

# Análisis de sensibilidad global de un colector solar plano en régimen transitorio: un estudio bajo condiciones de clima tropical

Elías A. Cobá-Pacheco<sup>1</sup>, José A. Lizarraga-Urzaiz<sup>1</sup>, Paola J. Pérez-Escalante<sup>1</sup>, Luis M. Castillo-Ek<sup>1</sup>, Víctor E. Ehuán-Colli<sup>1</sup>, A. J. Cetina-Quiñones<sup>2,\*</sup>, A. Bassam<sup>3,\*</sup>.

<sup>1</sup>Estudiante de Licenciatura de Ingeniería en Física, Facultad de Ingeniería-UADY, Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte s/n Apdo. Postal 150 Cordemex, Mérida, Yucatán, México.

<sup>2</sup>Posgrado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería-UADY, Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte s/n Apdo. Postal 150 Cordemex, Mérida, Yucatán, México.

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería-UADY, Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte s/n Apdo. Postal 150 Cordemex, Mérida, Yucatán, México.

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2022 - Fecha de aceptación: 20 de enero de 2023

## Resumen

El presente trabajo tiene como propósito realizar un análisis de sensibilidad global de un colector solar plano evaluado bajo condiciones de clima tropical. Para tal motivo se empleó un modelo en el régimen transitorio que predice eficazmente la temperatura de salida del fluido y eficiencia térmica del colector, a partir de diecinueve variables de entrada clasificadas en ambientales, operacionales, de diseño y ópticas. Los valores de las variables de entrada fueron obtenidos de una base de datos de 1920 datos por variable. De acuerdo con los resultados obtenidos, la temperatura promedio máxima alcanzada por el fluido de trabajo fue de 33.79 °C y la eficiencia térmica fue de 34.9 %. De esta manera, el análisis de sensibilidad global reveló que la variable con más influencia para la temperatura final del fluido es el espesor del aislante térmico con un índice de sensibilidad de orden total de 0.4451; mientras que, para la eficiencia, fue la radiación solar con un valor de 0.4821. El modelo desarrollado representa una herramienta en el modelado de colectores solares planos y permite la toma de decisiones para identificar áreas de oportunidad en el mejoramiento de estos sistemas termo-solares.

**Palabras claves:** desarrollo sustentable, energía solar, sistema fototérmico, modelo transitorio.

## Global sensitivity analysis of a flat-panel solar collector in transient regime: a study under tropical climate conditions

---

\*armando.cetina7@gmail.com; baali@correo.uady.mx

## Abstract

The purpose of this work is to perform a global sensitivity analysis of a flat solar collector evaluated under tropical climate conditions. Therefore, a model was used in the transient regime that effectively predicts the fluid outlet temperature and thermal efficiency of the collector, from nineteen input variables classified as environmental, operational, design and optical. The values of the input variables were obtained from a database of 1920 data per variable. According to the results obtained, the maximum average temperature reached by the working fluid was 33.79 °C and the thermal efficiency was 34.9 %. The global sensitivity analysis revealed that the most influential variable for final fluid temperature was the thickness of the thermal insulation with a total order sensitivity index of 0.4451; while for efficiency, it was solar radiation with a value of 0.4821. The developed model represents a useful tool in the modeling of flat solar collectors and allows decision-making to identify areas of opportunity in the improvement of these thermos-solar systems.

**Keywords:** sustainable development, solar energy, photothermal system, transient model.

## Nomenclatura

A	Área, m <sup>2</sup>		<i>Símbolos griegos</i>
c	Calor específico, J/kg °C	α	Absortividad
D <sub>i</sub>	Diámetro interno del tubo, m	δ	Espesor, m
g	Gravedad, m/s <sup>2</sup>	ε	Emisividad
G <sub>t</sub>	Radiación solar, W/m <sup>2</sup>	η <sub>th</sub>	Eficiencia térmica, %
h <sup>conv</sup>	Coefficiente de transferencia de calor por convección, W/m <sup>2</sup> °C	φ	Latitud, °
h <sup>rad</sup>	Coefficiente de transferencia de calor por radiación, W/m <sup>2</sup> °C	θ	Ángulo de inclinación, °
k	Conductividad térmica, W/m °C	ν	Viscosidad cinemática, m <sup>2</sup> /s
L	Longitud del CSP, m	ρ	Densidad, kg/m <sup>3</sup>
m <sub>f</sub>	Flujo másico de agua, kg/s	σ	Constante de Stefan-Boltzmann, W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
n <sub>t</sub>	Número de tubos del CSP	τ <sub>g</sub>	Transmisividad
Nu	Número de Nusselt		<i>Subíndices</i>
Pr	Número de Prandtl	a	Aire
Ra	Número de Rayleigh	amb	Ambiente
Re	Número de Reynolds	c	Colector solar
L	Longitud del CSP, m	f	Fluido
T	Temperatura, °C	g	Vidrio
V <sub>w</sub>	Velocidad del viento m/s	i	Aislante térmico
W	Ancho del CSP, m	in	Entrada
y	Longitud de los tubos del CSP, m	p	Placa absorbedora
		sky	Cielo

## 1. Introducción

El desarrollo de la civilización moderna requiere continuamente de grandes cantidades de energía para su uso en diversos procesos industriales. Esta energía es obtenida principalmente de la quema de combustibles fósiles (Orestes et al. 2016). Sin embargo, existe una necesidad urgente del desarrollo de tecnologías de energías renovables que puedan solventar los problemas ambientales y hacer frente a los desafíos políticos, económicos y ambientales que implica la generación de la energía (Bhattacharya et al. 2014). La energía solar es considerada una de las principales fuentes alternativas de energía para remplazar la dependencia con el combustible fósil, debido a sus insustituibles ventajas en la reducción de emisiones contaminantes, producción más limpia y almacenamiento de energía (Jia et al. 2018). Bajo este contexto, el colector solar plano (CSP) representa un elemento altamente atractivo dado que puede ser empleado en aplicaciones tanto domésticas como industriales para calentamiento de agua o espacios, enfriamiento de edificios, aplicaciones de energía solar y almacenamiento estacional (Cetina-Quiñones et al. 2021).

Para la modelación de cualquier sistema energético se puede emplear un modelo estacionario o transitorio. El régimen o estado estacionario se refiere a que las variables que definen el comportamiento del sistema respecto del tiempo permanecen invariantes, el cual se emplea cuando el sistema ha alcanzado el estado de equilibrio para la medición del fenómeno en cuestión (Rodríguez Caballero, 2016). Por otra parte el régimen transitorio considera la variable temporal y para el caso del CSP, las temperaturas de cada elemento del sistema se calculan en función del tiempo el cual está sujeto a las condiciones climáticas del lugar que de igual manera dependen del tiempo (Massipe Hernández, 2022). Sin embargo, se

ha demostrado que diferentes variables de diseño, ambientales, ópticas y operacionales pueden influir sobre el rendimiento de estos sistemas, de manera que tener control sobre estos parámetros permitirá describir la importancia de cada variable de entrada sobre la salida del modelo; tal descripción representa una herramienta útil para la toma de decisiones. Este tipo de análisis se denomina Análisis de Sensibilidad (AS), y representa el estudio de cómo la incertidumbre en las salidas de un sistema puede ser asociada a las incertidumbres en las entradas de este (Saltelli, 2002b). Un AS puede dividirse en tipo local (ASL) y global (ASG). Ambos permiten cuantificar la influencia de una variable de entrada sobre una variable de salida, no obstante, el ASL se concentra en la importancia de una variable, variando un parámetro de entrada y manteniendo fijos los otros parámetros, mientras que el ASG considera todas las incertidumbres de los parámetros simultáneamente (Hoops et al. 2016). Por esta razón, los ASG ofrecen mayor cobertura del espacio de parámetros inciertos, y permiten un mejor estudio de sus interacciones (Mavromatidis et al. 2018).

Por este motivo, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un análisis de sensibilidad global de un colector solar plano a partir de un modelo térmico de un CSP en régimen transitorio, considerando 19 variables de entrada clasificadas como ambientales, de operación, de diseño y ópticas. El modelo del CSP considera un balance de energía de los diferentes componentes de este. Finalmente, se realiza una proyección anual cuantificando la temperatura del fluido en la salida del CSP y la eficiencia térmica bajo condiciones de clima tropical en Mérida, Yucatán, México.

De esta forma, el presente trabajo pretende alcanzar aplicaciones prácticas directamente aplicables en la optimización de recursos y

---

\*armando.cetina7@gmail.com; baali@correo.uady.mx

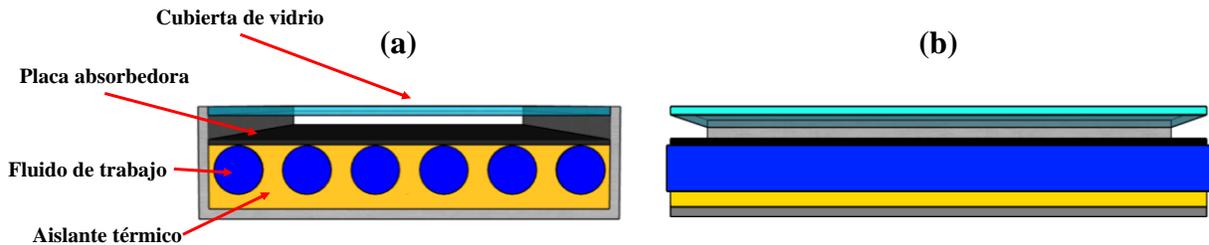
aumento del rendimiento de sistemas energéticos, tras la replicación de este estudio, con su respectiva adaptación a las diferentes condiciones y parámetros de operación.

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción del CSP

El CSP empleado se compone de una cubierta de vidrio transparente, una placa absorbidora

acoplada a seis tubos portadores de fluido de trabajo (agua), ambos fabricados de un metal conductor, una capa de aislante térmica en la parte inferior del colector y una carcasa que permite integrar cada uno de los elementos para minimizar fugas de agua y pérdidas por transferencia de calor. La Figura 1 ilustra el diagrama esquemático del CSP empleado en este trabajo.



**Figura 1.** Diagrama esquemático del colector solar plano, (a) vista transversal y (b) vista de corte longitudinal.

Por otra parte, la Tabla 1 presenta las características del sistema, considerando las diferentes variables de entrada del modelo con sus respectivos intervalos de operación para el

ASG. Los valores fijos se determinaron con base en las características del CSP reportado por (Cetina-Quiñones et al. 2021).

**Tabla 1.** Variables de entrada utilizadas para la modelación y el ASG del CSP.

Categoría	Variable	Valor fijo	Intervalo	Referencia
Ambientales	Radiación solar, $G_t$	900 W/m <sup>2</sup>	0 – 1072 W/m <sup>2</sup>	(FIUADY, 2019)
	Temperatura ambiente, $T_{amb}$	27 °C	10 – 41.2 °C	(FIUADY, 2019)
	Velocidad del viento, $V_w$	3.4 m/s	0 – 13.9 m/s	(FIUADY, 2019)
Operacionales	Flujo másico del agua, $\dot{m}_f$	0.01667 kg/s	0.005 – 0.020 kg/s	(Diego-Ayala and Carrillo, 2016)
	Temperatura de entrada del agua, $T_{f,in}$	30 °C	21 – 45 °C	(FIUADY, 2019)
	Latitud, $\varphi$	21°	6 – 36 °	(Diego-Ayala and Carrillo, 2016)
Diseño	Longitud del CSP, $L$	2 m	0.5 – 2.5 m	(Chabane, 2014; Taki and Farhadi, 2021)
	Ancho del CSP, $W$	0.92 m	0.5 – 2.5 m	(Caliskan, 2017; Taki and Farhadi, 2021)
	Diámetro interno del tubo, $D_i$	0.0254 m	0.008 – 0.05 m	(Badiei et al. 2020; Jiandong et al. 2015; Reddy et al. 2021)
	Espesor del vidrio, $\delta_g$	0.0032 m	0.003 – 0.005 m	(Balaji et al. 2019; Sharafeldin y Gróf, 2018)
	Espesor de la capa de aire, $\delta_a$	0.05 m	0.01 – 0.05 m	(Badiei et al. 2020)

	Espesor de la capa absorbedora, $\delta_p$	0.0005 m	0.0004 – 0.0025 m	(Badiei et al. 2020; Xia et al. 2020)
	Espesor del aislante térmico, $\delta_i$	0.01 m	0.004 – 0.06 m	(Jiandong et al. 2015)
	Número de tubos del CSP, $n_r$	6	6 – 9	(Hamid et al. 2021)
Ópticas	Absortividad del vidrio, $\alpha_g$	0.06	0.06 – 0.13	(Sharafeldin and Gróf, 2018)
	Absortividad de la placa absorbedora, $\alpha_p$	0.95	0.65 – 0.97	(Giovannetti et al. 2014; Xia et al. 2020)
	Emisividad del vidrio, $\varepsilon_g$	0.84	0.2 – 0.94	(Giovannetti et al. 2014; Xia et al. 2020)
	Emisividad de la placa absorbedora, $\varepsilon_p$	0.9	0.05 – 0.9	(Giovannetti et al. 2014; Xia et al. 2020)
	Transmisividad del vidrio, $\tau_g$	0.88	0.75 – 0.96	(Giovannetti et al. 2014)

## 2.2. Balance de energía del CSP

La energía empleada en cualquier sistema energético depende de la energía absorbida, la energía perdida y la generación de energía en forma de calor por el sistema. En los sistemas termo solares, la energía absorbida depende de la radiación solar, y la energía perdida se lleva a cabo a través de los procesos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación). La temperatura de cada componente del CSP se rige por una ecuación transitoria, que se deriva del equilibrio de los flujos de energía que intercambia, ya sea con el medio ambiente o con los otros elementos del sistema. Estas

ecuaciones se desarrollaron considerando un balance de energía a partir del intercambio de calor entre los diferentes elementos del CSP. Los elementos que se consideraron fueron la cubierta de vidrio, placa absorbedora y fluido de trabajo. Las temperaturas de cada elemento se escriben a través de una ecuación diferencial que considera el tiempo. Cada ecuación involucra diferentes coeficientes de transferencia de calor, así como entradas y salidas de energía al sistema.

El balance de energía de la cubierta de vidrio se presenta en la Ecuación (1) (Cetina-Quñones, et al. 2021):

$$G_t \alpha_g + h_{p-g}^{rad} (T_p - T_g) + h_{p-g}^{conv} (T_p - T_g) = h_{g-amb}^{conv} (T_g - T_{amb}) + h_{g-sky}^{rad} (T_g - T_{amb}) + (\rho_g c_g \delta_g) \frac{dT_g}{dt} \quad (1)$$

Donde el subíndice ( $g - amb$ ) de  $h_{g-amb}^{conv}$ , indica que la transferencia de calor es entre el vidrio y el ambiente, y se estima mediante la Ecuación (2) (Zhou et al. 2019).

$$h_w = 6.5 + 3.3V_w \quad (2)$$

Por otra parte,  $h_{p-g}^{conv}$  se calcula mediante la Ecuación (3) (Çengel et al. 2011), donde el subíndice ( $p - g$ ) denota el intercambio de calor entre la placa absorbedora y la cubierta de vidrio.

$$h_{p-g}^{conv} = \frac{k_a}{\delta_a} Nu_a \quad (3)$$

Donde el número de Nusselt del aire se obtiene por la relación descrita en la Ecuación (4) (Bergman et al. 2017).

$$Nu_a = 1 + 1.44 \left\{ 1 - \frac{1708[\sin(1.8\theta)]^{1.6}}{Ra \cos \theta} \right\} \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (4)$$

De la Ecuación (4) el símbolo “+” indica que la expresión dentro de corchetes se iguala a cero si su valor numérico es negativo. Por otro lado, el número de Rayleigh se calcula mediante la Ecuación (5) (Cengel, 2014).

$$Ra = \frac{gPr_a(|T_p - T_g|)\delta_a^3}{T_a\nu_a^2} \quad (5)$$

Por otra parte,  $h_{p-g}^{rad}$  y  $h_{g-sky}^{rad}$  se estiman por la Ecuaciones (6) y (7), respectivamente (Zhou et al. 2019). El subíndice ( $g - sky$ ) indica que la transferencia de calor se da entre la cubierta del vidrio y el cielo.

$$h_{p-g}^{rad} = \frac{\sigma(T_p + T_g)(T_p^2 + T_g^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} \quad (6)$$

$$h_{g-sky}^{rad} = \epsilon_g \sigma(T_g + T_{sky})(T_g^2 + T_{sky}^2) \quad (7)$$

Donde  $T_{sky}$  se relaciona con la temperatura del ambiente y se calcula mediante la correlación de Swinbank, a través de la Ecuación (8) (Swinbank, 1963).

$$T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (8)$$

El balance de la placa absorbidora se escribe mediante la Ecuación (9) (Cetina-Quiñones et al. 2021).

$$G_t \alpha_p \tau_g = h_{p-g}^{rad}(T_p - T_g) + h_{p-g}^{conv}(T_p - T_g) + \frac{k_i}{\delta_i}(T_p - T_{amb}) + h_{p-f}^{conv} \frac{A_f}{A_p}(T_p - T_f) + (\rho_p c_p \delta_p) \frac{dT_p}{dt} \quad (9)$$

Donde el subíndice de ( $p - f$ ) de  $h_{p-f}^{conv}$  denota el intercambio de calor entre la placa absorbidora y el fluido de trabajo, y se estima mediante la Ecuación (10) (Cengel, 2014).

$$h_{p-f}^{conv} = \frac{k_f}{D_i} Nu_f \quad (10)$$

El número de Nusselt del fluido se puede calcular por la Ecuación (11) (Bergman et al. 2017).

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (11)$$

Por otra parte, el balance de energía para el fluido de trabajo se presenta en la Ecuación

(12) (Badiei et al. 2019; Cetina-Quiñones et al. 2021).

$$h_{p-f}^{conv} \pi D_f (T_p - T_f) = \rho_f c_f \frac{\pi D_f^2}{4} \frac{dT_f}{dt} + \frac{\dot{m}_f c_f}{n_t} \frac{\partial T_f}{\partial y} \quad (12)$$

Finalmente, la eficiencia térmica del CSP se calcula mediante la Ecuación (13) (Kalogirou, 2013).

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_f c_f (T_{f,out} - T_{f,in})}{G_t A_c} \quad (13)$$

Todas las ecuaciones (1 - 13) descritas anteriormente se resolvieron numéricamente mediante el método de diferencias finitas, el

cual es un método iterativo, a partir del cual se propone e itera un determinado valor hasta que alcanza un criterio de convergencia. Para tal motivo, se desarrolló un código en el entorno de programación MATLAB, que resuelve el modelo numéricamente a través de la iteración de temperaturas calculadas a partir de una temperatura propuesta. Este cálculo se realiza hasta que el método converge y se obtienen las temperaturas de cada elemento del sistema. Estas temperaturas obtenidas representan los resultados finales y la cantidad de valores que dependen del tamaño de la base de datos, cuyo valor es de 1920 datos por variable, que después fueron analizados para su interpretación de resultados. La base de datos fue creada manualmente para determinar que los valores se encontraran dentro de los intervalos reportados en la Tabla 1. Finalmente, para la validación del modelo bajo este régimen, se requiere comparar los resultados obtenidos con resultados previos obtenidos de la literatura, principalmente de trabajos experimentales, ya que estos representan el fenómeno real de estudio.

### 2.3. Análisis de sensibilidad global del CSP

Para el desarrollo del ASG se utilizó el método de Sobol, con el cual se obtienen valores numéricos denominados *índices de*

*sensibilidad*, que permiten medir la contribución de cada variable de entrada sobre las variables de salida (Saltelli, 2002a). Estos índices se dividen en primer orden (Ecuación (14) (Saltelli, 2002a)), que miden la contribución a la varianza de salida ante la variación de un solo parámetro de entrada; los de segundo orden que miden la contribución a la varianza causada por la variación de un parámetro de entrada ante la variación de otro parámetro de entrada, tanto en sus contribuciones independientes como correlacionadas; y los de orden total (Ecuación (15) (Saltelli, 2002b)), que miden la contribución a la varianza causada por la variación de un parámetro de entrada ante la variación de todos los parámetros de entrada involucrados (incluye efectos de primer orden y las demás interacciones de orden mayor) (Saltelli, 2002a).

$$SI = \frac{V[E(Y/X_i)]}{V(Y)} \quad (14)$$

$$ST = 1 - \frac{V[E(Y/X_{-i})]}{V(Y)} \quad (15)$$

Siendo  $V[E(Y/X_i)]$  la varianza esperada,  $V[E(Y/X_{-i})]$  es la varianza esperada que sería removida de la varianza total  $V(Y)$  al considerar todos los términos de cualquier orden que incluya  $X_i$ .

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Resultados de la validación del modelo

La Figura 2 presenta los resultados de la validación del modelo desarrollado comparado con resultados experimentales reportados por (Wenceslas and Ghislain, 2019). Como se puede observar en la Figura 2(a), existe una alta correlación de las temperaturas obtenidas de la modelación del CSP con las reportados por (Wenceslas and Ghislain, 2019) durante un

intervalo de tiempo entre 6:00 y 18:30 hrs. Las máximas temperaturas obtenidas para la cubierta de vidrio, la placa absorbadora y el fluido de trabajo fueron de 38.01, 69.6 y 65.25 °C, respectivamente, obtenidas durante las 12:30 hrs. Además, se empleó el coeficiente de determinación para garantizar la confiabilidad del modelo, en el cual se obtuvo un valor de 0.9965 (ver Figura 2(b)), lo que indica que el modelo desarrollado presenta una adecuada correlación con los resultados experimentales.

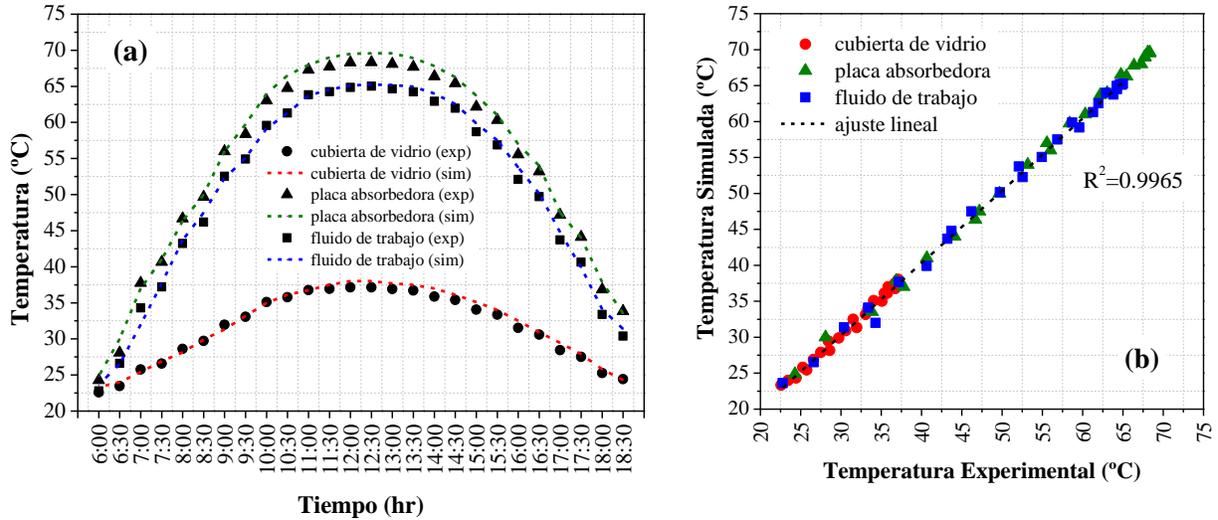


Figura 2. Resultados obtenidos de la validación del modelo del CSP con datos experimentales.

### 3.2. Resultados de temperatura y eficiencia térmica

En esta sección se presentan los resultados de temperatura de salida del fluido y eficiencia térmica del CSP obtenidos por el modelo

térmico a partir de una base de datos anual, considerando los parámetros fijos presentados en la Tabla 1. Estos resultados corresponden a valores de promedios mensuales y se ilustran en la Figura 3.

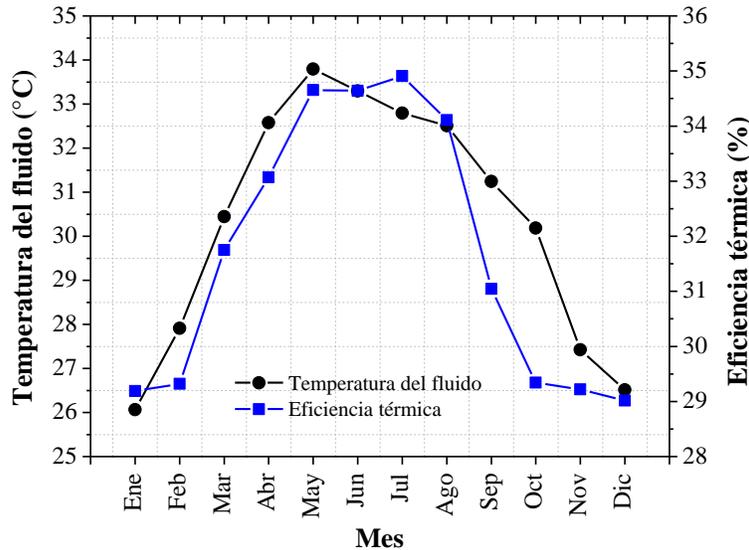


Figura 3. Valores promedios mensuales de temperatura de salida del fluido de trabajo y eficiencia térmica del CSP.

Como se puede observar de la Figura 3, existe un incremento de la temperatura del fluido y la eficiencia térmica durante los meses centrales del año, específicamente durante primavera y verano. Esto puede deberse a que las variables ambientales, específicamente la radiación solar es mayor durante estos meses, lo cual conlleva

a un incremento de la temperatura del fluido y por ende la eficiencia térmica. La correlación entre estas dos variables es lineal, ya que como se aprecia de la Ecuación (13), al incrementar la temperatura de salida del fluido, la eficiencia térmica también incrementa debido a que tales variables son directamente proporcionales. Los

valores alcanzados en ambas variables dependen de los parámetros ambientales y climáticos de cada mes. Desde el punto de vista físico, una temperatura mayor indica que el fluido aprovechó eficazmente el calor proveniente de la radiación solar y las pérdidas de calor fueron minimizadas, por lo que su rendimiento o eficiencia también fue mayor. Finalmente, el valor máximo promedio alcanzado por la temperatura del fluido fue de 33.79 °C, mientras que la eficiencia térmica del CSP alcanzó un valor máximo de 34.9 %.

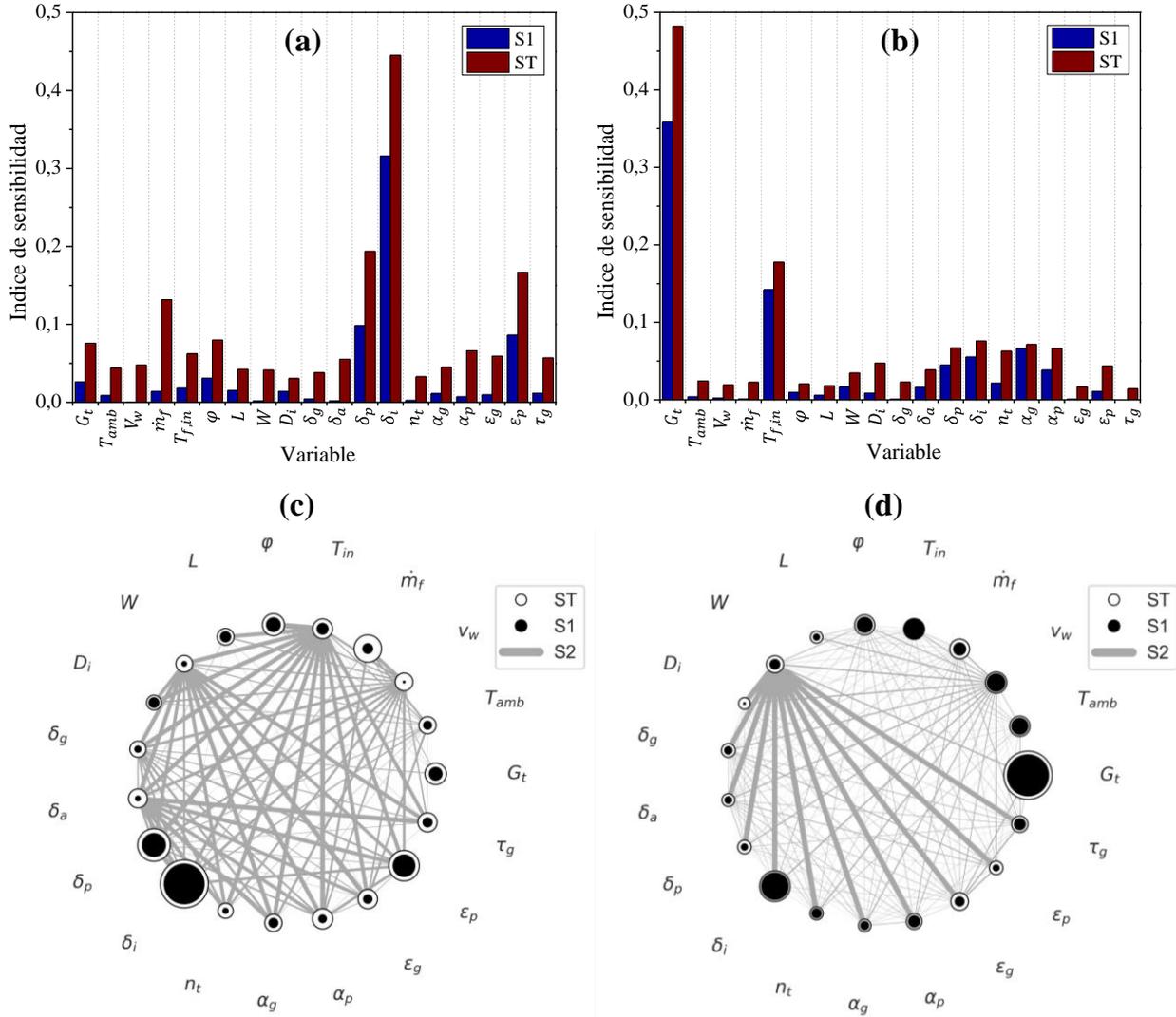
### *3.3. Resultados del análisis de sensibilidad global*

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad global empleando el método de Sobol anteriormente descrito. Para tal motivo, se generó una base de datos a partir del modelo transitorio del CSP considerando los intervalos de análisis de cada variable. Para la validación del ASG se obtuvieron los valores del margen de error entre diferentes simulaciones realizadas. Este procedimiento fue efectuado varias veces hasta lograr un criterio de convergencia con resultados muy cercanos a cero (Sarrazin et al. 2016).

Finalmente, se obtuvieron los índices de sensibilidad de Sobol presentados en las Figuras 4(a) y 4(b), y se reportan gráficas de convergencia radial donde se aprecia de manera cualitativa la influencia de cada

variable de entrada, así como sus interacciones con las demás (ver Figura 4(c) y 4(d)).

De la Figura 4(a) se observa que el índice más alto con la mayor influencia para la temperatura de salida de fluido tanto para S1 como ST fue el espesor del aislante térmico, con un valor de 0.3160 y 0.4451, respectivamente. Esto se debe a que el espesor de la capa de aire influye en las pérdidas de calor por conducción del fluido en contacto con la placa absorbidora. Por otra parte, la Figura 4(b) indica que la radiación solar presentó mayor influencia sobre la eficiencia térmica, obteniendo un índice de sensibilidad de primer orden de 0.3592 y un índice de orden total de 0.4821, mientras que la temperatura de entrada fue la segunda variable con mayor influencia sobre el CSP. Estos resultados pueden atribuirse a que la radiación solar representa una entrada de energía al sistema, lo cual influye directamente en su eficiencia térmica como se reportó en la Ecuación 13. Por otra parte, si la temperatura de entrada aumenta bajo las mismas condiciones, se esperaría un incremento en la temperatura de salida lo cual se interpreta como una ganancia térmica mayor y por ende una mayor eficiencia térmica. Finalmente, las Figuras 4(c) y 4(d) ilustran los valores de los índices de sensibilidad de manera cualitativa. Se puede apreciar que los círculos concéntricos más grandes son los que presentan mayor influencia, mientras que el índice S2 muestra la intensidad de la relación de las variables entre sí.



**Figura 4.** Índices de sensibilidad de Sobol y gráficas de convergencia radial obtenidas por el análisis de sensibilidad global para (a y c) la temperatura de salida del fluido, y (b y d) la eficiencia térmica del CSP.

Finalmente, se reporta en la Tabla 2 los resultados de la desviación estándar de la simulación del análisis de sensibilidad, donde

se presenta cada valor por cada variable de entrada. Estos resultados fueron obtenidos hasta alcanzar un criterio de convergencia.

**Tabla 2.** Valores del margen de error obtenidos durante el análisis de sensibilidad global

Variable	Temperatura	Eficiencia térmica
Radiación solar, $G_t$	0.00426	0.00162
Temperatura ambiente, $T_{amb}$	0.00266	0.00323
Velocidad del viento, $V_w$	0.00249	0.00412
Flujo másico del agua, $\dot{m}_f$	0.00659	0.00357
Temperatura de entrada del agua, $T_{f,in}$	0.00299	0.003388
Latitud, $\varphi$	0.00399	0.00268

Longitud del CSP, $L$	0.00213	0.000971
Ancho del CSP, $W$	0.00235	0.00197
Diámetro interno del tubo, $D_i$	0.00179	0.000805
Espesor del vidrio, $\delta_g$	0.00213	0.00130
Espesor de la capa de aire, $\delta_a$	0.00289	0.00102
Espesor de la capa absorbadora, $\delta_p$	0.00779	0.00109
Espesor del aislante térmico, $\delta_i$	0.00155	0.00760
Número de tubos del CSP, $n_t$	0.00196	0.00106
Absortividad del vidrio, $\alpha_g$	0.00251	0.00114
Absortividad de la placa absorbadora, $\alpha_p$	0.00342	0.00174
Emisividad del vidrio, $\varepsilon_g$	0.00337	0.00250
Emisividad de la placa absorbadora, $\varepsilon_p$	0.00787	0.00129
Transmisividad del vidrio, $\tau_g$	0.00262	0.00254

Como se puede observar de la Tabla 2, todos los valores correspondientes al margen de error se encuentran por debajo de 0.01 para un intervalo de confianza del 95 %, tanto para la temperatura como para la eficiencia térmica. Estos valores fueron obtenidos mediante promedios de diferentes simulaciones con el método de Sobol, lo cual permiten validar los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad global.

## Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo de un análisis de sensibilidad global de un colector solar plano considerando 19 variables de entrada clasificadas en tipo ambiental, operacionales, de diseño y ópticas. El modelo fue desarrollado mediante un balance de energía global en estado transitorio, contemplando los diferentes procesos de transferencia de calor involucrados en un colector solar plano el cual fue proyectado para un año, obteniendo valores promedios mensuales para su análisis.

Los resultados obtenidos demostraron que el valor máximo promedio alcanzado por la

temperatura del fluido fue de 33.79 °C, mientras que la eficiencia térmica del CSP alcanzó un valor máximo de 34.9 %. Estos valores fueron obtenidos durante los meses centrales del año, lo cual se le atribuye a mayor cantidad de incidencia de la radiación solar sobre el sistema.

Finalmente, el análisis de sensibilidad global indicó que la variable con mayor influencia sobre la temperatura de salida fue el espesor del aislante con índices de sensibilidad de 0.3160 y 0.4451 para S1 y ST, respectivamente, mientras que para la eficiencia térmica fue la radiación solar con un índice S1 de 0.3592 y ST de 0.4821.

Este trabajo permite destacar la importancia del análisis de sensibilidad global en el diseño y modelación de sistemas energéticos como una herramienta útil para la optimización. Además, debido a la comprensión del efecto particular de parámetros de entrada sobre parámetros de salida, se puede tener un mejor control sobre ciertas variables durante el proceso de modelación y fabricación de cualquier tipo de sistema termo-solar.

## Referencias

- Badiei, Z., Eslami, M., and Jafarpur, K. (2019). Performance Improvements in Solar Flat Plate Collectors by Integrating with Phase Change Materials and Fins: A CFD Modeling. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116719>
- Badiei, Z., Eslami, M., and Jafarpur, K. (2020). Performance improvements in solar flat plate collectors by integrating with phase change materials and fins: A CFD modeling. *Energy*, 192, 116719.
- Balaji, K., P. G. K., Sakthivadivel, D., Vigneswaran, V. S., and Iniyar, S. (2019). Experimental investigation on flat plate solar collector using frictionally engaged thermal performance enhancer in the absorber tube. *Renewable Energy*, 142, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.078>
- Bergman, T. L., Lavine, A., Incropera, F. P., and Dewitt, D. P. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons New York.
- Bhattacharya, T., Chakraborty, A. K., and Pal, K. (2014). Effects of ambient temperature and wind speed on performance of monocrystalline solar photovoltaic module in Tripura, India. *Journal of Solar Energy*, 2014.
- Caliskan, H. (2017). Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenvironomic (EXENEC) analyses of solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(March 2016), 488–492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.203>
- Cengel, Y. (2014). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- Çengel, Y. A., Ghajar, A. J., and D'Orneville, E. J. H. (2011). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Cetina-Quiñones, A. J., Lopez Lopez, J., Ricalde-Cab, L., El Mekaoui, A., San-Pedro, L., and Bassam, A. (2021). Experimental evaluation of an indirect type solar dryer for agricultural use in rural communities: Relative humidity comparative study under winter season in tropical climate with sensible heat storage material. *Solar Energy*, 224(June), 58–75. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.040>
- Cetina-Quiñones, A. J., Xamán, J., Bassam, A., Escalante Soberanis, M. A., and Perez-Quintana, I. (2021). Thermo-economic analysis of a flat solar collector with a phase changing material under tropical climate conditions: Residential and industrial case. *Applied Thermal Engineering*, 182(March 2020). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116082>
- Chabane, F. (2014). Experimental study of heat transfer and thermal performance with longitudinal fins of solar air heater. *Journal of Advanced Research*, 5(2), 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.03.001>
- Diego-Ayala, U., and Carrillo, J. . (2016). Evaluation of temperature and efficiency in relation to mass flow on a solar flat plate collector in Mexico. *Renewable Energy*, 96, 756–764.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.027>

- FIUADY. (2019). *Estación Meteorológica FIUADY*. <https://www.ingenieria.uady.mx/meteorologica/index.php>
- Giovannetti, F., Föste, S., Ehrmann, N., and Rockendorf, G. (2014). High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: Applications and performance. *Solar Energy*, *104*, 52–59.
- Hamid, S., Rafae, O., and Mohammed, O. (2021). Energetic and exergetic performance analysis of flat plate solar collector under variables heat transfer coefficient and inlet water temperature. *Case Studies in Thermal Engineering*, *28*(December), 101700. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101700>
- Hoops, S., Hontecillas, R., Abedi, V., Leber, A., Philipson, C., Carbo, A., and Bassaganya-Riera, J. (2016). Ordinary differential equations (ODEs) based modeling. In *Computational Immunology* (pp. 63–78). Elsevier.
- Jia, T., Dai, Y., and Wang, R. (2018). Refining energy sources in winemaking industry by using solar energy as alternatives for fossil fuels: A review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *88*(May 2017), 278–296. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.008>
- Jiandong, Z., Hanzhong, T., and Susu, C. (2015). Numerical simulation for structural parameters of flat-plate solar collector. *Solar Energy*, *117*, 192–202.
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press.
- Massipe Hernández, J. R. (2022). *Colectores solares termoacumulativos. Análisis numérico y experimental en regímenes estacionario y transitorio*.
- Mavromatidis, G., Orehounig, K., and Carmeliet, J. (2018). Uncertainty and global sensitivity analysis for the optimal design of distributed energy systems. *Applied Energy*, *214*, 219–238.
- Orestes, M., González, A., Gonçalves, J. S., and Vasconcelos, R. M. (2016). Sustainable development: Case study in the implementation of renewable energy in Brazil. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.052>
- Reddy, J., Das, B., and Negi, S. (2021). Energy, exergy, and environmental (3E) analyses of reverse and cross-corrugated trapezoidal solar air collectors: An experimental study. *Journal of Building Engineering*, *41*(March), 102434. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102434>
- Rodriguez Caballero, M. (2016). *Análisis de modelos de un captador solar plano en régimen transitorio*.
- Saltelli, A. (2002a). Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, *145*(2), 280–297.
- Saltelli, A. (2002b). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis*, *22*(3), 579–590.
- Sarrazin, F., Pianosi, F., and Wagener, T. (2016). Global Sensitivity Analysis of environmental models: Convergence and validation. *Environmental Modelling and Software*, *79*(May), 135–152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.005>

- Sharafeldin, M. A., and Gróf, G. (2018). Experimental investigation of flat plate solar collector using CeO<sub>2</sub>-water nano fluid. *Energy Conversion and Management*, 155(October 2017), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.070>
- Swinbank, W. C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339–348.
- Taki, M., and Farhadi, R. (2021). Modeling the energy gain reduction due to shadow in flat-plate solar collectors; Application of artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.08.002>
- Wenceslas, K. Y., and Ghislain, T. (2019). Experimental Validation of Exergy Optimization of a Flat-Plate Solar Collector in a Thermosyphon Solar Water Heater. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(3), 2535–2549. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3227-x>
- Xia, J., Li, Y., Li, C., Wang, Y., Xie, L., Miao, Y., Zhang, Q., Hao, C., and Sun, G. (2020). Performance evaluation of different solar collectors in building cooling, heating, and hot water supply. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(4), 43701.
- Zhou, F., Ji, J., Yuan, W., Zhao, X., and Huang, S. (2019). Study on the PCM flat-plate solar collector system with antifreeze characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.114>