



Artículo de investigación

Estudio numérico de un colector solar utilizando agua y nanofluido de dióxido de titanio base agua como fluidos de trabajo mediante la dinámica de fluidos computacional

Numerical study of a solar collector using water and titanium dioxide water-based nanofluid as working fluids by means of computational fluid dynamics

Oscar Alejandro López Núñez , Fernando Lara Chávez , Arilí Cárdenas Robles , Álvaro González Ángeles 

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N CP 21280, Mexicali, Baja California, México

Autor de correspondencia: Oscar Alejandro López Núñez, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N CP 21280, Mexicali, Baja California, México. E-mail: oscar.lopez.nunez@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0002-1173-8284.

Enviado: 17 de Junio del 2023

Aceptado: 2 de Agosto del 2023

Publicado: 20 de Septiembre del 2023

Resumen. El presente trabajo se centra en el estudio numérico comparativo del desempeño térmico, hidráulico y de generación de entropía de un colector solar de tubos evacuados utilizando agua y nanofluido de dióxido de titanio (TiO_2) de base agua como fluidos de trabajo por medio de la Dinámica de Fluidos Computacional. El estudio consideró una geometría completa en 3D bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Mexicali, México, en una operación de 9 horas. De acuerdo con los resultados, en todo el periodo de operación, el colector solar de tubos evacuados tuvo un mejor rendimiento en términos de su temperatura de salida, así como en la velocidad dentro de éste al utilizar el nanofluido en lugar de usar solo agua como fluido de trabajo. Además, para la formulación de la generación de entropía se tomaron en cuenta las irreversibilidades generadas por los fenómenos de efectos viscosos, transferencia de calor y pérdida de calor, tanto de manera global como de manera local. La formulación de la generación de entropía local permite mostrar la localización exacta de las diferentes irreversibilidades. Así mismo, se encontró que al utilizar el nanofluido, se obtiene una reducción significativa de la generación de entropía en todo el colector solar. Finalmente, la obtención de la generación de entropía por medio de este tipo de análisis puede ayudar a mejorar el rendimiento de los colectores solares a través de la minimización de entropía.

Palabras clave: Colector solar; Nanofluido; Dinámica de fluidos computacional; Generación de entropía.

Abstract. A thermo-hydraulic performance and entropy generation comparison of an evacuated tube solar collector using water and titanium dioxide (TiO_2) water-based nanofluid as working fluids is carried out by means of Computational Fluid Dynamics. It is considered a complete 3D geometry under meteorological conditions of the city of Mexicali, Mexico under an operation time of 9 hours. It was found that, throughout the operation time, the evacuated tube solar collector had a better performance in terms of outlet temperature and velocity inside the solar collector using the nanofluid than using only water as a working fluid. The phenomena of viscous effects, heat transfer, and heat loss in a global and local form are considered in the formulation of the entropy generation. The local entropy generation formulation also allows us to illustrate the exact location of the irreversibilities. It was found that, using TiO_2 water-based nanofluid as a working fluid leads to a reduction of the entropy generation in all the evacuated tube solar collectors. Finally, this type of analysis by obtaining the global and local entropy generation can be helpful to improve their performance through entropy minimization.

Keywords: Solar collector; Nanofluid; Computational fluid dynamics; Entropy generation.





1. Introducción

El uso global de combustibles fósiles ha traído diversos problemas ambientales, entre ellos el incremento de gases de efecto invernadero [1,2]. En este sentido, la energía solar como fuente de energía renovable tiene un gran potencial para poder llegar sostenibilidad, así como reducir el uso de fuentes de energía tradicionales [3,4], sin embargo, en la actualidad el aprovechamiento y conversión de esta energía solar en energía útil es muy inferior en comparación con el gran potencial que se dispone [5,6].

Una manera de aprovechar la energía solar y transformarla en energía térmica es por medio de dispositivos conocidos como colectores solares, siendo uno de los más comunes el colector solar de tubos evacuados (ETSC, por sus siglas en inglés) [7,8].

Los ETSC consisten en un conjunto de tubos de vidrio de borosilicato conectados a un cabezal. Cada uno de ellos contiene un segundo tubo de vidrio concéntrico con un espacio anular evacuado con el fin de minimizar las pérdidas de calor [9]. Dentro del colector solar circula un fluido de trabajo, ya sea agua pura o algún fluido modificado como lo es el nanofluido, el cual absorbe la energía de la radiación solar a medida que fluye a través del tubo interior desde el cabezal hasta los tubos y viceversa. Con la absorción de esta energía, el fluido llega a calentarse y posteriormente puede ser utilizado para diversas aplicaciones, desde lo residencial hasta aplicaciones de tipo industrial [10,11].

Si bien, en la actualidad existen colectores solares de tubos evacuados ya comercializados, resulta importante mejorar su eficiencia y, por tanto, obtener un mejor aprovechamiento de la energía solar. En este sentido, se han incorporado el uso de nanofluidos como fluido de trabajo en los colectores solares [12,13]. Los nanofluidos

son suspensiones coloidales formadas por nanopartículas en un fluido base. Estas nanopartículas (menores a 100 nm) suelen estar hechas de metales, óxidos, carburos o nanotubos de carbono, mientras que los fluidos bases más comunes incluyen agua, etilenglicol y aceites [14]. La adición de nanopartículas sólidas a un fluido puede conducir a una suspensión con propiedades termo físicas mejoradas, ya que los sólidos exhiben valores de conductividad térmica más altos que los líquidos [15].

A diferencia de los fluidos de transferencia de calor convencionales, los nanofluidos presentan conductividades térmicas, coeficientes de transferencia de calor y densidades elevados, lo que resulta en un aumento de la eficiencia de los dispositivos térmicos solares [16,17]. Por otro lado, se siguen teniendo diversos retos en su introducción a diversos sistemas, tales como su dificultad en su producción, costos elevados de producción, así como posible aglomeración de las partículas [18].

Así mismo, un análisis completo del comportamiento del colector solar por medio de diversas herramientas como lo es la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), así como el uso de la segunda ley de la Termodinámica (análisis de generación de entropía) resulta en una mejora sustancial de este tipo de dispositivos [19].

Por tanto, el presente trabajo se centra en la caracterización y comparación numérica del comportamiento térmico, hidráulico y de generación de entropía de un colector solar de tubos evacuados al utilizar agua y nanofluido de dióxido de Titanio (TiO_2) de base agua como fluidos de trabajo. El análisis se realizó a lo largo de un día del mes de Marzo (15 de Marzo) utilizando las condiciones meteorológicas de la ciudad de Mexicali, Baja California, México,



esto debido a que en dicho mes las condiciones meteorológicas comienzan a ser las óptimas para el funcionamiento del ETSC. La irradiación solar fue obtenida por medio de la herramienta conocida como calculadora solar (“solar calculator”) dentro del entorno de las herramientas de CFD.

El presente trabajo se divide como sigue: La sección 2 detalla los antecedentes y esfuerzos previos en este tipo de análisis, resaltando la importancia y relevancia en su realización. La sección 3 precisa la metodología utilizada, incluyendo la geometría del colector solar, las ecuaciones gobernantes, la formulación de la generación de entropía, las condiciones de operación y condiciones de frontera utilizadas. La sección 4 muestra y discute los resultados obtenidos, desde la comparación en el comportamiento térmico e hidráulico, hasta la comparación de la generación de entropía (tanto global como local) al utilizar agua y el nanofluido como fluidos de trabajo.

2. Antecedentes

Con el fin de poder de evaluar y mejorar el rendimiento de un colector solar de tubos evacuados, se han llevado a cabo diversos estudios utilizando nanofluidos como fluido de trabajo. Así mismo, el uso del CFD ha surgido como una manera económica de analizar el comportamiento térmico e hidráulico de un colector solar, así como sus efectos con el uso de nanofluidos. Esta herramienta combina el análisis de las ecuaciones gobernantes de los fluidos junto con su solución mediante métodos numéricos en un entorno computacional.

Además, el estudio de este tipo de equipos solares puede llevarse a cabo por medio de un análisis por segunda ley de la termodinámica conocido como análisis de generación de entropía, que permite la identificación y

cuantificación de las diferentes irreversibilidades dentro del sistema, por lo que al realizar una posible reducción de éstas conllevará a un aumento en el rendimiento del dispositivo [20]. Sharafeldin & Gróf [21] realizaron una investigación experimental en un colector solar de tubos evacuados utilizando nanofluido de Trióxido de Wolframio (WO_3) de base agua. En sus experimentos se obtuvo un aumento del 21% y 19.3% en la temperatura de salida del colector y en la eficiencia térmica respectivamente en comparación con utilizar únicamente agua como fluido de trabajo. Mas recientemente, Sharafeldin y colaboradores [22] investigaron el rendimiento de un ETSC al utilizar nanofluido de cobre de base agua. Los resultados mostraron un aumento del 50% en la temperatura de salida, en comparación con el uso de agua. Así mismo, los autores establecen que con el uso del nanofluido se puede evitar la emisión de hasta 312 kg de CO_2 al ambiente. Por otro lado, el uso del nanofluido de dióxido de Titanio (TiO_2) de base agua fue investigado por Hosseini & Dehaj. [23] Sus resultados indicaron una mejora en la eficiencia del colector de hasta un 12.2%, además, se obtiene una mejora de la conductividad térmica debido a la adición de las nanopartículas de TiO_2 . Si bien los estudios experimentales son importantes en la caracterización de un ETSC, estos pueden estar asociados con diversos equipos costosos y sofisticados a fin de obtener resultados confiables.

Es así como el uso de CFD se ha convertido en una opción viable que permite este tipo de análisis a un costo relativamente bajo. Jamil y colaboradores [24] presentaron un análisis CFD de un ETSC utilizando nanofluido de TiO_2 base de base agua como fluido de trabajo. El estudio consideró diferentes concentraciones de nanopartículas, así como diversos ángulos de inclinación del ETSC. Se concluyó que la velocidad más alta y la transferencia de calor máxima se obtuvieron con la concentración de



partículas más alta y el ángulo de inclinación más bajo. Mercan & Yurddaş [25] llevaron a cabo un análisis de un ETSC por medio de CFD utilizando nanofluidos base agua de Alúmina (Al_2O_3) y Cobre. Los autores obtuvieron un aumento máximo del 3.93% y 6.63% en la temperatura de salida al usar Al_2O_3 y Cobre respectivamente en comparación con utilizar únicamente agua. Más recientemente, Tabarhoseini & Sheikholeslami [26] realizaron el estudio numérico por medio de CFD de una parte de un ETSC modificado (acoplado tres aletas longitudinales internas en el tubo evacuado) con el fin de aumentar la eficiencia térmica y la tasa de transferencia de calor al utilizar nanofluido de cobre de base agua. Los resultados mostraron un aumento sustancial en la temperatura promedio dentro del tanque del ETSC.

Todos estos trabajos han estado enfocados en el desempeño térmico del ETSC, sin embargo, el uso de la segunda ley de la Termodinámica por medio del método conocido como análisis de generación de entropía ayuda a identificar y cuantificar las irreversibilidades dentro de este tipo de dispositivo solar.

Gan y colaboradores [27] condujeron un estudio experimental para evaluar la eficiencia térmica y la generación de entropía global de un ETSC utilizando nanofluido de TiO_2 de base agua como fluido de trabajo. Se encontró una disminución de la generación de entropía global y un aumento en la eficiencia térmica al usar nanofluidos en lugar de agua. Sin embargo, es importante mencionar que la generación de entropía en forma global no puede identificar la ubicación exacta de las diversas irreversibilidades.

Tabarhoseini & Sheikholeslami [28] llevaron a cabo un análisis de energía y generación de entropía de un ETSC utilizando nanofluido de cobre de base agua como fluido de trabajo. Se consideró la generación de entropía de forma

global y local debido a los fenómenos de efectos viscosos y transferencia de calor. Sus resultados concluyeron en una reducción de la generación de entropía mediante el uso de nanofluidos, así como en la ubicación exacta de las irreversibilidades. Sin embargo, el modelo CFD no considera toda la geometría del colector solar, sino solo una parte de este.

Así mismo, de los trabajos previos, se destaca que la gran mayoría consideran las condiciones meteorológicas como estables, sin tomar en cuenta su variación a lo largo del tiempo de operación, así mismo, solo uno de ellos obtiene de manera local la identificación de las diversas irreversibilidades. Es por ello que, el presente trabajo detalla la comparación numérica en el comportamiento térmico, hidráulico y de generación de entropía entre agua y nanofluido de TiO_2 de base agua como fluidos de trabajo en un colector solar de tubos evacuados (ETSC), bajo un esquema transitorio utilizando las condiciones meteorológicas de la ciudad de Mexicali, Baja California, México en un tiempo de operación de 9 horas a través de la Dinámica de Fluidos Computacional.

3. Metodología

En esta sección, se detallan las características del ETSC utilizado, así como la metodología utilizada para las simulaciones numéricas realizadas.

3.1 Geometría

Para el desarrollo y solución del modelo numérico a través de CFD se tomaron en cuenta los parámetros y dimensiones de una geometría comercial de un ETSC, mostrada en la Figura 1. Es importante señalar que el dominio analizado fue todo el colector solar, tomando en cuenta sus 36 tubos evacuados, cada uno con una longitud de 1.5 m y un área de absorción de 3.14 m^2 (Tabla



1 [29]). Con base en dichos parámetros se llevó a cabo la construcción de la geometría en tres

dimensiones del colector solar por medio del software ANSYS-Fluent.

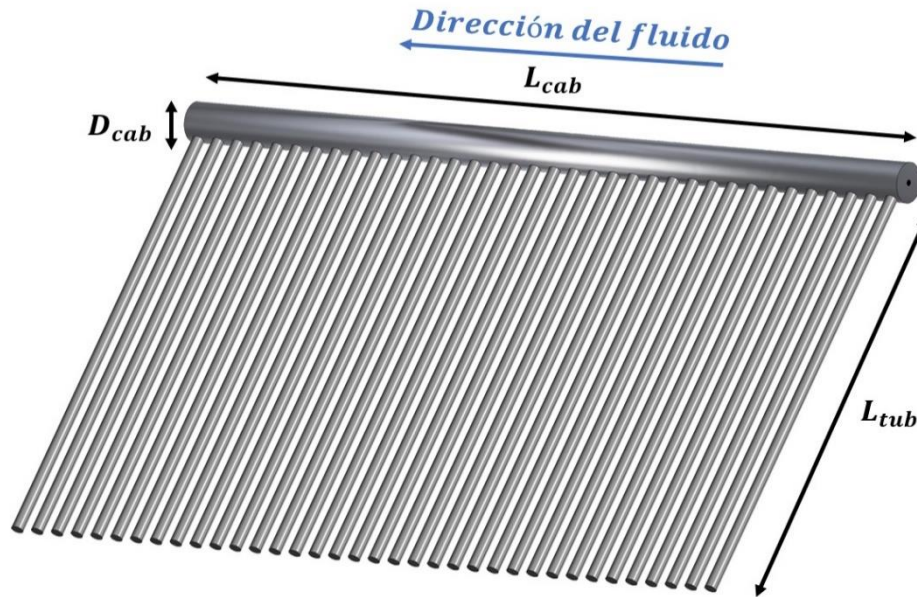


Figura 1. Geometría en tres dimensiones del ETSC utilizada en el análisis numérico.

Tabla 1. Dimensiones de la geometría del ETSC.

Dimensión	Valor	Unidad
Longitud del tubo, L_{tub}	1.5	m
Longitud del cabezal, L_{cab}	2.5	m
Diámetro del cabezal, D_{cab}	0.13	m
Área de Absorción, A_c	3.14	m ²
Número de tubos, N_{tub}	36	Tubos

3.2 Ecuaciones de Gobierno

El modelo numérico del ETSC requiere de la representación matemática de los fenómenos físicos involucrados a través de las ecuaciones de Ecuación de conservación de la masa:

conservación de masa, cantidad de movimiento y energía [30,31].

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$



Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento:

$$u_x \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + u_y \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial y} + u_z \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right]$$

$$u_x \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial x} + u_y \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + u_z \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right] \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right]$$

$$u_x \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial x} + u_y \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial y} + u_z \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right] \quad (4)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] \right\}$$

Ecuación de conservación de la energía:

$$u_x \frac{\partial(\rho c T)}{\partial x} + u_y \frac{\partial(\rho c T)}{\partial y} + u_z \frac{\partial(\rho c T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Donde u , P , μ , ρ y k representan la velocidad, presión, viscosidad, densidad y conductividad térmica del fluido de trabajo respectivamente.

Con el fin de tomar en cuenta los efectos de flotabilidad de los fluidos de trabajo, las propiedades de estos fueron establecidas como polinomios dependientes de la temperatura con un rango de validez desde 5°C hasta 95°C.

En el caso del agua se establecieron como:

$$\rho_w = 1001 - 0.0834T - 0.0035T^2 \quad (6)$$

$$k_w = 0.5634 + 0.002T - 8 \times 10^{-6}T^2 \quad (7)$$

$$c_w = 4215 - 2.3787T + 0.0528T^2 - 0.0005T^3 + 2 \times 10^{-6}T^4 \quad (8)$$

$$\mu_w = 0.0017 - 5 \times 10^{-5}T + 9 \times 10^{-7}T^2 - 8 \times 10^{-9}T^3 + 3 \times 10^{-11}T^4 \quad (9)$$

Donde T hace referencia a la temperatura del fluido.



De igual manera, en el caso del nanofluido de TiO₂ de base agua, las propiedades del nanofluido se establecieron como polinomios

dependientes de la temperatura, los cuales se presentan en las ecuaciones 10-13 [32].

$$\rho_{nf} = 786.68 + 1.78T - 0.003423T^2 \tag{10}$$

$$k_{nf} = -0.7924 + 0.0076707T - 1.004x10^{-5}T^2 \tag{11}$$

$$c_{nf} = 546235.05 - 8362.11T + 51.48T^2 - 0.1581T^3 + 2.42x10^{-4}T^4 - 1.481x10^{-7}T^5 \tag{12}$$

$$\mu_{nf} = 0.4207 - 4.8514x10^{-3}T + 2.1102x10^{-5}T^2 - 4.095x10^{-8}T^3 + 3x10^{-11}T^4 \tag{13}$$

Dichos polinomios fueron obtenidos utilizando las propiedades de la nanopartícula de TiO₂ que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la nanopartícula de TiO₂ [33,34].

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	4260	kg/m ³
Concentración	0.5	%
Conductividad térmica	8.4	W / mK
Calor específico	692	J/KgK
Tamaño de Partícula	21	nm

Las ecuaciones anteriores son resueltas por medio del método numérico de volumen finito, tomando en cuentas las siguientes suposiciones:

- Régimen de flujo laminar.
- Estado transitorio, considerando un periodo de operación de las 9 a las 18 horas (9 horas).
- Se consideran los datos de localización del sitio de interés (ciudad de Mexicali, Baja California), tomando en cuenta sus coordenadas geográficas (Latitud: 32.6469°; Longitud: -115.446°), con el fin de obtener los datos de

radiación directa a utilizar en el modelo numérico.

- Los polinomios dependientes de la temperatura del nanofluido de TiO₂ de base agua considera un tamaño de partícula de 21 nm uniformemente dispersados con una concentración de la nanopartícula del 0.5% [35].

3.3 Formulación de la generación de entropía

La formulación de la generación de entropía se realizó tomando en cuenta los fenómenos de efectos viscosos (ecuación 14) y transferencia de



calor (ecuación 15) de manera local. Cada contribución se expresa por medio de un análisis infinitesimal en 3D [36]:

$$s_v = \frac{\mu}{T} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

$$s_h = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (15)$$

Mediante la integración en todo el volumen de control, se obtiene la generación de entropía global de cada fenómeno.

$$S_i = \int s_i dV \quad (16)$$

Donde $i = \{v, h\}$

Así mismo, se toma en cuenta la generación de entropía debido a la pérdida de calor. Dicha

aportación considera la tasa de ganancia de la energía solar y el calor útil respectivamente.

$$S_q = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{util}}{T_{amb}} \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{in} = A_c I \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m}c(T_{out} - T_{in}) \quad (19)$$

Donde I y \dot{m} se refiere a la radiación incidente y el flujo másico de entrada al colector respectivamente.

Por tanto, la generación de entropía total se calcula como la sumatoria de cada uno de los fenómenos:

$$S_t = S_v + S_h + S_q \quad (20)$$

Finalmente, la eficiencia térmica del ETSC se puede calcular como la relación entre el calor útil y la tasa de ganancia de energía solar.

$$\eta = \frac{\dot{m}c(T_{out} - T_{in})}{A_c I} \quad (21)$$

3.4 Condiciones de frontera

Para analizar y comparar el comportamiento térmico, hidráulico y de generación de entropía del ETSC, se realizaron simulaciones numéricas considerando las condiciones meteorológicas de

la ciudad de Mexicali a través de sus coordenadas geográficas (Latitud: 32.6469°; Longitud: -115.446°) en un tiempo de operación de 9 horas (9 a 18 horas) para un día del mes de Marzo (15 de marzo). Es importante mencionar que los datos meteorológicos fueron obtenidos por



medio de la herramienta conocida como calculadora solar (“solar calculator”), la cual se encuentra dentro del software de ANSYS-Fluent y que ha sido utilizada por varios autores en distintas aplicaciones de energía solar térmica [37,38].

Para la entrada del fluido de trabajo al ETSC, se consideró un flujo másico de 0.0717 kg/s, de acuerdo con la norma Mexicana NMX-ES-001-NORMEX 2005, con una temperatura de 20°C, además, los tubos del colector fueron inclinados

30° con respecto a la horizontal. La transferencia de calor por convección debido a los alrededores del ETSC fue modelada por una condición de contorno convectiva en los tubos y el cabezal del colector solar. La transferencia de calor por conducción a través del material aislante y del espesor de los tubos de vidrio se consideró teniendo en cuenta las resistencias térmicas adecuadas a través de las paredes. La figura 2 muestra la distribución de las condiciones de frontera utilizadas en el modelo numérico del ETSC:

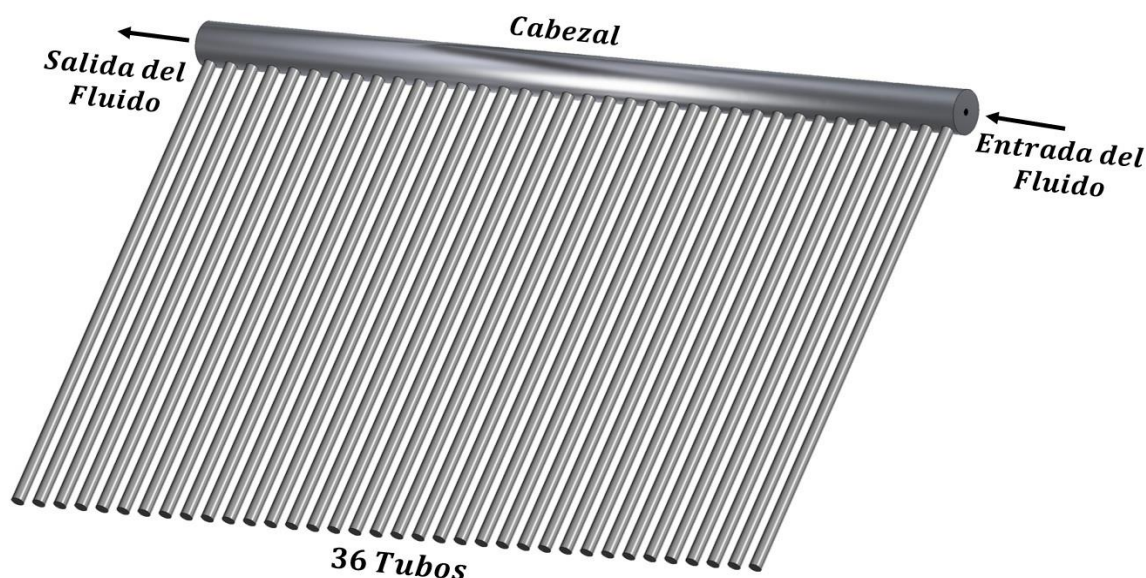


Figura 2. Condiciones de frontera del ETSC.

Es importante mencionar que las propiedades de los materiales se obtuvieron de trabajos previamente publicados [39,40].

Como se mencionó antes, el modelo numérico se resolvió utilizando el software comercial ANSYS-Fluent® mediante el método numérico de volumen finito. Las ecuaciones de cantidad de movimiento y energía fueron resueltas mediante el algoritmo SIMPLE para obtener las distribuciones de velocidad y temperatura,

además, se utilizó un esquema estándar para la presión. El criterio de convergencia utilizado para las ecuaciones fue de 1×10^{-6} para todas las variables. Finalmente, los resultados de la generación de entropía se calculan como un proceso posterior implementado mediante una función definida por el usuario (UDF, por sus siglas en inglés). La Figura 3 muestra de manera gráfica el proceso de solución del modelo numérico.

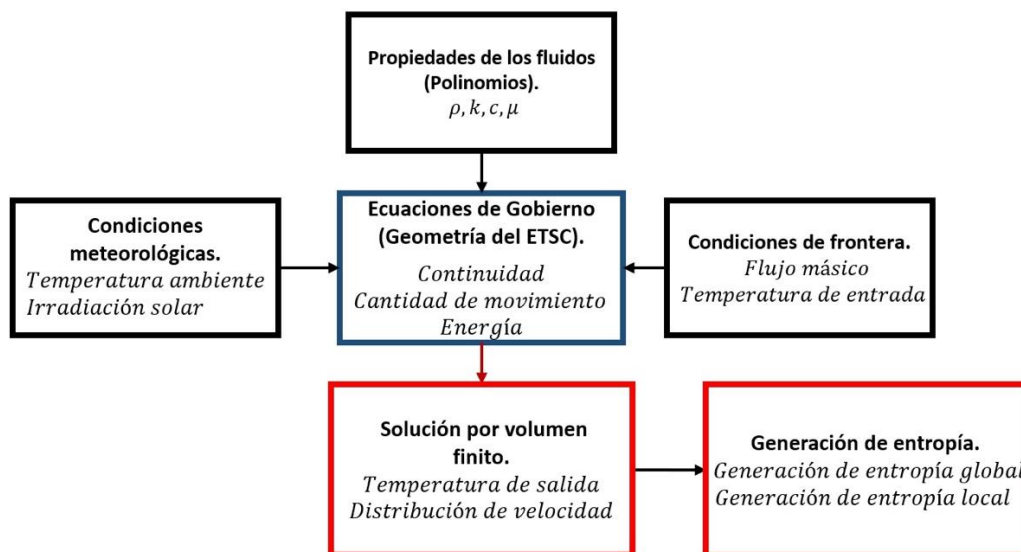


Figura 3. Proceso de solución del modelo numérico.

4. Resultados y Discusiones

Los resultados de la comparación del comportamiento térmico, hidráulico y de generación de entropía son descritos en las siguientes secciones.

Es importante mencionar que el análisis de independencia de malla, así como la validación numérica del modelo del ETSC ha sido objeto de estudio en trabajos previamente publicados [29,39,40]. Así mismo, se utilizó una malla con aproximadamente 1.15 millones de elementos para conservar un equilibrio entre los resultados obtenidos y el tiempo computacional requerido.

4.1 Comportamiento térmico e hidráulico

La figura 4 muestra la comparación el comportamiento de la temperatura de salida al utilizar agua y nanofluido de TiO₂ de base agua como fluidos de trabajo en el colector solar. Así mismo, se muestra el comportamiento de la radiación solar incidente a lo largo del tiempo de operación.

Se observa que, en todo el tiempo de operación del ETSC, el uso del nanofluido como fluido de trabajo arroja mayores temperaturas de salida en comparación con utilizar simplemente agua. Así mismo, se obtiene un valor máximo de 30.73°C alrededor de las 14:30 horas utilizando el nanofluido como fluido de trabajo, mientras que, a la misma hora, se obtuvo una temperatura de salida de 25.7 °C al utilizar agua como fluido de trabajo, lo anterior llega a representar un aumento de 5.03 °C (lo equivalente a 19.5%).

El aumento en la temperatura de salida corresponde a los cambios en las propiedades del calor específico y la conductividad térmica del nanofluido. Así mismo, se puede observar que, a pesar de que la máxima radiación solar se presenta alrededor de las 11 horas, la temperatura de salida del nanofluido sigue aumentando hasta llegar a un máximo alrededor de las 15 horas.

Esto se debe a que el calor específico del nanofluido es menor en comparación con el del agua, por lo que se requiere menor energía para incrementar su temperatura. Es decir, incluso con menor radiación solar, el nanofluido seguirá aumentando su temperatura.

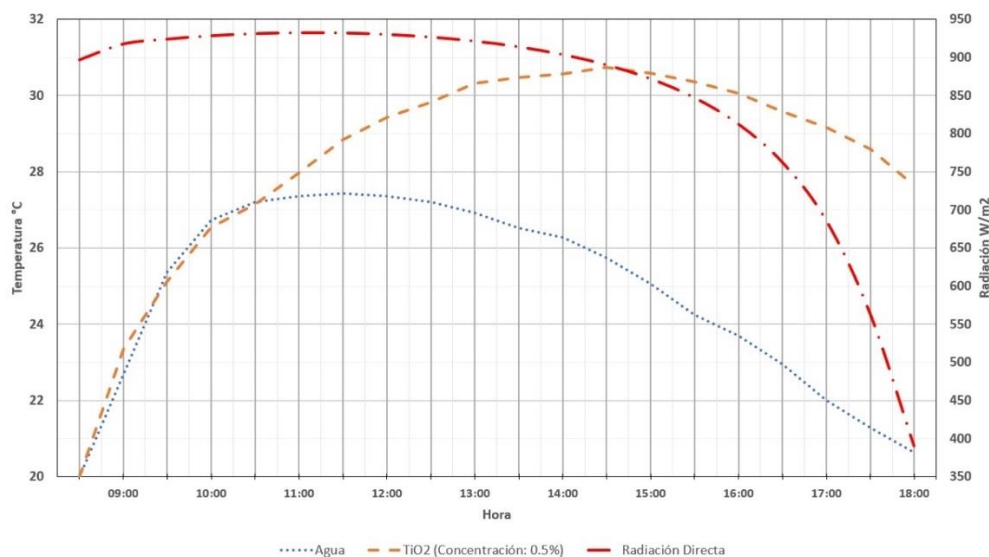


Figura 4. Comparación del comportamiento térmico del ETSC.

La figura 5 muestra la comparación el comportamiento de la eficiencia térmica al utilizar agua y nanofluido de TiO₂ de base agua como fluidos de trabajo en el colector solar. Se observa que, en general, el uso del nanofluido como fluido de trabajo arroja mayores eficiencias en comparación con utilizar simplemente agua. Se llega a obtener un valor máximo de 82.5% alrededor de las 14:30 horas utilizando el nanofluido como fluido de trabajo,

manteniéndose hasta alrededor de las 15:30 horas, mientras que, a la misma hora, se obtuvo una eficiencia de 61.5% al utilizar agua como fluido de trabajo. La eficiencia máxima al utilizar agua como fluido de trabajo se produce alrededor de las 11:30 horas con un valor de 76.2%. El comportamiento de las eficiencias térmicas coincide con el comportamiento de la temperatura de salida para ambos fluidos.

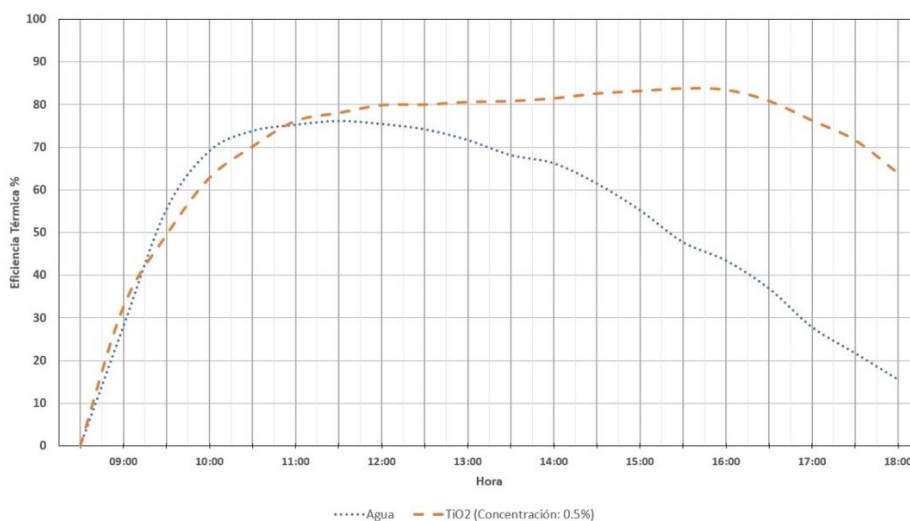


Figura 5. Comparación de la eficiencia térmica del ETSC.



Por otro lado, la figura 6 muestra el comportamiento hidráulico dentro de los tubos del ETSC al utilizar agua (figura 6a) y al utilizar el nanofluido de TiO₂ de base agua (figura 6b), ambas a las 14:30 horas. Se observa que, al utilizar agua, se obtiene una velocidad máxima de 5.72 mm/s localizada en la unión del cabezal y los tubos evacuados, mientras que al usar el nanofluido, se obtiene una velocidad máxima de 30 mm/s en la misma zona. En promedio, se obtiene una velocidad dentro de los tubos evacuados de 0.38 mm/s y de 10.72 mm/s al utilizar agua y nanofluido respectivamente. En general, para todo el tiempo de operación, el uso

del nanofluido conlleva a una aceleración en el fluido dentro del colector solar debido a la disminución de la viscosidad. Así mismo, dicha aceleración conlleva a una uniformidad en la temperatura dentro del ETSC, y, por tanto, una disminución en la generación de entropía por transferencia de calor al utilizar el nanofluido (lo cual se observará en la sección 4.2 y 4.3). Sin embargo, es importante resaltar que los valores de las velocidades son muy bajas para ambos fluidos de trabajo, esto tendrá como consecuencia una muy baja generación de entropía por efectos viscosos.

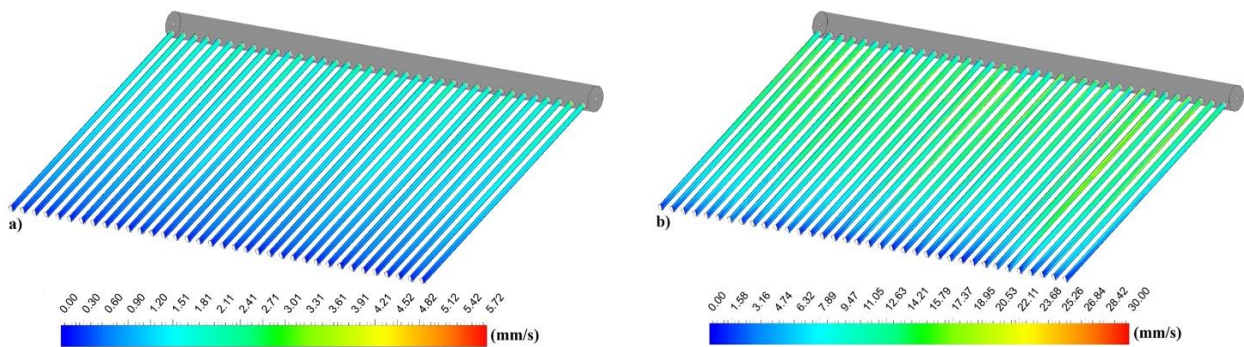


Figura 6. Comportamiento hidráulico dentro de los tubos evacuado del ETSC al utilizar a) Agua y b) Nanofluido de TiO₂ de base agua.

Finalmente, debido a que se trata de un fenómeno de transferencia de calor, resulta necesario el cálculo del número adimensional de Nusselt.

Este se calculó considerando los valores de las propiedades a las 14:30 horas dentro de los tubos evacuados mediante la correlación de Churchill-Bernstein.

$$Nu_D = 0.3 + \frac{0.62(Re_D)^{1/2}Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{28200} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (22)$$

Donde los números de Reynolds y Prandlt (Re_D y Pr respectivamente) se obtienen como:

$$Re_D = \frac{\rho V_w D}{\mu} \quad (23)$$

$$Pr = \frac{c\mu}{k} \quad (24)$$



Los valores obtenidos de los números de Reynolds y Prandtl para el agua son 20.23 y 6.18 respectivamente, mientras que al usar el nanofluido se obtuvieron valores de 591 y 5.6 para Reynolds y Prandtl respectivamente. Se observa que ambos fluidos se encuentran dentro del régimen laminar. Así mismo, con dichos valores se obtuvieron números de Nusselt de 5.2 y 27.8 para el agua y nanofluido respectivamente, comprobando con ello que existe una mayor transferencia de calor al usar el nanofluido de TiO_2 de base agua.

4.2 Generación de entropía global

La figura 7 presenta la comparación de la generación de entropía global debido a los fenómenos de efectos viscosos (S_v), transferencia de calor (S_h) y pérdida de calor (S_q) al utilizar agua y nanofluido de TiO_2 de base agua como fluidos de trabajo. La comparación se realizó tomando en cuenta las condiciones meteorológicas de las 14:30 horas.

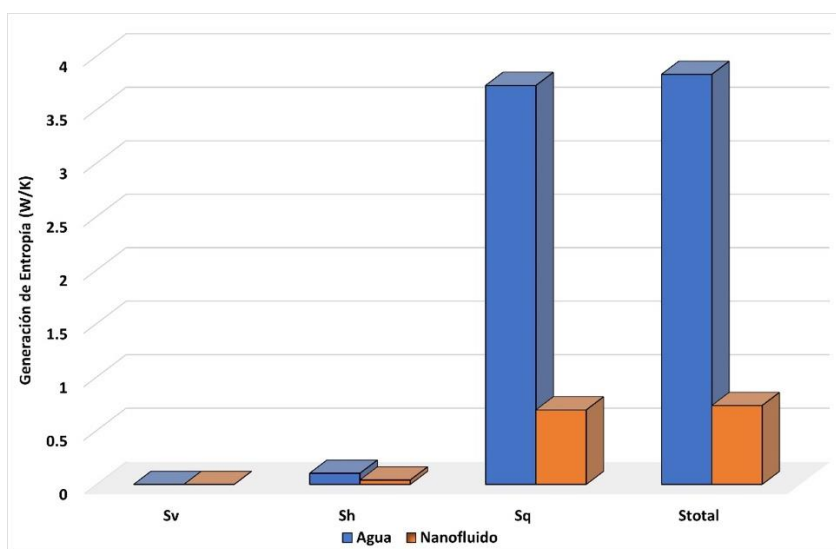


Figura 7. Comparación de la generación de entropía global.

En el caso de la generación de entropía por efectos viscosos, S_v , se tienen valores muy bajos para ambos fluidos de trabajo, esto es debido a las bajas velocidades conseguidas dentro del ETSC (como se observó en la sección 4.1). Por tanto, la generación de entropía debido efectos viscosos resulta insignificante.

Por otro lado, en la generación de entropía debido a transferencia de calor, S_h , se obtuvieron valores máximos de 0.1 W/K y 0.04 W/K al usar agua y nanofluido respectivamente, lo que representa una disminución del 60.35%. La generación de entropía por transferencia de calor representa el 2.72% y el 5.61% del total de la generación de entropía para el agua y para el nanofluido

respectivamente. Así mismo, esta disminución tiene que ver con el cambio en el calor específico y la conductividad térmica del nanofluido de TiO_2 de base agua, y, por tanto, en la disminución de los gradientes de temperatura dentro del ETSC, lo que de acuerdo con la ecuación (15), arroja valores de generación de entropía más bajos.

Finalmente, en la generación de entropía por pérdida de calor, S_q , se obtuvieron valores máximos de 3.72 W/K y 0.69 W/K al utilizar agua y nanofluido respectivamente, lo cual llega a representar una disminución del 81.32%. La generación de entropía por pérdida de calor representa el 94.27% y 97.27% del total de la generación de entropía para el agua y el



nanofluido respectivamente. Estos resultados se deben a los cambios en las propiedades del nanofluido, especialmente en el calor específico.

En general, se obtuvieron resultados similares para todas las horas de operación, además de que el uso del nanofluido de TiO_2 de base agua como fluido de trabajo para el ETSC conduce a una disminución en los tres tipos de generación de entropía (S_v, S_h, S_q).

4.3 Generación de entropía local

La figura 8 muestra una comparación de la generación de entropía local debido a efectos viscosos al utilizar agua (izquierda) y nanofluido de TiO_2 de base agua (derecha) como fluido de trabajo. El contorno se muestra en un plano vertical en el primer tubo evacuado del ETSC a las 14:30 horas.

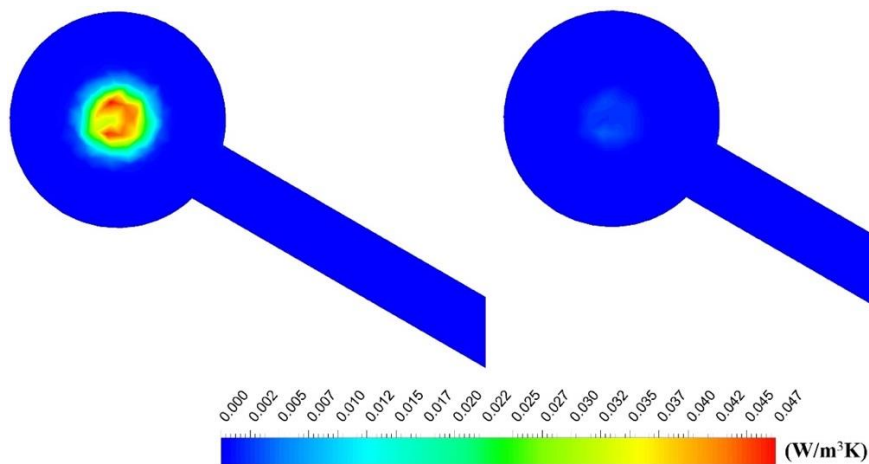


Figura 8. Generación de entropía local por efectos viscosos.

Se observa que, se tiene un valor máximo de generación de entropía de $0.047 \text{ W/m}^3\text{K}$ al utilizar agua como fluido de trabajo, mientras que, al utilizar el nanofluido, el valor máximo es de aproximadamente $0.007 \text{ W/m}^3\text{K}$, lo que representa una disminución del 85%. En ambos casos, dichos valores máximos se localizan a la mitad del cabezal del ETSC. En general, los valores de la generación de entropía local debido a los efectos viscosos son menores cuando se utiliza el nanofluido como fluido de trabajo en cualquier momento de operación del ETSC. Es importante notar, que las bajas velocidades de los

fluidos mostradas anteriormente (figura 6) son las causantes de una insignificante generación de entropía local debido a los efectos viscosos para ambos fluidos de trabajo.

Así mismo, la figura 9 muestra una comparación de la generación de entropía local debido a transferencia de calor al utilizar agua (izquierda) y nanofluido de TiO_2 de base agua (derecha) como fluido de trabajo. De igual manera, el contorno se muestra en un plano vertical en el primer tubo evacuado del ETSC a las 14:30 horas.

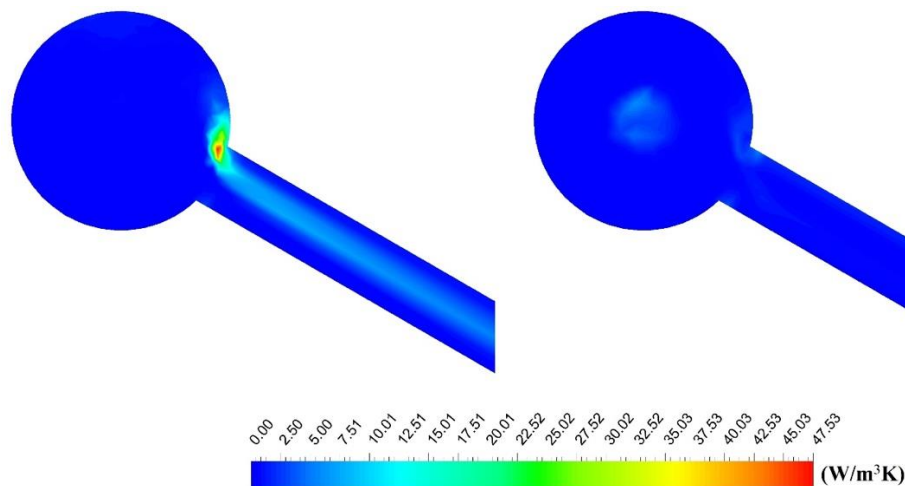


Figura 9. Generación de entropía local por transferencia de calor.

A partir de la figura, se observa que la máxima generación de entropía local se encuentra en la unión del colector y el tubo de vacío para el caso del agua y en el centro del colector para el caso del nanofluido. Los valores máximos de la generación de entropía local debido a transferencia de calor son de $47.53 \text{ W/m}^3\text{K}$ y $12 \text{ W/m}^3\text{K}$ para el agua y el nanofluido respectivamente, representando una disminución del 75%. El comportamiento de la generación de entropía local debido a la transferencia de calor está relacionado con una mejor distribución de temperaturas ocasionado por los cambios en las propiedades del calor específico y conductividad térmica del nanofluido de TiO_2 de base agua.

5. Conclusiones

El presente trabajo se centra en el análisis y comparación del comportamiento térmico, hidráulico y de generación de entropía de un Colector Solar de Tubos Evacuados utilizando agua y nanofluido de TiO_2 de base agua como fluidos de trabajo a través de la Dinámica de Fluidos Computacional. El análisis considera una geometría comercial completa realizada en 3D por medio del software comercial ANSYS-Fluent. El modelo numérico considera un régimen de flujo laminar en estado transitorio tomando en cuenta un tiempo de operación de 9

horas, así como los datos de radiación solar de la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Las propiedades de los fluidos de trabajo se establecen como polinomios dependientes de la temperatura, que en el caso del nanofluido de TiO_2 de base agua, se considera un tamaño de partícula de 21 nm uniformemente dispersado con una concentración de 0.5%. Finalmente, la generación de entropía considera los fenómenos de efectos viscosos, transferencia de calor y pérdida de calor en forma global y local.

Las principales conclusiones obtenidas son:

- El uso del nanofluido de TiO_2 de base agua como fluido de trabajo conduce a un aumento de la temperatura de salida del ETSC para todo el rango de horas de operación (9 a 18 horas), teniendo una temperatura máxima de salida de 30.73°C a las 14:30 horas en comparación con los 25.7°C al usar agua a la misma hora.
- En general, utilizar nanofluido de TiO_2 de base agua aumenta la eficiencia térmica del colector solar en comparación con usar simplemente agua, teniendo una eficiencia máxima de 82.5% al usar el nanofluido en comparación con el 61.5% del agua.
- Para todo el periodo de operación, el uso del nanofluido de TiO_2 de base agua como fluido de trabajo conlleva a una aceleración del fluido



dentro del colector solar, esto debido a la disminución en la viscosidad. En promedio, la velocidad alcanzada es de 10.72 mm/s.

- Debido a las bajas velocidades mencionadas, la generación de entropía por efectos viscosos arroja valores muy bajos para ambos fluidos de trabajo (prácticamente insignificantes).
- Se obtuvieron los valores de los números adimensionales de Reynolds, Prandtl y Nusselt considerando las propiedades a las 14:30 horas dentro de los tubos evacuados. Se observa que para el caso del nanofluido, se obtiene un aumento considerable en el número de Reynolds y Nusselt, comprobando con ello la existencia de una mayor transferencia de calor.
- Utilizar nanofluido como fluido de trabajo en un colector solar arroja una reducción de hasta el 60.35% en la generación de entropía debido a transferencia de calor. Así mismo, la generación de entropía debido a la pérdida de calor presenta una reducción de hasta el 81.32%.
- Es posible obtener la localización exacta de las diferentes irreversibilidades por medio del análisis de generación de entropía local. Se observó que se obtiene una mayor concentración de irreversibilidades en el centro del colector para el caso de la generación de entropía debido a los efectos viscosos, así como una mayor concentración en la unión del tubo al colector para la generación de entropía debido a transferencia de calor.

Este trabajo es una contribución en el uso y comportamiento de nanofluidos como fluido de trabajo en un dispositivo solar, así como su análisis por generación de entropía de manera global y local, permitiendo con ello buscar oportunidades en la mejora de su desempeño.

Tomando como base el presente modelo, es posible la realización de análisis con otros tipos de nanofluidos con el fin de determinar el más conveniente para diversas situaciones particulares. Finalmente, es posible realizar la variación de parámetros geométricos y de operación que permitan la disminución de la generación de entropía con el fin de obtener un dispositivo más eficiente.

6. Reconocimiento de autoría

Oscar A. López-Núñez: Conceptualización; Metodología; Validación; Análisis formal; Investigación; Recursos; Escritura: Borrador original; Escritura: revisión y edición; Visualización; Supervisión. *Fernando Lara-Chávez:* Metodología; Validación; Análisis formal; Investigación; Recursos; Escritura: revisión y edición; Visualización. *Arilí Cárdenas-Robles:* Metodología; Validación; Análisis formal; Investigación; Recursos; Escritura: revisión y edición; Visualización. *Álvaro González Ángeles:* Metodología; Validación; Análisis formal; Investigación; Recursos; Escritura: revisión y edición; Visualización.



Nomenclatura

A_c	Área de absorción (m^2)	S_i	Generación de entropía global de cada fenómeno (W/K)
c	Calor específico (J/kg K)	S_q	Generación de entropía global debido a la pérdida de calor (W/K)
g_y	Gravedad (m/s^2)	S_t	Generación de entropía total (W/K)
I	Radiación solar incidente (W/m^2)	T	Temperatura ($^{\circ}C$)
k	Conductividad térmica (W/m K)	T_{amb}	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
\dot{m}	Flujo másico (Kg/s)	T_{in}	Temperatura de entrada ($^{\circ}C$)
P	Presión (Pa)	T_{out}	Temperatura de salida ($^{\circ}C$)
\dot{Q}_{in}	Energía solar de entrada (W)	u_x	Velocidad en la dirección x (m/s)
\dot{Q}_{util}	Calor útil (W)	u_y	Velocidad en la dirección y (m/s)
s_h	Generación de entropía local debido a transferencia de calor ($W/m^3 K$)	u_z	Velocidad en la dirección z (m/s)
s_v	Generación de entropía local debido a efectos viscosos ($W/m^3 K$)		

Abreviaturas

<i>CFD</i>	Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
<i>ETSC</i>	Colector Solar de Tubos Evacuados (Evacuated Tube Solar Collector)
<i>UDF</i>	Función Definida por el Usuario (User Defined Function)

Letras griegas

η	Eficiencia térmica
μ	Viscosidad dinámica (Pa s)
ρ	Densidad (kg/m^3)

Subíndices

<i>bf</i>	Fluido base
<i>nf</i>	Nanofluido
<i>w</i>	Agua



Referencias

- [1] M. Rezaeian, M. Shafiey Dehaj, M. Zamani Mohiabadi, M. Salarmofrad, S. Shamsi, Experimental investigation into a parabolic solar collector with direct flow evacuated tube, *Appl Therm Eng.* 189 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116608>.
- [2] R. Wiser, D. Millstein, T. Mai, J. Macknick, A. Carpenter, S. Cohen, W. Cole, B. Frew, G. Heath, the environmental and public health benefits of achieving high penetrations of solar energy in the United States, *Energy.* 113 (2016) 472–486.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.068>.
- [3] F.R. Mazarron, C.J. Porras-Prieto, J.L. Garcia, R.M. Benavente, Feasibility of active solar water heating systems with evacuated tube collector at different operational water temperatures, *Energy Convers Manag.* 113 (2016) 16–26.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.046>.
- [4] M. de P.R. Teles, K.A.R. Ismail, A. Arabkoohsar, A new version of a low concentration evacuated tube solar collector: Optical and thermal investigation, *Solar Energy.* 180 (2019) 324–339.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.039>.
- [5] M. Murugan, A. Saravanan, P.V. Elumalai, P. Kumar, C. Ahamed Saleel, O.D. Samuel, M. Setiyo, C.C. Enweremadu, A. Afzal, An overview on energy and exergy analysis of solar thermal collectors with passive performance enhancers, *Alexandria Engineering Journal.* 61 (2022) 8123–8147.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.052>.
- [6] T. Güney, Solar energy, governance and CO₂ emissions, *Renew Energy.* 184 (2022) 791–798.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.124>.
- [7] X. Zhang, S. You, H. Ge, Y. Gao, W. Xu, M. Wang, T. He, X. Zheng, Thermal performance of direct-flow coaxial evacuated-tube solar collectors with and without a heat shield, *Energy Convers Manag.* 84 (2014) 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.014>
- [8] R. Kuang, B. Du, P.D. Lund, J. Wang, Improving performance prediction of evacuated tube solar collector through convolutional neural network method, *Thermal Science and Engineering Progress.* 39 (2023) 101717.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101717>.
- [9] S. Aggarwal, R. Kumar, D. Lee, S. Kumar, T. Singh, A comprehensive review of techniques for increasing the efficiency of evacuated tube solar collectors, *Heliyon.* 9 (2023) e15185.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15185>.
- [10] B.K. Naik, M. Bhowmik, P. Muthukumar, Experimental investigation and numerical modelling on the performance assessments of evacuated U – Tube solar collector systems, *Renew Energy.* 134 (2019) 1344–1361.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.066>.
- [11] J. Gong, Z. Jiang, X. Luo, B. Du, J. Wang, P.D. Lund, Straight-through all-glass evacuated tube solar collector for low and medium temperature applications, *Solar Energy.* 201 (2020) 935–943.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.069>.
- [12] S. Aggarwal, R. Kumar, D. Lee, S. Kumar, T. Singh, A comprehensive review of techniques for increasing the efficiency of evacuated tube solar collectors, *Heliyon.* 9 (2023) e15185.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15185>.
- [13] Y. Tong, R. Wang, S. Wang, H. Wang, L. Huang, C. Shao, X. Jin, B. Xue, Z. Zhu, Comparison and evaluation of energetic and exergetic performance of an evacuated tube solar collector using various nanofluid, *Process Safety and Environmental Protection.* 174 (2023) 585–594.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.025>.
- [14] S. Choi, J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* 231. (1995) 99–105.
<https://www.researchgate.net/publication/236353373>.
- [15] P. Martínez-Merino, P. Estellé, R. Alcántara, I. Carrillo-Berdugo, J. Navas, Thermal performance of nanofluids based on tungsten disulphide nanosheets as heat transfer fluids in parabolic trough solar collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 247 (2022) 111937.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111937>.
- [16] H. Olfian, S.S.M. Ajarostaghi, M. Ebrahimnataj, Development on evacuated tube solar collectors: A review of the last decade results of using nanofluids, *Solar Energy.* 211 (2020) 265–282.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.056>.
- [17] A.A. İnada, S. Arman, B. Safaei, A novel review on the efficiency of nanomaterials for solar



- energy storage systems, *J Energy Storage*. 55 (2022) 105661. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105661>.
- [18] A.H. Elsheikh, S.W. Sharshir, M.E. Mostafa, F.A. Essa, M.K. Ahmed Ali, Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82 (2018) 3483–3502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.108>.
- [19] S. Aggarwal, R. Kumar, S. Kumar, M. Bhatnagar, P. Kumar, Computational fluid dynamics-based analysis for optimization of various thermal enhancement techniques used in evacuated tubes solar collectors: A review, *Mater Today Proc*. 46 (2021) 8700–8707. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.021>.
- [20] A. Sciacovelli, V. Verda, E. Sciubba, Entropy generation analysis as a design tool—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 43 (2015) 1167–1181. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.104>.
- [21] M.A. Sharafeldin, G. Gróf, Efficiency of evacuated tube solar collector using WO₃/Water nanofluid, *Renew Energy*. 134 (2019) 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.010>.
- [22] M.A. Sharafeldin, G. Gróf, E. Abu-Nada, O. Mahian, Evacuated tube solar collector performance using copper nanofluid: Energy and environmental analysis, *Appl Therm Eng*. 162 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114205>.
- [23] S.M.S. Hosseini, M. Shafiey Dehaj, Assessment of TiO₂ water-based nanofluids with two distinct morphologies in a U type evacuated tube solar collector, *Appl Therm Eng*. 182 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116086>.
- [24] M.M. Jamil, N.A.C. Sidik, M.N.A.W.M. Yazid, Thermal Performance of Thermosyphon Evacuated Tube Solar Collector using TiO₂ /Water Nanofluid, 2016.
- [25] M. Mercan, A. Yurddaş, Numerical analysis of evacuated tube solar collectors using nanofluids, *Solar Energy*. 191 (2019) 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.074>.
- [26] S. Mojtaba Tabarhoseini, M. Sheikholeslami, Modeling of evacuated tube solar collector involving longitudinal fins and nanofluids, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 53 (2022) 102587. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102587>.
- [27] Y.Y. Gan, H.C. Ong, T.C. Ling, N.W.M. Zulkifli, C.T. Wang, Y.C. Yang, Thermal conductivity optimization and entropy generation analysis of titanium dioxide nanofluid in evacuated tube solar collector, *Appl Therm Eng*. 145 (2018) 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.012>.
- [28] S.M. Tabarhoseini, M. Sheikholeslami, Entropy generation and thermal analysis of nanofluid flow inside the evacuated tube solar collector, *Sci Rep*. 12 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05263-2>.
- [29] J.A. Alfaro-Ayala, G. Martínez-Rodríguez, M. Picón-Núñez, A.R. Uribe-Ramírez, A. Gallegos-Muñoz, Numerical study of a low temperature water-in-glass evacuated tube solar collector, *Energy Convers Manag*. 94 (2015) 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.091>
- [30] J.R. Howell, R. Siegel, M.P. Mengüç, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5th. Editi, CRC Press, Boca Ratón, USA, 2012. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [31] A.A. Hachicha, I. Rodríguez, R. Capdevila, A. Oliva, Heat transfer analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector, *Appl Energy*. 111 (2013) 581–592. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.067>.
- [32] O.A. López-Núñez, J.A. Alfaro-Ayala, J.J. Ramírez-Minguela, F. Cano-Banda, B. Ruiz-Camacho, J.M. Belman-Flores, Numerical analysis of the thermo-hydraulic performance and entropy generation rate of a water-in-glass evacuated tube solar collector using TiO₂ water-based nanofluid and only water as working fluids, *Renew Energy*. 197 (2022) 953–965. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.156>.
- [33] S. Mukherjee, S. Chakrabarty, P.C. Mishra, P. Chaudhuri, Transient heat transfer characteristics and process intensification with Al₂O₃-water and TiO₂-water nanofluids: An experimental investigation, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 150 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107887>.
- [34] A. Kamyar, R. Saidur, M. Hasanuzzaman, Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for nanofluids, *Int J Heat Mass Transf*. 55 (2012) 4104–4115.



<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.052>.

[35] S. Koçak Soylu, Z. Yeşil Acar, M. Asiltürk, İ. Atmaca, Effects of doping on the thermophysical properties of Ag and Cu doped TiO₂ nanoparticles and their nanofluids, *J Mol Liq.* 368 (2022) 120615. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120615>.

[36] D. Groot, S. Ruurds, P. Mazur, *Non-Equilibrium Thermodynamics*, Dover Publications, New York, 2011.

[37] H. Hareesh Krishnan, K.K. Ashin, A. Adhil Muhammed, B.K. Ayalur, Experimental and numerical study of wind tower integrated with solar heating unit to meet thermal comfort in buildings during cold and sunny climate conditions, *Journal of Building Engineering.* 68 (2023) 106048. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106048>.

[38] A. Kumar, A. Maurya, Experimental analysis and CFD modelling for pyramidal solar still, *Mater Today Proc.* 62 (2022) 2173–2178. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.360>.

[39] J.A. Alfaro-Ayala, O.A. López-Núñez, F.I. Gómez-Castro, J.J. Ramírez-Minguela, A.R. Uribe-Ramírez, J.M. Belman-Flores, S. Cano-Andrade, Optimization of a solar collector with evacuated tubes using the simulated annealing and computational fluid dynamics, *Energy Convers Manag.* 166 (2018) 343–355.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.039>

[40] O.A. López-Núñez, J. Arturo Alfaro-Ayala, J.J. Ramírez-Minguela, J. Nicolás Flores-Balderas, J.M. Belman-Flores, Solar Radiation Model Applied to a Low Temperature Evacuated Tubes Solar Collector, *J Sol Energy Eng.* 141 (2018) 031003. <https://doi.org/10.1115/1.4041402>

Derechos de Autor (c) 2023 Oscar Alejandro López Núñez, Fernando Lara Chávez, Arilí Cárdenas Robles, Álvaro González Ángeles



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)