



# JEEOS

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING  
OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

# 2026

ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD



Vol. 10 Núm. 2 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2026-050410175100-102. ISSN: 2448-8186



## DIRECTORIO

**L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO**

Rector

**DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ**

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

**DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA**

Secretario de Servicios Académicos

**LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO**

Encargado del Despacho de la Secretaría de  
Servicios Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.1atindex.unam.mx/> JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 2, Año 2026, es una publicación continúa editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: [jeeos@ujat.mx](mailto:jeeos@ujat.mx). Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2026-050410175100-102, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 31 de agosto 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores  
**EDITOR EN JEFE**

M.A. Pauly González Mayo  
**GESTORÍA Y ASISTENCIA EDITORIAL**

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano  
MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez  
**ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO**

Dra. Sulma Guadalupe Gómez Jiménez  
Dra. Margarita del Carmen Noguera Miceli  
**ASISTENCIA EN TRADUCCIÓN Y MAQUETADO**

#### **EDITORES ASOCIADOS INVITADOS**

Dr. Darío Colorado Garrido. **Universidad Veracruzana**  
Dra. Linda Viviana García Quiñonez. **Universidad Veracruzana**  
Dr. Cristian Gómez. **Universidad Veracruzana**  
Dra. Deysi Carmina Peña Ortiz. **Universidad Veracruzana**  
Dr. Roberto Agustín Conde Gutiérrez. **Universidad Veracruzana**  
Dr. Gerardo Alcalá Perea. **Universidad Veracruzana**  
Dra. Zaira Ruth Zuviría López. **Universidad Autónoma de Guadalajara**  
Dra. Karen Rodríguez Rosales. **Universidad Autónoma de Querétaro**  
Dra. Laura López Díaz. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**  
Dr. Erik Ramírez Morales. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**

## COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, **Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luís Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

## Índice Vol. 10 Núm. 2 (2026)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Carta editorial</b><br>Zuviría-López Z.R.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>i-ii</b>   |
| <b>Integración de calor en la purificación de ciclohexano grado textil utilizando etilenglicol como solvente</b><br>Cruz-Valdez J.A. <sup>1*</sup> , Álvarez-Alor B. <sup>2</sup> , Montalvo-Salinas D. <sup>3</sup> , Garzón-Pérez A.S. <sup>4</sup> , Alvarado-Méndez P.E. <sup>5</sup>                                                                                                                                                        | <b>1-16</b>   |
| <b>Fotosíntesis artificial efecto sinérgico de <math>\text{Ti}^{3+}</math>, <math>\text{Co}^{2+}</math>, <math>\text{Co}^{3+}</math> en los mecanismos de activación, acoplamiento c-c hacia la producción de isopropanol</b><br>Pérez- de la Cruz A.Y. <sup>1</sup> , Montalvo-Salinas D. <sup>2*</sup> , Cruz-Valdez J.A. <sup>1</sup> , Pérez- Francisco J.M. <sup>1</sup> , Jiménez- Castillo U. <sup>1</sup> , Álvarez-Alor B. <sup>3</sup> | <b>17-30</b>  |
| <b>Predicción de la potencia en una turbina vestas v52 mediante regresión polinomial y una red neuronal</b><br>Olan-Barroso A.A. <sup>1*</sup> , Alaffita-Hernández F.A. <sup>2</sup> , Escobedo-Trujillo B.A. <sup>1</sup> , Colorado-Garrido D. <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                   | <b>31-46</b>  |
| <b>Estrategias de ingeniería de software verde para aplicaciones energéticamente eficientes</b><br>Morales-Reyes E. <sup>1*</sup> , Pacheco-Reyes J.N. <sup>1</sup> , Vázquez-Hernández R. <sup>1</sup> , Gilbón-Aburto A. <sup>1</sup> , Gómez-Manuel E. <sup>1</sup>                                                                                                                                                                           | <b>47-54</b>  |
| <b>Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico en Coatzacoalcos, México</b><br>Rodríguez-Flores E. <sup>1</sup> , González-Martínez M.I. <sup>2</sup> , Fuentes-Orozco S. <sup>2</sup> , Garrido-Meléndez J. <sup>3</sup> , Márquez-Nolasco A. <sup>4</sup> , Conde-Gutiérrez R.A. <sup>4*</sup>                                                                                                  | <b>55-70</b>  |
| <b>Determinación de la acumulación de metales en <i>eichhornia crassipes</i> para valorización de biomasa</b><br>Benítez-Martínez X. S. <sup>1</sup> , Domínguez-Villate W. A. <sup>1</sup> , Núñez-Correa S. <sup>1</sup> , Morales-Salas L. <sup>2,3*</sup>                                                                                                                                                                                    | <b>71-80</b>  |
| <b>Restricciones de sostenibilidad y riesgo de cola en portafolios accionarios de México</b><br>Villada-Medina H.D. <sup>1*</sup> , Rendón-García J.F. <sup>1</sup> , Alcalá-Perea G. <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                               | <b>81-96</b>  |
| <b>Análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada con reducción del rizo de corriente de entrada para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno</b><br>Hidalgo-Leal H.D. <sup>1</sup> , Cruz-Gutiérrez F. <sup>1*</sup> , May-Burgos L.D. <sup>1</sup> , Sarao-Cruz L.D.J. <sup>1</sup> , Pérez-Aguilar A. <sup>1</sup>                                                                                                 | <b>97-114</b> |

## Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico en Coatzacoalcos, México.

### Theoretical and experimental study of the thermal efficiency of a parabolic trough collector in Coatzacoalcos, Mexico.

Rodríguez-Flores E.<sup>1</sup>, González-Martínez M.I.<sup>2</sup>, Fuentes-Orozco S.<sup>2</sup>, Garrido-Meléndez J.<sup>3</sup>, Márquez-Nolasco A.<sup>4</sup>, Conde-Gutiérrez R.A.<sup>4\*</sup>.

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Km. 7.5, Col. Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos, Veracruz, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Km. 7.5, Col. Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos, Veracruz, México.

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Km 7.5, Col. Santa Isabel, Coatzacoalcos CP 96538, Veracruz, México.

<sup>4\*</sup>Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana, Av. Universidad Km 7.5, Col. Santa Isabel, C.P. 96535 Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico.

\*roconde@uv.mx

**Artículo Científico**  
**Publicado: 31 de agosto 2026**

## RESUMEN

El uso de la energía solar mediante sistemas de concentración representa una alternativa viable para aplicaciones térmicas de baja entalpía. En este trabajo se evaluó la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico (CCP) bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Coatzacoalcos, México, mediante un enfoque teórico y experimental. El CCP fue instrumentado para registrar variables operativas y meteorológicas, incluyendo las temperaturas de ambiente, entrada y salida del fluido, la radiación solar global y difusa, velocidad del viento y caudal volumétrico. El colector posee un área de apertura de 2.08 m<sup>2</sup> con un tubo receptor de cobre y utilizando agua como fluido de trabajo en un circuito cerrado. Una prueba experimental realizada el 30 de septiembre de 2025 entre las 09:00 y 13:00 h fue usada para determinar la eficiencia térmica. El tiempo constante de calentamiento y enfriamiento fueron calculados. La eficiencia teórica del CCP fue determinada a través de diversos parámetros y considerando el diseño del colector. La eficiencia experimental fue determinada siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ANSI/ASHRAE 93-2003. Los resultados muestran una eficiencia térmica experimental máxima de 19.25% bajo una irradiancia directa de 1018.65 W/m<sup>2</sup>. La diferencia entre la eficiencia experimental y la teórica osciló entre 8.17 % y 17 %. Esta discrepancia puede atribuirse principalmente a la inercia térmica inherente al sistema de recirculación utilizado durante las pruebas experimentales.

**Palabras clave:** Energía solar, colector solar parabólico (CCP), eficiencia térmica, condiciones meteorológicas, Coatzacoalcos.

## ABSTRACT

The use of solar energy through concentrating systems represents a viable alternative for low-enthalpy thermal applications. In this work, the thermal efficiency of a parabolic trough collector

(PTC) was evaluated under the meteorological conditions of the city of Coatzacoalcos, Mexico, using a theoretical and experimental approach. The PTC was instrumented to record operational and meteorological variables, including ambient temperatures, fluid inlet and outlet, global and diffuse solar radiation, wind speed and volumetric flow. The collector has an aperture area of 2.08 m<sup>2</sup> with a copper receiver tube and using water as a working fluid in a closed circuit. An experimental test conducted on September 30, 2025 between 09:00 and 13:00 h was used to determine the thermal efficiency. The constant heating and cooling time were calculated. The theoretical efficiency of the PTC was determined through various parameters and considering the design of the collector. The experimental efficiency was determined following the ANSI/ASHRAE 93-2003 standard. The results show a maximum experimental thermal efficiency of 19.25% under a direct irradiance of 1018.65 W/m<sup>2</sup>. The difference between experimental and theoretical efficiency ranged from 8.16% to 17%, mainly due to the thermal inertia associated with the closed-loop operating conditions.

**Keywords:** Solar energy, parabolic solar collector, thermal efficiency, weather conditions, Coatzacoalcos.

## INTRODUCCIÓN

El planeta recibe de manera constante una magnitud de energía solar que supera en 10,000 veces el consumo global de todos los sistemas energéticos [1]. La radiación, es originada por un flujo de energía solar de  $3.9 \times 10^{26}$  W, donde solo una fracción alcanza la superficie terrestre, pero aun así resulta suficiente para cubrir múltiples veces la demanda energética mundial [2]. Por lo tanto, la energía solar se constituye como una fuente primaria que sustenta la vida en nuestro planeta.

A lo largo de los años, se han desarrollado distintos dispositivos tecnológicos para el aprovechamiento de la radiación solar; entre estas tecnologías destacan los sistemas de concentración solar. Estos dispositivos han adquirido especial relevancia debido a su capacidad de alcanzar altas temperaturas de operación, siendo adecuados para aplicaciones industriales, como: generación de vapor, producción de energía eléctrica, entre otros [3].

El CCP es un dispositivo que se fundamenta en el uso de superficies reflejantes con geometría parabólica para concentrar la radiación directa sobre un receptor tubular situado en la línea focal, permitiendo la transferencia de calor hacia un fluido de trabajo [4].

Los CCP se caracterizan por su estructura longitudinal compuesta por reflectores curvados en forma parabólica. Asimismo, una de sus características geométricas fundamentales es el ángulo de borde, el cual define la curvatura de la superficie reflectante y define la proporción de radiación solar captada que se redirige hacia el tubo absorbedor. El receptor tubular, es un elemento clave del sistema, suele estar diseñado para soportar condiciones térmicas elevadas y minimizar pérdidas energéticas.

El desempeño del colector depende de parámetros como la reflectividad del espejo, la precisión geométrica de la superficie parabólica y el factor de interceptación del receptor, los cuales influyen directamente en la eficiencia óptica del sistema [5]. Asimismo, variables como la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la radiación solar incidente repercuten de manera significativa en el comportamiento de la eficiencia térmica del colector. La adecuada integración de estos factores puede mejorar la eficiencia energética del sistema y reducir pérdidas térmicas asociadas a efectos ópticos y convectivos [6].

La relevancia de analizar el desempeño de los CCP ha motivado el desarrollo de investigaciones orientadas hacia enfoques tanto experimentales como numéricos [7]. A nivel internacional, los CCP han sido ampliamente estudiados de manera experimental con el propósito de analizar su desempeño térmico y proponer aplicaciones para satisfacer diversas necesidades. En este contexto, Bharti et al. [8] realizaron un estudio experimental de un CCP evaluando el efecto del material del tubo receptor y del flujo del fluido de trabajo, reportando una eficiencia térmica máxima cercana al 35.90 %. Por otra parte, en México estos dispositivos han sido analizados en diferentes estudios enfocados en su aplicación en procesos de baja entalpía. Jaramillo et al. [9] evaluaron el desempeño de concentradores cilindro-parabólicos para procesos térmicos de baja temperatura, destacando su potencial en el aprovechamiento de energía solar. Asimismo, investigaciones experimentales realizadas en Yucatán, México, han analizado la eficiencia de CCP utilizados como sistemas de calentamiento de agua, evidenciando resultados favorables en términos de eficiencia térmica y desempeño energético [10].

Con la información previa, el presente estudio tiene como objetivo el determinar la eficiencia térmica de un CCP considerando las condiciones meteorológicas de la ciudad de Coatzacoalcos, México, mediante un enfoque teórico y experimental. Esta investigación puede contribuir en generar información relevante sobre la evaluación de este tipo de colectores en zonas tropicales del golfo en México. Además, proporcionar una comparación con la eficiencia térmica teórica del CCP a partir de parámetros relevantes como la eficiencia óptica, transferencia de calor del tubo receptor, entre otros.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El fundamento de la operación del CCP consiste en concentrar la irradiancia normal directa (IND) en un receptor tubular, donde el flujo radiante es absorbido y transferido en forma de calor al fluido de trabajo, elevando así su energía térmica y temperatura. El tubo receptor empleado está fabricado en cobre, material seleccionado por su alta conductividad térmica [8].

La instalación del CCP integra sensores para el registro continuo de variables operativas y meteorológicas, tales como las temperaturas de entrada y salida del fluido, la temperatura ambiente, la irradiancia solar difusa y solar, velocidad y dirección del viento, así como caudal volumétrico, con el fin de caracterizar el rendimiento del sistema.

El CCP fue rotado sobre un eje horizontal de orientación este-oeste, realizando un ajuste en el plano norte-sur con el objetivo de minimizar el ángulo de incidencia.

En la **Figura 1**, se muestra el CCP instrumentado para su evaluación experimental, utilizando agua como fluido de trabajo. El sistema fue instalado en las coordenadas 18.1443093° N de latitud y -94.476728° W de longitud, a una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar, correspondientes a la Universidad Veracruzana, campus Coatzacoalcos, en el estado de Veracruz, México.



**Figura 1.** Colector cilindro-parabólico experimental.

La **Tabla 1**, describe los valores de incertidumbre y otras características relevantes de los instrumentos de medición presentados en la **Figura 1**.

**Tabla 1.** Características de los instrumentos de medición instalados en el CCP obtenidos de [19].

| Instrumentos           | Medición de variables                   | Características                                                            | Incertidumbre                                      |
|------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Termopares tipo - T    | Medioambiente, entrada y salida de agua | 0 – 105 °C                                                                 | ±0.5 °C                                            |
| Rotámetro              | Flujo volumétrico de agua               | 0 – 4 L/min                                                                | 2.4 %                                              |
| Piranómetro con sombra | Irradiancia solar difusa                | Sensibilidad $17.29 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$        | 1.8 %                                              |
| Piranómetro            | Irradiancia solar global                | Sensibilidad $10.24 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$        | 2%                                                 |
| Anemómetro             | Velocidad y dirección del viento        | Rango: 0 – 60 m/s (velocidad del viento) y 0 – 359 °(dirección del viento) | Velocidad del viento 2 % y dirección del viento 2% |

## METODOLOGÍA

**Estructura física del CCP.** Este trabajo de investigación está basado en la construcción e instalación del CCP reportado por Márquez-Nolasco et al., 2026, donde la estructura fue fabricada en acero inoxidable 304L, empleando una película reflectante 3M Solar Mirror Film 1100 con una reflectancia superior al 90%. En cuanto al absorbedor, se utiliza un tubo de cobre recubierto con pintura Pyromark 2500, con un coeficiente de absortividad de 0.95.

**Determinación del tiempo constante.** El tiempo constante ( $\tau$ ) de calentamiento se define como el tiempo requerido para que la temperatura de salida del colector alcance el 63.20 % del incremento total entre la condición inicial y el estado estacionario. El procedimiento se realizó conforme a la norma ANSI/ASHRAE 93-2003 [9,11].

Iniciando con el sistema desenfocado y el fluido aproximadamente a temperatura ambiente. Tras alcanzar el equilibrio inicial, la parábola se enfoca, registrando la temperatura hasta lograr un nuevo estado estable. El valor de  $\tau$  se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{T_o - T_{o,t}}{T_o - T_i} = \frac{1}{e} = 0.368 \quad (1)$$

Donde  $T_i$  es la temperatura del agua de entrada al colector,  $T_o$  es la temperatura final del agua de salida del colector y  $T_{o,t}$  es la temperatura del agua de salida del colector después de un tiempo  $t$ . Mediante la cual se determina el tiempo constante de calentamiento.

Por otro lado, para determinar  $\tau$  de enfriamiento, el colector se opera manteniendo la temperatura del fluido de entrada igual a la temperatura de ambiente. En este caso, la energía solar incidente se reduce abruptamente a cero mediante el desenfoque del colector. Las temperaturas del fluido de transferencia se monitorean continuamente en función del tiempo hasta que satisfaga la siguiente relación:

$$\frac{T_{o,t} - T_i}{T_{oi} - T_i} = \frac{1}{e} \approx 0.368 \quad (2)$$

Donde  $T_{oi}$  es la temperatura inicial de salida del agua del colector al momento del desenfoque. En este caso,  $\tau$  se define como el periodo necesario para que la temperatura de salida del colector disminuya un 63.20 % del incremento total por encima de la temperatura ambiente ( $T_a$ ), tras la reducción súbita de la irradiancia solar en el tiempo cero.

## RENDIMIENTO TEÓRICO DEL CCP

**Rendimiento óptico.** Este valor puede ser definido como la porción de radiación solar que logra absorber efectivamente el CCP tomando en cuenta factores como la reflexión o absorción del

receptor y factores geométricos que ajustan la eficiencia óptica compensando reducciones efectivas al área de apertura causadas por efectos geométricos no considerados. Por consiguiente, el rendimiento óptico ( $\eta_o$ ) puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación [12]:

$$\eta_o = \rho \tau \alpha \gamma [(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta)] \quad (3)$$

Donde  $A_f$  es el factor geométrico (factor de forma del colector),  $\theta$  es el ángulo de incidencia,  $\rho$  la reflectancia,  $\alpha$  define la absorptancia del tubo receptor y  $\tau$  es la transmitancia que es considerada solo cuando el tubo receptor tiene una cubierta (no válido para este caso). La **Tabla 2** muestra las variables de construcción del CCP y utilizadas para el cálculo del rendimiento óptico.

**Tabla 2.** Parámetros de construcción del CCP.

| Parámetros       | Valor   | Símbolo     |
|------------------|---------|-------------|
| Apertura         | 1.040 m | $Wa$        |
| Longitud         | 2.000 m | $L$         |
| Diámetro externo | 0.035 m | $Do$        |
| Diámetro interno | 0.032 m | $Di$        |
| Ángulo de borde  | 90°     | $\varphi_r$ |

El factor geométrico puede ser calculado por:

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} \quad (4)$$

Donde  $A_l$  es definida por el área perdida y  $A_a$  el área de apertura del CCP ( $Wa \cdot L$ ). Estos valores se muestran en la **Tabla 3**. La determinación de  $A_l$  se puede obtener a partir de la siguiente ecuación [13]:

$$A_l = \frac{2}{3} Wahp + fWa \left[ 1 + \frac{Wa^2}{48f^2} \right] \quad (5)$$

Donde  $hp$  define la altura de la parábola y  $f$  define la distancia focal, estos parámetros se muestran en la **Tabla 3**, calculados a partir de las ecuaciones [14]:

$$f = \frac{Wa}{4 \tan(\frac{\varphi_r}{2})} \quad (6)$$

$$hp = 4f \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{1 + \cos(\varphi_r)}{2 \sin(\varphi_r)} \int_0^{\varphi_r} \frac{\text{erf}(M) - \text{erf}(N)}{1 + \cos(\varphi_r)} d\varphi \quad (8)$$

Donde  $\text{erf}()$  son una función de error de  $M$  y  $N$  establecida:

$$M = \frac{\sin(\varphi_r)(1+\cos(\varphi))(1-2d^*\sin(\varphi))-\pi\beta^*(1+\cos(\varphi_r))}{\sqrt{2}\pi\sigma^*(1+\cos(\varphi_r))} \quad (9)$$

$$N = -\frac{\sin(\varphi_r)(1+\cos(\varphi))(1+2d^*\sin(\varphi))+\pi\beta^*(1+\cos(\varphi_r))}{\sqrt{2}\pi\sigma^*(1+\cos(\varphi_r))} \quad (10)$$

El factor de intercepción ( $\gamma$ ) es una fracción de los rayos reflejados por el absorbedor al receptor, el cual depende del tamaño del receptor y se da por la siguiente expresión [15]:

Donde  $d^*$  se puede expresar como un parámetro de error no aleatorio universal debido a la desubicación del receptor ( $d^* = Dr/D$ ),  $\beta^*$  un parámetro de error no aleatorio universal por errores angulares ( $\beta^* = \beta C_o$ ),  $\sigma^*$  un error aleatorio universal ( $\sigma^* = \sigma C_o$ ),  $D$  el diámetro externo del receptor y  $D_r$  un desplazamiento del receptor desde la línea focal. La razón de concentración ( $C_o$ ) es un parámetro geométrico que mide la capacidad del colector para concentrar la radiación solar sobre el tubo receptor. Se define como la relación entre el área de apertura del colector ( $A_a$ ) y el área externa del receptor ( $A_r$ ). Su cálculo se determina mediante la siguiente ecuación [14]:

$$C_o = \frac{A_a}{A_r} \quad (11)$$

**Tabla 3.** Valores geométricos del CCP.

| Parámetros         | Valor               | Símbolo |
|--------------------|---------------------|---------|
| Factor geométrico  | 0.520               | $A_f$   |
| Área pérdida       | $1.081 \text{ m}^2$ | $A_l$   |
| Área de apertura   | $2.080 \text{ m}^2$ | $A_a$   |
| Foco               | 0.260 m             | $f$     |
| Altura de Parábola | 1.040 m             | $hp$    |

El área de recepción ( $A_r$ ) es el área que recibe la energía solar antes de que sea reflejada al tubo receptor por los espejos parabólicos ( $2\pi rL$ ). Mientras, el error aleatorio ( $\sigma$ ) se determina estadísticamente y se modela la desviación estándar de la distribución total de la energía reflejada [16], calculada a partir de la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + \sigma_{slope}^2 + \sigma_{mirror}^2} \quad (12)$$

De acuerdo con Güven y Bannerot [15] para un colector, define  $\sigma_{mirror} = 0.002$  radiación (rad) mide la uniformidad de reflectancia en la superficie del espejo parabólico,  $\sigma_{slope} = 0.004$  rad cuantifica la desviación angular por imperfecciones en el espejo y el ángulo del cono solar  $\sigma_{sun} = 0.004$  rad representa la dispersión natural de radiación solar. En este caso se adoptan valores  $\sigma_{mirror} = 0.004$  rad,  $\sigma_{slope} = 0.009$  rad y  $\sigma_{sun} = 0.004$  rad. El resultado del error aleatorio se

presenta junto a otros parámetros calculados derivados al rendimiento óptico. En la **Tabla 4** se muestra el valor de la eficiencia óptica, así como los parámetros utilizados para su respectivo cálculo.

**Tabla 4.** Parámetros para el cálculo del rendimiento óptico.

| Parámetros             | Valor              | Símbolo       |
|------------------------|--------------------|---------------|
| Día del año            | 273                | $d$           |
| Diámetro del receptor  | 0.01 m             | $D_r$         |
| Razón de concentración | 21.53              | $C_o$         |
| Área de recepción      | $0.09 \text{ m}^2$ | $A_r$         |
| Error aleatorio        | 0.02               | $\sigma^*$    |
| Ángulo de incidencia   | $86.14^\circ$      | $\theta$      |
| Ángulo horario         | $88.79^\circ$      | $w$           |
| Ángulo de declinación  | $-3.66^\circ$      | $\delta$      |
| Emisividad             | 0.94               | $\varepsilon$ |
| Factor de intercepción | 0.39               | $\gamma$      |
| Reflectancia           | 0.95               | $\rho$        |
| Absortancia            | 0.96               | $\alpha$      |
| Eficiencia óptica      | 17.54 %            | $\eta_o$      |

**Eficiencia térmica teórica.** Este valor corresponde a una fracción de energía solar que puede ser usada como energía térmica útil transferida. Esta ecuación se puede determinar por la siguiente expresión [14]:

$$\eta_t = F_r \eta_o - F_r \left( \frac{U_L}{C_o} \right) \left[ \frac{\Delta T}{G_b} \right] \quad (13)$$

Donde  $\eta_o$  es la eficiencia óptica,  $U_L$  cuantifica las pérdidas totales (convección, radiación, conducción),  $F_r$  indica la porción de remoción de calor del absorbedor ajustando la eficiencia térmica real, la  $G_b$  representa la cantidad de radiación solar directa,  $\Delta T = T_i - T_a$  considera la diferencia entre la temperatura de entrada al receptor y la ambiental. El factor de remoción de calor ( $F_r$ ) se puede calcular a partir de la ecuación:

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{U_L F' A_r}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (14)$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo másico,  $C_p$  indica el calor específico del fluido y  $F'$  es el factor eficiente del captador que indica la cantidad de radiación solar que se aprovecha de forma útil y que se puede determinar por [15]:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{Do}{h_w Di} + \frac{Do}{2k_w} + \frac{Do}{Di}} \quad (15)$$

La **Tabla 5** muestra parámetros importantes para el cálculo de  $U_L$ ,  $F'$  y  $F_r$ , para obtener finalmente la eficiencia del colector ( $\eta_l$ ).

Así mismo, aplicando los parámetros calculados en este trabajo a la Ecuación (16), la eficiencia térmica teórica ( $\eta_l$ ) puede quedar planteada a partir de la siguiente ecuación:

$$\eta_l = 0.1602 - 0.9543 \left[ \frac{\Delta T}{G_b} \right] \quad (16)$$

**Tabla 5.** Parámetros calculo rendimiento térmico.

| Parámetro                       | Valor                     | Símbolo   |
|---------------------------------|---------------------------|-----------|
| Coeficiente radiactivo          | 7.72 W/m <sup>2</sup> K   | $h_r$     |
| Coeficiente convectivo del aire | 14.78 W/m <sup>2</sup> K  | $h_v$     |
| Coeficiente convectivo del agua | 715.96 W/m <sup>2</sup> K | $h_w$     |
| Temperatura ambiente            | 308.26 K                  | $T_a$     |
| Conductividad del aire          | 0.02 W/m-K                | $k_v$     |
| Conductividad del agua          | 0.64 W/m-K                | $k_w$     |
| Temperatura superficie receptor | 330.87 K                  | $T_r$     |
| Temperatura entrada             | 323.94 K                  | $T_i$     |
| Temperatura salida              | 325.64 K                  | $T_o$     |
| Radiación directa               | 816.08 W/m <sup>2</sup>   | $G_b$     |
| Calor específico                | 4178.77 kJ/kg-K           | $C_p$     |
| Flujo másico                    | 0.04 kg/s                 | $\dot{m}$ |
| Factor eficiente del captador   | 0.91                      | $F'$      |
| Factor remoción de calor        | 0.91                      | $F_r$     |
| Coeficiente global de perdidas  | 22.51                     | $U_L$     |
| Numero de Reynolds aire         | 1944.81                   | $Re_v$    |
| Numero de Reynolds agua         | 2918.26                   | $Re_w$    |
| Numero de Nusselt aire          | 20.28                     | $Nu_v$    |
| Numero de Nusselt agua          | 35.99                     | $Nu_w$    |
| Eficiencia térmica              | 14.18%                    | $\eta_l$  |

**Eficiencia térmica.** La eficiencia térmica del colector sirve para evaluar su desempeño, ya que permite cuantificar la fracción de la radiación solar incidente que es transformada en energía térmica útil. El procedimiento para la determinación de la eficiencia térmica ( $\eta_g$ ) se fundamenta en los criterios de estabilidad de la norma ANSI/ASHRAE 93-2003 [11]. Para ello, los experimentos se llevaron a cabo bajo un ángulo de incidencia normal respecto al plano del colector, estableciendo una distribución de temperaturas de entrada de 35, 40, 45 y 50 °C. Durante las pruebas, se mantuvo un flujo másico constante de 0.022 kg/s, valor seleccionado para cumplir con la recomendación de la norma de estandarizar el flujo a 0.02 kg/(s · m<sup>2</sup>) por unidad de área de apertura para fluidos líquidos. La eficiencia se evaluó experimentalmente mediante la relación entre el calor útil ganado y la energía solar incidente, considerando la siguiente expresión:

$$\eta_g = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{G_{bp}A_a} \quad (17)$$

Donde  $T_i$  es la temperatura de entrada del colector,  $T_o$  es la temperatura de salida del colector.

## Resultados

El estudio experimental del CCP se realizó el 30 de septiembre de 2025, en un intervalo comprendido entre 09:00 y 13:00 h.

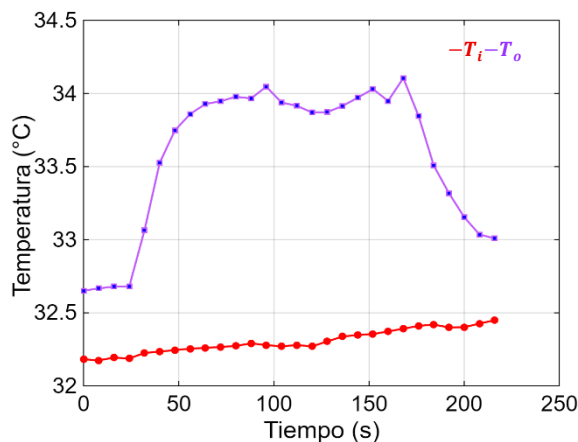
En la **Tabla 6** se presentan los valores correspondientes al  $\tau$  para determinar el calentamiento y enfriamiento del sistema, así como las temperaturas registradas durante dichas etapas.

**Tabla 6.** Tiempo constante de calentamiento y enfriamiento.

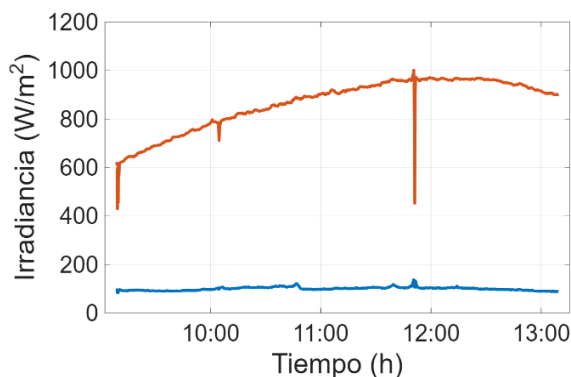
| Calentamiento                              | Enfriamiento                               |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>48 s</b>                                | <b>40 s</b>                                |
| $T_i = 32.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$     | $T_i = 32.40 \text{ }^{\circ}\text{C}$     |
| $T_o = 34.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$     | $T_o = 34.10 \text{ }^{\circ}\text{C}$     |
| $T_{o,t} = 33.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | $T_{o,t} = 33.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |

La **Figura 2** presenta la naturaleza exponencial de la constante de tiempo el CCP. Como se observa, la  $T_o$  presenta un incremento más pronunciado en comparación con la  $T_i$ , lo cual indica la absorción de energía térmica por parte del fluido de trabajo en el calentamiento. Mientras en el enfriamiento, se aprecia el efecto contrario por el desenfoque de la parábola.

La **Figura 3** presenta el comportamiento temporal de la radiación solar global ( $G_t$ ) y difusa registradas durante el periodo de medición. Se observó que la irradiancia global tuvo un incremento gradual durante la mañana hasta alcanzar un máximo al mediodía, seguido de una disminución progresiva durante la tarde, lo cual corresponde al ciclo natural de la radiación solar. Por otro lado, la irradiancia difusa ( $G_d$ ) mantiene valores considerablemente menores y presenta variaciones más suaves, asociadas a los procesos de dispersión de la radiación en la atmósfera.



**Figura 2.** Evaluación del tiempo constante.

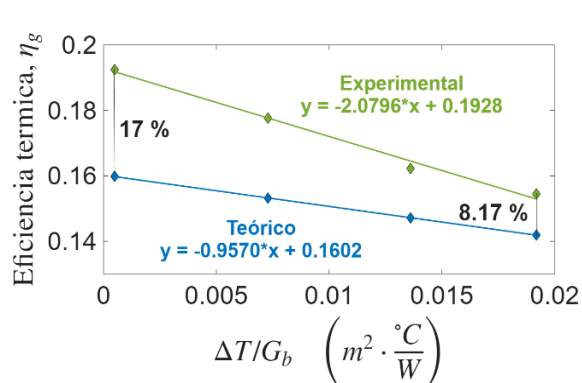


**Figura 3.** Comportamiento de la radiación global y difusa el 30 de septiembre de 2025

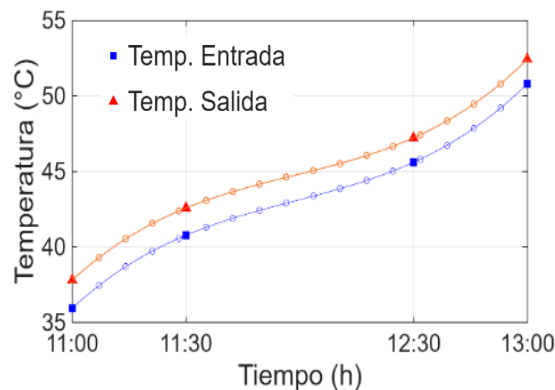
En la **Figura 4** se muestra la relación entre la eficiencia térmica del colector ( $\eta_g$ ) y el parámetro adimensional  $\Delta T/G_b$  (donde  $\Delta T$  corresponde a  $T_i - T_a$ ), comparando el comportamiento teórico con los datos experimentales. La diferencia observada entre la eficiencia térmica teórica y experimental puede atribuirse no solamente a la inercia térmica del sistema, sino también a factores asociados con las simplificaciones inherentes al modelo teórico empleado. Entre estos factores destacan las fluctuaciones de la irradiancia solar, variaciones en la velocidad del viento, pérdidas térmicas no consideradas y posibles incertidumbres asociadas a los instrumentos de medición. Debido a que el sistema opera bajo condiciones ambientales reales, resulta complejo reproducir experimentalmente las condiciones ideales asumidas por el modelo teórico. La tendencia experimental presenta un buen ajuste lineal ( $R^2 \approx 0.9905$ ). Para cuantificar la diferencia entre el rendimiento experimental y el teórico se aplicó el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE, por sus siglas en inglés [17]), obteniendo un valor de inicial de 17 % y un valor final de 8.17%. Por lo tanto, es posible observar una mayor separación entre la eficiencia experimental y teórica al inicio de la prueba y un efecto contrario al final de la misma.

Por otra parte, el cálculo de la eficiencia en estado estacionario es menor al reportado por el método experimental, esto se debe a que es afectado por suponer que todas las variables permanecen constantes durante el período de medición y que el sistema ha alcanzado el equilibrio térmico. Sin embargo, las variables meteorológicas son completamente dependiente del tiempo. Por lo tanto, el cálculo de la eficiencia en estado estacionario puede representar con discrepancias el comportamiento real del colector durante condiciones transitorias. En esta investigación, el cálculo de eficiencia en estado estacionario fue aplicado para simplificar el análisis y la comparación entre colectores. No obstante, se propone a futuro desarrollar modelos dinámicos para aproximar la eficiencia real del sistema considerando las condiciones ambientales que evolucionan con el tiempo.

En la **Figura 5**, se observa un incremento gradual en  $T_i$ , asociado a la recirculación del fluido dentro del sistema. Por lo tanto, la eficiencia experimental se ve favorecida por la inercia térmica del ciclo cerrado y esta disminuye cuando se incrementa la temperatura de entrada del receptor, provocando que el rendimiento teórico se aproxime al experimental.

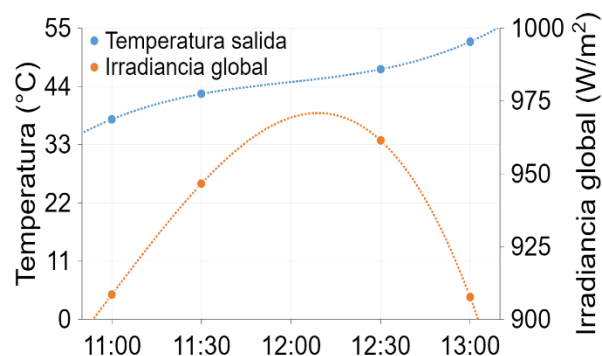


**Figura 4.** Eficiencia térmica del estudio teórico y experimental.



**Figura 5.** Registro de temperaturas del sistema.

La **Figura 6** presenta la evolución simultánea de la irradiancia solar global y la temperatura de salida del fluido de trabajo durante la evaluación experimental del CCP. Se observa que el incremento de la irradiancia favorece el aumento de la temperatura de salida; sin embargo, la respuesta térmica del sistema no es inmediata. Este comportamiento se atribuye a la inercia térmica del colector y del fluido de trabajo, los cuales almacenan parte de la energía absorbida y la liberan de forma gradual, evidenciando el comportamiento dinámico del proceso de transferencia de calor.



**Figura 6.** Relación entre la irradiancia solar global y la temperatura de salida del CCP.

Para situar la eficiencia del CCP, en la **Tabla 7** se presenta una comparativa con otros sistemas publicados a nivel internacional. La eficiencia térmica más elevada corresponder a Jaramillo et al. [9], quien alcanza 67% mediante una configuración geométrica rigurosa. En segundo término, la investigación desarrollada en la India por Bharti et al. registra una eficiencia del 35.90% al emplear

un receptor de acero inoxidable. Por su parte, la presente investigación reporta una eficiencia cercana al 19.25% para el CCP, operado en condiciones climatológicas de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México. El valor máximo alcanzado al inicio de la prueba experimental se debe a la formulación de la eficiencia instantánea, donde la potencia térmica útil entregada al fluido inicialmente es mayor debido a que la energía absorbida no solo se transfiere al fluido, sino que también se almacena en el sistema por efecto de la inercia térmica, lo cual se refleja en la elevación continua de la temperatura del tanque. Otro factor importante radica en las condiciones iniciales de la prueba, la temperatura de entrada en el colector es relativamente cercana a la temperatura ambiente, generando que las pérdidas de calor por convección y radiación sean menores. Por lo tanto, una mayor fracción de la energía absorbida puede convertirse en calor útil.

**Tabla 7.** Comparativa de parámetros técnicos y operativos de diversos CCP.

| Referencia                                  | Eficiencia térmica | Radiación ( $W/m^2$ ) | Flujo masico ( $kg/s$ ) | Estructura                            | Tubo receptor                                                             | Ángulo de borde |
|---------------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Jaramillo et al. [9]<br>(Temixco, México)   | 67 %               | 896.30                | 0.007                   | Estructura y costillas de aluminio    | Cobre pintado de negro (Ø 25.4 mm) sin cubierta de vidrio                 | 90°             |
| Bharti et al. [8]<br>(India)                | 35.90 %            | 950                   | 0.020                   | Reflector de acero inoxidable         | Acero Inoxidable (Ø 1 pulgada)                                            | 80°             |
| Presente estudio<br>(Coatzacoalcos, México) | 19.25 %            | 1018.65               | 0.020                   | Acero inoxidable 304L                 | Cobre con pintura Pyromark 2500 (Ø 38 mm)                                 | 90°             |
| Calderón Bacón [18]<br>(Lambayeque, Perú)   | 16.77 %            | 1044.10               | -                       | Acero inoxidable y varillas de fierro | Cobre pintado de negro (Ø 6 mm, espesor 1 mm)                             | -               |
| Rosado et al. [10]<br>(Yucatán, México)     | 5.43 %             | 821                   | 0.020                   | Lámina de acero inoxidable pulido     | Cobre pintado de negro (Ø 3/4 pulgadas) dentro de vidrio de policarbonato | 65.56°          |

Se exhibe una notable superioridad térmica al contrastarse con las configuraciones propuestas por Calderón et al. y Rosado et al. [10, 18], cuyas eficiencias se sitúan en 16.77 % y 5.43 %, respectivamente. Por lo tanto, la eficiencia presentada en este trabajo es competitiva ya que la radiación solar incidente fue transformada en energía térmica útil de mejor manera, lo que refleja un diseño más adecuado y una correcta selección de materiales y parámetros de operación. La diferencia a favor de la actual propuesta con respecto a los otros colectores con tubo desnudo radica en gran medida en el dimensionamiento estructural del CCP. En específico, el presente estudio al reportar un ángulo de borde mayor, esto le permite tener más capacidad de captación de la radiación reflejada, logrando que los rayos que inciden sobre el tubo receptor aumenten. Otra diferencia, son

los materiales elegidos para la construcción del sistema, los cuales están basados en reflejar la mayor cantidad de radiación solar dirigida hacia el tubo receptor y la aplicación de una pintura especializada para absorber la mayor cantidad de energía solar [19]. Además, las condiciones meteorológicas de la región pueden proporcionar un beneficio debido a las características de la radiación solar en la región costera.

Finalmente, en este trabajo se identifican dos factores clave para mejorar el diseño del sistema y, en consecuencia, su desempeño. El primero, aplicar una cubierta de vidrio al vacío para producir un efecto invernadero capaz de incrementar la temperatura del receptor y mejorar la eficiencia térmica. El segundo, instalar un sistema de seguimiento solar que permite al colector mantener una orientación adecuada respecto al sol durante el día, incrementando la radiación solar directa incidente sobre el reflector. Estos factores no fueron integrados debido a limitaciones de recursos económicos; sin embargo, en trabajos futuros se contempla su adquisición con el fin de dar continuidad al desarrollo y mejora operativa del sistema.

## CONCLUSIÓN

La evaluación térmica del CCP permitió caracterizar su comportamiento bajo condiciones reales de operación en la ciudad de Coatzacoalcos, México. Los resultados obtenidos evidenciaron un tiempo constante de calentamiento de 48 s y un tiempo de enfriamiento de 40 s, lo que indica una respuesta térmica relativamente rápida del sistema ante cambios en la radiación solar.

La eficiencia térmica máxima alcanzada fue cercana al 19.25%, valor que se encuentra dentro del rango reportado para colectores similares destinados a procesos de baja entalpía. El análisis comparativo con otros desarrollos experimentales mostró que el sistema evaluado presenta un desempeño competitivo, incluso operando con un receptor tubular sin cubierta protectora, lo que implica mayores pérdidas térmicas por convección.

Los datos mostraron un ajuste adecuado para determinar la eficiencia experimental del CCP. Por otra parte, la diferencia entre las eficiencias fue del 8.17% al 17%, siendo inferior el teórico, ya que no considera la inercia térmica del ciclo cerrado. Se recomienda realizar futuras evaluaciones experimentales utilizando configuraciones de ciclo abierto y campañas de medición extendidas durante diferentes condiciones climáticas. Esto permitirá reducir la influencia de la inercia térmica asociada a la recirculación del fluido y mejorar la precisión de la validación experimental del modelo teórico. Finalmente, los resultados obtenidos evidencian la viabilidad del uso de CCP para el aprovechamiento de energía solar térmica en aplicaciones de baja temperatura en regiones tropicales del Golfo de México, aportando información relevante para el diseño y optimización de este tipo de sistemas.

## REFERENCIAS

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 93-2003. (2003). Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA.
- [2] Bharti, A., Dixit, A., & Paul, B. (2018). Experimental analysis of a solar parabolic trough collector. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(6), 102–112.
- [3] Calderón Bacón, J. L. (2023). Diseño y construcción de un colector cilíndrico parabólico para uso de la energía solar en el calentamiento de agua (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- [4] Camarillo-Peñaranda, J. R., Saavedra-Montes, A. J., & Ramos-Paja, C. A. (2013). Recomendaciones para seleccionar índices para la validación de modelos. *Tecnológicas, edición especial*, 109–122.
- [5] Chekifi, T. (2022). Thermal efficiency enhancement of parabolic trough collectors: a review.
- [6] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [7] Forristall, R. (2003). Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver (NREL/TP-550-34169). National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [8] Güven, H. M., & Bannerot, R. B. (1986). Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries. *Solar Energy*, 36, 535–550.
- [9] Jaramillo, O. A., Venegas-Reyes, E., Aguilar, J. O., Castrejón-García, R., & Sosa-Montemayor, F. (2013). Parabolic trough concentrators for low enthalpy processes. *Renewable Energy*, 60, 529–539.
- [10] Jeter, S. M. (1983). Geometrical effects on the performance of trough collectors. *Solar Energy*, 30, 109–113.
- [11] Kalogirou, S. A. (2009). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295.
- [12] Kalogirou, S. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press. ISBN 978-0-12-374501-9.

- [13] Márquez-Nolasco, A., & Conde-Gutiérrez, R. A. (2026). Datos experimentales de un colector piloto de canal parabólico considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Coatzacoalcos, México. *Data*, 11(1), 17.
- [14] NASA. (2026). Sun-Earth Interactions. Earthdata.
- [15] Pranesh, V., & Kumaresan, V. (2019). Evolution of the 2D CPC solar collector based on the literature survey. *Solar Energy*.
- [16] Rabl, A. (1984). *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York, USA: Oxford University Press. ISBN 0-19-503546-1.
- [17] Rosado Hau, N., & Escalante Soberanis, M. A. (2011). Eficiencia de un colector parabólico como sistema de calentamiento de agua en Yucatán, México. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(6), 063108.
- [18] Sodha, M. S., Mathur, S. S., & Malik, M. A. S. (1984). *Reviews of Renewable Energy Resources*. New Delhi: Wiley Eastern.
- [19] Tejeda Martínez, A., & Gómez-Azpeitia, L. G. (2015). *Prontuario solar de México*. Universidad de Colima & Universidad Veracruzana.