.

VENTAJAS

Una de las principales ventajas de las aleaciones de alta entropía son sus propiedades optimizadas en comparación a materiales comunes. Las HEAs presentan propiedades como estabilidad térmica, resistencia a la corrosión u oxidación, propiedades ópticas y catalíticas muy superiores a otros compuestos, lo que las hace un material de interés para su uso en aplicaciones en energía fototérmica y fotovoltaica, teniendo un papel tanto en la mejora de la infraestructura como en el funcionamiento. Otra gran virtud de las HEAs es su versatilidad en el diseño, lo posibilidad de ajustar su composición a libertad tiene un rol fundamental en la obtención de las propiedades deseadas, por lo que es de suma importancia encontrar la combinación de elementos que mejor se adapte al objetivo gracias por las propiedades que presente la aleación. Esto también puede tener un impacto en la reducción de costos, ya que se pueden utilizar elementos de bajo costo y con gran abundancia en la naturaleza como el Fe, Cu y Al[5-10].

DESAFÍOS

Uno de los más grandes retos de las aleaciones de alta entropía es su escalabilidad a nivel industrial, puesto que actualmente requieren métodos muy complicados de síntesis que requieren equipo de laboratorio muy costoso y altos niveles de energía. Por otra parte, su costo de producción no solo se ve reflejado en su síntesis, sino en la necesidad de múltiples elementos en proporciones específicas, algunos de estos siendo metales preciosos o de poca abundancia en la tierra, lo que influye significativamente en su costo provocando que se limite su uso para aplicaciones a gran escala. Asimismo, en el aspecto medioambiental aún queda mucho por mejorar, puesto que en comparación a otros materiales su huella de carbono al ser fabricado es muy alta, emitiendo 277kg de CO_2 por kilogramo. La reciclabilidad representa otro desafío, ya que las complejas composiciones químicas de las aleaciones de alta entropía (HEAs) dificultan su separación y recuperación. Además, durante el proceso de reciclaje se pueden degradar sus propiedades, lo que hace que el uso de HEAs recicladas sea menos deseable para aplicaciones de alto rendimiento como su uso en tecnologías solares[10].

CONCLUSIÓN

En general, las aleaciones de alta entropía han mostrado potencial en sus aplicaciones para el aprovechamiento de la energía solar, gracias a sus propiedades sobresalientes como su alta estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y sus propiedades catalíticas para la conversión de energía que han hecho posible su uso para la mejora de la infraestructura y el funcionamiento de la tecnología tanto fototérmica como fotovoltaica. Sin embargo, a pesar de sus ventajas como su versatilidad y propiedades optimizadas en comparación a materiales comunes aún presentan desafíos que limitan su uso a nivel industrial, como su poca escalabilidad, su costo de producción y su impacto medioambiental. No obstante, las HEAs parecen ser una opción viable a futuro, puesto que aún queda mucho por investigar y mejorar, especialmente en el área de sus aplicaciones energéticas.

REFERENCIAS

1. Al-Ali, S., Olabi, A. G., & Mahmoud, M. (2025). A review of solar photovoltaic technologies: Developments, challenges, and future perspectives. *Energy Conversion and Management: X*, 27, 101057.
2. Rojas, A., García-Zuñiga, R. C., Colin-Vidal, A., Nogal, U., Hernández-Wong, J., Aguilar-Frutis, M., Muñoz-Hernández, R. A., Marín, E., & Calderón, A. (2023). Photothermal conversion for solar energy use. *Latin American Journal of Physics Education*, 17(1), 1312-1–1312-2.
3. Reyes, Y. (2024). Aleaciones de alta entropía: Innovación en materiales. https://inspenet.com/articulo/innovacion-en-aleaciones-de-alta-entropia/
4. Zamora, J., Suarez, R. G., & Camacho-Peralta, M. A. (2023). Aleaciones de alta entropía: materiales emergentes con un futuro prometedor. *Revista Materiales Avanzados*, 39, 104-113
5. Li, X., Zou, Y., Lu, H., & Wang, L. (2025). Nanoscale high-entropy alloys for solar and thermal applications. *Nanoscale*, 17, 6266-6286
6. Gao, X., Jiang, E., Pike, A., Lee, E., Wu, M., Wang, H., Sommer, S., Li, W., Hautier, G., Baker, I., & Liu, J. (2024). FeMnNiAlCr high-entropy alloys with high-efficiency surface oxide solar absorbers for concentrating solar power systems. *High Entropy Alloys & Materials*, 2(1), 97-109.
7. He, C.-Y., Gao, X.-H., Liu, G., Yu, D.-M., Qiu, X.-L., & Guo, H.-X. (2021). Scalable and highly efficient high temperature solar absorber coatings based on high entropy alloy nitride AlCrTaTiZrN with different antireflection layers. Journal of *Materials Chemistry A*, 9(11), 6413–6422.
8. Khan, M. (2023). High-entropy Alloying of Sn^{2+} and Ge^{2+} at the B-site of CsPbI for Stable and Efficient Perovskite Solar Cells. Master's Thesis [KAUST Research Repository].
9. Wang, K., Yun, S., Sun, M., Yang, T., Yang, G., Dang, J., Yang, H., Wang, Z., & Zhang, M. (2025). Strengthening heterogeneous strain in FeCoNiMo-based high-entropy alloys for advanced energy conversion. *Materials Today Energy*, 48, 101762.
10. Jalali, M., Nayebpashaee, N., & Saleh, N. R. (2025, April). A Review on the Role of High-Entropy Alloys in Enhancing Energy Efficiency and Sustainable Development. In 2025 *10th International Conference on Technology and Energy Management* (ICTEM) (pp. 1-6). IEEE.

SESIONES POSTER

ID	TÍTULO	PONENTE
2368	Visible sunlight photocatalytic activity in nitrogen-doped TiO_2 semiconductor nanoparticles	Maribel Ocampo Gaspar
2216	Comparación de películas delgadas de dióxido de estaño (SnO_2) como ETL, preparadas a partir de diferentes fuentes de estaño por método de baño químico (CBD), para el estudio de estabilidad en celdas solares de perovskita	Julieta Landa Bautista
2210	Estudio del empleo de un calibrador de bloque seco como ambiente térmico para la calorimetría por T-history	Lúar Moreno Álvarez
2202	Descripción de un sistema fotovoltaico con almacenamiento y planta de respaldo para clínica de salud de pueblos originarios	Carlos Eduardo Borjas Castillo

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

VISIBLE SUNLIGHT PHOTOCATALYTIC ACTIVITY IN NITROGEN-DOPED TiO2 SEMICONDUCTOR NANOPARTICLES

Maribel Ocampo Gaspar, Oscar J. Padilla González, Christopher Rosiles Pérez, Antonio E. Jiménez González

Departamento de materiales solares, Instituto de Energías Renovables, Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62580, México. **mog@ier.unam.mx.**

ABSTRACT

In this work, pure TiO_2 and nitrogen-doped (TiO_2:N) nanoparticles were synthesized, whose physical and photochemical properties were exhaustively studied. Initially, the value of the bandgap of both semiconductors were determined, finding that doping with N atoms decreases the value of the bandgap in relation to the pure material, which allows the doped semiconductor to be excited with visible light below 403 nm. An important property of N-doped TiO_2 is that it has a smaller average crystal size (~15 nm) and a greater BET surface area (79.6 and 84.6 m^2/g) than the commercial photocatalyst Degussa P25 (23 nm and 48.6 m^2/g, respectively), a fact that influences a greater availability of active sites as a photocatalyst. As an application of TiO_2 and TiO_2:N as photocatalysts, the treatment of the analgesic Acetaminophen (ACT) in the aqueous phase was carried out by heterogeneous photocatalysis in a photocatalytic reactor using concentrated solar radiation. In comparison, the same degradation experiments were carried out using the commercial photocatalyst Degussa P25 obtaining higher degradation levels achieved with the synthesized nanoparticles of TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2% than with the commercial photocatalyst.

Keywords: Nitrogen-doped TiO_2, Photosensitive material, Heterogeneous Photocatalysis, Acetaminophen, Sunlight, CPC Concentrator

INTRODUCTION

One of the most used semiconductor materials in the photocatalytic degradation of contaminants in aqueous phase is TiO_2. This is due to its physical and chemical properties: structural, electronic, photosensitive and photoelectrochemical. Other advantages of TiO_2 are its great abundance, low cost, easy to synthesize, non-toxicity and high chemical stability (Antonopoulou 2022; Shukla et al. 2021). The most important allotropic phases of TiO_2 are anatase and rutile. These have wide-range indirect band gaps of 3.2 eV and 3.0 eV, respectively, which allow photoactivation under ultraviolet (UV) light (Petala et al. 2014; Lin et al. 2015; Natarajan et al. 2021; Ansari et al. 2016). Nevertheless, some applications require activity in the visible region. To improve visible light absorption, doping of TiO_2 with metals (Cu, Ag) and non-metals (S, B, C and N) has been implemented (Mohite et al. 2024; Lin et al. 2015; Natarajan et al. 2021; Mekprasart and Pecharapa 2011). Nitrogen-doped TiO_2 is considered a promising photosensitive extrinsic semiconductor with optical absorption in the visible spectrum (Natarajan et al. 2021; Foo et al. 2021). Furthermore, N not only dopes TiO_2, but also reduces the recombination of photogenerated electrons (e^-) and holes (h^+). This increases the lifetime of both charge carriers in the TiO_2 crystalline structure (Ansari et al. 2016). Several methods exist to synthesize the TiO_2 photocatalyst both pure and N-doped. These include solid phase (Du et al. 2022), microwave (Natarajan et al. 2021), ultrasonic spray pyrolysis (USP) (Da Silva et al. 2022), sputtering, plasma (Natarajan et al. 2021), sol-gel, solvothermal or hydrothermal (Natarajan et al. 2021; Ansari et al. 2016; Du et al. 2022), among others. In this work, the sol gel/solvothermal method was used to synthesize TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2% materials. This method allows direct interaction between nitrogen precursors and the titanium precursor reagent (titanium isopropoxide), which facilitates the incorporation of the nitrogen atom into the crystalline structure of titanium dioxide, unlike other methods that start from an already formed titanium dioxide.

METHODOLOGY

Materials

Contaminant acetaminophen ($C_8H_9NO_2$, > 99%) and titanium (IV) isopropoxide ($C_{12}H_{28}O_4Ti$, 97%) were purchased from Sigma Aldrich. Ammonium nitrate (NH_4NO_3, 99.5%), hydrogen peroxide (H_2O_2) at 50%, absolute ethanol (C_2H_6O, 99.9%) and sodium hydroxide (NaOH, 98.2%) were obtained from FERMONT while acetic acid (CH_3COOH, ≥ 99.7%) from JT Baker. All these reagents were used without further purification. Deionized water was obtained from a Milli-Q water system (18.2 MΩ-cm). The initial concentration of the contaminant was 50 mg/L in aqueous solution for which deionized water was used.

Synthesis of TiO_2:N photocatalysts

The preparation of pure TiO_2 (TiO_2:N 0%) and N-doped TiO_2 was carried out by the sol-gel/solvothermal method. Absolute ethyl alcohol

(90.7 g), acetic acid (17.3 g), and titanium (IV) isopropoxide (20 g) were added to a flat-bottom spherical flask at room temperature. The mixture was stirred at 320 rpm for 30 minutes. Then, a specific amount of pre-weighed deionized water was added causing the solution to change from clear yellow to milky yellow. This mixture was stirred continuously for 2 hours. The product was then placed in an autoclave at 170 °C for 12 hours. After this, the TiO_2 nanoparticles were washed with absolute ethanol by centrifugation at 4500 rpm for 5 minutes to eliminate impurities. After three washings, the hydrated TiO_2 nanoparticles were subjected to a heat treatment in a muffle at 450 °C for 2 hours. The resulting product was macerated in an agate mortar to obtain the TiO_2 photocatalyst in powder form, which was later used for the degradation of acetaminophen. The synthesis of TiO_2:N followed the same method, but in this case, 1% or 2% of NH_4NO_3 (0.7667 and 1.4334 mmol of N respectively) was added to the precursor solution.

Analytic equipment

The optical properties used to calculate the band gap of the photocatalysts were determined with UV-Vis spectroscopy using a JASCO V-670 spectrophotometer. The morphological properties of TiO_2 nanoparticles were identified by Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM, Hitachi S-5500). The crystalline structure was studied by X-Ray Diffraction (XRD) using a Rigaku DMAX-2200 equipment with a wavelength $\lambda_0 = 1.5406$ Å. The BET (Brunauer-Emmett-Teller) surface area and pore size of photocatalysts were recorded by means of a BelSorp Max equipment. A HACH DR 6000 UV-Vis spectrophotometer was used to monitor the optical transmittance and absorbance during the ACT photodegradation process.

RESULTS AND DISCUSSION

Optical analysis of TiO_2:N photocatalysts

Nitrogen atoms were used to impurify and reduce the band gap of the TiO_2 and to make it more sensitive in the visible region. The value of the bandgap of pure titanium dioxide (TiO_2:N 0%) with anatase crystalline phase found in this work (Eg = 3.4 eV) is bigger than 3.2 eV, which is justified due to the small size of the crystal (14.3 nm) that experiences the quantum confinement effect and by which it is increased (Sánchez-García et al. 2015). Nitrogen doping caused two changes in the structure of TiO_2: a) introduced new energy levels into the crystal structure of TiO_2, which helped reduce the band gap from 3.4 to 3.05 and 3.15 eV, as shown in Fig. 1, and b) increased the crystallite size from 14.3 to 15.7 and 15.2 nm.

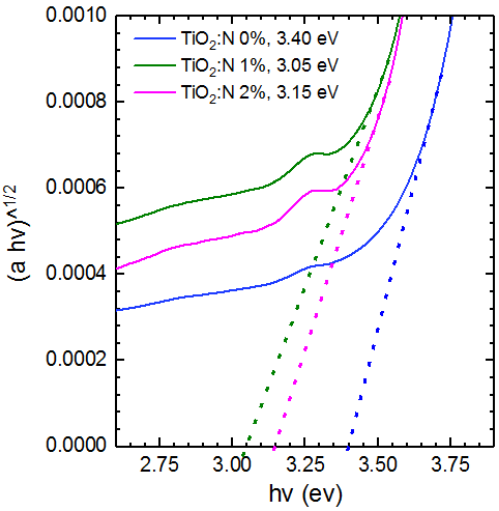


Fig. 1 Band gap of TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2% semiconductors

FE-SEM analysis

Fig. 2 shows nanoparticles of: (a) TiO_2:N 0% (b) TiO_2:N 1% and (c) TiO_2:N 2% treated in air at 450 °C with a pore size less than 20 nm. In a polycrystalline sample, it is common for small crystals to aggregate to form larger particles, as can be seen in Fig. 2 (a). In a first approximation, the aggregated TiO_2 particles are considered to have a cylindrical geometry (see Fig. 2 (a)), while in Fig. 2 (b) and 2 (c), the TiO_2:N nanoparticles have a more spherical shape. Furthermore, in Fig. 2 (b) and 2 (c) more dispersed and less aggregated TiO_2:N particles are observed.

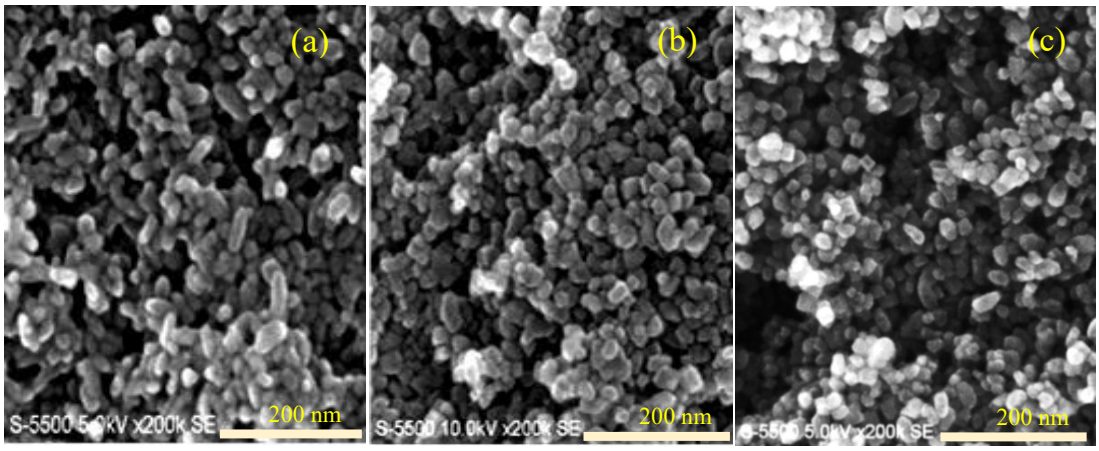


Fig. 2 Micrographs of (a) TiO_2:N 0% (b) TiO_2:N 1% and (c) TiO_2:N 2% nanoparticles taken at a magnification of 200k

XRD analysis

Fig. 3 shows the diffraction pattern of pure TiO_2 (TiO_2:N 0%) and 1 and 2 % N-doped TiO_2 (TiO_2:N) treated in air at 450 °C where three semiconductors show the same diffraction peaks. According to the JCPDS 21-1272, all the peaks correspond to an anatase phase with crystalline planes (101), (004), (200), (105), (211), (204). From the diffraction patterns it is easy to see that there is a slightly higher intensity of the reflex (101) in the doped TiO_2:N at 1 and 2% due to a more preferential orientation of that peak. Considering the diffraction peaks, it was possible to determine the apparent crystallite size of the TiO_2 nanocrystals using the Scherrer equation (Cullity and Stock 2014). The calculated average crystal size of 1 and 2 % N doped TiO_2 was 15.7 and 15.2 nm respectively, slightly larger than that measured in TiO_2:N 0 % (14.3 nm).

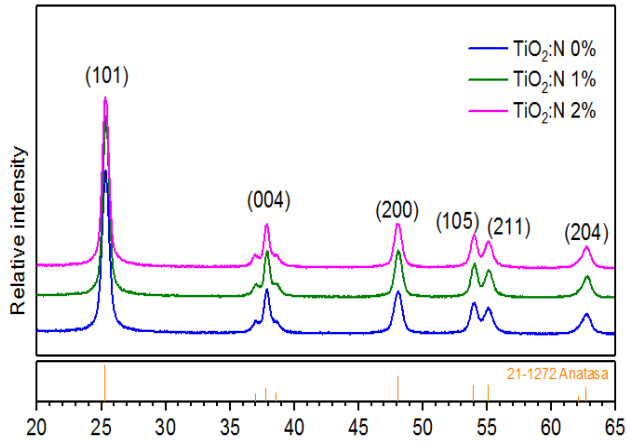


Fig. 3 Diffractograms of TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2% photocatalysts

BET surface area analysis

The surface area and pore size of the TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2% photocatalysts determined by the BET technic are reproduced in Table 1. Three photocatalysts were found to have a larger BET surface area and total pore volume than the commercial TiO_2 P25 photocatalyst. It was found that having a greater total pore volume and an average pore diameter, synthetized photocatalysts present greater diffusion of both the contaminants and the UV-Vis light on the surface and inside the photocatalyst, in addition to a great capacity for molecular adsorption (Wen-Ge et al. 2019; Niu et al. 2018). Also, it has been found that in a photocatalytic reaction, the oxidation process can occur both on the surface and inside the photocatalyst, since the reactants diffuse towards the internal structure and are adsorbed on the internal surface where oxidation reactions also occur (Bui et al. 2021).

Table 1 BET surface area, total pore volume, mean pore diameter and crystal size of synthetized and commercial photocatalysts

Samples	BET surface area (m^2/g)	Total pore volumen (cm^3/g)	Mean pore diameter (nm)	Crystal size (nm)
TiO_2:N 0%	125.5	0.295	9.39	14.3
TiO_2:N 1%	79.6	0.213	10.77	15.7
TiO_2:N 2%	84.6	0.264	12.49	15.2
TiO_2 P25	* 48.6	* 0.176	-	* 23 anatase * 44 rutile

Hernández Rodríguez et al. 2016*

Photocatalytic studies

Photodegradation experiments were carried out on the solar platform of the Renewable Energy Institute of the National Autonomous University of Mexico (IER-UNAM) located at 18°5' N latitude, 99°1' W longitude, 1219 m altitude above sea level, and with an average annual radiation of ~878 W/m^2. The degradation processes of ACT were carried out in a photocatalytic reactor under concentrated solar radiation and TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1%, TiO_2:N 2% and TiO2 P25 as photosensitive catalysts (photocatalysts). The solar radiation was coming from a Cylinder Parabolic Concentrator (CPC) of 1 sun (1 kW/m^2). The photocatalytic degradation efficiency was evaluated considering the removal efficiency (%) of the contaminant determined by the analytical techniques UV-Vis spectrophotometry, Total Organic Carbon (TOC), and Chemical Oxygen Demand (COD).

Fig. 4 (A) shows the degradation curves of ACT using the four different catalysts, oxidizing agent, and concentrated solar radiation named as TiO_2:N 0%/H_2O_2/UV, TiO_2:N 1%/H_2O_2/UV, TiO_2:N 2%/H_2O_2/UV and TiO_2 P25/H_2O_2/UV processes. After 60 minutes of exposure, the treatment of ACT with the TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2% photocatalysts achieved a percentual degradation of 98% and 45%, respectively, while with the TiO_2:N 0% photocatalyst the photodegradation reached only 81%, but using the commercial Degussa TiO_2 P25 photocatalyst, the contaminant removal was only 46%. It was found that the rutile crystalline structure presents low production of hydroxyl radicals, which leads to less photodegradation of organic compounds (Hernández Rodríguez et al. 2016). This explains why of the commercial Degussa TiO_2 P25 photocatalyst shows a low degradation efficiency because the anatase/rutile structural ratio is 80/20 (Hernández Rodríguez et al. 2016; Alonso-Tellez et al. 2012). Regarding the low removal of TiO_2:N 2% in the first 60 minutes of exposure, this could be due to the fact that a higher percentage of nitrogen could affect the crystalline structure of TiO_2 and form a new cubic phase of titanium oxynitride (C. Foo et al. 2021).

Another drawback of the commercial Degussa TiO_2 P25 photocatalyst is its BET surface area, which is lower than that of synthesized photocatalysts (See Table 1). A large surface area is necessary for several reasons: i) a larger surface area generates a greater number of oxygen vacancies (h^+ holes) on the surface of the TiO_2 with the possibility of directly oxidizing organic matter. ii) A larger surface area achieves a greater interaction of the radiation with the particle, whether it is TiO_2 or TiO_2:N, causing a greater production of electron-hole pairs (e^-, h^+) capable of inducing reduction and oxidation reactions in the surrounding medium for the generation of hydroxyl and superoxide radicals capable of carrying out the degradation processes (Patel et al. 2017).

The photodegradation reaction was monitored for 3 hours to observe the behavior of each photocatalyst during the ACT degradation enough to achieve a removal of the pollutant of ~100%, a fact which was achieved with TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% photocatalysts, while with the TiO_2:N 2% photocatalyst 91% was achieved. Nevertheless, with the TiO_2 P25 photocatalyst after 3 hours of reaction, only a 65% contaminant removal was achieved.

Taking into account a global first-order kinetic for photodegradation processes shown in Fig. 4 (A), during the first 60 min of exposure to radiation of the contaminant, Fig. 4 (B) shows the ln (Co/C) plots versus time through which it is possible to determine the reaction constant k for each degradation process, which turned out to be the following: TiO_2:N 0%; 0.027 min^{-1}, TiO_2:N 1% 0.071 min^{-1}, TiO_2:N 2% 0.010 min^{-1} and TiO_2 P25; 0.014 min^{-1}.

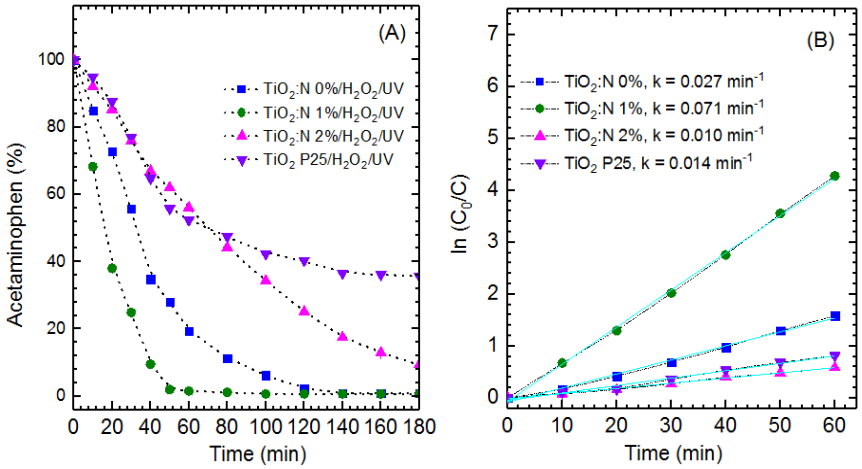


Fig. 4 Photodegradation of Acetaminophen: (A) under concentrated solar radiation and (B) first order apparent rate constants

Other data to highlight about the degradation of ACT are the final values of Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Organic Carbon (TOC). As can be seen shown in Table 2, the ACT degradation efficiencies with the TiO_2:N 1%/H_2O_2/UV process in terms of COD and TOC were 90 and 95%, respectively, with the TiO_2:N 2%/H_2O_2/UV process in terms of COD and TOC were 84 and 86%, respectively, while with the TiO_2-N 0%/H_2O_2/UV system, a COD and TOC degradation of 83 and 91% was achieved. But doing the TiO_2 P25/H_2O_2/UV process, a COD and TOC degradation of 80 and 83%, respectively.

Table 2 Acetaminophen degradation processes under illumination, H_2O_2 and at pH 7

Parameters	TiO_2:N/H_2O_2/UV			TiO_2 P25/H_2O_2/UV
	0 %	1 %	2 %	%
TOC	91	95	86	83
COD	83	90	84	80
UV-Vis 1h	81	98	45	46
UV-Vis 3h	99	99	91	65

CONCLUSIONS

It was found that doping TiO_2 with nitrogen positively influenced the crystal structure of the semiconductor, reducing the band gap from 3.4 to 3.05 and 3.15 eV in TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2%, respectively. This allowed TiO_2:N to be excited by visible light below 403 nm.

It was determined that all peaks of TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2% materials correspond to the anatase phase with crystal planes (101), (004), (200), (105), (211), (204). The calculated average crystal size of 1 and 2% N-doped TiO_2 was 15.7 and 15.2 nm respectively, slightly larger than that measured in TiO2:N 0% (14.3 nm).

It was observed that the three photocatalysts synthesized in this work (TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2%) have a larger BET surface area and a larger total pore volume than the commercial TiO_2 P25 photocatalyst, which means that they have a greater number of active sites to carry out the photodegradation processes.

TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1%, TiO_2:N 2% and commercial TiO_2 P25, as photocatalysts, were able to degrade the ACT in the aqueous phase. Based on COD, TOC, and UV-Vis measurements, the commercial TiO_2 P25 photocatalyst achieved ACT degradation efficiencies of 80%, 83%, and 65%, respectively. In the same measurements, the TiO_2:N 0% and TiO_2:N 2% photocatalysts achieved ACT removal efficiencies of 83%, 91%, 99%, and 84%, 86%, and 91%, respectively, but the highest ACT degradation was achieved with the TiO_2:N 1% photocatalyst, reaching percentage levels of 90%, 95%, and 99%, respectively.

Finally, in this work, it was possible to determine the optical and structural properties of TiO_2:N 0%, TiO_2:N 1% and TiO_2:N 2%, as well as to quantify their performance as photocatalysts during the photodegradation of ACT, considering that all these characteristics are influenced by the synthesis methodology used.

Acknowledgements

The authors acknowledge the technical support of R. Moran Elvira for the SEM and BET measurements, M. L. Ramon García for the XRD measurements. M. Ocampo Gaspar and C. Rosiles Pérez also thanks to SECIHTI (CONAHCyT) for the postdoctoral scholarship. The authors also thank to the research projects DGAPA-PAPIIT-IT103825, and SECIHTI (CONAHCyT) CF-775 and LNC-2023-33 through which it was possible to obtain financial support to cover the expenses required in the experimental part of this article. The authors also thank IER-UNAM for the infrastructure provided for the development of this research.

REFERENCES

Antonopoulou M. (2022). Homogeneous and Heterogeneous Photocatalysis for the Treatment of Pharmaceutical Industry Wastewaters: A Review, Toxics Vol. 10, No. (9)539, p. 1-17.

Shukla S., Pandey H., Singh P., Tiwari A.K., Baranwal V., Pandey A.C. (2021). Synergistic impact of photocatalyst and dopants on pharmaceutical-polluted waste water treatment: a review, Environmental Pollutants and Bioavailability Vol. 33, No. 1, p. 347-364.

Petala A., Tsikritzis D., Kollia M., Ladas S., Kennou S., Kondarides D.I. (2014). Synthesis and characterization of N-doped TiO_2 photocatalysts withtunable response to solar radiation, Applied Surface Science Vol. 305, No. 2014, p. 281-291.

Lin Y.H., Weng C.H., Srivastav A.L., Lin Y.T., Tzeng J.H. (2015). Facile Synthesis and Characterization of N-Doped TiO_2 Photocatalyst and Its Visible-Light Activity for Photo-Oxidation of Ethylene, Journal of Nanomaterials, Vol. 807394, No. 2015, p. 1-10.

Natarajan T.S., Mozhiarasi V., Tayade R.J. (2021). Nitrogen Doped Titanium Dioxide (N-TiO_2): Synopsis of Synthesis Methodologies, Doping Mechanisms, Property Evaluation and Visible Light Photocatalytic Applications, Photochem Vol. 1, No. 3, p. 371-410.

Ansari S.A., Khan M.M., Ansari M.O., Cho M.H. (2016). Nitrogen-doped titanium dioxide (N-doped TiO_2) for visible light photocatalysis, New J. Chem. Vol. 40, No. 4, p. 3000-3009.

Mohite S.V., Lee C., An K., Kim Y. (2024). Plasmon-induced efficient solar-driven H_2 production using bimetallic core-shell Cu@Ag:TiO_2 nanocomposite photocatalyst, Journal of Alloys and Compounds 1008, 176601.

Mekprasart W. and Pecharapa W. (2011). Synthesis and Characterization of Nitrogen-Doped TiO_2 and Its Photocatalytic Activity Enhancement Under Visible Light, Energy Procedia Vol. 9, No. 2011, p. 509-514.

Foo C., Li Y., Lebedev K., Chen T., Day S., Tang C., Tsang S.C.E. (2021). Characterization of oxygen defects and nitrogen impurities in TiO_2 photocatalysts using variable-temperature X-ray powder diffraction, Nat Commun Vol. 12(1), No. 661, p. 1-13.

Du S., Lian J., Zhang F. (2022). Visible Light-Responsive N-Doped TiO_2 Photocatalysis: Synthesis, Characterizations, and Applications, Transactions of Tianjin University Vol. 28, No. 2022, p. 33-52.

Da Silva A.L., Trindade F.J., Dalmasso J.L., Ramos B., Teixeira A.C.S.C., Gouvˆea D. (2022). Synthesis of TiO_2 microspheres by ultrasonic spray pyrolysis and photocatalytic activity evaluation, Ceramics International Vol.48, No. 7, p. 9739-9745.

Sánchez-García M.A., Bokhimi X., Maldonado-Álvarez A., Jiménez-González A.E. (2015). Effect of Anatase Synthesis on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells, Nanoscale Res Lett Vol. 10, No. 306, p. 1-13.

Cullity B.D., Stock S.R. (2014). Elements of X-Ray Diffraction: Pearson New International Edition. Pearson Education, Limited.

Wen-Ge L., Yan-Jie H., Hao J., Chun-Zhong L. (2019). Aerosol Spray Pyrolysis Synthesis of Porous Anatase TiO_2 Microspheres with Tailored Photocatalytic Activity, Acta Metallurgica Sinica (English Letters) Vol. 32, No. 2019, p. 286-296.

Niu B., Wang X., Wu K., He X., Zhang R. (2018). Mesoporous Titanium Dioxide: Synthesis and Applications in Photocatalysis, Energy and Biology, Materials Vol. 11(10), No. 1910, p. 1-23.

Bui V.K.H., Nguyen T.N., Van Tran V., Hur J., Kim I.T., Park D., Lee Y.C. (2021) Photocatalytic materials for indoor air purification systems: An updated mini-review, Environmental Technology & Innovation Vol. 22, No. 101471, p. 1-29.

Hernández Rodríguez M.J., Pulido Melián E., González Díaz O., Araña J., Macías M., González Orive A., Doña Rodríguez J.M. (2016). Comparison of supported TiO_2 catalysts in the photocatalytic degradation of NOx, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical Vol. 413, No.2016, p. 56-66.

Alonso-Tellez A., Masson R., Robert D., Keller N., Keller V. (2012). Comparison of Hombikat UV100 and P25 TiO_2 performance in gas-phase photocatalytic oxidation reactions, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Vol. 250, No. 2012, p. 58-65.

Patel H.A., Byun J., Yavuz C.T. (2017). Carbon Dioxide Capture Adsorbents: Chemistry and Methods, ChemSusChem, Vol. 10, No. 7, p. 1303-1317.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES®
ISES International Solar Energy Society

COMPARACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE DIÓXIDO DE ESTAÑO (SnO_2) COMO ETL, PREPARADAS A PARTIR DE DIFERENTES FUENTES DE ESTAÑO POR MÉTODO DE BAÑO QUÍMICO (CBD), PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD EN CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA.

Julieta Landa Bautista, Hailin Zhao Hu
Instituto de Energías, Instituto de Energías Renovables, Universidad Autónoma de México (UNAM), Privada Xochicalco s/n col. Centro, CP 62580, Temixco, Morelos, México
7621091901, lbj@ier.unam.mx

Asiel N. Corpus-Mendoza
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Av. Insurgentes Sur 1582 Col. Crédito Constructor, Demarcación Territorial, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México.

RESUMEN

El dióxido de titanio, TiO_2 ha sido ampliamente utilizado como capa trasportadora de electrones (ETL) en celdas solares de perovskita (PSC); sin embargo, presenta limitaciones que afectan su estabilidad, rendimiento y viabilidad para el escalamiento. Una de las principales desventajas es su alta temperatura de síntesis, lo que restringe su aplicación a sustratos rígidos (Min, 2021), (Yoo, 2022), por lo tanto, en esta investigación se estudia el depósito de dióxido de estaño, SnO_2, mediante baño químico (CBD) como una alternativa viable debido a sus propiedades favorables y a su síntesis a baja temperatura en menor tiempo (Ren, 2024), (Bai, 2023). Además, se analiza el impacto de la elección del precursor en la síntesis del SnO_2 preparado a partir de cloruro de estaño ($SnCl_2$) y sulfato de estaño ($SnSO_4$) en la calidad de las películas depositadas con un espesor de ~60 a 100 nm, donde se encuentra que el precursor de $SnSO_4$ elimina el uso de ácidos fuertes durante el proceso, permitiendo un entorno de crecimiento suave y controlado.

ABSTRACT

Titanium dioxide, TiO2, has been widely used as an electron transport layer (ETL) in perovskite solar cells (PSCs); however, it has limitations that affect its stability, performance, and feasibility for scaling up. One of the main disadvantages is its high synthesis temperature, which restricts its application to rigid substrates, therefore, in this research, the chemical bath deposition (CBD) of tin dioxide, SnO2, is studied as a viable alternative due to its favorable properties and its synthesis at low temperatures in less time. Furthermore, the impact of the choice of precursor in the synthesis of SnO_2 prepared from tin chloride ($SnCl_2$) and tin sulfate ($SnSO_4$) on the quality of the deposited films with a thickness of ~60 to 100 nm is analyzed, where it is found that the $SnSO_4$ precursor eliminates the need of strong acids during the growth process, allowing a gentle and controlled growth environment.

Palabras claves: Óxidos metálicos, semiconductores, celdas solares de perovskita, síntesis SnO_2, temperatura controlada, depósito por baño químico y capa trasportadora de electrones.

INTRODUCCIÓN

La energía solar es una fuente renovable clave para enfrentar las crisis energéticas actuales y futuras. Las celdas solares (SC) de primera generación, basadas en obleas de silicio, han sido ampliamente comercializadas, pero su alto costo limita su accesibilidad. En respuesta, se han impulsado tecnologías de tercera generación como las celdas solares de perovskita (PSC), orgánicas (OSC) y de puntos cuánticos, que ofrecen alto rendimiento de conversión de potencia (PCE) a menor costo. Entre estas, las PSC han ganado especial atención por su rápido incremento en términos de PCE de 3.8% en 2009 a 27% en 2025 (Green, 2025). Estas celdas híbridas se estructuran con una capa activa de perovskita entre una capa transportadora de huecos (HTL) y una capa transportadora de electrones (ETL), donde la ETL es crucial para extraer y transportar eficientemente los electrones generados por la luz, por lo que debe poseer alta movilidad electrónica, transparencia óptica, banda prohibida amplia y compatibilidad con procesos de fabricación escalables. Entre los materiales candidatos para ETL, el dióxido de titanio (TiO_2) ha sido ampliamente estudiado, sin embargo, este presenta una baja movilidad y requiere de tratamiento térmico a altas temperaturas. Por otra parte, el dióxido de estaño (SnO_2) destaca por su alta movilidad de carga, banda prohibida amplia y buena alineación energética con la perovskita, además de poder procesarse a bajas temperaturas (~200 °C), lo que lo hace ideal para dispositivos flexibles (et, 2024), (B:, 2023). Diversas técnicas se han empleado para depositar SnO_2, por ejemplo, el recubrimiento por centrifugación, la deposición de capa atómica y la pulverización catódica. Sin embargo, el método de baño químico (CBD) ofrece ventajas como simplicidad, bajo costo y uniformidad en el recubrimiento. A pesar de ello, el uso de cloruro de estaño ($SnCl_2$) como precursor de SnO_2 en CBD presenta desafíos como crecimiento no controlado de nanocristales y baja reproducibilidad, además de problemas de corrosión en sustratos sensibles al ácido debido al bajo pH de la solución. En este contexto, el uso de sulfato de estaño ($SnSO_4$) como fuente precursora de SnO_2 en el proceso de CBD podría mejorar la calidad de las películas delgadas de SnO_2, permitiendo un crecimiento más controlado, mayor cobertura uniforme y mejor compatibilidad con sustratos

de óxido conductor transparente (TCO) (Research, 2023). En este trabajo se comparan películas de SnO_2 como ETL, preparadas a partir de $SnCl_2$ $SnSO_4$ mediante CBD (A Review, 2023).

CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA

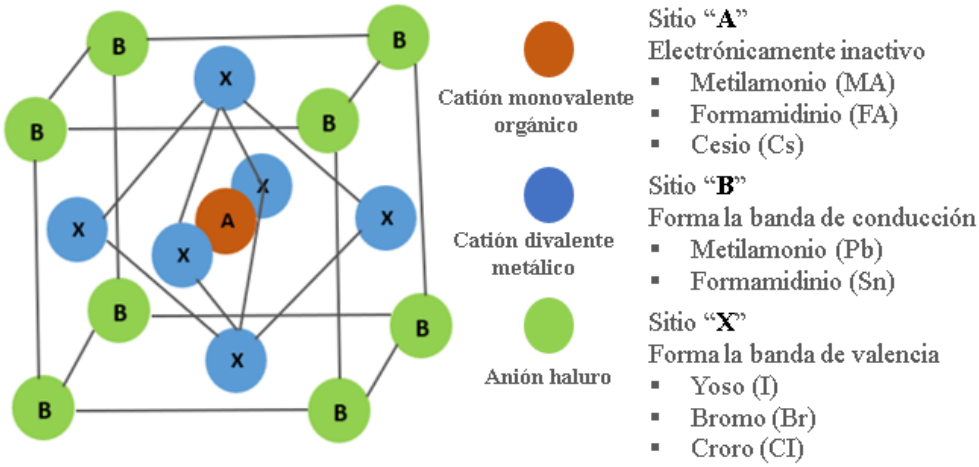


Figura 1: Estructura cristalina de la perovskita con respecto a los sitios de red ABX_3.

Las perovskitas de haluro orgánico-metálico consisten en un catión orgánico, por ejemplo, $CH_3NH_3^+$ (metil-amonio), $C_2H_5NH_3^+$ (etilamonio), y CH_5N_2 (formamidinio), un catión metálico divalente como Pb^{2+}, Sn^{2+} o Ge^{2+}, y un anión halógeno monovalente, por ejemplo F^-, Cl^-, Br^- y I^-. Para aplicaciones fotovoltaicas, los materiales de perovskita fueron investigados por primera vez por (Kojima et al. (2009) quienes fabricaron dos PSC diferentes con $CH_3NH_3PbBr_3$ y $CH_3NH_3PbI_3$ como capas absorbentes, con PCE de 3.1% y 3.81%, respectivamente (F.Zhangetal, 2025). Después de esto, el $CH_3NH_3PbI_3$ (yoduro de metilamonio y plomo o $MAPbI_3$) ha sido ampliamente investigado en PSC porque su brecha de energía ajustable de 1,5 a 1.6 eV y un amplio espectro de absorción hasta 800 nm.

ÓXIDOS METÁLICOS COMO ETL

Óxido de estaño (SnO_2-ETL)

El dióxido de estaño (SnO_2) es un material emergente para fines de ETL y una alternativa al TiO_2 en PSC. Tiene una banda prohibida grande de alrededor de 3,6 a 4.0 eV, mayor movilidad de electrones en masa (100–200 cm^2/Vs) con alta transparencia al espectro de luz visible (~90%) (P, 2023) (Kojima, 2009) . Además, el depósito y la cristalización de la película de SnO_2 se puede llevar a cabo a una temperatura de procesamiento comparativamente más baja (≤200°C) que la del TiO_2, siendo importante para el uso económico en dispositivos flexibles.

EL SnO_2 presenta mayor estabilidad ambiental que el TiO_2 (Sun. Y., 2011). Su uso es predominante en celdas solares de perovskita (PSC) de heterounión plana frente a la estructura usando dióxido de titanio mesoporoso (TiO_2-mp) usado en la estructura, siendo ampliamente investigado como ETL (ver figura 2) (AM, 2025).

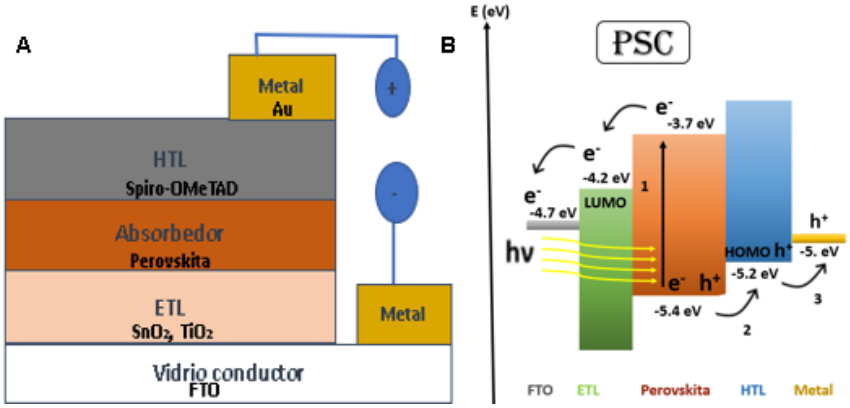


Figura 2: (A) estructura y (B) diagrama de bandas de la celda solar de perovskita

METODOLOGÍA

Fabricación de SnO_2 por el método de baño químico (CBD).

Los sustratos de FTO Tec #15 y vidrio Corning de 2.5 x 2.5. cm, se limpiaron con detergente líquido alcalino (Extra MA 01), agua desionizada (DI), acetona y alcohol isopropílico en baño ultrasónico durante 20 min. Posteriormente, los sustratos limpios se trataron con ozono durante 20 min. La temperatura ambiente se mantuvo a 25 °C con humedad relativa de 35%.

Fabricación de SnO_2 preparado a partir de $SnCl_2$ como precursor.

Se disolvieron 1,1 g de $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ (>99.99%) en 5 ml de ácido clorhídrico (HCL, 37 wt%), tras agitar durante 5 minutos a 140 rpm, se añadieron 400 ml de agua desionizada, manteniendo la agitación de durante otros 5 minutos. Después, se introdujeron 5 g de urea (>99.5%) y 100 µl de ácido tioglicólico (TGA, 99%), y la solución de CBD se agitó durante 20 min a temperatura de 25 °C con humedad relativa de 35%, antes de sumergir los sustratos de limpios. Los sustratos se sumergieron en la solución de CBD anterior a 80 °C durante 2 horas (extrayendo muestras cada 20 min), seguido de un enjuague en un baño sónico con agua desionizada durante 3 minutos y un secado posterior con nitrógeno. Finalmente, a las muestras se les realiza recocido a 200 °C en un horno durante 1 hora.

Fabricación de SnO_2 preparado a partir de $SnSO_4$ como precursor.

La solución de CBD se preparó disolviendo 5 g de urea (>99.5%) en 400 ml de agua desionizada, seguido de la adición de 150 µL de ácido tioglicólico (TGA, 99%), y 0.8 g SnSO4 (99%), seguido de agitación durante 1hora a temperatura de 25 °C con humedad relativa de 35%, antes de sumergir los sustratos de limpios. Los sustratos se sumergieron en la solución de CBD anterior a 70 °C hasta por 2 horas (extrayendo muestras cada 20 min), seguido de un enjuague en un baño de sonicación con agua desionizada durante 5 minutos y un secado posterior con nitrógeno. Finalmente, a las muestras se realiza recocido a 200 °C en un horno durante 1 hora.

Caracterización

Se realizaron caracterizaciones ópticas, usando técnicas de espectroscopía de UV-Vis, para conocer la absorbancia, transmitancia y reflectancia, con el objetivo de determinar la brecha de energía del material. También se realizó microscopia electrónica de barrido (SEM) para observar la morfología del material e identificar cambios en el material durante su depósito y tratamiento térmico.

RESULTADOS

Análisis de síntesis de fuentes de estaño (cloruro de estaño $SnCl_2$ y sulfato de estaño $SnSO_4$)

En la figura 3(a), se observa el incremento del pH después de 2 horas de depósito, causando la transformación de la solución de transparente a blanquecina con precipitados, además del aumento del valor del pH de 1 hasta 5.5 conforme la urea se descompone liberando OH^-, lo que modifica la velocidad y características del depósito y crecimiento del CBD, por la presencia de impurezas y la descomposición de la solución. En figura 3(b), se muestra la diferencia del comportamiento del pH de la solución con $SnSO_4$ como precursor en función del tiempo para sustituir $SnCl_2$ eliminando la base ácida de HCl. Se observa que a 80°C con $SnSO_4$ precursor causa la saturación de la solución en los primeros minutos aumentando el valor del pH, por tal razón se optó por bajar la temperatura de depósito de 80°C a 70°C, obteniendo un pH estable (~2.5-3), evitando la transformación de la solución. El proceso con $SnSO_4$ mostró un pH más alto y constante a 70°C ya que la aplicación de $SnSO_4$ como fuente de estaño permite realizar el depósito sin acido fuerte, lo que a su vez la hace aplicable a sustratos de óxido de estaño flexible sensible al acido.

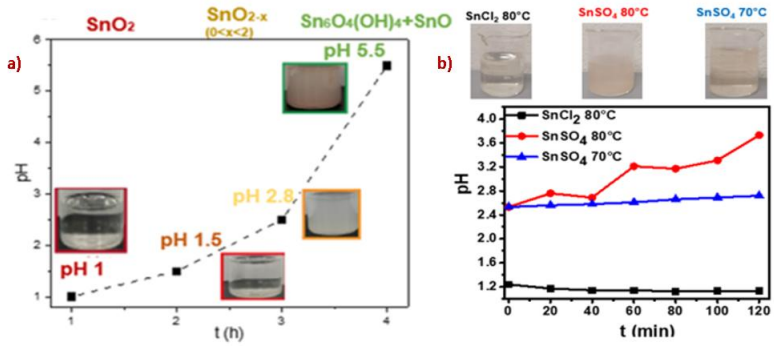


Figura 3: (a) *trasformación y aumento de pH del depósito de SnO_2 mediante $SnCl_2$, en función del tiempo ocasionando crecimiento de otros materiales (b) variación de pH en el CBD a la temperatura de 80°C con fuente de $SnCl_2$ y con fuente de $SnSO_4$ a 80°C y 70 °C.*

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA

Espectroscopia UV-Vis

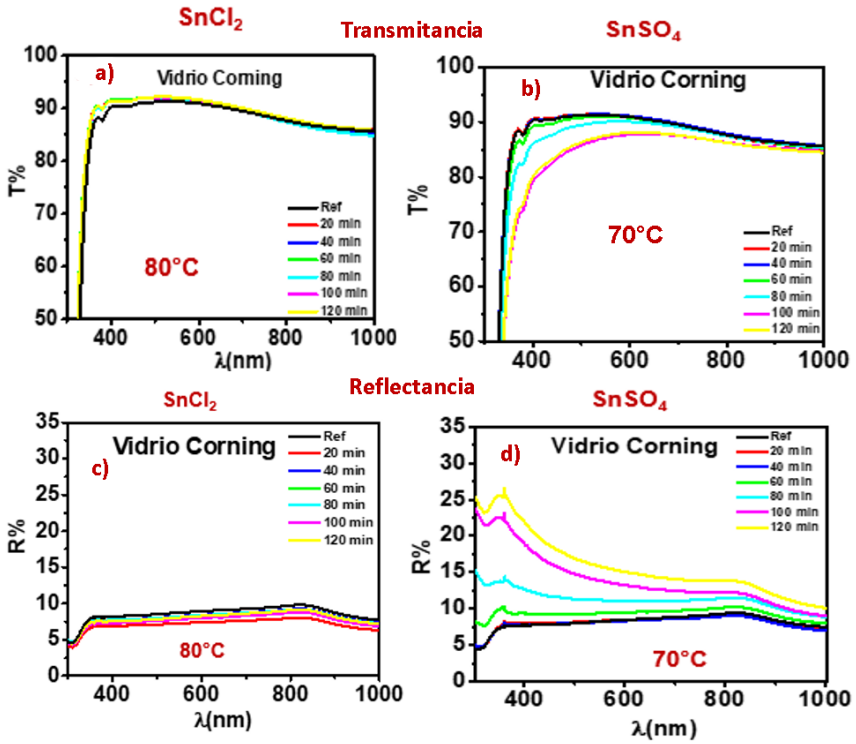


Figura 4: (a), (b) transmitancia y (c), (d) reflectancia de películas mediante $SnCl_2$ a 80°C y $SnSO_4$ a 70°C.

La figura 4(a) muestra un porcentaje de transmitancia de aproximadamente 88 - 92% para las películas de SnO_2 preparado a partir de $SnCl_2$, obteniendo una ligera diferencia en función del tiempo, lo que significa que difícilmente se obtiene un crecimiento en el espesor de la película. Por otra parte, la figura 4(b) muestra el resultado de transmitancia de las películas depositadas a partir de $SnSO_4$, obteniendo un porcentaje de transmitancia de aproximadamente 80 - 90% inicialmente, pero bajando conforme el tiempo avanza debido al incremento en el espesor de la película depositada. Similarmente, en 4 (c) se observa una pequeña variación en el porcentaje de reflectancia de las películas de SnO_2 preparadas a partir de $SnCl_2$ con respecto al tiempo, mientras que el porcentaje de reflectancia de las películas preparadas a partir de $SnSO_4$ incrementa notablemente conforme se deposita más material.

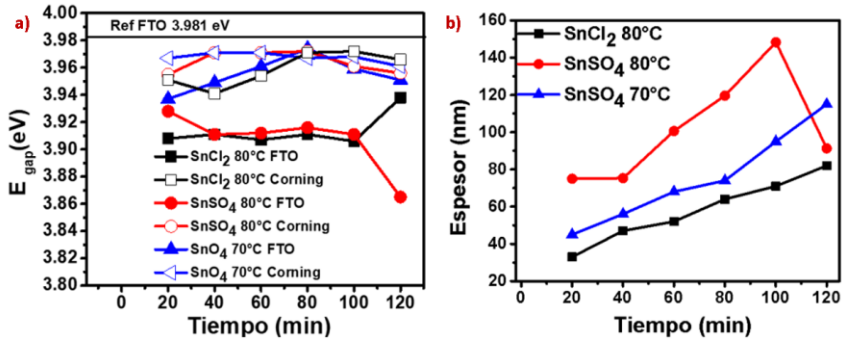


Figura 5: (a) Comparación de la brecha de energía (band gap) de películas de SnO_2 depositadas mediante $SnCl_2$ y $SnSO_4$ por CBD durante 2 horas con películas cada 20 min, (b) espesor de las mismas películas.

En la figura 5(a) se muestra la brecha de energía obtenida para las películas de SnO_2 depositadas a distintos tiempos, con valores entre ~3.90 y 3.97 eV, calculados a partir de sus espectros de transmitancia y reflectancia. Se observa una ligera variación de 0.1 a 0.2 eV entre las muestras, lo cual confirma que los valores se encuentran dentro del rango esperado para SnO_2. Esto sugiere una estructura cristalina-amorfa y una alta transparencia en el rango visible, indicando que el material presenta las propiedades ópticas deseadas. Por otra parte, la figura 5(b) presenta los valores de espesor de las películas depositadas utilizando $SnCl_2$ y $SnSO_4$ como precursores. Los espesores obtenidos oscilan entre ~40 y 100 nm, con una diferencia de aproximadamente 20 nm entre las películas según la fuente de estaño empleada.

Propiedades morfológicas

En la figura 6, se presenta la morfología superficial de las películas de SnO_2 depositadas por baño químico CBD, mediante dos diferentes fuentes de estaño, donde ese observa un depósito progresivo del material con el tiempo. Inicialmente, la superficie del vidrio conductor en la figura 6 a) es muy similar al de las películas depositadas a partir de $SnCl_2$ y $SnSO_4$ por una hora, como se observa en las figuras 6 b) y d), respectivamente. Sin embargo, a partir de 2 horas se observó el recubrimiento de los granos en la superficie del FTO (figuras 6 c) y e), formando estructuras esféricas aglomeradas de SnO_2, por lo que se confirma la presencia del SnO2 a partir de ambos precursores.

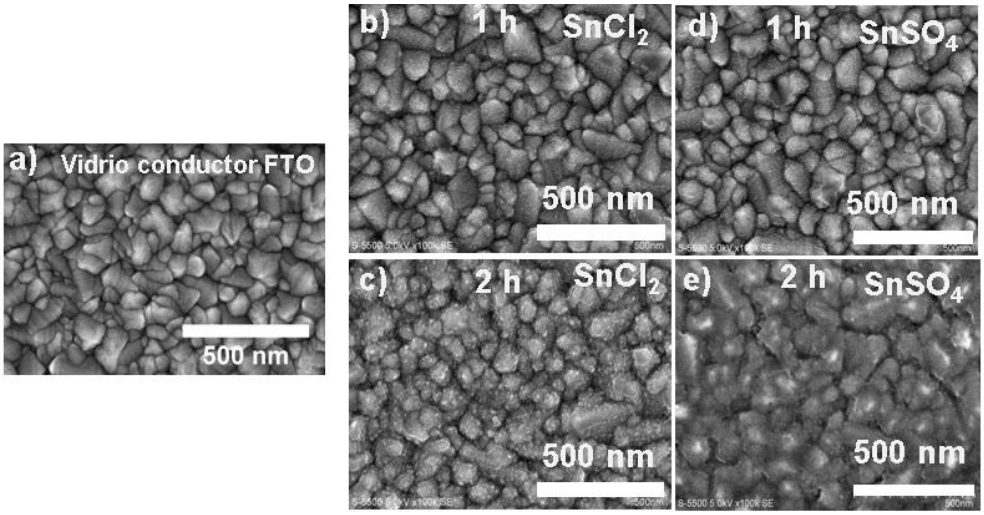


Figura 6: a) SEM de FTO, b), c) SEM de SnO_2 a partir de $SnCl_2$ a 1 y 2 horas de depósito d), e) SEM de SnO_2 a partir de $SnSO_4$ a 1 y 2 horas en comparación con vidrio conductor FTO a una resolución de 500 nm.

CONCLUSIONES

Se realizo el depósito de dióxido de estaño SnO_2 mediante cloruro de estaño $SnCl_2$ y sulfato de estaño SnSO4 para encontrar sus diferencias entre las 2 fuentes de estaño. Se comprobó mediante transmitancia y reflectancia la brecha de energía del SnO_2 entre ~3.8 y 4 eV, que está dentro del rango aceptable para una ETL. Mediante la síntesis de las dos diferentes fuentes de estaño se comprobó que el precursor de $SnCl_2$ presenta un pH entre 1.5 a 2.5, mientras que el precursor de $SnSO_4$ presenta un pH entre 2.5 y 3 para ser aplicados como ETL. Mediante el análisis de SEM, se observó el crecimiento del SnO_2, obteniendo aglomeración de granos sobre el grano del FTO, influenciando por el pH y tiempo de crecimiento del CBD.

AGRADECIMIENTOS

LBJ agradece el apoyo al eyecto de CONAHCYT Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de doctorado que se brinda. ANCM agradece el apoyo de SECIHTI bajo el programa de Investigadores por México, proyecto 7193. Se agradece el apoyo financiero de PAPIIT-UNAM (IA102625) y SECIHTI (CF-2023-I-725), así como la infraestructura proporcionada por Laboratorios Nacionales de SECIHTI (APOYOS LNC 2023-33 Innovación y Desarrollo de prototipos de módulos fotovoltaicos con celdas solares experimentales LIFYCS-IER-UNAM).

REFERENCIAS

Hanul Min Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO_2 electrode Nature volume 598, pages444–450 (2021).

Jason J. Yoo Efficient perovskite solar cells via improved carrier management Nature volume 590, pages587–593 (2022).

Dongliang Bai Facilitating electron transport in perovskite solar cells through tailorad SnO_2 film composition Solar RRL Volume 8, Issue 6 2301036(2023).

Ningyu Ren 25% - Efficiency flexible perovskite solar cells via controllable growth of SnO_2 Electronic ISSN 2771-9197(2024).

Solar Cell Efficiency Tables (Version 65) Martin A. Green, Online ISSN:1099-159X Progress in Photovoltaics: Research and Applications Volume 33, Issue 1 pp. 3-15 https://doi.org/10.1002/pip.3867

Chemical Bath Deposition of SnO2 Films on PEN/ITO Substrates for Efficient Flexible Perovskite Solar Cells, Along Cui et al 2024 Nanotechnology in press https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad568f

The influence of different complexing agents on the properties of tin dioxide (SnO2) deposited thin films through chemical bath approach Physica B: Condensed Matter journal homepage: www.elsevier.com/locate/physb

Ultralow-Temperature SnO2 Electron Transport Layers Fabricated by Intermediate-Controlled Chemical Bath Deposition for Highly Efficient Perovskite Solar Cells org Research Article doi.org/10.1002/cssc.2023

Effect of Chemical Bath Deposition Variables on the Properties of Zinc Sulfide Thin Films: A Review, molecules

Impact of Vertical Inhomogeneity on the Charge Extraction in Perovskite Solar Cells: A Study by Depth-Dependent Photoluminescence, applied materials e interfaces, E. Regalado-Pérez

Paola Gabriela AM, Dynamic Behavior of Ionic and Electronic Phenomena in Perovskite Solar Cells Analyzed Through Poles and Zeros of the Transfer Function of Impedance Circuit Theory and Applications, https://doi.org/10.1002/cta.4411 Volume 53, Issue 5 May 2025

F. Zhangetal., Engineering of hole-selective contact for low temperature-processed carbon counter electrode-based perovskite solar, Journal of Materials Chemistry A, vol.3, pp. 24272-24280,2025

P. Zhou et al., Efficient and stable mixed perovskite solar cells using P3HT as a hole transporting layer, Journal of Materials chemistry C, vol. 6, pp. 5733-5737,2028.

Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y. y Miyasaka, T. (2009). Perovskitas de haluros organometalicos como sensibilizadores de luz visible para celdas fotovoltaicas. J. Am. Chem. Soc. 131(17), 6050-6051. Doi:10.1221/ja809598r

Sun, Y., Seo, J.H., Takacs, C.J., Seifter, J. y Heeger, A.J. (2011). Celdas solares polimericas invertidas integradas con una pelicula de ZnO derivada de sol-gel recosida a baja temperature como capa de trasporte de electrons. Adv. Mater. 23 14),1679-1683. Doi;10.1002/adma.2010043301

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 • IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO DEL EMPLEO DE UN CALIBRADOR DE BLOQUE SECO COMO AMBIENTE TÉRMICO PARA LA CALORIMETRÍA POR T-HISTORY

Lúar Moreno-Álvarez y Mónica Graciela Marín-Amaya
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Energías Renovables y Semiconductores, Instituto Tecnológico de La Laguna - TecNM, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Torreón, Coahuila, 27000, México, **lmorenoa@itlalaguna.edu.mx**

Francisco Hernández-Tamayo, Javier Licurgo y Karla Graciela Cedano-Villavicencio
Instituto de Energías Renovables - UNAM, Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62580, México.

José María Serrano-Cornelio
DNV Energy Systems Mexico, Benito Juárez, Cd. de México, 03810 México.

RESUMEN

La calorimetría por historia térmica (T-History) es un método ampliamente utilizado como alternativa a la Calorimetría Diferencial de Barrido en el estudio de materiales de cambio de fase para el almacenamiento de energía térmica, debido a que permite el empleo de muestras con volúmenes mucho mayores y más representativas que las utilizadas típicamente en esta técnica. Sin embargo, el uso de ambientes térmicos convectivos empleados comúnmente para la calorimetría por T-History es una fuente de variabilidad térmica que ha inhibido el uso de un dispositivo estándar para esta metodología. En este trabajo presentamos los resultados preliminares del uso de un calibrador de bloque seco como un ambiente térmico de estado sólido que se adapta estrechamente al análisis teórico de la transferencia de calor supuesta por la calorimetría por T-History, en materiales de cambio de fase empleados comúnmente en aplicaciones termosolares a baja (C6H14) y alta temperatura (KCl), que demuestran la viabilidad de esta técnica experimental como una alternativa innovadora para la estandarización de este tipo de calorimetría.

ABSTRACT

Thermal history calorimetry (T-History) is increasingly used as an alternative to Differential Scanning Calorimetry for the characterization of phase change materials in thermal energy storage, as it allows for much larger and more representative sample volumes. However, the use of convective thermal environments in conventional T-History setups introduces variability, limiting standardization. In this work, we present preliminary results employing a dry-block calibrator as a solid-state thermal environment, which aligns with the theoretical heat transfer assumptions of the method. Tests performed with PCMs for low-temperature (C6H14) and high-temperature (KCl) solar thermal applications demonstrate the feasibility of this approach as an innovative step toward the standardization of T-History calorimetry.

Palabras claves: T-History, Calorimetry, Phase Change Materials, Thermal Energy Storage, Dry block calibrator.

INTRODUCCIÓN

Para que las tecnologías de aprovechamiento de recurso solar puedan volverse completamente competitivas contra las tecnologías convencionales es necesario que exista una disponibilidad energética, la cual se logra con la implementación de un sistema de almacenamiento de energía térmica eficiente y económico. Los parámetros térmicos más importantes a conocer de un material y que determinan si el mismo es adecuado para su aplicación en un sistema de almacenamiento de energía térmica son: su capacidad de almacenamiento de energía, su conductividad térmica y la evolución de sus propiedades térmicas al variar la temperatura y el tiempo. Por esta razón, es necesario conocer a detalle las curvas temperatura-tiempo (o curvas de historia térmica) que presentan los materiales. Los métodos calorimétricos permiten obtener información determinante de los materiales mediante estas curvas. Sin embargo, la técnica más madura en la actualidad, la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), presenta múltiples desventajas en la caracterización térmica de materiales, además de que el equipo comercial completo presenta costos muy elevados. El método T-History surgió como una alternativa a superar los inconvenientes que presenta la calorimetría por DSC.

En un intento por homologar las ecuaciones de análisis calorimétrico de esta técnica y hacerlas consistentes con la termodinámica del cambio de fases, (Moreno-Álvarez, 2012) formuló el método dT-History, el cual permite obtener información más confiable de las curvas de historia térmica registradas, particularmente de las curvas diferenciales. Esto permite conocer el efecto que cualquier modificación realizada al dispositivo, tendrá en la exactitud y precisión de sus resultados, haciendo más flexible la técnica.

En la tesis que da origen a este trabajo (Serrano-Cornelio, 2019), se propuso un procedimiento experimental dT-History basado en la formulación propuesta por Moreno-Álvarez (2012), para conocer la calorimetría de una muestra de sal KNO_3, la cual es utilizada en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica a altas temperaturas, por ejemplo, para los sistemas de almacenamiento de energía en plantas de potencia termosolar. Replicando el arreglo experimental nos fue posible obtener curvas T-t para cada elemento del sistema de calorimetría, comprobándose que este arreglo experimental reproduce las conductas térmicas observadas en los métodos experimentales típicos, y siguen una relación estrecha con el modelo de transferencia de calor en 1D que fundamenta esta técnica, lo que se comprueba con

la evaluación de la herramienta numérica propuesta por (Moreno-Álvarez et al, 2025) para obtención de curvas T-t simuladas para materiales de cambio de fase puro a baja temperatura.

EL MÉTODO T-HISTORY

El método T-History (o método de historia térmica) fue propuesto por Yinping en 1999 (Zhang et al., 1999) para abordar las limitaciones de la técnica de calorimetría por DSC. Este método se basa en comparar las temperaturas de una muestra de PCM y otra de un material de referencia (usualmente agua) durante un proceso de enfriamiento/calentamiento transiente, mientras el sistema evoluciona en el tiempo hacia el equilibrio térmico con un ambiente común que se encuentra a una temperatura constante. Durante este proceso se presenta un cambio de fase solamente en el material analizado y no en el material de referencia. En este análisis se obtiene el punto de fusión, el calor de fusión, el grado de subenfriamiento, la conductividad térmica y el calor específico del material de análisis (Solé et al., 2013).

La técnica experimental básica se puede apreciar en la Figura 1 (Moreno-Álvarez, 2012). En el arreglo, las muestras del material a caracterizar y del material de referencia (p. ej. agua) se colocan en recipientes idealmente idénticos y se someten al mismo ambiente térmico. La geometría idéntica de los recipientes asume una misma transferencia de calor con el ambiente. Un cambio en la temperatura del ambiente lleva a ambas muestras desde el equilibrio hacia una temperatura de equilibrio final, en donde el material a analizar cambia de fase mientras que el material de referencia permanece en su fase inicial. En este proceso se registra la temperatura de cada muestra y del ambiente para obtener curvas T vs t. La comparación de éstas permite calcular los parámetros termofísicos del material de análisis a partir de aquellos conocidos del material de referencia.

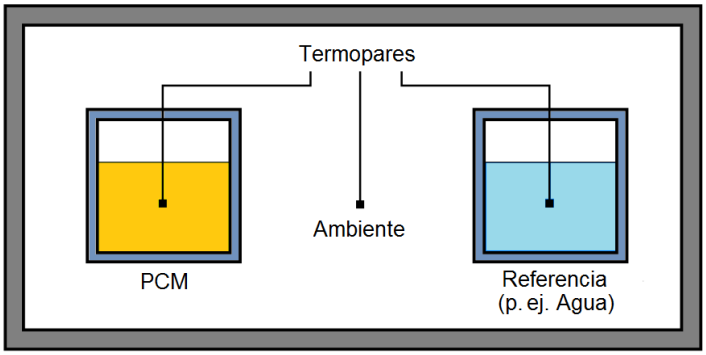


Figura 1. Arreglo experimental general del método T-History (Moreno-Álvarez, 2012).

Las principales ventajas de la técnica T-History son: la flexibilidad en el tamaño de la muestra a utilizar, lo que permite tener una mayor representatividad de la misma, pudiendo ser utilizada para estudiar materiales de cambio de fase (PCMs) inorgánicos, orgánicos, encapsulados y compuestos, además de materiales de almacenamiento de calor latente, de calor sensible y de calor químico; las rampas de calentamiento y enfriamiento y los rangos de temperatura típicos de un experimento T-History son lo suficientemente grandes como para adecuarse al estudio de PCMs destinados a cualquier aplicación; permite caracterizar muestras de materiales en tiempos menores y sin las complicaciones técnicas en el uso del equipo y la preparación de la muestra a caracterizar que se presentan en la DSC, sin comprometer la competitividad de los resultados obtenidos; la instrumentación y la configuración de un arreglo T-History debe ser de fácil montaje y de costos competitivos con los sistemas calorimétricos comerciales; permite estudiar también algunas propiedades como el subenfriamiento, histéresis y rangos de temperatura de cambio de fase; el procedimiento de la técnica no necesita de capacitación especializada para su adecuada utilización; la técnica puede ser más versátil en cuanto al rango de temperaturas de análisis de la muestra.

Por otro lado, una desventaja de este método es que hasta ahora no hay ningún instrumento comercial disponible para emplearlo como un sistema de caracterización estándar. Cada instalación T-History se monta individualmente, y la evaluación de los datos también depende de la técnica matemática específica que se elija para efectuar la calorimetría. (Lázaro et al., 2006). La técnica calorimétrica empleada en esta propuesta, el método dT-History, es una reciente propuesta de mejora de Moreno-Álvarez (por publicarse, 2025) a los estudios previos realizados sobre la técnica T-History, propuesta por (Zhang et al., 1999).

Los arreglos experimentales y estudios más representativos dentro del estado del arte de esta técnica son el método de Zhang (Zhang *et al.*, 1999), el de Marín (Marín *et al.*, 2005), el de Peck (Peck *et al*., 2006), el de Günther-Hiebler (Günther, 2009), el de Kravvaritis (Kravvaritis *et al*., 2010), el de Omaraa (Omaraa *et al*., 2017), y el de Moreno-Álvarez (Serrano-Cornelio, 2019), que se describe a continuación.

Modelo del Arreglo experimental dT-History

El modelo de calorimetría por historia térmica propuesto por (Moreno-Álvarez, 2012) considera que la evolución de la temperatura de la muestra a caracterizar se puede estudiar a través la temperatura *T* del punto 'central' de la misma, lo que permite considerar al modelo de transferencia de calor en el sistema como una analogía al análisis de circuitos eléctricos RC, sin necesidad de hacer referencia estricta al régimen de capacidad calorífica global (Moreno-Álvarez, 2013). De acuerdo con este modelo de análisis calorimétrico, el arreglo experimental conformado por la muestra del material a caracterizar, por el tubo contenedor de la misma y por el cilindro sólido que

intercambia energía con el medio (o fuente homogénea de calor) y realiza una transferencia de calor homogénea hacia el tubo contenedor, se representa mediante el esquema de la Figura 2. El cilindro sólido corresponderá a la pieza cilíndrica metálica (o inserto metálico) perteneciente a un calibrador de temperatura de referencia. El calibrador de temperatura de referencia es un dispositivo que permite proporcionar una transferencia de calor homogénea (azimutal y longitudinalmente) desde la fuente de calor hacia todo el interior del tubo contenedor, y por ende también a la muestra del material a caracterizar.

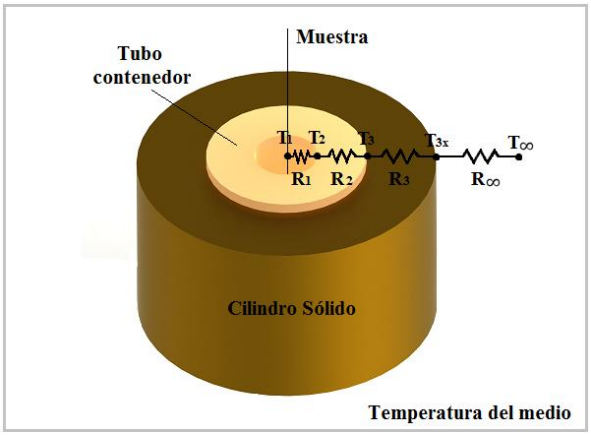


Figura 2. Esquema del arreglo experimental completo para la calorimetría dT-History de algún material que cambia de fase. El arreglo está conformado por: la muestra a caracterizar, el tubo contenedor de la misma y el cilindro sólido que intercambia energía con el medio o fuente de calor. Superpuesto se presentan las componentes de temperatura y resistencia térmicas del arreglo RC

El diagrama de circuito térmico completo para la calorimetría dT-History de un material con propiedades térmicas desconocidas se muestra en la Figura 3. Este modelo está compuesto por el material, el tubo contenedor del mismo y un cilindro sólido que intercambia energía con una fuente generadora de calor. En el circuito: C_1 y R_1 son la capacitad calorífica y la resistencia térmica radial de la muestra de material a caracterizar; C_2 y R_2 son la capacidad calorífica y la resistencia térmica radial del tubo contenedor de la muestra; C_3 y R_3 son la capacidad calorífica y la resistencia térmica radial del cilindro sólido que intercambia temperatura con el medio (o fuente homogénea de calor); T_1 es la temperatura en el centro de la muestra; T_2 es la temperatura en la cara interna del contenedor en contacto con la muestra; T_3 es la temperatura entre la cara externa del tubo contenedor y la cara interna del cilindro sólido; T_{3x} es la temperatura en la cara externa del cilindro sólido; T_∞ es la temperatura del medio (o fuente homogénea de calor; T_H al calentarse y T_L al enfriarse); R_∞ es la resistencia al paso de la energía entre el medio y la cara externa del cilindro sólido. Las resistencias térmicas del arreglo se encuentran superpuestas a la geometría del sistema en el esquema de la Figura 2.

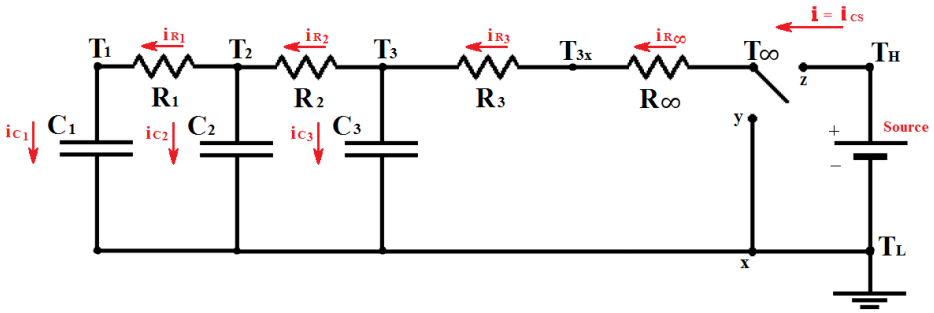


Figura 3. Diagrama de circuito térmico del arreglo experimental completo para la calorimetría dT-History. El arreglo está conformado por la muestra, el tubo contenedor y el cilindro sólido que intercambia energía con el medio o fuente de calor.

En la mayoría de los métodos T-History se asume que la resistencia interna dentro de la muestra es despreciable respecto de la resistencia externa (condición de capacidad calorífica global), de modo que el circuito térmico de la Figura 3 se considera un circuito RC simple, con $C = Mc_p$, la capacidad calorífica de la muestra de masa M, y $R = (hA)^{-1}$ la resistencia externa considerada por la ley de Newton, siendo h el coeficiente de transferencia de calor externo y A el área efectiva de transferencia de calor. Esto conduce a la ecuación:

$$t = t_o - \frac{M\,c_p}{h\,A}\,\mathrm{Ln}\left[\frac{T_o - T_{amb}}{T - T_{amb}}\right] \qquad (1)$$

Donde T_o es la temperatura de la muestra al tiempo t_o, T la temperatura de la muestra al tiempo t, y T_{amb} la temperatura del ambiente térmico.

Arreglo experimental propuesto. Los modelos de transferencia de calor de una sola dimensión presentados en la sección previa, solo se

cumplen si se garantiza una transferencia de calor uniforme y radial hacia el sistema. Con esto se elimina la componente longitudinal y la componente acimutal de la ecuación de calor.

Un calibrador de temperatura de referencia generalmente funciona bajo el principio de bloque seco, el cual consiste en calentar un bloque de metal y mantenerlo a una temperatura estable. Este principio presenta algunas ventajas en comparación con los tradicionales baños térmicos, entre las cuales se encuentran (AMETEK, 2019): calentamiento y enfriamiento mucho más rápido; rangos amplios de temperatura; físicamente más pequeño y ligero y está diseñado para aplicaciones industriales. Este equipo es utilizado principalmente para la calibración de dispositivos sensores de temperatura.

El calibrador de temperatura de referencia seleccionado para realizar la calorimetría, proporciona una transferencia de calor homogénea desde la fuente de calor hacia todo el largo del tubo contenedor, y por ende también a la muestra del material a caracterizar. La tecnología utilizada en este calibrador es denominada de calentamiento de triple zona activa, con la cual se controla de manera precisa cada zona de calentamiento al interior del pozo del sistema. El par de elementos de calentamiento en la parte inferior del pozo, la zona principal, garantizan una transferencia homogénea óptima de calor. Por otro lado, en la zona superior un elemento de calentamiento adicional compensa la pérdida de calor del sensor bajo prueba y de la parte superior abierta del pozo. Por lo tanto, la tecnología de zona triple mejora la homogeneidad en el pozo ajustando la temperatura en la parte superior a la misma temperatura que en la parte inferior, manteniendo una diferencia mínima (AMETEK, 2016).

Para realizar la calorimetría de la muestra, se utilizó un calibrador de temperatura de referencia modelo JOFRA RTC-700 B. Este equipo permite fijar temperaturas en un rango de entre 33 y 700°C, lo cual permite realizar calorimetría dT-History para distintos tipos de materiales utilizados en aplicaciones a medianas y altas temperaturas. Por ejemplo, para mezclas de sales fundidas utilizadas en los sistemas de almacenamiento térmico en plantas solares, ya que éstas tienen puntos de fusión que van desde los 100 hasta los 400 °C, aproximadamente. Por lo tanto, el JOFRA tiene la ventaja de ser utilizado como un calorímetro, lo cual es una opción adicional a su función original de calibración y referenciación de sensores de temperatura (Figura 4a).

El JOFRA cuenta con un pozo de diámetro interior de 29.8 mm y una profundidad de 200 mm, en donde se colocan los insertos metálicos (Figura 4b). Estos insertos, con un diámetro exterior de 29.8 mm y un largo de 210 mm, entran de manera justa en el pozo para asegurar una mejor transferencia de calor desde los elementos de calentamiento del JOFRA hacia la muestra (Figura 4c). Es importante mencionar que AMETEK no proporciona información específica sobre el tipo de aleación de la que están compuestos los insertos metálicos.



a) b) c)

Figura 4. a) Equipo JOFRA RTC-700 B. b) Pozo del calibrador. c) Insertos metálicos

Los datos se procesan mediante un adquisidor de datos NI cDAQ-9191 y la evolución en tiempo real de las temperaturas se monitorea mediante el software LabVIEW 2014. El esquema del arreglo experimental se muestra en la Figura 5. Como se mencionó anteriormente, las generalidades de este arreglo experimental también funcionan para las pruebas de caracterización de materiales para aplicaciones a bajas temperaturas.

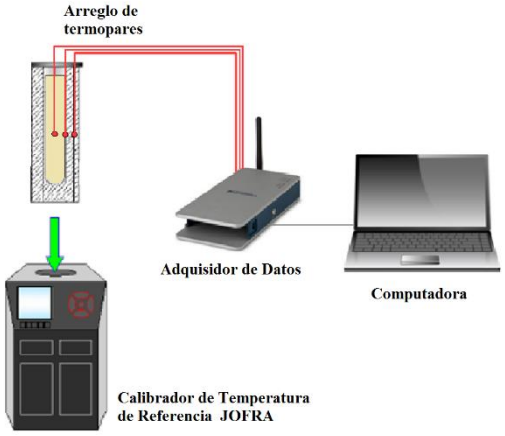


Figura 5. Esquema del arreglo experimental para la técnica dT-History del sistema completo.

Para las mediciones se utilizaron muestras de 16 g de sal KNO_3 y 20 g de la parafina $C_{16}H_{32}$ como muestras a caracterizar. La primera se colocó sobre un tubo contenedor cerámico de marca OMEGA, colocado a su vez dentro del inserto metálico; mientras que para la segunda se empleó un tubo de ensayo de Pyrex como contenedor de la muestra, colocado dentro del inserto metálico del modelo de calibrador marca JOFRA para bajas temperaturas (-25 a 150 ºC).

RESULTADOS

La Figura 6 muestra las curvas de historia térmica de la sal KNO_3, empleando una rampa de calentamiento fija de 5.25 ºC/min tanto en el proceso de calentamiento (a) como en el de enfriamiento (b). El empleo de una rampa de temperatura controlada del ambiente térmico en este arreglo experimental dT-History permite una versatilidad de análisis que no se tiene en los arreglos tradicionales de las otras técnicas, proveyendo una sensibilidad de detección mayor, como puede apreciarse en las mesetas de cambio de fase estructural de la sal, destacadas por los círculos rojos en los gráficos.

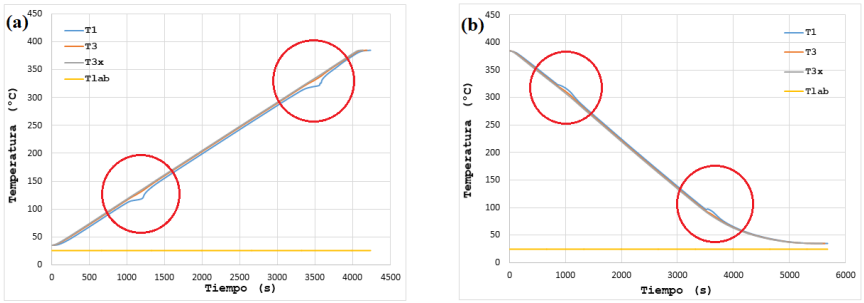


Figura 6. Curvas de historia térmica (T-t) para caracterización de muestra de sal KNO_3 para (a) calentamiento y (b) enfriamiento. Los círculos rojos destacan la aparición de las mesetas del cambio de fase en la sal.

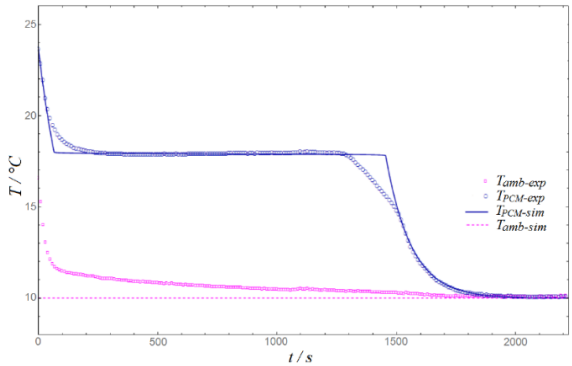


Figura 7. Comparación de curvas T-History obtenidas experimentalmente (puntos) y con la simulación (líneas) para una muestra de hexadecano en enfriamiento.

La Figura 7 presenta una comparativa de curvas T-History experimentales (puntos) y simuladas (líneas) para la muestra de hexadecano, donde puede observarse la transición de fase líquido-sólido a una temperatura aproximada de 18°C, tanto en la curva experimental como en la simulada usando la ecuación (1). Puede notarse que el tamaño de la meseta del cambio de fase es mucho mayor para el $C_{16}H_{34}$ que para la muestra de sal KNO_3. Este hecho se comprueba la alta capacidad de un material de cambio de fase para almacenar una mayor cantidad de calor latente durante la transición de fase. Así mismo, se verifica que la suposición de transferencia de calor unidimensional en la dirección radial de las técnicas T-History es válida en este arreglo experimental, salvo al inicio y al final del proceso de cambio de fase, donde la aparición de la interface líquido-sólido en el interior de la muestra vuelve más relevante la interacción térmica del sistema, sintetizada en la Figura 3.

CONCLUSIONES

La técnica experimental dT-History mediante el uso de un calibrador de temperaturas por bloque seco como ambiente térmico, permite un control versátil de la temperatura externa, misma que se mantiene homogénea en la dirección vertical y angular, permitiendo una mayor sensibilidad en la detección de los cambios de fase en las curvas de historia térmica.

La coincidencia entre el experimento y las curvas simuladas a partir de la suposición de la condición de capacidad calorífica global y la ley de Newton, indican que esta técnica experimental es consistente con la matemática de las distintas técnicas de calorimetría T-History, por lo que se presenta como una candidata viable para servir como técnica estándar para este tipo de calorimetría.

REFERENCIAS

AMETEK. SENSORS, TEST & CALIBRATION. (2016). Reference Temperature Calibrator RTC-700. (Pub code SS-RTC-700 Issue 1602), Specification Sheet, SS-RTC-700. Obtenido de www.ametekcalibration.com

AMETEK. SENSORS, TEST & CALIBRATION. (21 de 02 de 2019). The Dry Block Principle. Obtenido de https://www.ametekcalibration.com/knowledge/temperature-calibration/the-dry-block-principle:

Günther, E., Hiebler, S., Mehling, H., & Redlich, R. (2009). Enthalpy of Phase Change Materials as a Function of Temperature: Required Accuracy and Suitable Measurement Methods. International Journal of Thermophysics.

Kravvaritis, E., K.A., A., & Tzivanidis, C. (2010). Improvements to the measurement of thermal properties of phase change materials. Measurement Science and Technology 21, 045103 (9pp)

Lázaro, A., Günther, E., Mehling, H. H., Marín, J., & Zalba, B. (2006). Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials. Measurement Science and Technology 17, 2168-2174

Marín, J., Lázaro, A., & Zalba, B. (2005). New installation at the university of Zaragosa (Spain) of T-History method to measure the thermal properties. Proceedins of the 8th workshop annex 17, ECES, IEA.

Moreno-Álvarez, L. (2012). Formulación del método de calorimetría dT-History. Tesis Doctoral. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Moreno-Álvarez, L., Herrera-Pacheco, J. N., & Cruz-Meneses, F. (2013). Criterios de validez, precisión y exactitud para la calorimetría por historia térmica. XXVIII CONGRESO NACIONAL DE TERMODINÁMICA. CINVESTAV-Zacatenco, México DF.

Moreno-Álvarez, L., Hernández-Tamayo, F., Licurgo-Pedraza, J., Marín-Amaya, Mónica G., Serrano-Cornelio, J. M., (2025). Numerical generation of T-History curves of pure composition phase change materials with a heuristic single-temperature specific heat function. To be published.

Omaraa, E., Saman, W., Bruno, F., & Liu, M. (2017). Modified T-History Method for Measuring Thermophysical Properties of Phase Change Materials at High Temperature. AIP Conference Proceedings. SolarPACES 2016.

Peck, J., Kim, J., Kang, C., & Hong, H. (2006). A study of accurate laten heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-History method. International Journal of Refrigeration 29, 1225-1232.

Serrano-Cornelio, J.M. Estrada, C. y Moreno-Álvarez, L. (directores). (2019) Estudio de materiales para almacenamiento térmico para sistemas de generación de potencia termosolar. Tesis de Maestría. Energía Solar Fototérmica. IER-UNAM, México.

Solé, A., Miró, L., Barreneche, C., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2013). Review of the T- history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). Renewable and Sustainable Energy Reviews 26, 425-436.

Zhang, Y., Jiang, Y., & Jiang, Y. (1999). A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. Measurement Science and Technology 10, 201-205.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CON ALMACENAMIENTO Y PLANTA DE RESPALDO PARA CLÍNICA DE SALUD DE PUEBLOS ORIGINARIOS

Carlos Eduardo Borjas Castillo, Rafael Enrique Cabanillas López, Erick Mauricio Rascón Martínez, Fátima Olivas Villarreal.

Dirección General de Energía de la Secretaría de Economía y Turismo del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83270, México.
Correspondencia a Carlos E. Borjas Castillo (cbor1605@gmail.com)

RESUMEN

Este artículo presenta el caso de un proyecto de e instalación de un sistema fotovoltaico híbrido en beneficio de la comunidad indígena del Desemboque de los Seris, en Sonora. El sistema tiene como propósito principal reducir los costos de energía eléctrica, fortalecer la seguridad y continuidad del servicio eléctrico en una clínica de salud mediante un sistema fotovoltaico con respaldo de baterías y una planta de combustión interna de respaldo.
Esta necesidad surge a partir de las problemáticas que enfrenta la comunidad, tanto por las fluctuaciones técnicas en el suministro eléctrico como por las limitaciones en la comunicación, derivadas de su ubicación geográfica de difícil acceso. La falta de cobertura telefónica obliga a que el internet sea la única vía de contacto con el exterior. Al encontrarse en el extremo de la red de distribución eléctrica, la comunidad experimenta fallas con mayor frecuencia, lo que puede afectar la conservación de medicamentos que requieren refrigeración. A su vez, los problemas de comunicación pueden dificultar la atención oportuna, impactando directamente en la salud de la población.
La iniciativa surgió por medio de la Dirección General de Energía (DGE) del estado de Sonora, quien gestionó con la empresa ENGIE dentro de su programa de responsabilidad social una intervención energética en la comunidad del Desemboque de los Seris.
ENGIE realizó una consulta social y la DGE gestionó la instalación e interconexión de un sistema fotovoltaico de la clínica de la comunidad seri, superando retos institucionales derivados de la transición del servicio eléctrico al IMSS-Bienestar. El proyecto concluyó con la validación técnica y conexión a la red de parte de CFE, fortaleciendo el acceso a energía limpia en zonas rurales.

Palabras claves: Sistema fotovoltaico, energía eléctrica, zona rural, beneficio social.

ABSTRACT

This article presents the case of a hybrid photovoltaic system installation project benefiting the indigenous community of Desemboque de los Seris, Sonora. The system's main purpose is to reduce electricity costs and strengthen the security and continuity of electrical service at a health clinic through a battery-backed photovoltaic system and a backup internal combustion plant.
This need arises from the problems faced by the community, both due to technical fluctuations in the electricity supply and communication limitations derived from its difficult-to-access geographic location. The lack of telephone coverage means that the internet is the only means of contact with the outside world. Being located at the edge of the electricity distribution grid, the community experiences more frequent outages, which can affect the preservation of medications that require refrigeration. In turn, communication problems can hinder timely care, directly impacting the population's health. The initiative was launched through the General Directorate of Energy (DGE) of the state of Sonora, which, as part of its social responsibility program, managed an energy project with the company ENGIE in the Desemboque de los Seri community.
ENGIE conducted a community consultation, and the DGE managed the installation and interconnection of a photovoltaic system for the Seri community clinic, overcoming institutional challenges arising from the transition of electricity service to IMSS-Bienestar. The project concluded with technical validation and grid connection by CFE, strengthening access to clean energy in rural areas.

Keywords: Photovoltaic system, electric power, rural area, social benefit.

1. INTRODUCCIÓN

En alineación con el Plan Estatal de Desarrollo Sonora 2021–2027, el Programa de Mediano Plazo de Economía Sonora 2022–2027 y los Objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la Dirección General de Energía impulsa el proyecto “Reducción de pobreza energética en comunidades”, cuyo propósito es reducir la pobreza energética, garantizar el acceso equitativo a servicios básicos y fomentar el desarrollo integral en comunidades originarias y sectores históricamente marginados del estado. En el documento 100 días de gobierno: Inicio de la Transformación, se destacan los compromisos de campaña Núm 219 y Núm 280, en los cuales el Gobernador Alfonso Durazo propone las siguientes acciones a desarrollar:

- Lograr la autonomía energética del pozo de agua dulce en Desemboque.
- Ampliar la planta solar existente mediante la instalación de una bomba de mayor capacidad, el refuerzo estructural y el incremento del número de módulos fotovoltaicos.
- Instalar paneles solares en viviendas para reducir los costos de electricidad; estos módulos también funcionarán como estructuras de

sombra para huertos familiares.
- Introducir tecnologías solares térmicas como estufas solares, calentadores de agua y sistemas de purificación.
- Brindar capacitación técnica en el uso, operación y mantenimiento de estas tecnologías.
- Apoyar las actividades económicas tradicionales y emergentes del pueblo Comcaac, con énfasis en fortalecer su autosuficiencia y bienestar.

Este proyecto responde a dichos compromisos asumidos por el Gobernador de atender de forma prioritaria las demandas de los pueblos indígenas, especialmente aquellas relacionadas con el acceso a energía, agua potable y medios de vida sostenibles. En este marco, la Dirección General de Energía desempeña un rol técnico y estratégico en la gestión, ejecución y seguimiento de proyectos energéticos en comunidades Yaqui, Mayo, Guarijío y Comcaac (Seri), actuando como instancia de acompañamiento institucional ante diversas dependencias.

El principal eje de este proyecto se desarrolla en los pueblos de Desemboque y Punta Chueca, hogar del pueblo Comcaac. En el marco de este proyecto, se busca promover la independencia energética, la seguridad hídrica y alimentaria, así como la generación de empleos mediante un modelo comunitario que vincula el acceso a energía renovable con actividades productivas locales. Estas acciones se encuentran claramente establecidas dentro de los compromisos de campaña y del Plan de Justicia para el Pueblo Seri impulsado por el Gobierno Federal, y tienen como finalidad fortalecer la autonomía de las comunidades mediante soluciones sostenibles e incluyentes.

En la vertiente de “Electrificación” la Dirección General de Energía apoya el proyecto de instalación de paneles fotovoltaicos en viviendas, con la finalidad de hacer más accesible el acceso a energía eléctrica, así como la gestión de una planta fotovoltaica con recurso de la empresa ENGIE para alimentar la energía requerida para la Clínica de Salud (Figura 1), la rehabilitación de una planta fotovoltaica en Punta Chueca, la cual alimenta la desaladora y una planta fotovoltaica en El Desemboque de los Seris la cual alimenta un pozo de bombeo de agua potable que abastece a la comunidad.



Figura 1. Inicio de obras de la instalación del sistema fotovoltaico.

El papel de la Dirección General de Energía consiste en asesoría técnica, así como apoyo con gestiones con CFE, conformación de grupos de trabajo y seguimiento a los temas particulares para garantizar un correcto funcionamiento y un otorgamiento justo de estos servicios básicos tales como agua potable y energía eléctrica para dichas comunidades.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La Dirección General de Energía gestionó con ENGIE la realización de actividades de responsabilidad social en la comunidad de El Desemboque de los Seris, a lo que la empresa accedió a colaborar. Como parte del proyecto, se llevó a cabo una visita al sitio junto con ENGIE (empresa donadora) y BAJA SUN (empresa instaladora), donde se presentó el caso y la necesidad del sistema energético. Tras la exposición, ENGIE aceptó la propuesta y diseñó un sistema energético, cuya estructura se muestra en la imagen.

El proyecto consiste en la donación, instalación y puesta en marcha de un sistema fotovoltaico para abastecer la demanda energética de la clínica de salud (Figura 2). Su costo está estimado en 80 mil dólares y beneficiará a toda la comunidad, compuesta por aproximadamente 95 familias.

Este sistema permitirá mantener la refrigeración de los medicamentos incluso durante interrupciones en la red eléctrica, lo cual es crucial debido al aislamiento de la comunidad, que dificulta el acceso oportuno a los insumos médicos. Además, contribuirá a reducir los costos de electricidad.

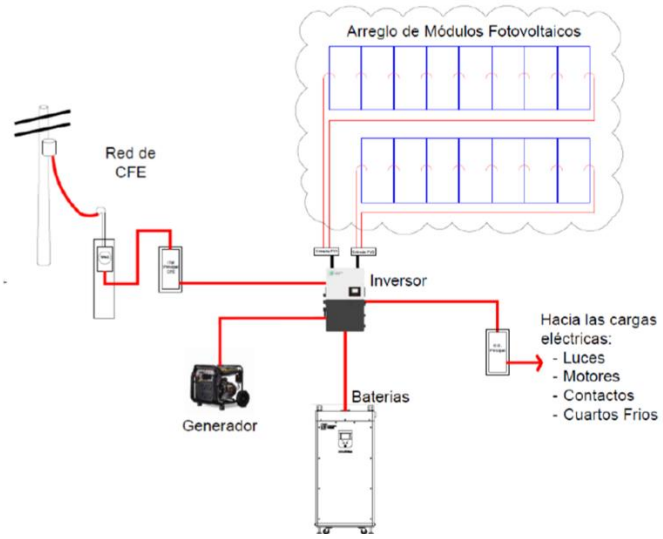


Figura 2. Esquema General del Sistema.

Descripción: El sistema fotovoltaico consiste en 15 paneles monocristalinos de 550W, cada uno, para generar una potencia de 8,250 W. También, incluirá:

- Sistema de baterías de litio de 18.5 KWH.
- Generador eléctrico de emergencia.
- Sistema de montaje de aluminio, un inversor central híbrido de 12KW.
- Cuarto de resguardo para el banco de baterías y el enrejado perimetral de las instalaciones.

Beneficios: El sistema fotovoltaico beneficiará a los 329 habitantes de la comunidad, que conforman alrededor de 95 familias. Asimismo, representará:

- Ahorro económico para los habitantes de la comunidad de aproximadamente 90% de la factura de consumo eléctrico de la Casa de Salud.
- Disminución anual de 4.06 TON de emisiones de CO2.

En caso de una falla en la red eléctrica, las baterías podrán seguir suministrando energía renovable para evitar la pérdida de medicamentos. Si la falla persiste y no se dan las condiciones adecuadas para la generación fotovoltaica, el generador de gasolina funcionará como sistema de respaldo de emergencia.

A continuación, en la Figura 3 se presenta el diagrama unifilar del sistema fotovoltaico híbrido.

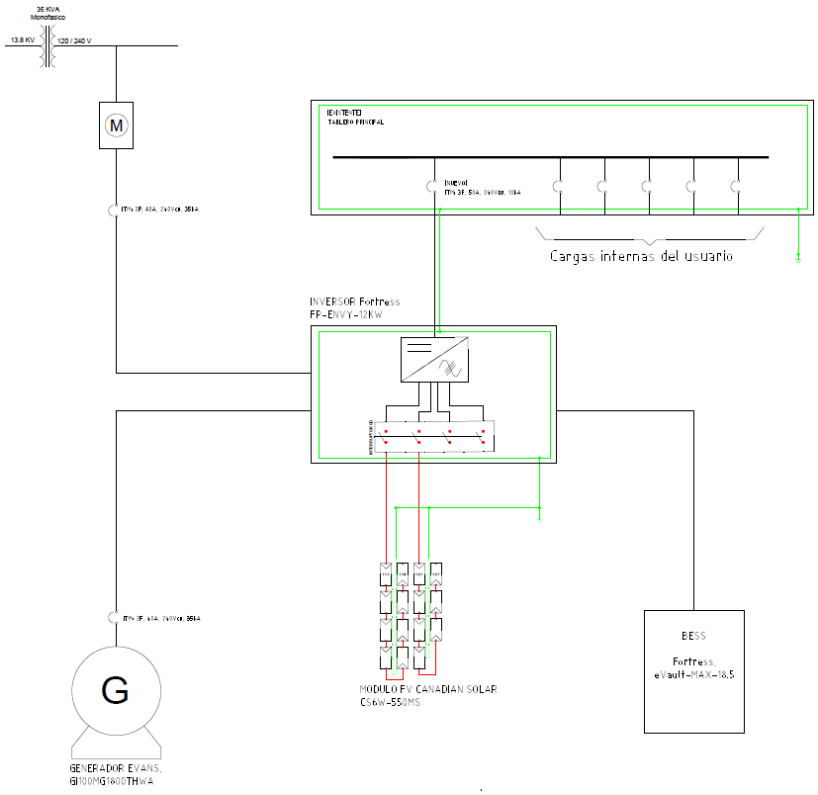


Figura 3. Diagrama Unifilar.

3. DESARROLLO

En este apartado, el contenido se organiza en dos secciones. La primera describe, de manera general, las acciones realizadas en cada etapa del proyecto, poniendo especial énfasis en la gestión para la obtención de la donación y en las labores de facilitación necesarias para su implementación. La segunda sección se enfoca específicamente en el proceso de gestión para la interconexión del sistema, dado que esta fase resulta crucial para garantizar su correcto funcionamiento y asegurar que la energía generada pueda ser aprovechada de manera continua y eficiente.

3.1 Procedimiento para el Desarrollo del Proyecto

A continuación, en la Figura 4 se muestra el procedimiento seguido para la gestión, obtención e implementación del sistema.



Figura 4. Diagrama General del Procedimiento.

En la Figura 4 se observa los pasos a seguir a continuación se describirá cada una de las etapas de manera general:

- Identificación de la problemática: Esta etapa consistió en determinar el proyecto más prioritario para la comunidad, considerando que presenta pobreza energética en diversas instalaciones. Se decidió priorizar la clínica local debido a su función esencial en materia de salud y a su ubicación geográfica aislada, lo que hace indispensable garantizar la seguridad médica en la zona. En colaboración con las empresas ENGIE y Bajasun, se realizó un estudio técnico de las instalaciones eléctricas y una entrevista de carácter social con las autoridades étnicas, con el objetivo de intervenir sin vulnerar las normas internas de la comunidad Seri y contar con su aprobación formal del proyecto.
- Gestión de la donación: En esta fase, la Dirección General de Energía (DGE) logró que ENGIE asumiera el desarrollo del proyecto como parte de sus actividades de responsabilidad social empresarial. Gracias a esta gestión, se consiguió que el sistema fuera donado de manera gratuita para beneficio del sector público y de la comunidad Seri.
- Diseño del proyecto: La empresa Bajasun, encargada de la instalación, realizó el dimensionamiento del sistema fotovoltaico con base en las necesidades energéticas de la clínica, atendiendo las problemáticas identificadas durante la visita de inspección.
- Instalación del sistema: La instalación fue ejecutada por Bajasun con la supervisión técnica de ENGIE y la DGE, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad establecidos.
- Coordinación de las partes involucradas: Una vez instalado el sistema, la DGE se encargó de coordinar a las instituciones vinculadas, ya que, si bien el beneficio era para la comunidad, el contrato del servicio eléctrico estaba a nombre de una dependencia pública estatal. La DGE notificó a la Secretaría de Salud del Estado de Sonora —titular del servicio— para explicar la situación y gestionar las firmas necesarias. Asimismo, se consideró la participación del IMSS Bienestar, ya que la clínica se encontraba en un proceso de transición administrativa en el que la Secretaría de Salud transfería el inmueble y sus servicios a dicha institución.
- Interconexión del sistema: La DGE tramitó ante la CFE Caborca la solicitud de interconexión, integrando el expediente correspondiente y dando seguimiento a las obras complementarias requeridas por la supervisión técnica de CFE.
- Entrega-recepción: Finalmente, se realizaron las pruebas de puesta en marcha del sistema y se elaboró un manual de operación y mantenimiento preventivo de la planta. Este manual, junto con el sistema fotovoltaico, fue entregado formalmente al IMSS Bienestar y a la comunidad Seri.

3.2 Gestión 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 [2], 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 5).

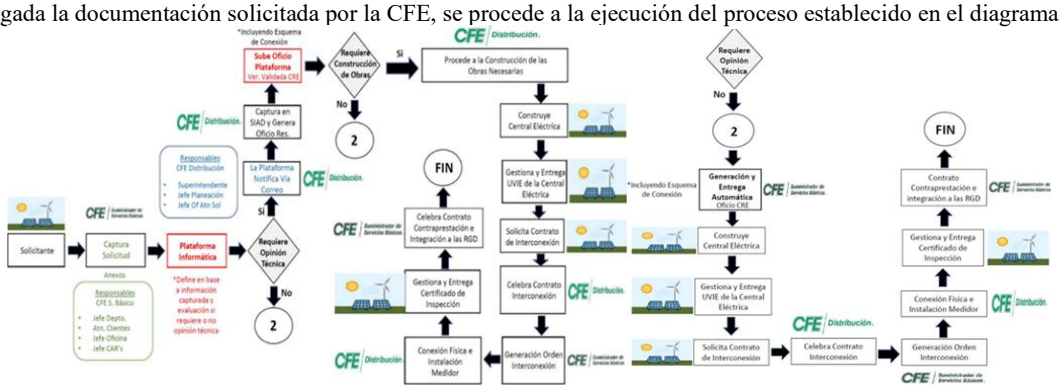


Figura 5. Diagrama del procedimiento para la interconexión de una central eléctrica.

4. RESULTADOS

Los resultados de la gestión realizada por la Dirección General de Energía derivaron en la implementación de un sistema fotovoltaico híbrido (Figura 6), diseñado para abastecer aproximadamente el 90 % de la demanda energética de la clínica. El sistema combina generación fotovoltaica con un banco de baterías de respaldo, lo que permite garantizar el suministro eléctrico ante interrupciones en la red. Esta capacidad de autonomía energética es particularmente relevante para asegurar la operación continua de los equipos médicos y la conservación de medicamentos que requieren refrigeración, reduciendo así riesgos sanitarios y pérdidas económicas asociadas a fallas en el suministro. Con ello, se contribuye directamente al objetivo general del proyecto, orientado a fortalecer la infraestructura energética de servicios de salud en comunidades con limitaciones de acceso a electricidad confiable.



Figura 6. Sistema Fotovoltaico Híbrido de la Clínica de Salud del Desemboque de los Seris.

5. CONCLUSIONES

Como resultado de las gestiones realizadas, se obtuvo la donación de un sistema fotovoltaico híbrido con una capacidad instalada de 8.25 kWp, destinado a beneficiar directamente a la comunidad Seri. Este sistema combina generación solar con almacenamiento en baterías y además una planta de emergencia, lo que permite garantizar el suministro eléctrico incluso en caso de interrupciones en la red, asegurando así la continuidad de los servicios médicos y la conservación de medicamentos que requieren refrigeración.

Paralelamente, se implementaron estrategias para el diseño y ejecución de proyectos con participación interinstitucional, en las que se integraron diversos actores del sector público, privado y de la propia comunidad. Este enfoque colaborativo permitió alinear recursos, capacidades técnicas y objetivos sociales, potenciando el impacto y la sostenibilidad del proyecto.

Con la instalación del sistema, se logró solventar de manera efectiva la problemática energética que enfrentaba la clínica, reduciendo su dependencia de la red eléctrica y mejorando la calidad y confiabilidad del servicio, en beneficio de la salud y bienestar de la población.

REFERENCIAS

[1] Gobierno del Estado de Sonora. (2021). Plan Estatal de Desarrollo 2021-2027. https://www.sonora.gob.mx/ped.

[2] Secretaria de Energía. (2016). Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad menor a 0.5 MW. Diario Oficial de la Federación.

SESIONES POSTER

ID	TÍTULO	PONENTE
2155	Análisis y diseño térmico de un módulo fotovoltaico de alta concentración	Luis Altamirano Barbosa
2154	Perovskitas sobre silicio: la fórmula para las celdas solares del futuro	Francisco Cancino Gordillo
2091	Aprovechamiento del mezquite y la energía solar para la obtención sostenible de biocombustibles sólidos en las zonas serranas del estado de Sonora	Emily Lara Montana

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS Y DISEÑO TÉRMICO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO DE ALTA CONCENTRACIÓN.

Luis Alonso Altamirano-Barbosa e Iván Salgado-Transito
Centro de Investigaciones en Óptica AC. Pról. Constitución 607 . Reserva de Loma Bonita.
CP. 20220. Aguascalientes, Ags. México. laltamirano@cio.mx

RESUMEN

La creciente necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar emisiones de CO_2 ha impulsado el desarrollo de sistemas fotovoltaicos de alta concentración (HCPV). Estos sistemas, que pueden alcanzar factores de concentración entre 300 y 2000 soles, permiten eficiencias cercanas al 46% mediante celdas de multiunión; sin embargo, la elevada radiación concentrada genera un exceso de calor que disminuye la eficiencia y la vida útil de las celdas, lo que hace indispensable un sistema de enfriamiento adecuado.

En este trabajo se presenta el diseño y análisis térmico de un módulo HCPV de 9 lentes de Fresnel (280 × 280 mm, distancia focal de 330 mm), integrado con celdas CPV de 10 mm y disipadores de calor de aluminio aleación 5052. La geometría del disipador se diseñó no solo para su capacidad de conducción térmica, sino también para facilitar la orientación, reemplazo y mantenimiento dentro del módulo. El análisis numérico se desarrolló en ANSYS Fluent 2025 R1 utilizando un modelo tridimensional en régimen estacionario, con turbulencia k-ε realizable y tratamiento de pared "Enhanced Wall Treatment", bajo condiciones de irradiancia de 600, 800 y 1000 W/m², velocidad de viento de 0.5 a 7.77 m/s y temperatura ambiente de 28 °C.

Los resultados muestran que la temperatura máxima de la celda depende directamente de la irradiancia y de la velocidad del aire. Para irradiancias elevadas (≥ 800 W/m²) y baja velocidad de viento (0.5 m/s), la temperatura de la celda supera los 120 °C, sobrepasando el límite operativo de 100 °C. En contraste, con velocidades superiores a 5 m/s, la disipación térmica mantiene la celda por debajo de dicho umbral, garantizando su funcionamiento seguro. Estos hallazgos confirman la efectividad del enfriamiento convectivo natural y la importancia del diseño optimizado del disipador en sistemas HCPV.

ABSTRACT

The growing demand to reduce fossil fuel dependence and mitigate CO_2 emissions has driven the development of high-concentration photovoltaic (HCPV) systems. These systems, which operate at concentration factors between 300 and 2000 suns, can achieve efficiencies close to 46% using multi-junction cells. However, the concentrated radiation produces excessive heat that reduces both efficiency and lifespan of the photovoltaic cells, making efficient thermal management essential.

This study presents the design and thermal analysis of an HCPV module consisting of nine Fresnel lenses (280 × 280 mm, 330 mm focal length) integrated with 10 mm CPV cells and aluminum alloy 5052 heat sinks. The heat sink geometry was designed not only for effective thermal conduction but also to ensure easy orientation, replacement, and maintenance within the module. Numerical simulations were performed using ANSYS Fluent 2025 R1 with a three-dimensional steady-state model, employing the realizable k-ε turbulence model with Enhanced Wall Treatment. Operating conditions considered irradiances of 600, 800, and 1000 W/m², ambient temperature of 28 °C, and wind speeds ranging from 0.5 to 7.77 m/s.

Results show a strong correlation between maximum cell temperature, solar irradiance, and airflow velocity. Under high irradiance (≥ 800 W/m²) and low airflow conditions (0.5 m/s), cell temperatures exceeded 120 °C, surpassing the operational limit of 100 °C and compromising system reliability. In contrast, at wind speeds above 5 m/s, convective cooling was sufficient to maintain cell temperatures below the critical threshold, ensuring safe operation. These findings highlight the importance of optimized passive cooling design and airflow conditions for the reliable and efficient operation of HCPV systems.

PALABRAS CLAVE

Dinámica de fluidos computacional, Disipador de calor, Sistema fotovoltaico de concentración

INTRODUCCIÓN

La búsqueda por reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el sector energético, así como mitigar las emisiones de CO_2 han propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías alternativas para la generación de electricidad. Dentro de ellas las tecnologías solares se han posicionado como las más factibles debido a la abundancia del recurso solar. Las tecnologías de aprovechamiento del recurso solar se pueden clasificar en tres distintos sistemas, el sistema fotovoltaico (PV) del cual se obtiene energía eléctrica como producto, el sistema térmico fotovoltaico (PV/T) del que se obtiene energía eléctrica y térmica, y el sistema de captación térmica (TC) del cual se obtiene solo energía térmica. En los sistemas fotovoltaicos una tecnología que destaca por las altas eficiencias de conversión son los sistemas fotovoltaicos de alta concentración (HCPV). A pesar de que los sistemas HCPV ya se estudiado extensivamente en la literatura, aun es necesario implementar mejoras que permitan obtener un sistema más eficiente, fiables y de bajo costo [5, 7,13, 14]. Una de las diferencias de los sistemas HCPV respecto a los sistemas fotovoltaicos convencionales es la necesidad de contar con sistemas de seguimiento solar. Los sistemas de seguimiento se pueden clasificar desde el punto de vista mecánico basándose en el número de ejes móviles disponibles siendo estos de uno o dos ejes, los cuales pueden ser un seguidor sencillo de un eje horizontal o vertical, o ser seguidores de dos ejes ya sea de dos ejes bastidor estructural o de dos ejes sobre eje giratorio. Estos últimos son los más utilizados para sistemas de concentración solar, los cuales convencionalmente se agrupan en módulos que pueden estar formados desde un arreglo de lente, los cuales constan de una lente primaria de Fresnel, un elemento óptico secundario (SOE), una celda PV y un sistema de disipación de calor donde se integra la celda.

Usualmente los sistemas CPV se clasifican de acuerdo con su factor de concentración. Esta relación indica el número de veces que se concentra la luz solar y se le conoce como soles. Así, se definen tres sistemas [10]:

- Baja concentración (LCPV): 1 - 40 soles
- Mediana concentración (MCPV): 40 – 300 soles
- Alta concentración (HCPV): 300 – 2000 soles

No obstante, las altas concentraciones de radiación pueden convertirse en un desafío. Aunque las celdas de multiunión pueden alcanzar eficiencias cercanas al 46%, más de la mitad de la energía solar captada se transforma en calor. El aumento de la temperatura de operación afecta negativamente tanto la eficiencia de conversión como la vida útil de las celdas [2,3,6,9]. Por ello, resulta fundamental implementar un sistema de enfriamiento eficaz que mantenga la temperatura por debajo del valor recomendado [11, 12]. En los sistemas CPV, las soluciones de enfriamiento se clasifican en dos categorías: pasivas y activas.

El enfriamiento activo requiere un aporte de energía externa para disipar el calor, lo que implica que parte de la energía eléctrica generada se destina a mover el fluido de trabajo. En contraste, el enfriamiento pasivo ofrece beneficios como ausencia de consumo energético, menor costo y facilidad de instalación.

Aunque en la literatura se encuentran diversos estudios sobre el desarrollo de sus componentes y existen algunos prototipos, su número aún es escaso y muchos de ellos requieren un mayor mantenimiento [15].

En este trabajo se abordará el diseño y análisis térmico de un módulo de fotovoltaico de alta concentración con lentes de Fresnel, el cual constará de 9 lentes de 280*280mm y una distancia focal de 330mm. Se construirá utilizando perfil Bosch de aluminio aleación 6063, disipadores de calor para la celda CPV, lamina de policarbonato de 6mm, tornillería varia y sello de goma de silicona.

Además, se llevará a cabo un análisis de transferencia de calor enfocado en el mecanismo de convección natural. Diversas investigaciones han implementado modelos numéricos basados en dinámica de fluidos computacional (CFD) con el fin de predecir la distribución de temperatura en disipadores de calor, evaluando los parámetros que condicionan su desempeño térmico. Estos estudios numéricos no solo permiten determinar los campos de temperatura, sino que también ofrecen información detallada sobre los patrones de flujo, facilitando una comprensión profunda de los fenómenos involucrados en el modelo. Es a través de este método se pretende evaluar el desempeño térmico de la celda CPV expuesta a la irradiancia solar directa concentrada a través de la lente de Fresnel.

METODOLOGÍA

1. Especificaciones del sistema HCPV propuesto.

El diseño del módulo HCPV está integrado de las siguientes componentes, lentes de Fresnel de la marca Fresnel Factory modelo CP330-280, ángulo de enfoque:45.98°, distancia focal:330mm, espesor:5mm, factor de concentración:627.2, material: polimetilmetacrilato (PMMA), tamaño:280*280mm, transmitancia óptica:92%. La celda fotovoltaica es la CPV Reciver 10mm suncore PHOTOVOLTAICS, con área: 1.012cm^2, eficiencia nominal: 38.5% (con 1000 soles de concentración a 25°C), coeficiente térmico: 0.00047 K^-1, rango de operación: -40 a 100°C, temperatura máxima:150°C. La descripción de la geometría y de los componentes del módulo HCPV se presentan en la tabla I.

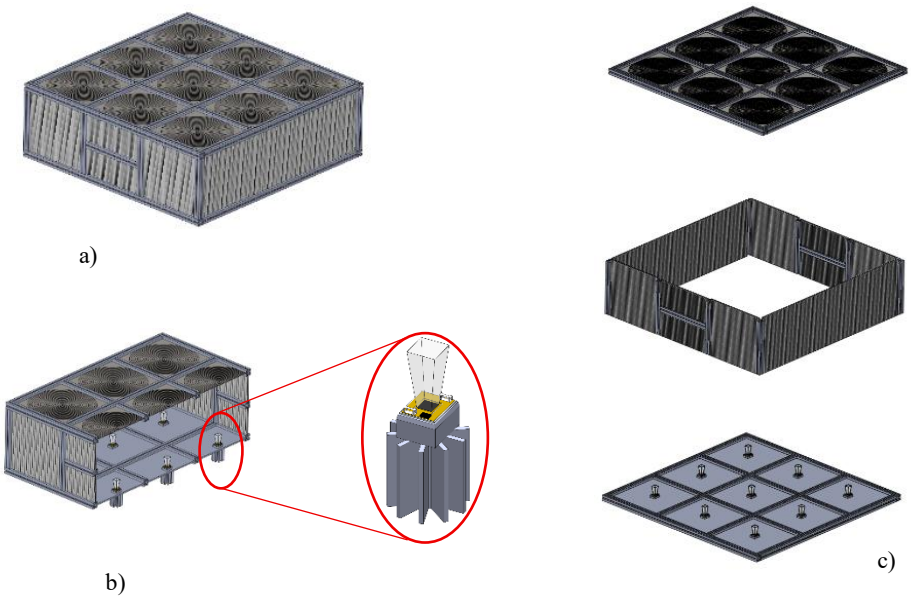


Figura 1. Componentes del módulo HCPV. a) Vista isométrica, b) Vista con corte, y c) ensamble

Tabla I. Geometría y disposición de los componentes.

Dimensiones Modulo HCPV:
• **90.17cm Largo** • **90.17cmm Ancho** • **35.5 cm Alto**
Peso aproximado total del módulo HCPV:
• **Masa = 20.42 Kg.** • **Volumen = 12706.00 cm^3**
Dimensiones del disipador de calor:
• **Ancho de aleta: 3 mm.** • **Altitud de aleta: 50 mm.** • **Longitud de aleta: 17.67 mm.** • **Diámetro cilindro: 15 mm.** • **Base de bloque celda CPV: 26.61 mm.** • **Alto de bloque de celda CPV: 31.61** • **Alto base de celda CPV: 15.7 mm.**

En la Figura 1, se muestran de manera integrada los distintos componentes que conformarán el diseño del módulo HCPV. En ellas se aprecia la disposición de las 9 celdas fotovoltaicas junto con sus respectivos lentes de concentración y los disipadores de calor asignados a cada una, evidenciando la relación entre estos elementos y su papel dentro del desarrollo del sistema.

La Figura 2 a, se muestra una representación gráfica de la geometría de la celda CPV a evaluar. La celda CPV fue modelada tomando como base CPV Reciver 10 mm suncore PHOTOVOLTAICS. Para este modelo, la celda CPV fue dividida en cuatro partes de distintos materiales tomando como base el trabajo propuesto por Zaghoul et al. [16]. La geometría y diseño del disipador de calor se definieron considerando no solo su capacidad térmica, sino también criterios de funcionalidad dentro del módulo HCPV (Figura 2b). En este sentido, la configuración adoptada facilita que el componente mantenga una orientación adecuada sin requerir ajustes complejos, al mismo tiempo que permite un proceso de reemplazo y mantenimiento ágil. Esta integración asegura que la operación del sistema no se vea comprometida y que las intervenciones técnicas puedan realizarse de manera eficiente y con mínima afectación en el desempeño global del módulo. Se considero de

aluminio aleación 5052, seleccionada en función de su disponibilidad industrial y de sus propiedades favorables de conductividad térmica, bajo peso y resistencia mecánica.



Figura 2. a) Representación de la distribución de capas de la celda CPV, b) Disipador celda CPV.

2. Modelo de simulación

El modelo de transferencia de calor se implementó en el software ANSYS Fluent 2025 R1 en su versión de estudiante. Para reducir la cantidad de recursos computacionales se hicieron las siguientes suposiciones: Condiciones de operación: irradiancias: 600 W/m^2, 800 W/m^2 y 1000 W/m^2, temperatura ambiente:28°C, velocidad del viento: 0.5 m/s, 1.5 m/s y 7.77m/s.

- Se utilizo el modelo de turbulencia k-ε realizable con tratamiento de pared "Enhanced Wall Treatment".
- Se utilizó el modelo de Boussinesq.
- Las propiedades del aire se mantuvieron constantes a excepción de su densidad.
- La radiación solar y las pérdidas por emisión de radiación no se consideraron.

Para analizar el comportamiento del aire se configuro una zona tridimensional que rodea la región solida de 82.85 x 81.32 x 98.58 mm como se aprecia en la figura 3a.

El dominio completo fue discretizado alcanzando un total de 834,634 celdas, 2,109,368 caras y 188,714 nodos, valores que reflejan un nivel de refinamiento adecuado para representar con detalle las regiones sólidas y fluidas del modelo (Figura 3b y 3c).

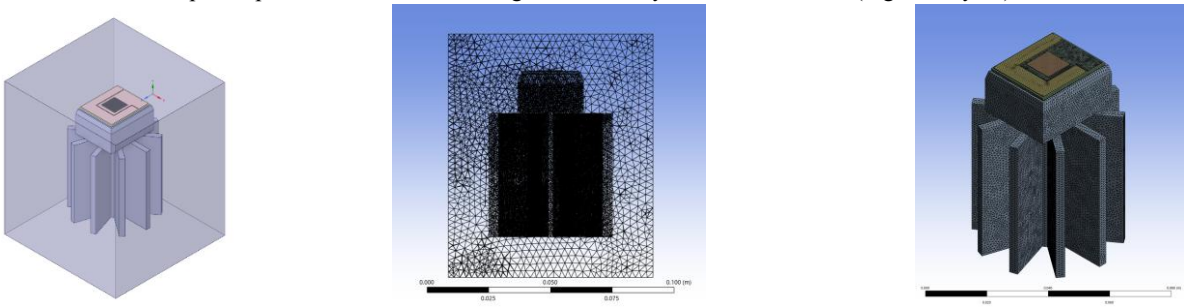


Figura 3. a) Zona delimitada para el análisis del comportamiento del aire. b) Configuración de la malla región fluida. c) Configuración de la malla región sólida.

La calidad de la malla se evaluó considerando el criterio de ortogonalidad mínima y la relación de aspecto máxima en cada zona [1]. Los resultados muestran valores de ortogonalidad entre 0.17 y 1.0, lo que indica que, aunque existen regiones con elementos cercanos al límite inferior aceptable, en general la malla se mantiene en un rango estable para el cálculo numérico. En cuanto a la relación de aspecto, los valores oscilaron entre 1.79 y 19.19, dentro del rango considerado aceptable en simulaciones CFD. De manera global, estos parámetros permiten se pueda clasificar la malla como adecuada.

Zona	Densidad (kg/m^3)	Calor específico (J/kg*K)	Conductividad térmica (W/m*K)
Celda	5323	310	60
Cobre	8978	381	387.6
Cerámica	3700	880	20
Pasta térmica	4000	800	10
Disipador de calor	2680	880	138

Tabla II. Propiedades del modelo físico del disipador de calor y la celda.

3. Modelado térmico

El modelo de simulación se configuró en tres dimensiones y en régimen estacionario, empleando el modelo de turbulencia k-ε realizable con tratamiento de pared "Enhanced Wall Treatment", lo cual permite representar adecuadamente el comportamiento del flujo tanto en regiones cercanas a la pared como en el dominio fluido. Se definieron las propiedades térmicas y de transporte de los materiales constitutivos del sistema (Tabla II), asignando a la celda fotovoltaica una fuente volumétrica de calor representativa de la radiación concentrada a diversos DNI (600, 800 y 1000) [4, 8]. Las condiciones de frontera se establecieron considerando un flujo de aire de entrada con una velocidad de 0.5, 1.5 y 7.77 m/s, temperatura de 28°C, y una salida a presión ambiente. El acoplamiento presión–velocidad se resolvió mediante el esquema "SIMPLE", utilizando "PRESTO!" para el cálculo de presión y esquemas "Second Order Upwind" en las ecuaciones de cantidad de movimiento, energía y turbulencia, con el fin de mejorar la precisión espacial de la solución.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos (Figura 7) muestran una clara dependencia de la temperatura máxima de la celda fotovoltaica con la irradiancia solar directa (DNI) y la velocidad del flujo de aire. Para una temperatura ambiente de 28 °C, se observó que al incrementar el DNI de 600 a 1000 W/m² la temperatura de la celda aumenta significativamente, alcanzando valores críticos superiores a 120 °C en condiciones de baja velocidad (0.5 m/s). El efecto del enfriamiento convectivo se hace evidente al incrementar la velocidad del aire, reduciendo la temperatura de la celda en todos los casos. Por ejemplo, para un DNI de 1000 W/m², la temperatura disminuyó de 120.31 °C a 87.7 °C al aumentar la velocidad de 0.5 a 7.77 m/s. Estos resultados indican que bajo condiciones de irradiancia elevada (≥ 800 W/m²) y baja velocidad de viento, la celda CPV supera su límite de operación de 100 °C, comprometiendo su confiabilidad. En contraste, a velocidades de viento superiores a 5 m/s, la disipación térmica es suficiente para mantener la celda por debajo de dicho límite, lo que subraya la importancia del enfriamiento forzado en la operación segura de sistemas CPV.

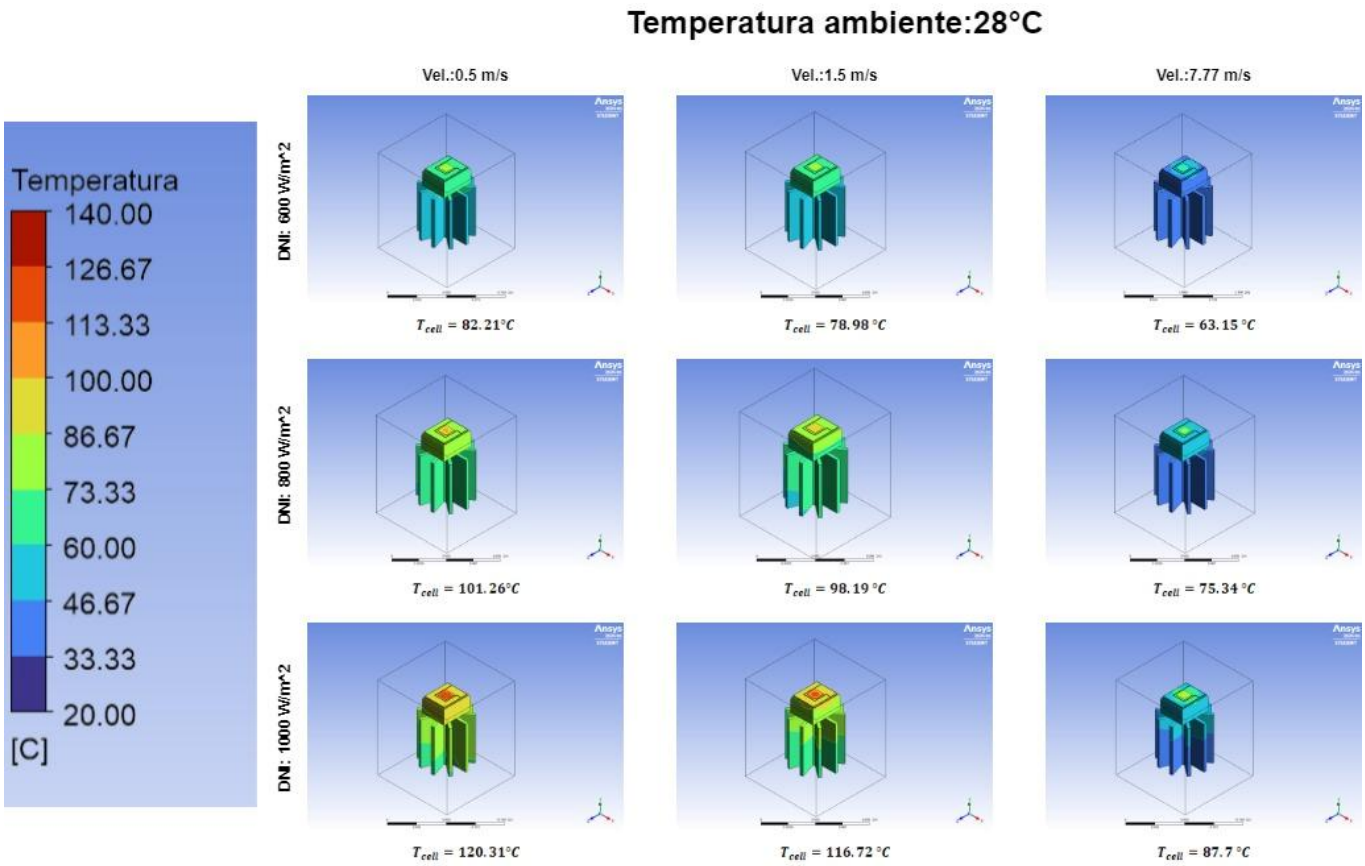


Figura 7. Comparativa temperatura

CONCLUSIONES

El modelo numérico configurado con el esquema k-ε realizable y tratamiento de pared "Enhanced Wall Treatment" alcanzó una convergencia estable en las 9 simulaciones, cumpliendo los criterios residuales establecidos. Esto confirma la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos para el análisis de transferencia de calor en la celda CPV y su disipador.

Los resultados demuestran que la temperatura de la celda CPV aumenta con la irradiancia y se mantiene por encima de 100 °C en condiciones de baja velocidad de viento, lo que compromete su operación. Sin embargo, con velocidades de aire superiores a 5 m/s la disipación térmica es suficiente para garantizar un funcionamiento seguro del sistema.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación ha brindado en la beca para los estudios de maestría.

REFERENCIAS

[1] *ANSYS Meshing Users Guide*. (2025, enero). https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/pdf/ANSYS_Meshing_Users_Guide.pdf

[2] Boucetta, C., Chibani, A., Hebbir, N., Merouani, S., Haddad, M. A. N., & Badji, R. (2024). Thermal Performance and Flash Point Analyses of concentrator photovoltaic (CPV) system using multiple types of PCMs and various panel inclination angles under the effect of a constant heat flux. *Journal Of Engineering Research*. https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.09.018

[3] Chou, T., Shih, Z., Hong, H., Han, C., & Chiang, K. (2012). Thermal Performance Assessment and Validation of High-Concentration Photovoltaic Solar Cell Module. *IEEE Transactions On Components Packaging And Manufacturing Technology*, *2*(4), 578-586. https://doi.org/10.1109/tcpmt.2011.2181165

[4] Chow, S., Valdivia, C. E., Wheeldon, J. F., Ares, R., Arenas, O. J., Aimez, V., McMeekin, D., Fafard, S., & Hinzer, K. (2010). Thermal test and simulation of alumina receiver with high efficiency multi-junction solar cell for concentrator systems. *Proceedings Of SPIE, The International Society For Optical Engineering/Proceedings Of SPIE*, *7750*, 775035. https://doi.org/10.1117/12.872894

[5] Dogan, M., Sivrioglu, M., & Yılmaz, O. (2013a). Numerical analysis of natural convection and radiation heat transfer from various shaped thin fin-arrays placed on a horizontal plate-a conjugate analysis. *Energy Conversion And Management*, *77*, 78-88. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.021

[6] Flores-Hernández, D., Palomino-Resendiz, S., Jost, N., & Luviano-Juárez, A. (2024). Numerical energy evaluation of an optimized hybrid energy harvesting system (CPV-TEG) considering the effects of solar tracking. *Applied Thermal Engineering*, *247*, 123071. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123071

[7] Gilmore, N., Timchenko, V., & Menictas, C. (2018). Microchannel cooling of concentrator photovoltaics: A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, *90*, 1041-1059. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.010

[8] Luo, Q., Li, P., Cai, L., Chen, X., Yan, H., Zhu, H., Zhai, P., Li, P., & Zhang, Q. (2019). Experimental investigation on the heat dissipation performance of flared-fin heat sinks for concentration photovoltaic modules. *Applied Thermal Engineering*, *157*, 113666.https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.076

[9] Pérez, M. V. (2014). *New concepts and techniques for the development of high-efficiency concentrating photovoltaic modules*. https://doi.org/10.20868/upm.thesis.30443

[10] Pérez-Higueras, P., Muñoz, E., Almonacid, G., & Vidal, P. (2011). High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, *15*(4), 1810-1815. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.046

[11] Radwan, A., Emam, M., & Ahmed, M. (2017). Comparative Study of Active and Passive Cooling Techniques for Concentrated Photovoltaic Systems. En *Elsevier eBooks* (pp. 475-505). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813734-5.00027-5

[12] Ritou, A., Voarino, P., & Raccurt, O. (2018). Does micro-scaling of CPV modules improve efficiency? A cell-to-module performance analysis. *Solar Energy*, *173*, 789-803. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.074

[13] Sato, D., Lee, K., Araki, K., Yamaguchi, M., & Yamada, N. (2018). Design and Evaluation of a III–V/Si Partial CPV Module for Maximization of Power Generation per Unit Module Area. *IEEE Journal Of Photovoltaics*, *9*(1), 147-153. https://doi.org/10.1109/jphotov.2018.2877015

[14] Theristis, M., & O'Donovan, T. S. (2015). Electrical-thermal analysis of III–V triple-junction solar cells under variable spectra and ambient temperatures. *Solar Energy*, *118*, 533-546. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.003

[15] Wiesenfarth, M., Anton, I., & Bett, A. W. (2018). Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies. *Applied Physics Reviews*, *5*(4). https://doi.org/10.1063/1.5046752

[16] Zaghloul, H., Emam, M., Abdelrahman, M., & Rabbo, M. A. (2021). Optimization and parametric analysis of a multi-junction high-concentrator PV cell combined with a straight fins heat sink. *Energy Conversion And Management*, *243*, 114382. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114382

2 Este es un ejemplo de pie de página.

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

PEROVSKITAS SOBRE SILICIO: LA FÓRMULA PARA LAS CELDAS SOLARES DEL FUTURO

Francisco E. Cancino-Gordillo, Carlos F. Arias-Ramos, Ricardo A. Arellano-Bahena, Paola G. Abrego-Martínez y Hailin Z. Hu
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México, **cancinogordillof@outlook.com.**

Asiel N. Corpus-Mendoza
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Av. Insurgentes Sur 1582 Col. Crédito Constructor, Demarcación Territorial, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México.

RESUMEN

La tecnología solar fotovoltaica basada en silicio se encuentra cerca de su límite teórico de eficiencia en la conversión de luz solar a energía eléctrica. Para superar este límite surgió las celdas solares tipo tándem perovskita-silicio como una solución prometedora, debido a que combina una celda de silicio con una celda de perovskita. Esta configuración permite aprovechar mejor el espectro solar, donde la celda de perovskita absorbe fotones de alta energía y la celda de silicio los de menor energía, logrando así superar sus récords de eficiencia individuales. Sin embargo, para lograr una implementación en las celdas solares tipo tándem es importante solucionar dos retos cruciales de la celda solar de perovskita que son la estabilidad ambiental y la adecuación óptica para aprovechar la mayor cantidad de luz sin intervenir con el proceso de la celda de silicio. En este trabajo se presenta el desarrollo y caracterización de películas y celdas solares de perovskita híbrida mixta $(FAPbI_3)_{1-x}(MAPbBr_3)_x$, mejor conocida como FAMA, fabricadas en condiciones ambientales. El estudio sistemático demostró el impacto que tiene al incrementar la cantidad de $MAPbBr_3$ sobre las propiedades ópticas con la finalidad de aumentar su brecha de energía y obtener perovskitas semitransparentes adecuadas para su integración en las celdas solares tipo tándem. Además, se fabricó celdas solares de perovskita con una eficiencia del ~13% para una fracción molar del 30 % de $MAPbBr_3$, con un aumento progresivo en el voltaje a circuito abierto. Estos resultados revelan el papel clave que tiene la ingeniería composicional para fabricar celdas solares de perovskitas semitransparentes y con propiedades electrónicas adecuadas para su integración en celdas solares.

ABSTRACT

Silicon-based photovoltaic solar technology is near its theoretical efficiency limit for converting sunlight into electrical energy. To overcome this limit, tandem perovskite-silicon solar cells have emerged as a promising solution, as they combine a silicon cell with a perovskite cell. This configuration allows for better utilization of the solar spectrum, where the perovskite cell absorbs high-energy photons and the silicon cell absorbs lower-energy ones, thus exceeding their individual efficiency records. However, to implement tandem solar cells, it is important to address two crucial challenges: environmental stability and optical adaptation to maximize light utilization without interfering with the silicon cell process. This work presents the development and characterization of hybrid mixed perovskite films and solar cells $(FAPbI_3)_{1-x}(MAPbBr_3)_x$, known as FAMA, manufactured under ambient conditions. Systematic study demonstrated the impact of increasing the amount of MAPbBr3 on the optical properties to increase its energy gap and achieve semi-transparent perovskites suitable for integration into tandem solar cells. Additionally, perovskite solar cells were manufactured with an efficiency of ~13% for a 30% molar fraction of MAPbBr3, with a progressive increase in open-circuit voltage. These results reveal the key role of compositional engineering in manufacturing semi-transparent perovskite solar cells with suitable electronic properties for integration into solar cells.

Palabras claves: Celdas de perovskita, condiciones ambientales, análisis óptico, celdas tándem

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la energía solar fotovoltaica ha presentado un crecimiento significativo en el mundo impulsando la producción de electricidad y reafirmando su liderazgo en la revolución de energías renovables con un 5.5 % de participación en la matriz eléctrica global de 2023 (“Global Electricity Review 2024”, s/f). Este crecimiento se ha logrado gracias a celdas solares que utilizan materiales semiconductores para absorber la energía proveniente de la luz solar y convertirla directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. En la actualidad, el mercado global es dominado por la tecnología de celdas solares de silicio cristalino, debido a su confiabilidad y madurez tecnológica. Sin embargo, las celdas de silicio presentan limitaciones en el contexto de su eficiencia, costo de producción y facilidad de fabricación. La principal limitación que tienen las celdas solares de silicio con respecto a la eficiencia es que teóricamente solo pueden llegar a alcanzar un valor de 29 % debido a que la energía restante se pierde en forma de calor por efectos físicos del material. Por otra parte, el costo de producción se considera elevado cuando se requiere una celda solar de alta eficiencia por qué conlleva un proceso de extracción, purificación y fabricación, que lo hace inaccesible para países en vías de desarrollo. Estas limitaciones han motivado a la comunidad científica a desarrollar soluciones que no solo superen eficiencias teóricas, sino a también usar fabricaciones

menos complejas para tener un costo de producción más accesible. En este contexto, la tecnología emergente de las celdas solares de perovskita es candidata prometedora para solucionar las limitantes que presentan las celdas de silicio. No obstante, al ser una tecnología emergente aun presenta problemas con la estabilidad del material o no tener la suficiente madurez tecnológica. Entonces se busca que las celdas solares de perovskita sea una tecnología complementaria que permita superar los límites establecidos por la tradicional celda solar de silicio cristalino (Raza & Ahmad, 2022). Por tal razón, las celdas solares tipo tándem de perovskita-silicio pueden revolucionar el mercado energético mundial en un futuro cercano.

La nueva tecnología de celdas solares tándem usa dos tecnologías y adapta las mejores cualidades de las celdas solares de silicio y las celdas solares perovskita para mejorar el producto final. Al combinar ambas tecnologías, la cobertura del espectro solar se extiende permitiendo aumentar la eficiencia de conversión energética (ECE) más allá de lo que cada celda puede lograr por separado (Figura 1a). En general, las celdas solares tipo tándem tiene una estructura de ensamble donde la sub celda con un mayor valor de brecha de energía se encuentra en la parte superior para absorber los fotones de alta energía y la sub celda con menor brecha de energía se encuentra en la parte inferior para absorber los fotones de baja energía que son transmitidos a través de la celda superior (Raza & Ahmad, 2022). Este proceso permite que la celda solar tipo tándem aproveche más fotones que proviene del espectro solar. En la Figura 1b se muestran las configuraciones que existen para las celdas solares tipo tándem, entre las cuales, la configuración de 4T presenta menos complicaciones físicas que las otras como ajustar la interfaz entre las celdas. Esta innovación permitió alcanzar un récord mundial de eficiencia del 33.9 %, según el último informe de certificación del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) (Xu et al., 2020; Yang et al., 2021).

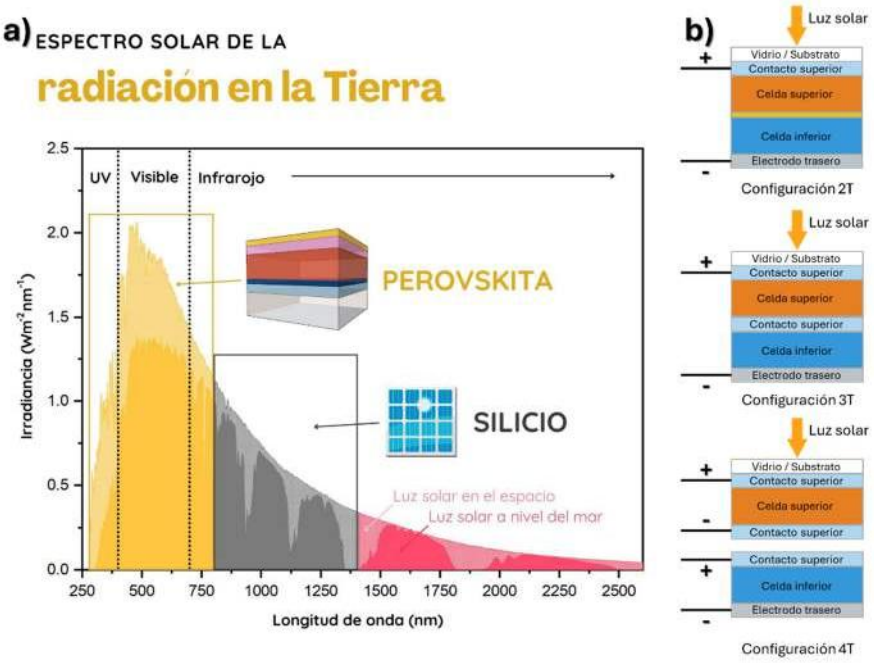


Figura 1: Espectro solar completo con los rangos de absorción de cada celda (a) y las configuraciones para celdas solares de perovskita tipo tándem (b).

Aunque las celdas solares tándem de perovskita-silicio tienen un gran potencial, todavía hay algunos desafíos que deben superarse antes de que puedan ser ampliamente explotadas por el mercado global. Uno de los principales desafíos es adecuar las propiedades optoelectrónicas para permitir el funcionamiento de la celda de silicio, es decir, encontrar una celda de perovskita que permita el paso de los fotones de menor energía y que no pierda eficiencia o desempeño fotovoltaico en el proceso. Con ese contexto, la ingeniería composicional aplicada en las perovskita puede ser la mejor estrategia para abordar el problema. La ingeniería composicional incorpora una mezcla de cationes y aniones en la estructura cristalina de la perovskita para modificar las propiedades físicas, químicas y de transporte del material (J. Wang et al., 2022; Q. Wang et al., 2023). Entre todas las perovskita que surgen aplicando la ingeniería composicional, la perovskita mixta con formulación $(FAPbI_3)_{1-x}(MAPbBr_3)_x$, nombrada por su abreviación FAMA, tiene una mayor ECE con un valor aproximado de 25 %. Al modificar la composición química de la perovskita, el valor de la brecha de energía se modifica permitiendo tener un ajuste controlado del rango donde puede absorber y generar portadores (Helal Miah et al., 2024). Sin embargo, las celdas solares de perovskita FAMA presentan un desafío difícil de superar que es la fabricación en condiciones ambientales, ya que la perovskita presenta polimorfismo a temperatura ambiente donde una fase es fotoactiva (fase cubica o perovskita oscura) y otra no es fotoactiva (fase hexagonal o perovskita amarilla). Por lo tanto, la perovskita FAMA se fabrica estrictamente en condiciones controladas de atmosfera inerte (caja de guantes) (Tian et al., 2020; Yoo et al., 2021).

Por lo tanto, este estudio investiga la influencia que tiene variar la composición de la perovskita FAMA y como afecta en el desempeño fotovoltaico en las celdas solares. Las películas y dispositivos se fabricaron completamente en aire a alta humedad relativa (> 40 %) sin ningún aditivo y evitando el uso de ambientes controlados para la fabricación de dispositivos. Las celdas de perovskita FAMA presentaron una eficiencia de 13 % usando una composición de $(FAPbI_3)_{0.70}(MAPbBr_3)_{0.30}$ equivalente al 30 % de incorporación de $MAPbBr_3$.

METODOLOGÍA

Para la preparación de las películas de perovskita FAMA se usó el método de recubrimiento por centrifugación (*spin-coating*) para depositar una solución precursora de perovskita. La solución de la perovskita FAMA, se preparó a partir de las soluciones precursoras de $FAPbI_3$ y $MAPbBr_3$ disolviendo FAI (Lumtec) con PbI_2 (Lumtec) y MABr (Lumtec) con $PbBr_2$ (Sigma-Aldrich), respectivamente, en una mezcla de solventes de dimetilformamida (DMF, Sigma-Aldrich) y 2-N-Metil-Pirrolidona (NMP, Sigma-Aldrich) usando una concentración de 1.6 M bajo las condiciones del ambiente con una temperatura dentro del rango de 23 – 27 °C y una humedad relativa entre 40 a 65 %. Ambas soluciones se mantuvieron en agitación magnética durante 12 h para obtener una solución transparente. Subsecuentemente, las soluciones precursoras se mezclaron en una relación molar de1:9, 1:4, 3:7 y 1:1 para tener la solución de perovskita FAMA con diferente composición. Las muestras se etiquetaron como $FA_{0.9}MA_{0.1}$, $FA_{0.8}MA_{0.2}$, $FA_{0.7}MA_{0.3}$ y $FA_{0.5}MA_{0.5}$ para una composición nominal de $(FAPbI_3)_{0.9}(MAPbBr_3)_{0.1}$, $(FAPbI_3)_{0.8}(MAPbBr_3)_{0.2}$, $(FAPbI_3)_{0.7}(MAPbBr_3)_{0.3}$ y $(FAPbI_3)_{0.5}(MAPbBr_3)_{0.5}$, respectivamente. Las soluciones finales de cada composición se mantuvieron en agitación magnética durante 2 h en las mismas condiciones ambientales antes de realizar el procedimiento de depósito para la fabricación de películas.

Las condiciones de depósito que se usaron para fabricar las películas fueron una rotación de 5000 rpm durante 20 s. Todos los depósitos fueron asistidos por un lavado de anti-disolvente (acetato de etilo) a los 10 s de empezar el giro. Posteriormente las películas de perovskita se trataron térmicamente a 110 °C durante 5 min. Para el caso de la fabricación de las celdas solares se siguió el protocolo reportado para el procedimiento de lavado y fabricación de la capa transportadora de electrones y huecos (Arias-Ramos et al., 2020).

Las propiedades optoelectrónicas de las películas de perovskita se analizaron por medio del coeficiente de absorción (α) como se observa en la ecuación 1, el cual representa la capacidad que tiene el material de absorber la radiación electromagnética que se incide, en este caso, la luz del espectro solar. Esto involucra conocer la transmitancia (T) y reflectancia (R) de la película en función de la longitud de onda (λ) de la luz incidente, lo cual se realizó con un espectrofotómetro Shimadzu UV-1800 en el intervalo de longitud de onda de 300 a 1100 nm. Además, el espesor de cada película (d) se midió usando un perfilómetro superficial Ambios Technology XP-200.

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{d} ln\left[\frac{\sqrt{(1-R)^4+4T^2R^2}-(1-R)^2}{2TR^2}\right] \quad (1)$$

El valor de la brecha de energía de las películas de perovskita se estimó usando el método de Tauc de banda directa como se muestra en la ecuación 2:

$$(\alpha h\nu)^2 = C(h\nu - E_g) \quad (2)$$

donde h es la constante de Planck, C es una constante y ν es la frecuencia del fotón. El valor de la brecha de energía (E_g) se determina extrapolando la región lineal de la curva obtenida con el eje horizontal. Las curvas de densidad de corriente bajo iluminación de las celdas solares fabricadas fueron medidas en el simulador solar Oriel LCS-100 bajo un estándar de iluminación AM 1.5G, con un adquisidor de datos Keithley 2400 SourceMeter. La intensidad de la luz fue calibrada con una celda de referencia de silicio (Newport) para alcanzar una potencia de iluminación de 100 mW/cm2. El área activa de iluminación de cada celda fue de 0.104 cm2 y estas fueron medidas con una dirección de barrido en reversa de 1.1 a -0.1 V.

RESULTADOS

El análisis óptico de las películas de perovskita, presentado en la Figura 2a, muestra una alta absorción en el espectro de luz visible, evidenciada por una baja transmitancia (T) y una reflectancia (R) casi nula. Para su aplicación en celdas solares tipo tándem, es crucial que la perovskita sea transparente a la luz que absorbe la celda solar de silicio (900 – 1200 nm), lo que exige una alta T y baja R en dicho rango (Raza & Ahmad, 2022). Para verificar esta condición, calculamos el coeficiente de absorción (α). Los espectros de la Figura 2b confirman que los valores de absorción son prácticamente nulos en la región de 700 – 950 nm, dependiendo de la composición de la perovskita FAMA. Además, se observa un claro desplazamiento del borde de absorción óptica a medida que se incrementa la proporción de $MAPbBr_3$ en la muestra.

Por otro lado, estimamos el valor de E_g mediante los gráficos de Tauc (Figura 2c), los cuales revelan un incremento de 1.7 eV a 1.81 eV. Este aumento se atribuye a modificaciones en la electronegatividad y los radios iónicos de los haluros que están en la red cristalina, que alteran las distancias y ángulos de los enlaces con el plomo (Pb). Como consecuencia, estos cambios estructurales afectan directamente los niveles de energía de las bandas de valencia y conducción (Helal Miah et al., 2024). Estas observaciones confirman que la incorporación de la perovskita $MAPbBr_3$ en la red cristalina huésped de $FAPbI_3$ se ha realizado con éxito.

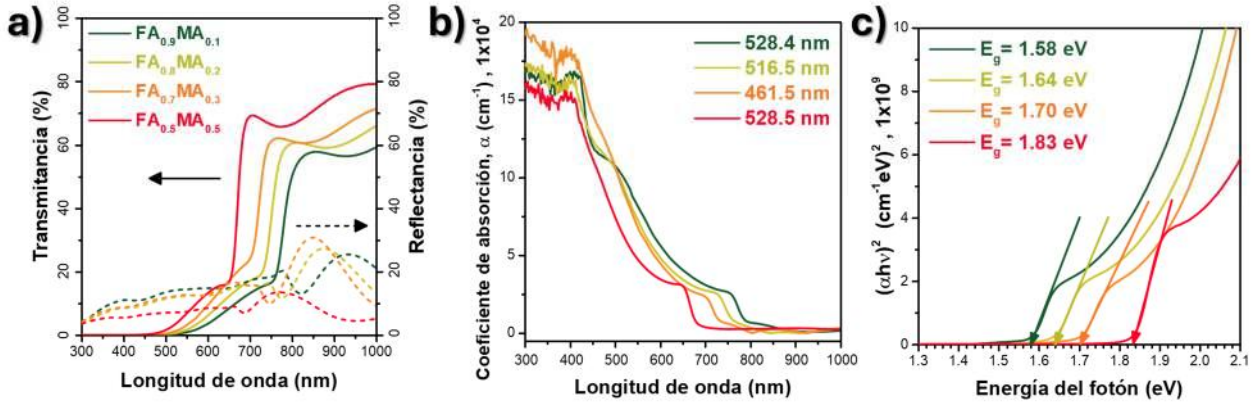


Figura 2: Espectros de transmitancia y reflectancia (a), curvas del coeficiente de absorción óptico (b) y gráficos de Tauc (c) de las películas de perovskita mixta con diferentes composiciones.

Para evaluar el rendimiento fotovoltaico, fabricamos celdas solares en condiciones ambientales con la arquitectura FTO/TiO_2-compacto/TiO_2-mesoporoso/Perovskita/Spiro-MeOTAD/Au. Los resultados estadísticos (Figura 3) muestran que incrementar el contenido de $MAPbBr_3$ al 30 % produce un aumento significativo tanto en el voltaje de circuito abierto (V_{OC}), de 967.2 mV a 1098.3 mV como en el factor de llenado (*FF*) de 53.57 % a 68.73%. Esta mejora puede deberse a mejorar la calidad del material absorbedor, es decir, mejorar la cristalinidad de la película de perovskita FAMA. En contraparte, la densidad de corriente a corto circuito (J_{SC}) disminuyó de 18.47 a 12.14 mA/cm^2, un efecto consistente con el aumento de la brecha de energía observado previamente. Una brecha de energía mayor reduce la ventana de absorción del espectro solar. Sin embargo, este efecto es deseable en una configuración tándem, ya que permite que los fotones de menor energía sean aprovechados por la subcelda de silicio. Gracias a las sustanciales mejoras en V_{OC} y *FF*, la eficiencia neta del dispositivo aumentó, alcanzando un máximo de 12.89 % con la composición $(FAPbI_3)_{0.7}(MAPbBr_3)_{0.3}$. Estos hallazgos subrayan la importancia de la ingeniería composicional para balancear el rendimiento y la absorción en dispositivos tándem.

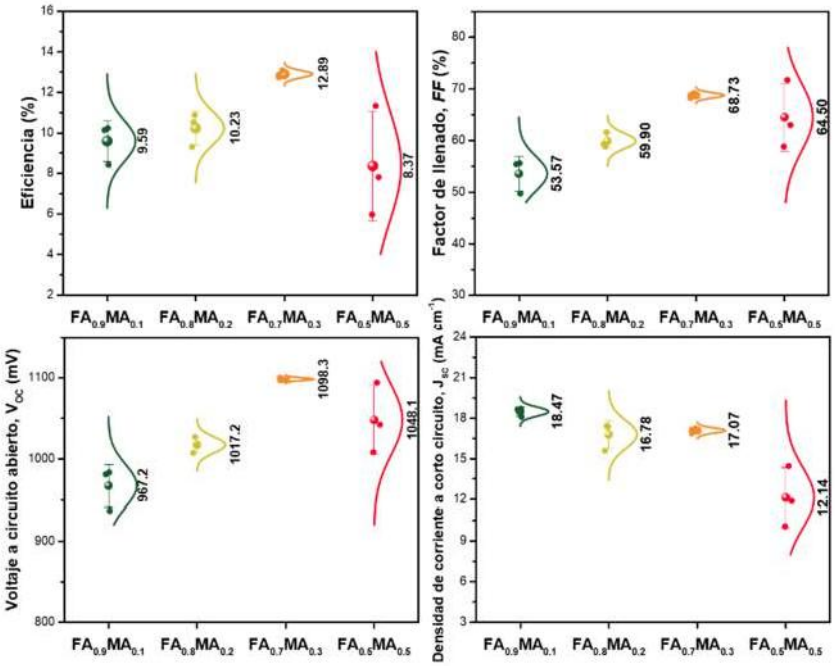


Figura 3: Estadística del rendimiento fotovoltaico de 3 dispositivos por composición de perovskita mixta FAMA

CONCLUSIONES

Se ha demostrado la fabricación exitosa de películas y celdas solares de perovskita mixta en condiciones ambientales, sin necesidad de atmósferas controladas o aditivos. El análisis óptico confirma que la incorporación de $MAPbBr_3$ incrementa la brecha de energía. Aunque la celda con mayor contenido de $MAPbBr_3$ no mostró la mayor eficiencia individual, su perfil de absorción es idóneo para aplicaciones tándem, permitiendo el paso de fotones de baja energía a una subcelda inferior. Este trabajo establece una ruta prometedora para la fabricación ambiental, reproducible y escalable de dispositivos de perovskita de nueva generación.

AGRADECIMIENTOS

FECG y CFAR agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México, por la beca postdoctoral (CVU # 784149 y # 709010), ANCM agradece el apoyo de SECIHTI bajo el programa de Investigadores por México, proyecto 7193. Se agradece el apoyo financiero de PAPIIT-UNAM (IA102625) y SECIHTI (CF-2023-I-725), así como la infraestructura proporcionada por Laboratorios Nacionales de SECIHTI (APOYOS LNC 2023-33 Innovación y Desarrollo de prototipos de módulos fotovoltaicos con celdas solares experimentales LIFYCS-IER-UNAM).

REFERENCIAS

Arias-Ramos, C. F., Kumar, Y., Abrego-Martínez, P. G., & Hu, H. (2020). Efficient and stable hybrid perovskite prepared at 60% relative humidity with a hydrophobic additive in anti-solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *215*, 110625. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110625

Global Electricity Review 2024. (s/f). *Ember*. Recuperado el 8 de agosto de 2025, de https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2024

Helal Miah, M., Uddin Khandaker, M., Bulu Rahman, M., Nur-E-Alam, M., & Aminul Islam, M. (2024). Band gap tuning of perovskite solar cells for enhancing the efficiency and stability: Issues and prospects. *RSC Advances*, *14*(23), 15876–15906. https://doi.org/10.1039/D4RA01640H

Raza, E., & Ahmad, Z. (2022). Review on two-terminal and four-terminal crystalline-silicon/perovskite tandem solar cells; progress, challenges, and future perspectives. *Energy Reports*, *8*, 5820–5851. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.028

Tian, L., Zhang, W., Huang, Y., Wen, F., Yu, H., Li, Y., Wang, Q., Peng, C., Ma, Z., Hu, T., Du, L., & Zhang, M. (2020). Effects of Annealing Time on Triple Cation Perovskite Films and Their Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *12*(26), 29344–29356. https://doi.org/10.1021/acsami.0c06558

Wang, J., Yuan, L., Luo, H., Duan, C., Zhou, B., Wen, Q., & Yan, K. (2022). Ambient air processed highly oriented perovskite solar cells with efficiency exceeding 23% via amorphous intermediate. *Chemical Engineering Journal*, *446*, 136968. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136968

Wang, Q., Tang, W., Chen, Y., Qiu, W., Wu, Y., & Peng, Q. (2023). Over 25% efficiency and stable bromine-free RbCsFAMA-based quadruple cation perovskite solar cells enabled by an aromatic zwitterion. *Journal of Materials Chemistry A*, *11*(3), 1170–1179. https://doi.org/10.1039/D2TA08878A

Xu, J., Boyd, C. C., Yu, Z. J., Palmstrom, A. F., Witter, D. J., Larson, B. W., France, R. M., Werner, J., Harvey, S. P., Wolf, E. J., Weigand, W., Manzoor, S., van Hest, M. F. A. M., Berry, J. J., Luther, J. M., Holman, Z. C., & McGehee, M. D. (2020). Triple-halide wide–band gap perovskites with suppressed phase segregation for efficient tandems. *Science*, *367*(6482), 1097–1104. https://doi.org/10.1126/science.aaz5074

Yang, D., Zhang, X., Hou, Y., Wang, K., Ye, T., Yoon, J., Wu, C., Sanghadasa, M., Liu, S. (Frank), & Priya, S. (2021). 28.3%-efficiency perovskite/silicon tandem solar cell by optimal transparent electrode for high efficient semitransparent top cell. *Nano Energy*, *84*, 105934. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105934

Yoo, J. J., Seo, G., Chua, M. R., Park, T. G., Lu, Y., Rotermund, F., Kim, Y.-K., Moon, C. S., Jeon, N. J., Correa-Baena, J.-P., Bulović, V., Shin, S. S., Bawendi, M. G., & Seo, J. (2021). Efficient perovskite solar cells via improved carrier management. *Nature*, *590*(7847), 587–593. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03285-w

XLIX SEMANA NACIONAL ENERGÍA SOLAR
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.
Conectando con el sol por un futuro sostenible
ANES
ISES International Solar Energy Society

APROVECHAMIENTO DEL MEZQUITE Y LA ENERGÍA SOLAR PARA LA OBTENCIÓN SOSTENIBLE DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS EN LAS ZONAS SERRANAS DEL ESTADO DE SONORA

EMILY LARA MONTANA, KARLA XIMENA CERVANTES PAEZ, VICTOR MANUEL MAYTORENA SORIA, RICARDO ARTURO PEREZ ENCISO Y RAMIRO ALBERTO CALLEJA VALDEZ.
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora (UNISON), Blvd. Rosales y Luis Encinas, Hermosillo, CP 83000, Sonora, México,
a222213777@unison.mx .

RESUMEN

Este trabajo evalúa la viabilidad técnica de producir biocombustibles sólidos mediante pirólisis solar de poda de mezquite **(**prosopis velutina**)**, recurso abundante en las zonas serranas del estado de Sonora. Se empleó un horno solar compuesto por un heliostato, un shooter y un concentrador parabólico que focaliza la radiación directa sobre un reactor. Se realizaron ensayos con dos configuraciones: el reactor A operó a 400 °C y el reactor B alcanzó hasta 750 °C, ambos con 50 g de biomasa previamente secada al sol y fragmentada (1 cm). El rendimiento de biochar fue mayor en el reactor A (34 %) frente al reactor B (28 %), y su eficiencia energética también fue superior (25 % frente a 6.8 %). Aunque el biochar del reactor B mostró un poder calorífico más alto, su elevado consumo energético (4.67 MJ) lo hizo menos viable. El análisis calorimétrico comparativo confirmó que el biochar tiene un poder calorífico significativamente mayor que la biomasa cruda. Además, se generaron subproductos líquidos y gaseosos como biopetróleo y biometano. Este estudio demuestra que la pirólisis solar es una alternativa tecnológica eficiente, ambientalmente limpia y con potencial impacto social en comunidades rurales. El uso del mezquite **(**prosopis velutina**)**, planta representativa del paisaje sonorense, no solo permite valorizar residuos forestales, sino también promover una transición energética justa mediante el aprovechamiento de fuentes renovables accesibles y culturalmente significativas.
Palabras clave: pirólisis solar, prosopis velutina, biochar, poda de mezquite, energía renovable, biocombustibles sólidos.

ABSTRACT

This work assesses the technical feasibility of producing solid biofuels through solar pyrolysis of mesquite (prosopis velutina) pruning, a plentiful resource in the mountainous regions of the state of Sonora. A solar furnace, composed of a heliostat, a radiation shutter, and a parabolic concentrator, focuses direct solar radiation onto a reactor. Tests were conducted with two configurations: reactor A operated at 400 °C, and reactor B reached temperatures of up to 750 °C, both using 50 g of sun-dried and fragmented biomass (1 cm). The biochar yield was higher in reactor A (34%) compared to reactor B (28%), and its energy efficiency was also superior (25% vs. 6.8%). Although biochar from reactor B showed a higher calorific value, its high energy consumption (4.67 MJ) made it less viable. Comparative calorimetric analysis confirmed that biochar has a significantly higher calorific value than raw biomass. Additionally, liquid and gaseous byproducts such as bio-oil and biomethane were generated. This study demonstrates that solar pyrolysis is an efficient, environmentally clean technological alternative with potential social impact in rural communities. The use of mesquite (prosopis velutina), a plant representative of the Sonoran landscape, not only valorizes forest residues but also promotes a just energy transition by harnessing accessible and culturally significant renewable resources.
Keywords: solar pyrolysis, prosopis velutina, biochar, mesquite pruning, renewable energy, solid biofuels.

INTRODUCCIÓN

Considerando la actual crisis climática, el crecimiento acelerado de la población y las persistentes condiciones de pobreza energética en México (las cuales se caracterizan por la falta de acceso a servicios energéticos adecuados debido a factores como la marginación social, el aislamiento geográfico, la baja calidad de las viviendas y las limitaciones económicas para costear energía), se vuelve urgente buscar soluciones sostenibles que reduzcan dicha desigualdad. En el caso particular de Sonora, las zonas serranas enfrentan además condiciones ambientales extremas, con inviernos fríos y veranos muy calurosos, lo que incrementa la demanda de energía para calefacción y refrigeración (Medina-Pérez, Quiroz-Jiménez & Tapia-Fernández, 2023). Estas necesidades, sumadas a la dispersión poblacional y a las limitaciones de infraestructura, acentúan la vulnerabilidad de sus comunidades rurales.

En este contexto, las energías renovables se presentan como una alternativa viable y accesible, capaz de impulsar una transición energética justa. Se eligió como materia prima al mezquite (prosopis velutina), una especie nativa que crece de forma natural en gran parte del estado de Sonora y cuya poda representa una biomasa abundante y con un alto poder calorífico.

Es importante aclarar que esta propuesta no implica la tala de árboles, sino el aprovechamiento de la poda del mezquite (prosopis velutina), una práctica común en el manejo de esta especie. Este residuo lignocelulósico, que frecuentemente se desaprovecha, puede transformarse mediante pirólisis solar en carbón vegetal con fines energéticos, particularmente para su uso en la cocción de alimentos, una necesidad básica en muchas comunidades rurales. Al utilizar la radiación solar como fuente de energía, esta tecnología representa una opción limpia, de bajo costo operativo y con gran potencial para mejorar las condiciones de vida en sectores marginados del estado de Sonora.

La pirólisis solar es un proceso termoquímico que descompone biomasa lignocelulósica (como los residuos agrícolas o forestales) mediante la aplicación de altas temperaturas (entre 400 y 1000 °C) en ausencia de oxígeno, utilizando como única fuente de energía la radiación solar concentrada. Para alcanzar dichas temperaturas, se emplean tecnologías de concentración solar (como platos parabólicos, sistemas de torre

central o canales cilindro-parabólicos) que aumentan la densidad del flujo radiativo (Castells, 2012, pp. 478-485). Este método permite convertir la biomasa en tres productos principales: bioaceite, biocarbón y gases no condensables, con aplicaciones energéticas y químicas. A diferencia de la pirólisis convencional, que generalmente recurre a electricidad o combustibles fósiles, la pirólisis solar elimina la necesidad de insumos energéticos no renovables, reduce hasta un 32,4 % las emisiones de CO_2, evita pérdidas de materia prima y produce biocombustibles con mayor valor calorífico. Por lo tanto, se trata de una alternativa más limpia, eficiente y sostenible para la valorización de residuos orgánicos.

METODOLOGÍA

Método experimental

En la Figura 1 se muestra un diagrama de los pasos seguidos en este estudio, desde la recolección y preparación de la biomasa hasta el análisis final de las muestras. La materia prima utilizada fue obtenida a partir de la poda de un ejemplar de mezquite (prosopis velutina) localizado en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Primeramente, se seleccionó un árbol adulto y se procedió a cortar ramas en trozos de aproximadamente 1 cm de longitud. Posteriormente, la biomasa fragmentada se colocó sobre una superficie metálica expuesta a radiación solar directa, con el objetivo de reducir su contenido de humedad superficial mediante secado natural. Este proceso se realizó durante un periodo continuo de 24 horas. Al finalizar el secado, se recolectó una muestra total de 100 gramos de biomasa para los ensayos experimentales.

Una vez concluido el secado solar, la muestra de 100 gramos de biomasa fue dividida en dos fracciones iguales de 50 gramos. Cada una de estas porciones se destinó a un reactor distinto, con el objetivo de evaluar el comportamiento térmico de la biomasa bajo diferentes condiciones de temperatura. La primera muestra fue introducida en el reactor A (400 °C) y la segunda en el reactor B (750 °C), en ensayos independientes.

Una vez obtenidas las muestras de carbón y conservada una fracción de biomasa cruda, ambas fueron enviadas a laboratorio para la determinación de su poder calorífico. Este análisis se realizó mediante un calorímetro de bomba de oxígeno, equipo que mide con alta precisión la energía liberada durante la combustión completa del material. Dicho parámetro es fundamental para evaluar el potencial energético de cada muestra y su viabilidad como combustible sólido renovable (Hernández-López, Morales-Rodríguez & García-Mendoza, 2014).

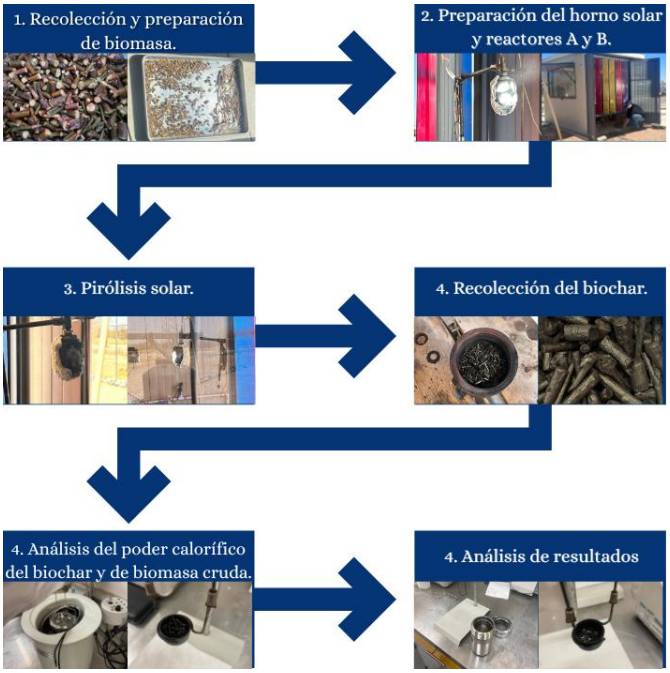
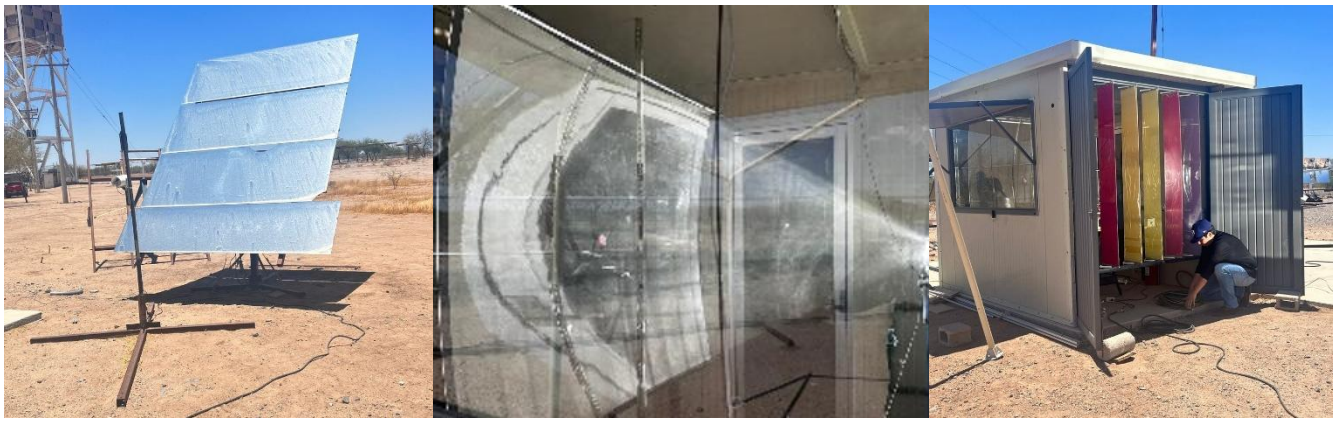


Figura 1. Diagrama de metodología empleada para la producción y evaluación del biochar de mezquite (prosopis velutina).

Los ensayos de pirólisis solar se llevaron a cabo utilizando un horno solar diseñado para concentrar la radiación directa mediante un sistema compuesto por tres elementos principales: (a) un heliostato motorizado con cámara de seguimiento solar, encargado de redirigir los rayos directos del sol en tiempo real hacia el concentrador, (b) un plato parabólico que focaliza la radiación solar en un punto específico, donde se coloca el reactor y (c) un sistema de cortinas regulables que permite modular la cantidad de radiación que ingresa al sistema, regulando la apertura del paso de luz, como se muestra en la Figura 2.



a) b) c)

Figura 2. Componentes del horno solar: a) Heliostato, b) Plato parabólico y c) Cortinas regulables.

La monitorización térmica se realizó mediante un sensor termopar instalado internamente en los reactores, esto permitió registrar continuamente la evolución de temperatura durante todo el proceso. En la fase de gasificación, observable en la Figura 3 a), los gases volátiles generados (principalmente biometano) fueron oxidados mediante combustión controlada para su conversión a dióxido de carbono (CO_2), reduciendo así su impacto ambiental. Posteriormente, durante la etapa de carbonización, se mantuvo un control para llegar a las temperaturas objetivo para ambos ensayos. Finalizado el proceso, los reactores se dejaron enfriar naturalmente antes de proceder a la extracción de los productos y subproductos: biochar sólido (Figura 3b) y biocombustible líquido (Figura 3c). El sistema de adquisición de datos conectado al termopar permitió documentar con precisión los perfiles térmicos característicos de cada etapa, proporcionando información clave para el análisis de los rendimientos obtenidos.



a) b) c)

Figura 3. Biocombustibles durante el proceso experimental: a) Quema de biometano, b) Biochar obtenido, c) Biocombustible líquido recuperado.

Modelos matemáticos

Para el análisis energético del presente trabajo, se discuten de manera elemental dos aspectos importantes. En primer lugar, se hace una predicción de la potencia solar suministrada ($\dot{E}_{sol}$) al reactor para el proceso de pirólisis, de acuerdo con la Ecuación (1). Posteriormente, se estima el rendimiento del biochar (Y_B) siguiendo la Ecuación (2). Estos cálculos permiten cuantificar tanto la energía disponible para el proceso como la fracción de masa útil obtenida tras la conversión térmica, estableciendo una base objetiva para evaluar la eficiencia global del sistema.

$$\dot{E_{sol}} = F \bullet I_b \bullet A_c \bullet (1 - S) \qquad 1) \qquad\qquad Y_B = \frac{m_B}{m_C} \qquad 2)$$

Donde: F es el factor horno, I_b es la radiación solar directa (DNI en W/m2), 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 biomasa cruda (g), respectivamente.

La eficiencia del proceso de pirólisis solar se calculó mediante la Ecuación (3) donde se muestra la relación entre la energía contenida en el carbón vegetal producido (salida deseada) y la energía total suministrada (biomasa cruda + energía solar suministrada), conforme a los principios de balances energéticos estándar (Cengel & Boles, 2015).

$$Eficiencia = \frac{Salida\ deseada}{Entrada\ requerida} = \frac{m_B \bullet PC_B}{(m_C * PC_C) + E_{sol,total}} \quad (3)$$

Donde: m_B es la masa del biochar y m_C es la masa de la biomasa cruda (kg) , PC_B es el poder calorífico del biochar y PC_C es el poder calorífico de la biomasa cruda(MJ/kg), y finalmente $E_{sol,total}$ corresponde a energía solar total suministrada durante el experimento.

Finalmente, se utilizó la Ecuación (4) conocida como Energía Especifica, esta última cuantifica la energía (MJ) requerida para producir una unidad de masa (kg) de biochar, siendo un indicador clave de la eficiencia del sistema.

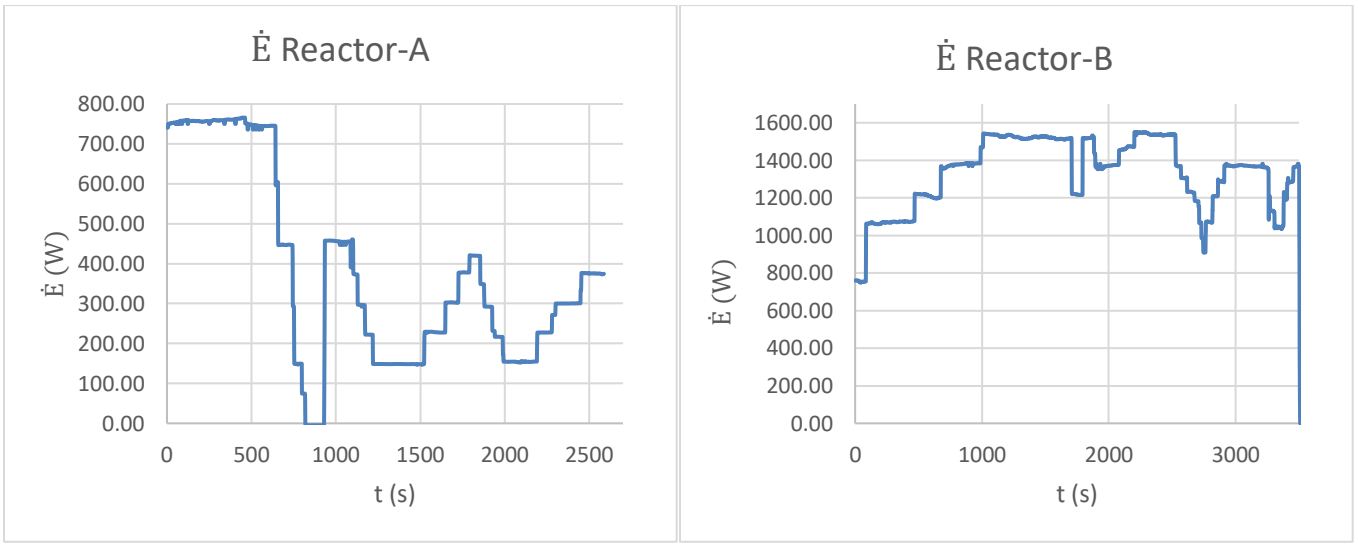
$$EE = \frac{E_{sol}}{m_B} \quad (4)$$

Donde: E_{sol} representa la energía solar total suministrada durante el experimento, y m_B es la masa del biochar obtenido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pirólisis solar y producción de carbón vegetal (biochar)

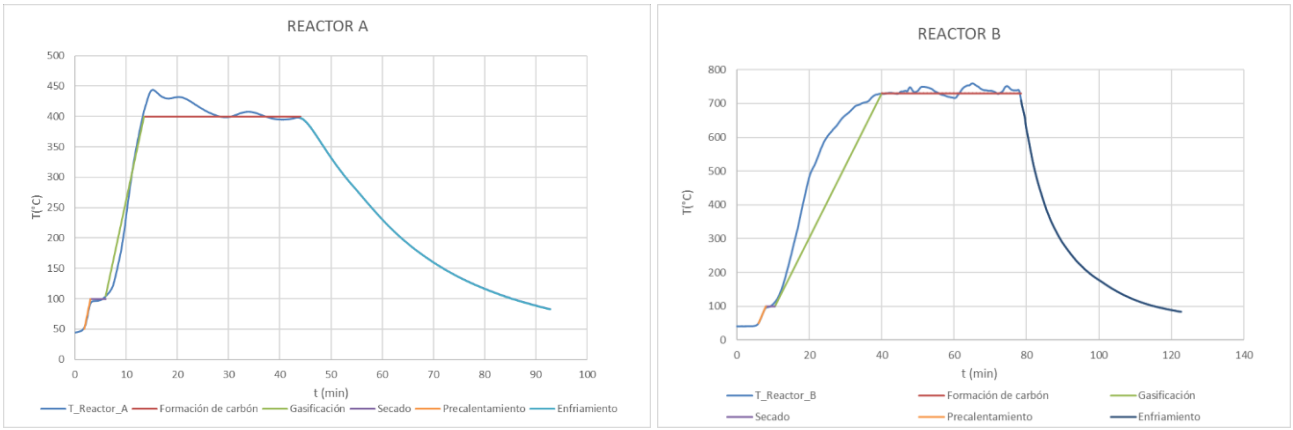
La Figura 4 muestra la potencia solar suministrada ($\dot{E}$), expresada en watts, de los reactores A y B en función del tiempo (s) durante el experimento. La integral del área bajo esta función representa la energía solar total (MJ) recibida por cada reactor (Tabla 1). Se observa que el reactor A (400°C) operó con una menor demanda energética comparada con el reactor B (750°C) el cual requirió de mayor potencia para alcanzar la temperatura objetivo.



a) b)

Figura 4. Potencia solar suministrada durante la pirólisis en función del tiempo: (a) reactor A (400°C) y (b) reactor B (750°C).

El proceso experimental se desarrolló con dos reactores operados en condiciones térmicas distintas durante el proceso de pirólisis que se muestran en la Figura 5: el reactor A a 400 °C y el reactor B a 750 °C. En el reactor B, la etapa de precalentamiento presentó una rampa de 25 °C/min durante 2 min, hasta que se llega al secado a los 100 °C el cual duró 2.5 min. La gasificación mostró una rampa aparente de 21.355 °C/min (real de 19 °C/min) durante 29.5 min, liberando metano (CH_4) que fue quemado a CO_2, y la carbonización se mantuvo estable a 738 °C por 38.5 min antes de un enfriamiento natural de 45 min. En el reactor A, la rampa inicial fue de 41.67 °C/min hasta 100 °C en 1.2 min, con un secado de 3 min. La gasificación presentó un incremento de 39 °C/min durante 7.5 min, y la carbonización se sostuvo en promedio a 412 °C por 30.5 min, con ligeras fluctuaciones debido al control manual, seguida de un enfriamiento de 49 min. Estas condiciones contrastantes permitieron evaluar el impacto de la temperatura objetivo sobre el rendimiento, la estabilidad térmica y la formación de biochar.



a) b)

Figura 5. Evolución de temperatura-tiempo y etapas del proceso de pirólisis solar en los reactores A y B

La Tabla 1 indica los parámetros clave para poder comparar el desempeño de ambos reactores. El reactor A (400°C) mostró un mayor rendimiento en masa (34% vs. 28%) y una eficiencia energética notablemente superior (25% vs. 6.8%), a pesar de requerir solo 0.99 MJ de energía solar, frente a los 4.67 MJ del reactor B (750°C). Además, la energía específica (MJ/kg de biochar) fue significativamente menor en el reactor A (58 vs. 334 MJ/kg), confirmando que operar a menor temperatura optimiza tanto la conservación de masa como el consumo energético.

Tabla 1. Parámetros de rendimiento y eficiencia para la pirólisis solar en reactor A y reactor B

Parámetro	Reactor A (400°C)	Reactor B (750°C)
Rendimiento en masa (%)	34%	28%
Energía solar suministrada (MJ)	0.99	4.67
Energía específica (MJ/kg biochar)	58	334
Eficiencia energética (%)	25%	6.8%

Poderes caloríficos

Los resultados del análisis de poder calorífico, realizados en laboratorio, se muestran en la Tabla 2. El biochar producido en el reactor A presentó un valor de 26.902 MJ/kg, mientras que el del reactor B fue de 26.994 MJ/kg. En contraste, la biomasa cruda registró un poder calorífico inferior (17.375 MJ/kg), lo que evidencia un incremento significativo en la energía disponible tras el proceso de pirólisis solar.

Tabla 2. Poderes caloríficos de biochar del reactor A, reactor B y de la biomasa cruda

Muestra	Poder calorífico (MJ/kg)
Biomasa cruda	17.375
Biochar reactor A (400°C)	26.902
Biochar reactor B (750 °C)	26.994

La similitud en el poder calorífico del biochar producido a 400°C y 750°C (Tabla 2) puede explicarse mediante los mecanismos de pirólisis descritos por Lehmann (2009). Como se menciona en su obra (p. 74), a temperaturas inferiores a 300°C, la biomasa libera volátiles ligeros (CO_2, CO) y agua, mientras que entre 300°C y 500°C ocurre la despolimerización principal de componentes como la celulosa, formando el biochar sólido. A temperaturas superiores (>500°C), aunque se generan más gases, la estructura carbonosa del biochar ya está establecida, lo que justifica la mínima variación en su poder calorífico. Esta estabilidad térmica es típica de maderas duras como el mezquite, donde el carbono fijo domina la composición final.

Comparación de costos de pirólisis con gas natural

En la Tabla 3 se muestra la comparación de costos energéticos para la pirólisis de 50 gramos mezquite, (prosopis velutina**),** en comparación con el gas natural, considerando la energía que se requirió en cada reactor con sis respectivas temperaturas.

Tabla 3. Tabla comparativa de costos energéticos

Parámetro	Reactor A (400°C)	Reactor B (750°C)
Energía requerida (MJ)	0.99	4.67
Energía solar	$0 MXN	$0 MXN
Gas natural	$253.30 MXN	$1,195 MXN

Los costos asociados al uso de gas natural se calcularon con base en datos oficiales de la Secretaría de Energía (SENER, 2025). La densidad energética del gas natural (39.0826 MJ/m³) la obtuvimos de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2025) y su precio en Sonora ($10 MXN/L aproximadamente) la obtuvimos de la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2025), estos datos permitieron estimar que, de haberse utilizado este combustible fósil en lugar de energía solar, el costo por lote experimental (50 g de biomasa) hubiera sido de $253.30 MXN (reactor A) y $1,195 MXN (reactor B). Estos valores contrastan radicalmente con la pirólisis solar, que tiene un costo energético nulo (energía renovable). Considerando que los combustibles fósiles se encarecerán progresivamente, mientras que la energía solar mantendrá su disponibilidad sin costos operativos, esta tecnología emerge como una alternativa económicamente viable y ambientalmente responsable para la producción de biochar. Este análisis demuestra que la pirólisis solar de mezquite constituye una alternativa técnicamente viable y económicamente competitiva para la producción sostenible de biocombustibles sólidos en zonas serranas de Sonora.

CONCLUSIÓN

- Rendimiento y eficiencia: El reactor A (400 °C) mostró un mejor desempeño que el reactor B, con mayor producción de biochar (34% vs. 28%) y una eficiencia global más alta (25% vs. 6.8%).
- Viabilidad técnica: Aunque el biochar del reactor B tuvo un poder calorífico ligeramente superior, el consumo energético excesivo compromete su viabilidad, consolidando al reactor A como la opción óptima.
- Aprovechamiento de recursos locales: La biomasa de mezquite (prosopis velutina), abundante en Sonora, puede transformarse mediante pirólisis solar en un combustible sólido de alto valor energético usando únicamente podas residuales y sin insumos fósiles.
- Beneficio ambiental: La pirólisis solar se presenta como una alternativa limpia y renovable que reduce emisiones, evita el desperdicio de biomasa y disminuye la presión forestal.
- Impacto social: El biochar obtenido puede satisfacer necesidades básicas de energía en comunidades rurales, contribuyendo a mejorar la calidad de vida y reduciendo la pobreza energética.
- Transición energética justa: Este enfoque tecnológico fortalece la autonomía energética, promueve la sostenibilidad rural y demuestra que la transición energética puede impulsarse desde lo local.

REFERENCIAS

1. Castells, X. E. (2012). tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos, 478-485.
2. Medina-Pérez, Patricia Catalina, Quiroz-Jiménez, Jesús David, & Tapia-Fernández, Héctor Jesús. (2023). Pobreza energética y cambio climático. Aproximación desde el análisis territorial en los municipios de México. Revista INVI, 38(109), 134-171.
3. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). Thermodynamics: An Engineering Approach, p. 78-80.
4. Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Routledge, p. 74.
5. Secretaría de Energía. (2025, agosto). Tabla de precios máximos aplicables de Gas LP a consumidores finales por región y modalidad de venta. Vigencia del 10 al 16 de agosto de 2025 (Acuerdo A/023/2022). Comisión Nacional de Energía. https://www.gob.mx/sener
6. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2025). Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2025. Secretaría de Energía. https://www.gob.mx/conuee
7. Hernández-López, J., Morales-Rodríguez, M. L., & García-Mendoza, B. (2014). Contenido calórico de alimentos no-industrializados expendidos en escuelas primarias en Hermosillo, Sonora [Caloric content in non-industrialized food sold by elementary school stores in Hermosillo, Sonora]. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud, 16(3), 38-41. https://www.biotecnia.uson.mx

AGRADECIMIENTOS

Proyecto apoyado por la “Secihti” en el año 2025.

XLIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE 2025 ● IER-UNAM TEMIXCO, MOR.

Conectando con el sol por un futuro sostenible

La ANES y el Comité Organizador de la XLIX SNES agradecen profundamente a nuestros patrocinadores por su valioso apoyo, que hace posible la realización de este evento y el impulso de las energías renovables en México.

stripsteel® S. de R.L. de C.V.

GRUPO Apolo

ANES® Asociación Nacional de Energía Solar

ISES International Solar Energy Society

UNAM CAMPUS MORELOS

IER Instituto de Energías Renovables

Usar energía renovable es elegir un futuro responsable.