



ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA EN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

José de Jesús Ramírez-Minguela ^{a,*}, Juan Manuel Mendoza-Miranda ^b, Carmen Salazar-Hernández ^b,
Jorge Arturo Alfaro-Ayala ^a, José Luis Rodríguez-Muñoz ^c, Tzayam Pérez-Segura ^a, Carlos Enrique
Alvarado-Rodríguez ^a, Agustín Ramón Uribe-Ramírez ^a

^a Universidad de Guanajuato-División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Col. Noria
Alta s/n, C.P. 36050 Guanajuato, Guanajuato, México. jdj.ramirezminguela@ugto.mx

^b Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingenierías Campus Guanajuato.
Av. Mineral de Valenciana No. 200 Col. Fracc. Industrial Puerto Interior, C.P. 36275 Silao de la Victoria,
Guanajuato, México.

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Carretera Cd.
Sahagún-Otumba s/n, Zona Industrial, Ciudad Sahagún, C.P. 43970 Hidalgo, México.

Resumen

En este trabajo se analiza numéricamente el comportamiento de la generación de entropía de un colector solar de placa plana mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) considerando tres diferentes irradiaciones. La geometría considerada para el estudio es un arreglo en paralelo de 7 tubos unidos a los cabezales inferior y superior del colector. Las irradiaciones consideradas en el estudio corresponden a la más baja promedio del mes, promedio del año y a la más alta promedio del mes en un año que prevalecen en la ciudad de Guanajuato, Guanajuato, México. El modelo toma en cuenta el flujo del fluido y la transferencia de calor a través de los tubos que conforman el colector. Los resultados obtenidos muestran que la generación de entropía debido a la viscosidad del fluido es despreciable. Por otra parte, la generación de entropía debido a la transferencia de calor es más significativa al aumentar la irradiación.

Palabras clave: CFD; colector solar de placa plana; generación de entropía.



NUMERICAL ANALYSIS OF ENTROPY GENERATION IN FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR

Abstract

In this work, the entropy generation behavior of a flat plate solar collector has been numerically analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) considering three different irradiances was analyzed numerically. The geometry considered for the study is a parallel arrangement of 7 tubes connected to the lower and upper heads of the collector. The irradiances considered in the study correspond to the lowest average of the month, the average of the year and the highest average of the month in one year that prevail in the city of Guanajuato, Guanajuato, Mexico. The model considers the fluid flow and heat transfer through the tubes that make up the collector. The results obtained show that the entropy generation due to the viscosity of the fluid is negligible. Furthermore, the entropy generation due to heat transfer becomes more significant as the irradiation increases.

Keywords: CFD; flat plate solar collector; entropy generation.



1. Introducción

La energía solar es una alternativa al uso de combustibles fósiles para la generación de energía. Como es bien sabido, es necesario reemplazar las fuentes de energía actuales que se utilizan para satisfacer la demanda de energía y así disminuir la emisión de gases causantes del efecto invernadero mediante el uso de fuentes alternas. En este sentido, el uso de colectores solares, los cuales aprovechan la energía solar para transferir calor a un fluido (agua, aire, aceites, entre otros) ayuda a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero (Ahmadia y col., 2021). Dentro de las aplicaciones que se han estudiado y desarrollado con éxito se encuentra el uso de los colectores solares para el calentamiento de agua sanitaria.

Existen diversos tipos de colectores solares entre los cuales se encuentran los colectores solares de placa plana cuya superficie absorbe la radiación solar directa y difusa. Una de las geometrías más comunes utilizadas en este tipo de colectores consiste en un número determinado de tubos en paralelo verticales unidos a un cabezal inferior, por donde entra el fluido de trabajo, y un cabezal superior, por donde sale el fluido de trabajo, los cuales están cubiertos generalmente por una tapa

transparente de cristal templado para mejorar la transferencia de calor y genera un aislamiento que limita las pérdidas térmicas (Bhatia, 2014).

Dentro de la literatura se encuentran estudios experimentales y estudios numéricos sobre el desempeño de los colectores solares de placa plana. Marroquín y col. (2013) analizaron mediante la construcción, experimentación y simulación dos sistemas de absorción utilizando como fluido de trabajo agua. El estudio consistió en variar la geometría de la sección transversal del colector solar de placa plana utilizando una geometría cilíndrica y una rectangular. Los autores discutieron el desempeño térmico y la dinámica del fluido tanto de los resultados experimentales como de los resultados de las simulaciones realizadas mediante la dinámica de fluidos computacional. Kargarsharifabad y col. (2014) analizaron la implementación de tubos de calor para proveer de energía térmica a un edificio. Ellos realizaron la simulación de un análisis termodinámico del sistema y compararon el desempeño de los tubos de calor propuestos con el desempeño de colectores solares convencionales de placa plana, además de realizar análisis exegéticos de los sistemas. Hashim y col. (2018) diseñaron un colector solar de placa plana con



patrón cuadrado y analizaron su desempeño térmico mediante la realización de experimentos, considerando las condiciones prevalecientes de Baghdad, Iraq. Los autores utilizaron agua como fluido de trabajo y probaron dos diferentes flujos volumétricos de 5.3 y 6.51 l/min, respectivamente. De acuerdo con los resultados obtenidos, en el trabajo se concluye que el sistema era de utilidad ya que se obtuvieron altas efectividades y altas temperaturas de salida en el sistema. Mustafa y col. (2021) mejoraron el desempeño de un proceso de corriente caliente asistido mediante el sol usando nanopartículas de CuO en un colector solar de placa plana. El trabajo se realizó mediante una aproximación numérica basada en la dinámica de fluidos computacional considerando un modelo en estado transitorio. Vengadesan y Senthil (2022) analizaron de manera experimental un sistema simple de conversión de energía solar mediante el uso de colectores solares de placa plana para producción de agua caliente. Principalmente su trabajo consistió en la obtención del desempeño térmico considerando desviadores de flujo de corte rectangular bifuncionales con un ángulo de inclinación a diferentes flujos volumétricos. Sus resultados obtenidos mostraron que la

eficiencia térmica se incrementa debido a las modificaciones analizadas.

Por otra parte, es conveniente mencionar que existen pocos trabajos que consideran el uso de la segunda ley de la termodinámica para evaluar el desempeño de los colectores solares planos. En este sentido, la generación de entropía ayuda a cuantificar las irreversibilidades que se tienen en el desempeño de los colectores solares planos y estas dependen en gran medida en los fenómenos físicos que se presentan durante su funcionamiento. Por lo tanto, un dispositivo de conversión eficiente de energía tiene una baja generación de entropía. Torres Reyes y col. (2001) obtuvieron de manera experimental y teórica los parámetros óptimos de un colector solar de placa plana para los cuales la generación de entropía es un mínimo. Jilani y Thomas (2014) realizaron un estudio mediante simulación numérica sobre los efectos de los parámetros de rendimiento de colectores solares de placa plana tipo lamina y tubo mediante la tasa de generación de entropía. En sus resultados presentaron y discutieron una amplia gama de valores para la relación de aspecto de la placa absorbente, el parámetro de pérdida general y la temperatura de salida del fluido adimensional. Los autores concluyeron que la



suposición de una conductividad térmica constante y un coeficiente de pérdida general da como resultado sobreestimaciones de la tasa total de generación de entropía con un error considerable. Además, también concluyeron que la generación de entropía total aumenta al incrementar el parámetro de pérdida general. Jouybari y col. (2017) estudiaron de manera experimental los efectos en el desempeño térmico y la generación de entropía de colectores solares de placa plana a base de agua considerando medios porosos. Ellos consideraron el análisis de dos casos: el primero fue un canal poroso completamente lleno, mientras que el segundo fue un canal vacío. En el análisis se realizó la variación del flujo volumétrico de 0.5 a 1.5 l/min. Entre sus resultados se obtuvo que el medio poroso causa que la pérdida de presión incremente de manera no lineal al incrementar el número de Reynolds. Además, se muestra que el desempeño del colector solar de placa plana disminuye al aumentar el número de Reynolds. Finalmente, el análisis de generación de entropía reveló que las irreversibilidades debidas a la transferencia de calor son más dominantes en ambos colectores.

Como puede observarse, la mayoría de los estudios reportados en la literatura muestran

estudios sobre el desempeño de los colectores solares de placa plana que consideran diferentes geometrías en términos de eficiencia térmica. Mientras que algunos trabajos que realizan análisis de generación de entropía consideran modelos de caja negra. Es por lo anterior que, en este trabajo se analiza el desempeño térmico y las irreversibilidades de un colector solar de placa plana mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) con la ayuda del software ANSYS-FLUENT®. El colector consiste en 7 tubos verticales en paralelo unidos a un cabezal inferior y a uno superior. En el estudio se consideró la irradiación más alta promedio de un mes, la irradiación más baja promedio del mes, así como la irradiación promedio a lo largo del año que prevalecen en la ciudad de Guanajuato, Guanajuato, México. El flujo volumétrico considerado para los casos de estudio es de 3 l/min. El modelo considera una geometría en tres dimensiones, los efectos de la transferencia de calor y la dinámica del fluido para el desempeño térmico. Para la cuantificación de las irreversibilidades se realizó un análisis de generación de entropía considerando la transferencia de calor, los efectos viscosos, así como las pérdidas de



calor debido a las pérdidas ópticas y térmicas en los tubos.

2. Descripción de la geometría

La Figura 1 muestra un esquema general de la geometría del colector solar plano utilizado para las simulaciones, donde las características de la geometría son las siguientes: largo de 1 m, ancho de 1.75 m, diámetro de los cabezales 0.025 m, diámetro de los tubos 0.016 m, número de tubos 7, separación entre tubos de 0.11 m.

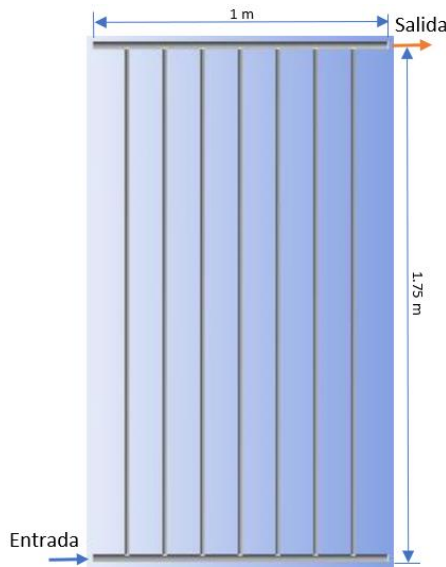


Figura 1. Esquema general de la geometría del colector solar de placa plana.

3. Ecuaciones de gobierno

El modelado del colector solar de placa plana considera una serie de ecuaciones parciales

que describen los fenómenos que ocurren al interior de este. Para modelar dicho colector se consideran las suposiciones de estado estable, el fluido en el interior de los tubos es agua como fluido incompresible con propiedades físicas y de transporte constantes exceptuando la densidad, la cual fue calculada mediante la aproximación de Boussinesq.

Los campos de velocidad y presión fueron determinados mediante el uso de las leyes de conservación de momento y masa.

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F} \quad (2)$$

Para el flujo turbulento se consideró el modelo estándar k-ε (Launder y Spalding, 1972) debido a que se ha demostrado ser apropiado para el estudio de la turbulencia en flujos prácticos de ingeniería por su precisión razonable para una amplia gama de flujos turbulentos.

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$



$$\rho\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Para el análisis de las distribuciones de temperatura se resolvió la ecuación de energía.

$$\rho c \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

El movimiento del fluido debido a los cambios de densidad por la temperatura fue considerado mediante la aproximación de Boussinesq debido a que en este tipo de sistemas ha demostrado dar buenos resultados (Alfaro y col., 2015).

$$\rho_\infty - \rho = \rho\beta(T - T_\infty) \quad (7)$$

donde la diferencia de densidad se expresa en términos del coeficiente de expansión volumétrica β (para el caso de estudio se consideró un coeficiente constante, $\beta = 0.000206 K^{-1}$) y la temperatura T .

Por otro lado, el flujo de generación de entropía local se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$s_i = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{T} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

Como se puede observar en la ecuación 8, el flujo de generación de entropía local considera tanto los efectos de transferencia de calor, s_h , como los efectos viscosos, s_μ . Por lo que la entropía local total se puede expresar como:

$$s_i = s_h + s_\mu \quad (9)$$

El cálculo de la entropía global se expresa mediante:

$$S_i = \int s_i dV \quad (10)$$

La generación de entropía global debido a la transferencia de calor (S_q) se considera como:

$$S_q = \frac{\dot{Q}_{loss}}{T_{env}} \quad (11)$$

donde

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{Q}_{sun,in} - \dot{Q}_{useful} \quad (12)$$

Como fue establecido por Takashima y col. (1994), el flujo de calor del sol puede ser expresado como:

$$\dot{Q}_{sun,in} = A_c I \quad (13)$$



El flujo de calor utilizado (\dot{Q}_{useful}) es calculado como:

$$\dot{Q}_{useful} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (14)$$

En este sentido, en las paredes de los tubos se consideró el flujo de calor utilizado como condición de frontera. Donde el flujo de calor utilizado fue obtenido analíticamente restando las pérdidas ópticas y térmicas en los tubos y el colector de la cantidad total de calor recibido debido a la radiación solar, tal como lo presentan Budihardjo y col. (2002), Budihardjo y Morrison (2009) y Li y col. (2010). De manera experimental, el flujo de calor utilizado es el calor requerido para incrementar la temperatura del agua entre la entrada y la salida del colector solar.

Por lo que, la generación de entropía total se calcula como sigue:

$$S_{total} = S_i + S_q \quad (15)$$

4. Condiciones de frontera del modelo

El flujo volumétrico que se consideró fue de 3.0 l/min, la cual se introduce al software mediante la condición de velocidad promedio en la sección transversal de la entrada del colector. En esa misma sección se consideró la temperatura promedio de entrada del agua con un valor de 301.05 K. Se utilizó un flujo

de calor útil en las paredes del colector de placa plana (Alwan y col., 2021) de acuerdo con la ecuación (14), donde se consideró la irradiación más alta promedio de un mes (11.018 kWh/m²día), la irradiación más baja promedio del mes (7.065 kWh/m²día), así como la irradiación promedio a lo largo del año (9.4 kWh/m²día) que prevalecen en la ciudad de Guanajuato, Guanajuato, México (Sistema De Información Energética De Guanajuato, 2017). Finalmente, se estableció una presión de salida como condición de frontera a la salida del colector.

5. Aproximación numérica

Para resolver las ecuaciones descritas anteriormente, se implementó un algoritmo iterativo mediante la ayuda del software ANSYS-Fluent[®], donde al resolver las ecuaciones (1)-(7) se obtienen las distribuciones de velocidades y de temperatura dentro del colector usando el algoritmo SIMPLE. El criterio de convergencia se estableció cuando los residuales alcanzaran valores menores a 10⁻⁶. Además, el cálculo de la generación de entropía se realizó mediante programación a través de las funciones definidas por el usuario, las cuales admite el software mediante el procesamiento de los resultados



numéricos obtenidos de las soluciones de las ecuaciones (1)-(7).

Por otra parte, para obtener resultados independientes de la geometría, se realizó un análisis de la sensibilidad de la malla, donde, la malla computacional fue refinada desde 30,253 hasta 1,734,153 elementos. La variable para monitorear considerada fue la temperatura de salida del colector solar. De este análisis se obtuvo que, para un número de 649,887 elementos, la variación de la temperatura de salida del colector solar de placa plana era independiente del número de elementos de la malla, tal como se muestra en la Figura 2.

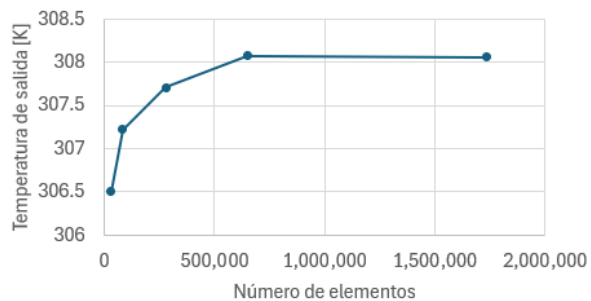


Figura 2. Análisis de sensibilidad de malla.

6. Resultados

La Figura 3 muestra los contornos de temperatura en la sección transversal del tubo a la salida del colector solar de placa plana considerando la irradiación promedio del año, la mejor irradiación del mes y la peor

irradiación del mes en el transcurso de un año a un flujo volumétrico de 3.0 l/min.

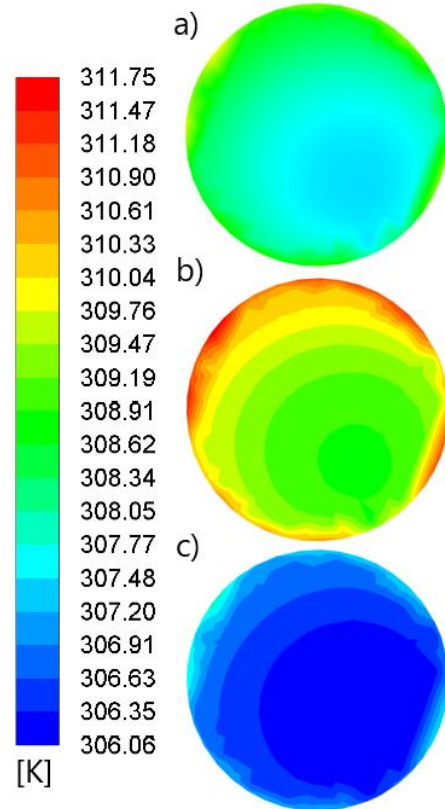


Figura 3. Contornos de temperaturas obtenidas a la salida del colector solar de placa plana: a) Condición promedio, b) irradiación más alta y c) irradiación más baja.

Para los tres casos bajo estudio, las mayores temperaturas se observan en el fluido que se encuentra cerca de las paredes del tubo, lo cual es debido a que es donde se recibe el flujo de calor útil, ecuación (14). Por otra parte, la temperatura de salida más alta se logra al considerar la irradiación disponible más alta tal como era de esperarse, la cual



corresponde a un valor promedio de 309.5 K. Por otra parte, la temperatura de salida menor corresponde a la irradiación menor disponible, la cual corresponde a un valor promedio de 306.5 K. Además, al considerar la condición promedio a la que prevalece la irradiación a lo largo del año se obtiene una temperatura promedio de 308 K.

En la Figura 4 se observan los contornos de presión que se obtuvieron en el interior del colector solar de placa plana. La presión mínima se obtiene a la salida del colector, aproximadamente de 101,320 Pa, mientras que la mayor presión se encuentra justo en el lado opuesto a la salida del colector, aproximadamente de 101,343.5 Pa. Por lo que, la caída de presión es 23.5 Pa. Finalmente, es conveniente señalar que solo se muestra una figura debido a que para los tres casos bajo estudio se tienen los mismos contornos de presión, lo cual es debido a que en los tres casos se considera el mismo flujo volumétrico, así como el mismo fluido de trabajo. En este sentido, a pesar de que la densidad es variable con respecto a la temperatura, esta no afecta de manera significativa los resultados obtenidos para los tres casos analizados.

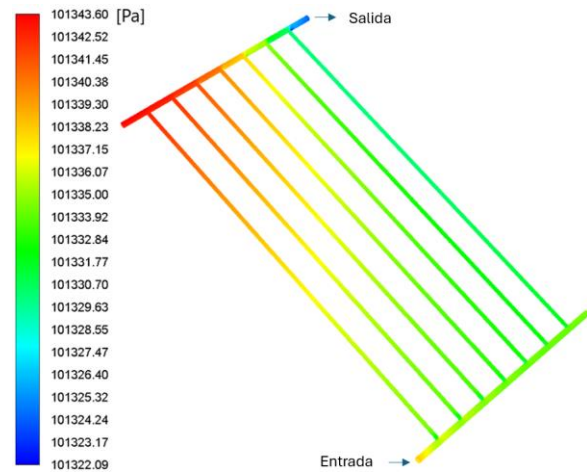


Figura 4. Contorno de presiones obtenidas dentro del colector solar de placa plana para los tres casos bajo estudio.

La Figura 5 muestra el flujo de generación de entropía debido a los fenómenos físicos que ocurren dentro del colector solar de placa plana. En la Figura 5a se puede observar que las mayores irreversibilidades debido a los efectos de la transferencia de calor corresponden al caso con la mayor irradiación bajo estudio. Por otra parte, la menor generación de entropía debido a los efectos por transferencia de calor corresponde al caso que considera la peor irradiación del mes. Lo anterior, se debe a que los gradientes de temperatura dentro del colector para el caso con la menor irradiación son menores en comparación al caso que considera la mayor irradiación, Figura 3c. Además, para el caso de la generación de entropía causada por los efectos viscosos se tiene que la menor



contribución corresponde al caso con la mayor irradiación, esto se debe a la mayor temperatura que se alcanza dentro del colector, lo que a su vez modifica la densidad del fluido de trabajo, por lo que en consecuencia los efectos viscosos se vuelven ligeramente menos significativos en comparación con el caso que considera el peor mes de irradiación, en el cual se obtiene la menor temperatura a la salida del colector, Figura 3c. Por otra parte, en la Figura 5c se observa que la generación de entropía debido a las pérdidas de calor es mayor al tener mayor irradiación. Dichas pérdidas engloban a *las pérdidas de calor debido pérdidas ópticas y térmicas en los tubos*. Finalmente, la Figura 5d muestra la suma de los tres diferentes fenómenos que forman parte de las irreversibilidades del sistema, y tal como era de esperarse, se puede observar que las mayores irreversibilidades son debido a las pérdidas de calor.

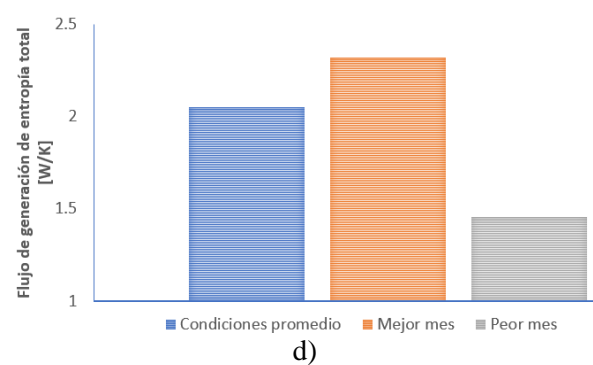
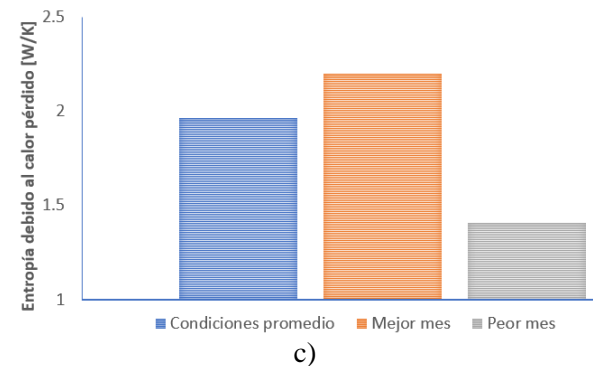
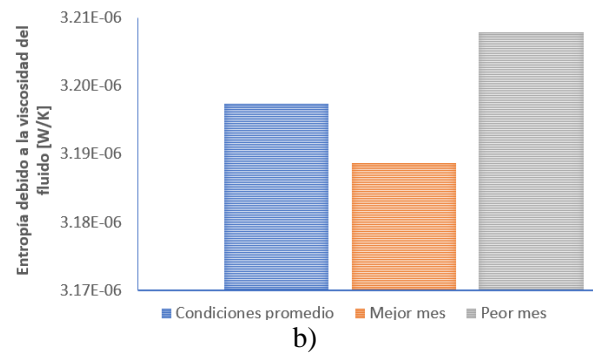
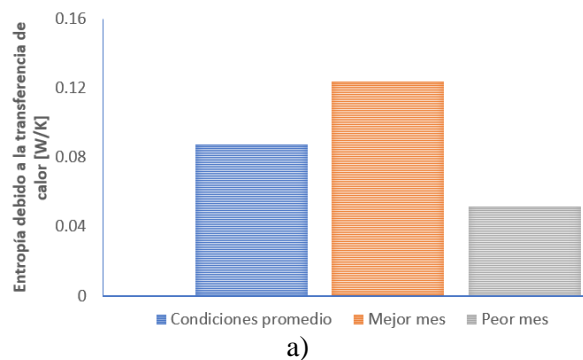


Figura 5. Generación de entropía en el colector solar plano: a) por la transferencia de calor, b) por los efectos viscosos, c) por pérdidas de calor y d) suma de las tres contribuciones.

En la Figura 6 se muestra un resumen de las contribuciones de la generación de entropía debido a los diferentes fenómenos que ocurren en el colector solar. Como puede observarse, la contribución de la generación



de entropía debido a los efectos viscosos es insignificante. Por otra parte, la contribución de generación de entropía debido a la transferencia de calor para cada uno de los casos estudiados es de alrededor del 5%, por lo que, la contribución debido a las pérdidas de calor es de aproximadamente 95%.

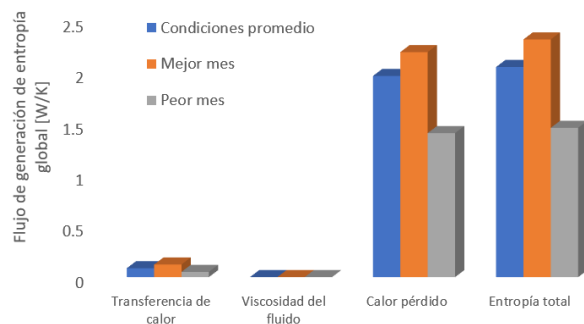


Figura 6. Resumen de las contribuciones de la generación de entropía en el colector solar de placa plana.

7. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

La temperatura de salida depende en gran medida de la irradiación, por lo que es un factor por considerar en la ubicación del colector y época del año.

La entropía generada es dependiente de la irradiación y su principal factor es por pérdida

de calor ligado a la geometría y las propiedades ópticas de los tubos.

La generación de entropía debida a los efectos viscosos tiene poca contribución a la generación de entropía total, por lo que puede considerarse despreciable.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias Y Tecnologías CONAHCYT, México, por el apoyo económico recibido mediante la convocatoria 2023 de "Apoyos complementarios para estancias sabáticas vinculadas a la consolidación de grupos de investigación", I1200/311/2023 MOD.ORD.08/2023 "Estancia sabática nacional".

Nomenclatura

A_c	Área de absorción [m ²]
c	Calor específico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
I	Irradiación solar [W m ⁻²]
k	Conductividad térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]
\dot{m}	Flujo másico de entrada [kg s ⁻¹]
P	Presión [Pa]
$\dot{Q}_{sun,in}$	Flujo de calor incidente [W]



\dot{Q}_{loss}	Calor perdido [W]
\dot{Q}_{useful}	Calor útil [W]
s_i	Generación de entropía local [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
S_μ	Generación de entropía local debido a los efectos viscosos [W K ⁻¹ m ⁻³]
S_h	Generación de entropía local debido a los efectos de transferencia de calor [W K ⁻¹ m ⁻³]
S_i	Generación de entropía global [W K ⁻¹]
S_q	Generación de entropía global debido a la transferencia de calor [W K ⁻¹]
S_{total}	Generación de entropía global total [W K ⁻¹]
T	Temperatura [K]
T_{env}	Temperatura ambiente [K]
T_{in}	Temperatura de entrada [K]
T_{out}	Temperatura de salida [K]
u_x	Velocidad en la dirección x [m s ⁻¹]
u_y	Velocidad en la dirección y [m s ⁻¹]
u_z	Velocidad en la dirección z [m s ⁻¹]
\vec{V}	Vector de velocidad [m s ⁻¹]

Símbolos griegos

β	Coefficiente de expansión volumétrica [-]
μ	Viscosidad dinámica [Pa s]
ρ	Densidad [kg m ⁻³]

Referencias bibliográficas

Ahmadia, A., Ehyaei, M.A., Doustgani, A., El, A.M., Hmida, A., Jamalif, D.H., Kumarg, R., Li, Z.X., Razmjoo, A. (2021). Recent

residential applications of low-temperature solar collector, *J. Clean. Prod.* 279, 123549.

Alfaro-Ayala, J.A., Martínez-Rodríguez, G., Picon-Núñez, M., Uribe-Ramírez, A.R., Gallegos-Muñoz, A. (2015). Numerical study of a low temperature water-in-glass evacuated tube solar collector. *Energy Convers. Manag.* 94, 472-481.

Alwan, Nasseer T., Shcheklein, S.E., Ali, Obed M. (2021). Experimental analysis of thermal performance for flat plate solar water collector in the climate conditions of Yekaterinburg, Russia. *Materials Today: Proceedings.* 42, 2076-2083.

Bhatia, S.C. (2014). Solar thermal energy, Capítulo 4. En Bhatia, S.C. (Ed). *Advanced Renewable Energy Systems* (pp. 94–143). New York, NY, USA.

Budihardjo, I., Morrison, G.L., Behnia, M., (2002). Performance of a water-in-glass evacuated tube solar water heater. In: *Proceedings of ANZSES annual conference, Newcastle (Australia), 2002, November.*

Budihardjo, I., Morrison, G.L., (2009). Performance of water-in-glass evacuated tube solarwater heaters. *Sol. Energy* 83, 49-56.



Hashim, W.M., Shomran, A.T., Jurmut, H.A., Gaaz, T.S., Kadhum, A.A.H., Al-Amiery, A.A. (2018). Case study on solar water heating for flat plate collector, *Case Stud. Therm. Eng.* 12, 666–671.

Mustafa, J., Alqaed, S., Kalbasi, R. (2021). Challenging of using CuO nanoparticles in a flat plate solar collector-Energy saving in a solar-assisted hot process stream, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 124, 258-265.

Jilani, J., Thomas, C. (2014). Effect of thermo-geometric parameters on entropy generation in absorber plate fin of a solar flat plate collector. *Energy*. 70, 35-42.

Jouybari, H.J., Saedodin, S., Zamzamian, A., Nimvari, M.E. (2017). Experimental investigation of thermal performance and entropy generation of a flat-plate solar collector filled with porous media. *Appl. Therm. Eng.* 127, 1506-1517.

Kargarsharifabad, H., Behshad, S.M., Taeibi, R.M., Abbaspour, M. (2014). Exergy Analysis of a Flat Plate Solar Collector in Combination with Heat Pipe, *Int. J. Environ. Res.* 8, 39–48.

Launder, B.; Spalding. (1972). D. Lectures in Mathematical Models of Turbulence, 1st ed.; Academic Press: London, UK.

Li, Z., Chen, C., Luo, H., Zhang, Y., Xue, Y. (2010). All-glass vacuum tube collector heat transfer model used in forced-circulation solar water heating system. *Sol. Energy* 84, 1413-1421.

Marroquín-De Jesús, Á., Olivares-Ramírez, J. M., Jiménez-Sandoval, O., Zamora-Antuñano, M.A., Encinas-Oropesa, A. (2013). Analysis of Flow and Heat Transfer in a Flat Solar Collector with Rectangular and Cylindrical Geometry Using CFD, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14, 4, 553-561.

Ramírez-Minguela, J. J., Ruiz-Camacho, B., Rangel-Hernández, V. H., Alfaro-Ayala, J. A., Elizalde-Blancas, F., López-Núñez, O.A., Alvarado-Rodríguez, C.E. (2023). Performance Comparison of Different Flat Plate Solar Collectors by Means of the Entropy Generation Rate Using Computational Fluid Dynamics, *Entropy*, 25, 621.

Sistema De Información Energética De Guanajuato, Marzo 2017.
<http://energia.guanajuato.gob.mx>



Takashima, T., Tanaka, T., Doi, T., Kamoshida, J., Tani, T., Horigome, T., (1994). New proposal for photovoltaic-thermal solar energy utilization method. *Sol. Energy*, 52, 3, 241-245.

Torres Reyes, E., Cervantes de Gortari, J.G., Ibarra Salazar, B.A., Picon Nunez, M. (2001). A design method of flat-plate solar collectors based on minimum entropy generation. *Exergy Int. J.*, 1, 46-52.

Vengadesan, E., Senthil, R. (2022). Experimental study on the thermal performance of a flat plate solar water collector with a bifunctional flow insert, *Sustain. Energy Technol. Assess.* 50, 101829.