

# Evaluación de fluidos caloportadores no convencionales para aplicación solar térmica: Un estudio numérico en Panamá

## Evaluation of unconventional heat transfer fluids for solar thermal application: A numerical study in Panama

Alessandra Arcia<sup>1,2</sup>, Norbert Díaz<sup>1,2</sup>, Alejandro Medina<sup>1,2</sup>, Miguel Chen Austin<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Licenciatura en Ingeniería en Energía y Ambiente, Facultad de Ingeniería Mecánica,

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Metropolitano Víctor Levi Sasso

\*Autor de correspondencia: [miguel.chen@utp.ac.pa](mailto:miguel.chen@utp.ac.pa)

**Resumen.** En este estudio se llevó a cabo la investigación para determinar el potencial de los nanofluidos como fluidos caloportadores no convencionales en colectores solares en un país con tanto potencial térmico como Panamá. Luego de hacer la investigación preliminar sobre cuatro posibles fluidos caloportadores, encontramos que los nanofluidos de CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y TiO<sub>2</sub> con agua como fluido base poseen propiedades térmicas de gran interés. Después se realizó la simulación de un sistema de colector solar simple a través del *software* TRNSYS y se utilizaron las condiciones climáticas de Panamá. Se utilizó un intercambiador de calor de contraflujo para suministrar el agua caliente sanitaria a una residencia estándar de cuatro personas, donde cada una consume 50 litros diarios. Se logró comprobar que los nanofluidos son fluidos caloportadores más eficientes que el fluido convencional (agua), siendo el SiO<sub>2</sub> el mejor nanofluido a la hora de escoger el intercambiador de calor que vaya a utilizarse, por lo que estos fluidos caloportadores no convencionales podrían ser posibles sustitutos para nuevos colectores en un futuro.

**Palabras clave.** Colector solar, fluidos caloportadores, intercambiador de calor, nanofluido, transferencia de calor.

**Abstract.** In this study, research was carried out to determine the efficiency of nanofluids as unconventional heat transfer fluids in solar collectors in a country with as much thermal potential as Panama. After doing preliminary research on four possible heat transfer fluids, we found that CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> nanofluids with water as the base fluid have thermal properties of great interest. Afterwards, the simulation of a simple solar collector system was carried out through the TRNSYS software using the climatic conditions of Panama. A counter flow heat exchanger was used to supply the domestic hot water to a standard residence of four people, where each one consumes fifty liters of water per day. It was possible to verify that nanofluids are more efficient heat transfer fluids than the conventional fluid (water), with SiO<sub>2</sub> being the best nanofluid when choosing the heat exchanger to be used; therefore, these unconventional heat transfer fluids could be possible substitutes for new collectors in the future.

**Keywords.** Solar collector, heat transfer fluids, heat exchanger, nanofluid, heat transfer.

## 1. Introducción

Los colectores solares son dispositivos que pueden producir calor y energía a alta temperatura de manera eficiente gracias al calor obtenido por la radiación solar. Son aplicados en sistemas de calentamiento, secado, refrigeración, agua sanitaria, entre otros [1]. Utilizados principalmente para calentar un fluido caloportador, que actúa como fluido de trabajo para el calentamiento de agua en residencias, hoteles, hospitales, entre otros. El procedimiento consiste en calentar el agua fría que proviene de la red de tubería, esta se almacena en un acumulador, el fluido caloportador circula dentro del acumulador, elevando la temperatura del agua,

al combinarse con el agua fría en una válvula mezcladora, se fija una temperatura de salida, proporcionando de esta manera agua caliente lista para usos requeridos [2].

La transferencia de calor es de gran importancia en distintas áreas, no obstante, algunos de los fluidos convencionales utilizados en la mayoría de los casos poseen bajas conductividades térmicas, afectando el proceso de transferencia de calor. Es por esto que surge la necesidad de optimización de estos fluidos caloportadores o nuevas alternativas, para el mejoramiento de la conductividad térmica [3].

Los fluidos caloportadores que estudiaremos serán los nanofluidos, estos se describen como suspensiones compuestas de partículas sólidas de un tamaño inferior a 100 nm. Constan de propiedades fisicoquímicas que los vuelven óptimos para su uso como fluido refrigerante, al poseer una mayor eficiencia, se logrará un ahorro energético, ya que la energía consumida en términos de fluido caloportador será menor. La principal razón de utilizar nanopartículas es la de aumentar la capacidad de transferencia de calor del fluido [4].

El proceso por el cual las partículas son dispersadas en el líquido juega un papel importante en las propiedades finales, y por esto existen dos tipos de métodos de preparación de nanofluidos: El primero es el método de un paso, el cual consta de administrar las nanopartículas en forma de polvo seco en la solución base, para que se dispersen a tal punto de formar una suspensión homogénea y estable [5]. El segundo método es el de dos pasos y suele llevarse a cabo en baños de ultrasonidos, sondas de ultrasonidos, agitadores magnéticos, entre otros. El más utilizado es el de sondas de ultrasonido, que conserva las propiedades ideales del nanofluido para su aplicación térmica [6].

### 1.1 Estado del arte

Se estudiarán cuatro nanofluidos en específico, el óxido de cobre (CuO) que tiene aplicaciones en los colectores solares de tubos de vacío (de temperatura media) [7], pero también para colectores solares planos, el óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), el óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y el óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>); estos tres últimos, todos con aplicaciones en colectores solares planos [8]. Algunas características de cada uno se presentan en la tabla 1.

El CuO, ha sido de mucho interés por sus propiedades térmicas, las cuales, haciendo una modificación en su composición, se puede optimizar de gran manera las propiedades como la conductividad térmica, la capacidad calorífica, entre otras.

El SiO<sub>2</sub> y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son algunos de los nanofluidos de óxido metálico que han sido de interés para muchos investigadores recientemente debido a sus propiedades térmicas y físicas crecientes [8].

En una investigación experimental numérica de Hawwash y col. se utilizó Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como nanofluido y agua como fluido base, con el tensioactivo Triton X-100, con un rango de volumen de 0.1-3% (De la solución final), mejoró la eficiencia del colector solar plano de 3 a 18%, también es importante mencionar que el caudal afecta la eficiencia, y para este estudio el caudal de 5.5 L/min, equivalente a 9.167x10<sup>5</sup> (m<sup>3</sup>/s) fue considerado el mejor. Si se aumenta la concentración de volumen a un 0.5% se alcanza la eficiencia máxima, luego de este porcentaje causará un efecto negativo [9].

Con el nanofluido TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, el estudio realizado por Said, Z., la fracción de volumen de las nanopartículas fue de 0.1% y

0.3% respectivamente, mientras que los caudales máxicos del nanofluido variaron de 0.5 a 1.5 kg/min, por lo que calculando un promedio de caudal máxico de 1 kg/min, es lo mismo que 3.99x10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/s [10].

Otro estudio experimental numérico de Verma y col. en un colector solar plano de 0.375 m<sup>2</sup>, para los nanofluidos CuO/H<sub>2</sub>O y SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O respectivamente.

Se calculó el número y la eficiencia térmica del colector solar plano, siguiendo la norma ASHRAE 93-2003, con fracciones de volumen de 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.5% y los caudales máxicos de 0.01- 0.05 kg/s fueron los que se utilizaron para este estudio. Los experimentos mostraron que en la fracción de volumen de 0.75% y caudal de 0.025 kg/s, mejoraron la eficiencia térmica del colector en un 12.64% y 4.08% para, CuO/H<sub>2</sub>O, y SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, respectivamente [9].

Según el estudio de Bellos y Tzivanidis, aplicando diferentes nanopartículas como fluidos caloportadores, se demostró que el más eficiente fue CuO, debido a la alta conductividad térmica que posee, seguido del SiO<sub>2</sub> que tiene el calor específico más alto en cualquier volumen concentración [11].

**Tabla 1.** Propiedades físicas de los nanofluidos en un colector solar plano con agua como fluido base [9], [10]

Tipo de nano partícula	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Tamaño (nm)	< 20	10	44	21
Fracción de Volumen (%)	0.1	0.75	0.75	0.2
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	9.2x10 <sup>-5</sup>	3.8x10 <sup>-6</sup>	1.1x10 <sup>-5</sup>	4.0x10 <sup>-6</sup>

Se debe saber que las tres propiedades térmicas más importantes a la hora de estudiar un fluido caloportador son: la densidad, conductividad térmica, y calor específico [4].

La densidad del nanofluido caloportador se encuentra gracias a la relación de Pak y Cho [12], donde va a venir definida por la ecuación (1):

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_{np} + (1 - \varphi)\rho_{bf} \quad (1)$$

En la ecuación (1),  $\varphi$  es la concentración de volumen,  $\rho_{nf}$ ,  $\rho_{np}$  y  $\rho_{bf}$  son las densidades del nanofluido, nanopartícula y fluido base respectivamente. Esta expresión para la densidad, además de la relación de Pak y Cho, fue obtenida por medio del principio de la regla de mezclas o "mixture rule", aplicadas a la densidad [13].

Para la conductividad térmica del nanofluido, el modelo de Maxwell de conductividad térmica para mezclas sólido-líquido de partículas relativamente grandes (tamaño micro / pequeño) es bueno para concentraciones bajas de sólidos [14], por lo que la conductividad térmica efectiva para el nanofluido está expresada a través de la ecuación (2):

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (2)$$

Donde  $\phi$  es la fracción de volumen de las nanopartículas, y  $k_{nf}$ ,  $k_{np}$  y  $k_{bf}$  son respectivamente los valores térmicos, es decir las conductividades del nanofluido, nanopartícula y fluido base [14].

Para el calor específico, concretamente para altas concentraciones, se utiliza la formula dada por la ecuación (3):

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\phi)\rho_{bf}C_{p,bf} + \phi\rho_{np}C_{p,np}}{(1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np}} \quad (3)$$

Donde  $\phi$  es la fracción de volumen de las nanopartículas,  $C_{p,nf}$ ,  $C_{p,np}$  y  $C_{p,bf}$  son los valores caloríficos del nanofluido, nanopartícula y fluido base, y  $\rho_{np}$  y  $\rho_{bf}$  son las densidades de la nanopartícula y el fluido base, respectivamente [11].

### 1.2 Análisis termodinámico

Una característica que deben cumplir todos los fluidos caloportadores es de no sobrepasar su temperatura de ebullición, si pasan de fase líquida a gaseosa, ocasionarán problemas en el rendimiento de la tasa de transferencia de calor del fluido. Si el flujo de calor de un sistema en ebullición es mayor que el flujo de calor crítico (CHF) del sistema, el fluido acumulado puede hervir, formando grandes burbujas que pueden bloquear el paso del fluido y el vapor termina aislando el fluido de la superficie caliente, lo que causará que el flujo de calor disminuya drásticamente.

Para determinar el punto de ebullición de cada fluido, se encontró que no hay una temperatura específica para cada fluido, porque estas van a depender de la fracción volumétrica del nanofluido, del tamaño de las nanopartículas, de las condiciones de presión en las que se encuentren y también del método de preparación al cual hayan sido sometidos [15].

En el estudio de transferencia de calor por ebullición en piscina de Fahmy y Aziz, se comprobó que la adición al agua de nanopartículas de  $Al_2O_3$  y de  $CuO$  provocó una disminución de la transferencia de calor de ebullición nucleada de la piscina a través del volumen la relación de fracción, variándola de 0.02% a 0.8% y de 0.02% a 0.20%, respectivamente. Se observó que la superficie calentada afecta dramáticamente el rendimiento de ebullición del agua, por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor disminuyó al aumentar la concentración de partículas [16].

Se asumirá un sistema idealizado sin pérdidas y con transferencia de calor perfecta, y al observar las temperaturas

promedio, así como las gráficas, se puede decir que los fluidos caloportadores no convencionales no sobrepasarán su punto de ebullición por lo que no ocasionarán este tipo de problemas en el sistema.

Así, el objetivo de este trabajo es evaluar el potencial de estos cuatro nanofluidos aplicándolos como fluidos caloportadores no convencionales en colectores solares.

## 2. Materiales y métodos

La elaboración de este trabajo inició con la búsqueda de información e investigaciones realizadas anteriormente referentes al tema escogido, con el fin de conocer cada uno de los diferentes fluidos caloportadores no convencionales posibles a emplear y sus características principales.

### 2.1 Evaluación de los fluidos caloportadores

Para la evaluación de los fluidos caloportadores, se procedió de la siguiente manera:

- Luego de la búsqueda, se eligieron los tipos de nanofluidos que más beneficios y eficiencia ofrezcan, ya que son los que van a llevar a cabo la producción de energía térmica para calentar el fluido.
- Se utilizó el *software* TRNSYS [17] para realizar las simulaciones mediante un circuito térmico para poder comprobar la eficiencia térmica de los fluidos caloportadores en el problema base, utilizando los datos de las condiciones climáticas de Panamá (figura 1).
- El estudio fue realizado durante un año, tomando en consideración que las temperaturas de cada mes se median de forma semanal, suponiendo que el uso del agua caliente sanitaria es de ocho horas al día.
- Se compararon los nanofluidos entre ellos, para elegir cual es el que mejor desempeño presenta en el colector solar. Las propiedades físicas de los cuatro fluidos estudiados se presentan en la tabla 2.

Para abordar el caso de estudio, se debe conocer que en Panamá hay cuatro rangos comunes de dimensiones para viviendas, 60 a 80 m<sup>2</sup>, 80 a 100 m<sup>2</sup>, 100 a 120 m<sup>2</sup>, y 120 a 150 m<sup>2</sup>. Para este estudio se implementaron seis dimensiones de vivienda diferentes: 60, 80, 100, 120, 150 y 200 m<sup>2</sup>.

**Tabla 2.** Propiedades Termofísicas de diferentes nanopartículas y del agua a T 300K [4]

Propiedad Termofísica	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Agua
Densidad ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )	3890	6500	2200	4175	996.5
Conductividad Térmica (k, W/mK)	31	17.65	1.4	8.4	0.613
Calor específico (c, J/kgK)	795	533	745	692	4181

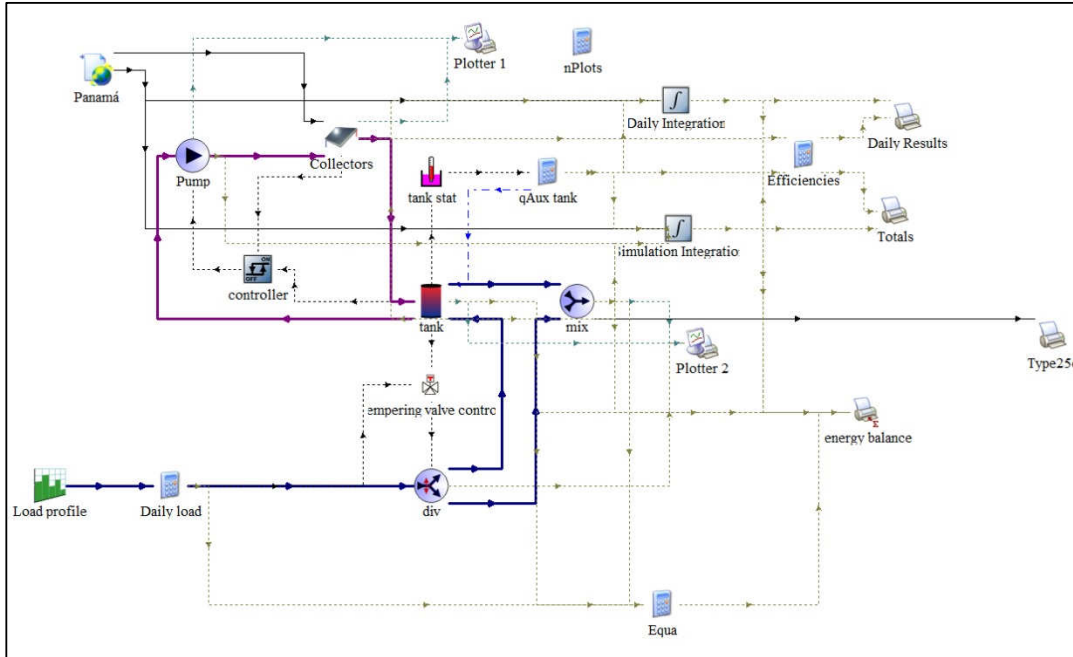


Figura 1. Circuito térmico del sistema en TRNSYS.

Se necesitó hacer el análisis del consumo de agua caliente en cada casa, por lo que se asumió la cantidad de litros consumidos por persona al día de acuerdo con el criterio de consumo de viviendas unifamiliares del IDAE [16], en una vivienda unifamiliar se consume alrededor de 50 litros de agua por día por persona, como se evaluó un máximo de cuatro personas por vivienda, fueron 200 litros por día en cada vivienda [16]. Es importante aclarar que el caso de estudio se asumió como un sistema ideal sin pérdidas y con transferencia de calor perfecta. En base a estos datos, el objetivo fue conocer cuál de los cuatro nanofluidos presenta una mejor tasa de transferencia de calor hacia el agua a utilizar en la residencia.

El circuito consta de un colector, un tanque, una bomba, un controlador, un tanque auxiliar, un mixer, un divisor y un tanque auxiliar. El colector se encarga de absorber la radiación solar y calentar el fluido, la bomba será la encargada de mover el fluido desde el colector hacia el tanque, pero estará condicionada a encenderse si cumple con las condiciones de temperatura del controlador. El tanque auxiliar funciona como una resistencia, y cuando la temperatura del tanque es menor a la que necesita para operar, esta se activa para que se caliente y el agua llegue más rápido a la temperatura deseada.

El tanque principal se divide en 2 secciones, la parte superior y la parte inferior; la parte inferior tiene una entrada de agua fría que proviene del divisor y una salida hacia la bomba; la parte superior tiene una entrada que proviene del colector y una salida hacia el mixer donde se dirige hacia el

intercambiador de calor para finalmente abastecer la residencia.

### 2.2 Dimensionamiento del intercambiador de calor para los fluidos caloportadores

Se utilizó un intercambiador de calor de contraflujo. La ecuación para obtener el coeficiente de transferencia de calor total es la siguiente:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_c}} \quad (4)$$

Donde  $U$  es el coeficiente de transferencia de calor total y  $h_f$ ,  $h_c$  son los coeficientes de convección [18]. Para su obtención se asumió que la viscosidad de los nanofluidos será igual a la del agua, debido a que los estudios realizados para la viscosidad en estos nanofluidos son muy variados y confusos por la cantidad de factores que se toman en cuenta.

Para obtener el calor que se transfiere del nanofluido al agua se utilizara la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = UA \Delta T \quad (5)$$

Donde  $\dot{Q}$  es la tasa de transferencia de calor,  $A$  es el área del tubo externo,  $\Delta T$  diferencia media logarítmica de temperaturas del nanofluido y el agua en el intercambiador [18].

$$\Delta T = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (6)$$

Los datos del intercambiador de calor fueron asumidos en base a los típicos usados a estos fines, el tubo con longitud de 1.43m, diámetro interior de 0.02 m y exterior de 0.03 m, y un área exterior de  $0.135m^2$ . Los valores de la tasa de flujo de calor fueron calculados teniendo como referencia que la temperatura promedio de salida del agua es de  $60^{\circ}C$ .

### 3. Resultados y discusión

Simulación de las temperaturas de entrada y salida del colector con cada fluido caloportador en TRNSYS, con su respectivo flujo másico:

- Fluido base (figura 2): Agua
- Mejor fluido caloportador (figura 3).  
Con las temperaturas de la parte superior e inferior del tanque se halla la temperatura y el flujo másico de salida del colector como agua caliente sanitaria (DHW):
- Fluido base (figura 4): Agua
- Mejor fluido caloportador (figura 5).

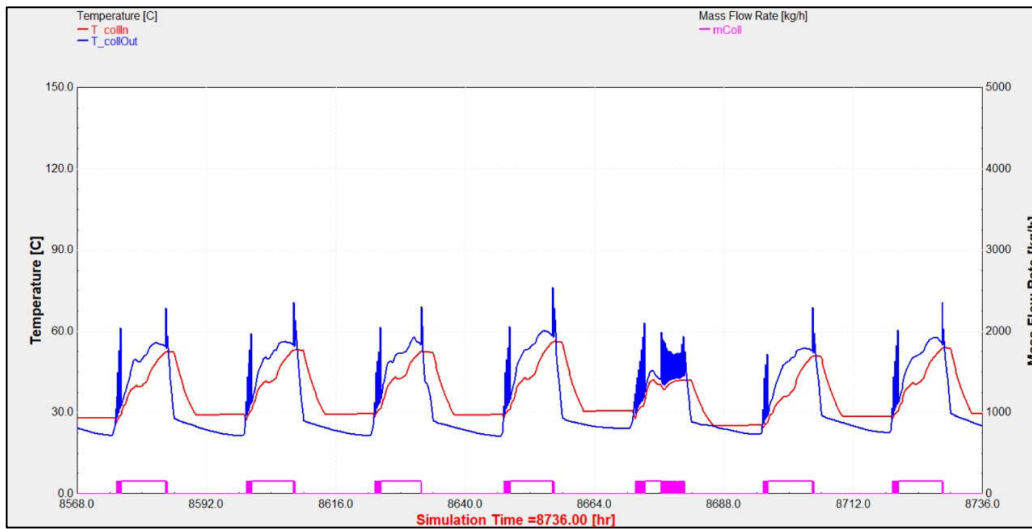


Figura 2. Simulación del agua.

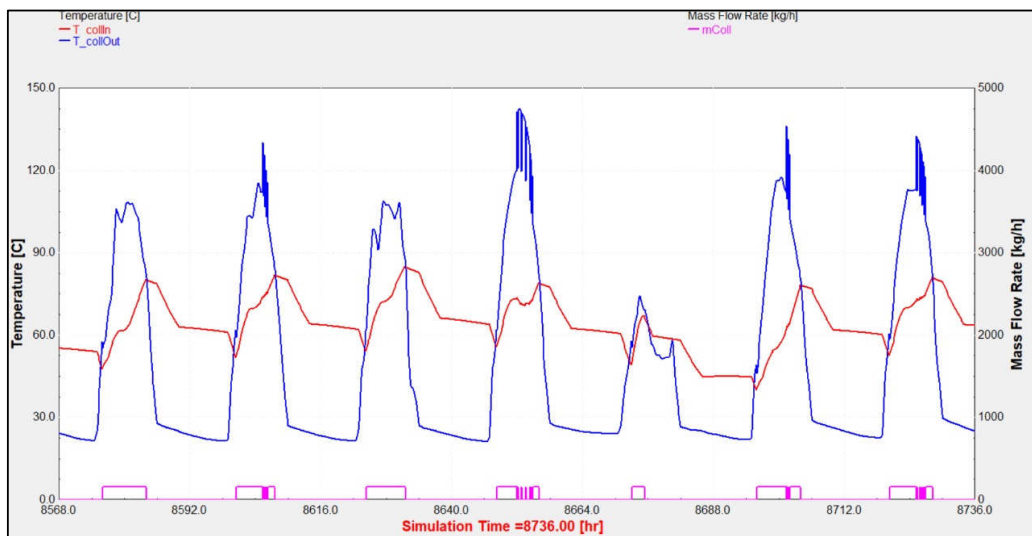


Figura 3. Simulación del SiO2.

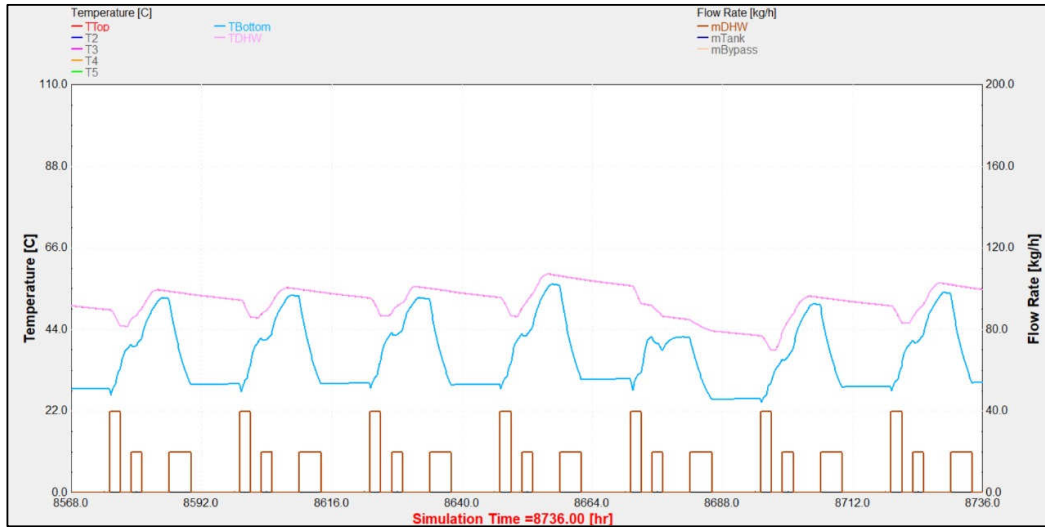


Figura 4. Simulación del agua en la última semana.



Figura 5. Simulación del SiO2 en la primera semana del mes.

Se observa que el flujo másico del fluido caloportador en las condiciones base trabajará solo durante ocho horas, y el patrón es similar en todos los casos. Como se necesitan 200 Litros diarios, el flujo másico del agua sanitaria sería de 25 kg/h suponiendo 8 horas de trabajo al día, lo que es equivalente a los 200 L por las ocho horas en un día, mientras que los fluidos caloportadores tendrán un flujo másico de 0.095 kg/s. Se obtuvieron las temperaturas mensuales promedio para cada fluido caloportador (tabla 3).

Las temperaturas del agua son inferiores a la temperatura objetivo de 60°C, por lo que no presentará un desempeño adecuado y no serán evaluados para la tasa de transferencia de calor. Con las temperaturas promedio de cada mes y las propiedades térmicas de cada fluido, junto con los datos del intercambiador de calor, haciendo uso de las ecuaciones (4) y (5) se calcula el coeficiente de transferencia de calor (tabla 4) y la tasa de flujo de calor (tabla 5).

Para el estudio el mejor fluido caloportador es el nanofluido de dióxido de Silicio ( $\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$ ) debido que este permitirá un

menor costo y tamaño del intercambiador de calor. En otras palabras, este fluido necesita ceder una menor cantidad de calor para lograr el mismo fin (calentar el agua hasta la temperatura deseada de 60°C).

**Tabla 3.** Temperaturas promedio mensuales de cada fluido caloportador en °C

Temperaturas promedio mensuales (°C)					
Mes	Agua	CuO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Enero	54.06	76.41	74.37	74.76	76.31
Febrero	55.48	78.92	76.98	76.61	78.42
Marzo	56.81	78.06	76.24	75.62	77.55
Abril	44.58	72.88	68.78	64.57	70.64
Mayo	50.77	74.63	71.93	71.75	73.96
Junio	49.64	74.23	71.55	71.04	73.59
Julio	50.70	72.99	70.10	70.94	72.27
Agosto	48.88	73.20	70.08	70.13	72.34
Septiembre	50.32	73.82	70.74	70.16	72.89
Octubre	53.93	76.96	74.74	74.70	76.38
Noviembre	50.45	75.19	72.20	72.17	74.49
Diciembre	52.72	77.46	75.24	75.18	76.97

**Tabla 4.** Valor de coeficiente de transferencia de calor total

Intercambiador	Agua y Agua	Agua y CuO	Agua y Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Agua y TiO <sub>2</sub>	Agua y SiO <sub>2</sub>
U (W/m <sup>2</sup> K)	215	279	266	248	206

**Tabla 5.** Tasa de Transferencia de Calor

Tasa de Transferencia de Calor Mensual (W)				
Mes	CuO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Enero	843.92	809.65	629.83	802.16
Febrero	900.63	870.93	663.22	846.75
Marzo	881.39	854.00	645.63	828.63
Abril	758.34	661.40	399.66	669.58
Mayo	801.83	748.30	571.66	749.77
Junio	791.96	738.53	557.19	741.15
Julio	761.30	699.15	555.21	710.10
Agosto	766.50	698.61	538.01	711.67
Septiembre	782.01	716.77	538.75	724.85
Octubre	856.50	818.73	628.73	803.65
Noviembre	815.30	755.54	580.16	761.92
Diciembre	867.99	830.44	637.49	816.38

Comparando estos resultados, se comprueba lo visto en el estudio de Bellos y Tzivanidis que muestra al fluido

caloportador de CuO como el más eficiente en términos de transferencia de calor; sin embargo, en el caso de estudio, se quiso el fluido caloportador que menor tasa de transferencia de calor tenga, es decir el SiO<sub>2</sub> para un rendimiento igual reduciendo costos en el intercambiador de calor.

Esto indica que, dependiendo el tamaño de las nanopartículas y la fracción de volumen del nanofluido, afectaran de manera positiva o negativa la eficiencia térmica, siendo que mientras más grandes sean las nanopartículas y más grande sea la fracción de volumen, peor eficiencia térmica se tendrá, pero siempre dependiendo la aplicación y el enfoque que se desee lograr en la investigación.

Se presentan la figura 2 para el agua como fluido convencional y la figura 3 para el SiO<sub>2</sub> ya que resultó ser el fluido más eficiente, sin embargo, por motivos de espacio se omitieron las figuras de las simulaciones de los demás nanofluidos.

#### 4. Conclusiones

Teniendo el objetivo de evaluar el potencial de estos cuatro nanofluidos aplicándolos como fluidos caloportadores no convencionales en colectores solares, mediante simulación dinámica con el *software* TRNSYS bajo el clima de Ciudad de Panamá, podemos resaltar lo siguiente:

- El nanofluido de óxido de silicio SiO<sub>2</sub> es el fluido caloportador que con menor tasa de transferencia de calor proporcionará la temperatura deseada de agua caliente sanitaria, lo que reduce costos en diseño y tamaño del intercambiador de calor.
- Se comprueba que, para las condiciones climáticas de Panamá, los fluidos caloportadores no convencionales resultan ser eficientes gracias a la gran radiación solar que recibe el país durante gran parte del año.
- La tasa de flujo de calor va a depender del coeficiente de transferencia de calor del fluido caloportador, del tamaño de las nanopartículas, de la fracción de volumen del nanofluido, de la temperatura de salida del colector y de la temporada en la cual se hagan las mediciones.

Por otro lado, se logra comprobar que los cuatro nanofluidos suministran un flujo másico de 0.095 kg/s, suficiente flujo para permitir calentar los 200 litros diarios de agua caliente sanitaria que se necesitan para consumo en la vivienda.

A pesar de que se comprueba la eficiencia de los nanofluidos como fluidos caloportadores, se debe considerar que se asumió un sistema idealizado sin pérdidas y con transferencia de calor perfecta. Los resultados de esta investigación estuvieron sujetos a las limitaciones del *software* y a la disponibilidad de los nanofluidos, en especial a su método de preparación y los costos de este.

Los datos obtenidos por medio de análisis numérico se pueden utilizar para futuros proyectos experimentales con nanofluidos. Así, se recomienda el estudio de un sólo nanofluido con un método de preparación en específico, debido a la alta complejidad de hacer múltiples experimentos con este tipo de fluidos caloportadores.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Panamá por su colaboración. Esta investigación fue financiada por la Institución Panameña Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) <https://www.senacyt.gob.pa/>, bajo el proyecto con código FIED19-R2-005 y del Sistema Nacional de Investigación (SNI).

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

## REFERENCIAS

- [1] G. Flamant *et al.*, “A new heat transfer fluid for concentrating solar systems: Particle flow in tubes,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 617–626, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.067.
- [2] J. F. Cerón, “Análisis del mecanismo de transferencia de calor en colectores solares térmicos y de la influencia de las condiciones de contorno,” p. 170, 2012, [Online]. Available: [http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2885/1/pf\\_c4460.pdf](http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2885/1/pf_c4460.pdf).
- [3] U. Nacional, D. E. L. Centro, and D. E. L. Perú, “ASESOR : Dr . WILDER EFRAÍN EUFRACIO ARIAS,” 2017.
- [4] P. Pedraza and J. Pino, “Análisis de los Nanofluidos y su aplicación como Fluido HTF,” p. 136, 2016.
- [5] I. Conference, O. Communication, B. Rathodiya, and S. Vishnoi, “PREPARATION METHODS FOR NANOFLUIDS AND THERE STABILITY,” pp. 155–159, 2017.
- [6] T. Aguilar, I. Carrillo-Berdugo, P. Martínez-Merino, A. Yasinskiy, M. Rodríguez-Fernández, and J. Navas, “Improving stability and thermal properties of TiO<sub>2</sub>-based nanofluids for concentrating solar energy using two methods of preparation,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 895–905, 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09615-w.
- [7] M. Shafiey Dehaj and M. Zamani Mohiabadi, “Experimental study of water-based CuO nanofluid flow in heat pipe solar collector,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 137, no. 6, pp. 2061–2072, 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08046-6.
- [8] S. Khalid, I. A. Zakaria, W. A. N. W. Mohamed, and W. A. W. Hamzah, “Comparative analysis of thermophysical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> nanofluids,” *J. Mech. Eng.*, vol. 8, no. Specialissue1, pp. 153–163, 2019.
- [9] N. Akram *et al.*, *A comprehensive review on nanofluid operated solar flat plate collectors*, vol. 139, no. 2, 2020.
- [10] Q. Al-Yasiri, M. Szabó, and M. Arıcı, “Single and hybrid nanofluids to enhance performance of flat plate solar collectors: Application and obstacles,” *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 65, no. 1, pp. 86–102, 2021, doi: 10.3311/PPme.17312.
- [11] Z. Hajabdollahi, H. Hajabdollahi, and K. C. Kim, “Multi-objective optimization of solar collector using water-based nanofluids with different types of nanoparticles,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 140, no. 3, pp. 991–1002, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08444-w.
- [12] B. C. Pak and Y. I. Cho, “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles,” *Exp. Heat Transf.*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998, doi: 10.1080/08916159808946559.
- [13] X. Q. Wang and A. S. Mujumdar, “A review on nanofluids - Part I: Theoretical and numerical investigations,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 613–630, 2008, doi: 10.1590/S0104-66322008000400001.
- [14] R. Mondragón, D. Sánchez, R. Cabello, R. Llopis, and J. E. Juliá, “Flat plate solar collector performance using alumina nanofluids: Experimental characterization and efficiency tests,” *PLoS One*, vol. 14, no. 2, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0212260.
- [15] S. M. S. Murshed, C. A. Nieto De Castro, M. J. V. Loureno, M. L. M. Lopes, and F. J. V. Santos, “A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 2342–2354, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.02.016.
- [16] A. A. Fahmy and A. A. Abdel Aziz, “Pool boiling heat transfer from aluminum alloy circular surface using al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> and cuo water based nano-fluids,” *Period. Polytech. Chem. Eng.*, vol. 64, no. 2, pp. 283–292, 2020, doi: 10.3311/PPch.13984.
- [17] L. Thermal Energy System Specialists, “TRNSYS.” 3 North Pinckney Street, Suite 202 Madison, WI 53703 USA, 2019.
- [18] Ç. Yunus A., “Transferencia de Calor y Masa,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 1, no. 9, p. 1699, 2013.