

# SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN CALENTADOR SOLAR MEDIANTE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Ana Karen Aranda Ramírez (1), Dr. Jorge Arturo Alfaro Ayala (2)

1 Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico:  
karenaranda\_05@hotmail.com

2 Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de  
Guanajuato | Dirección de correo electrónico: ja.alfaroayala@ugto.mx

## Resumen

En el presente trabajo se muestra un estudio numérico de un calentador solar de tubos evacuados utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD). La predicción de la temperatura en el calentador solar comercial de 18 tubos evacuados se obtuvo mediante un modelo de radiación solar. Las propiedades del fluido se describieron como polinomios en términos de la temperatura, de esta manera, se toman en cuenta las fuerzas de flotabilidad y el efecto termosifón debido a los cambios de la densidad. El estudio numérico CFD del calentador fue validado mediante datos experimentales reportados en la bibliografía. Una vez validado el estudio numérico, se obtuvo la distribución de temperatura en el calentador solar de tubos evacuados para diferentes relaciones de volumen de agua (tanque de almacenamiento/tubos evacuados) obteniendo una mayor temperatura para una relación de 1 y una menor temperatura para una relación de 5.

## Abstract

A numerical study of an evacuated solar water heater (ESWH) using computational fluid dynamics (CFD) is shown in this paper. The prediction of the temperature inside a 18<sup>th</sup> evacuated tube commercial solar water-in-glass heater was obtained by using a solar model. The fluid properties were described by mathematical polynomials in terms of the temperature, thus the buoyancy forces and the thermosiphon effect were allowed due to the change of the density according to the temperature. The CFD numerical study was validate with experimental data reported in the bibliography. Once the model is validated, different volume ratios were simulated in order to obtain the temperature distribution inside the ESWH. Obtaining higher temperature for the volume ratio of 1 than the volume ratio of 5.

### Palabras Clave

1.- Calentador solar; 2.- Radiación; 3.- Termosifón; 4.- Tubos evacuados, 5.- CFD.

## INTRODUCCIÓN

México tiene abundantes recursos energéticos renovables. No obstante, y debido principalmente a la riqueza petrolera del país que determina el uso intensivo de hidrocarburos para usos finales de la energía, las mayores porciones de estas oportunidades en recursos renovables no han sido explotadas. Calentar agua utilizando energía solar es un proceso que utiliza tecnología ya muy probada en México y el resto del mundo. Por su ubicación geográfica, México cuenta con excelentes recursos de energía solar, con un promedio de radiación de alrededor de 5 kWh/m<sup>2</sup> por día, lo que significa que en un m<sup>2</sup> y con un equipo solar de eficiencia de 50% se reciba diariamente el equivalente a la energía contenida en un metro cúbico de gas natural [1].

### Calentadores Solares

Un calentador solar es un sistema que utiliza la radiación para calentar algún fluido, como puede ser aceite, aire o más comúnmente agua. Los calentadores tienen una elevada eficiencia, dependiendo de la tecnología y materiales implementados, pueden llegar a alcanzar eficiencias hasta del 70% [2]. Para fines de este trabajo se estudiará un sistema o calentador de tubos evacuados como el que se muestra en la IMAGEN 1.

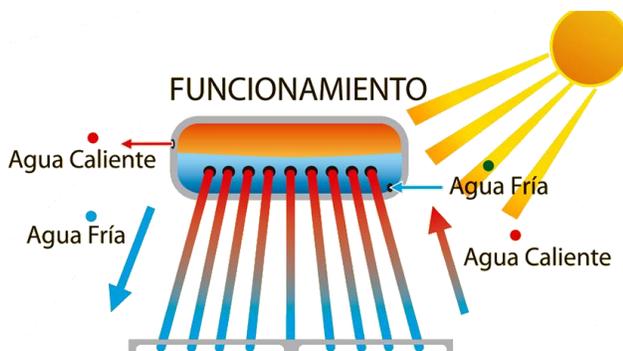


IMAGEN 1: Calentador solar de tubos evacuados

El modo de trabajo de este tipo de calentador solar consiste en lo siguiente: el agua fría entra en el sistema y circula de manera natural, cuando se calienta pierde densidad y peso, y esto causa que tienda a ascender de manera natural [3] mientras que el agua fría desciende al interior de los tubos,

a esto le llamamos el efecto termosifón (ver IMAGEN 2).

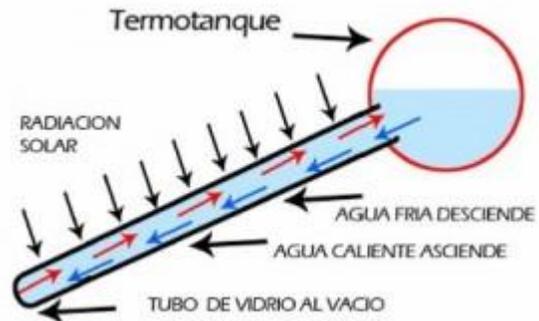


IMAGEN 2: Efecto termosifón

### Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La simulación por medio de CFD permite conocer las distribuciones de temperatura, así como los vectores de velocidad que se generan en el dominio computacional, recreando de esta manera el efecto termosifón dentro del calentador solar [4].

Dentro de los trabajos realizados a calentadores solares mediante dinámica de fluidos computacional encontramos el estudio del efecto en la eficiencia térmica debido al ángulo de inclinación [5], así como la validación de varios modelos matemáticos, diseños de diferentes geometrías, etc. A través de simulaciones.

En este trabajo se realizó la validación de la simulación numérica CFD del ESWH en base al trabajo experimental de R. Tang [6], mediante la obtención de perfiles de temperatura registrados en la literatura.

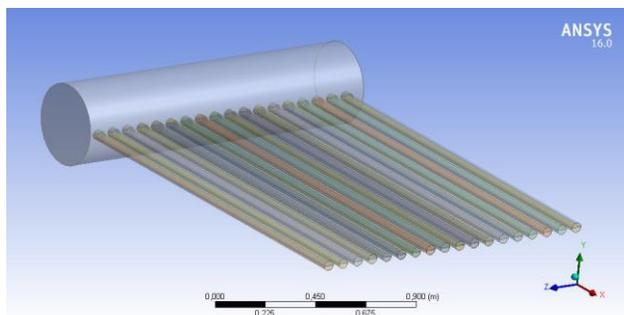
### MATERIALES Y MÉTODOS

La simulación se llevó a cabo bajo la configuración geométrica de un calentador solar comercial estudiado en la Universidad Normal de Yunnan en China (25.03°N) [6] de 18 tubos evacuados. Las dimensiones se pueden observar en la Tabla 1.

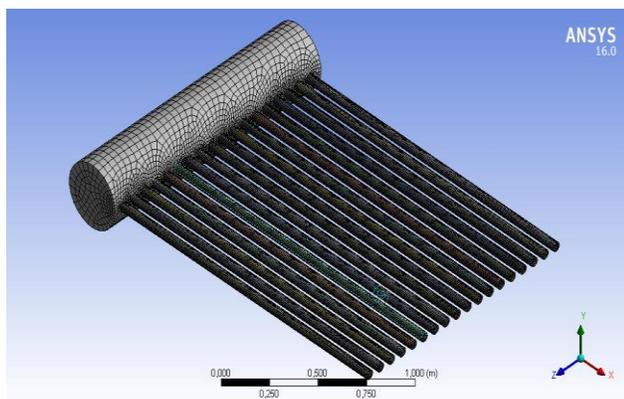
**Tabla 1: Dimensiones de la geometría**

Calentador solar de tubos evacuados	
Diámetro interno del tanque de almacenamiento	0.33m
Longitud del tanque de almacenamiento	1.5m
Diámetro interno de los tubos	0.047m
Longitud de los tubos	1.8 m
Espesor de los tubos	0.0016m
Ángulo de inclinación	46°
Distancia entre tubos	0.08m
Relación de volumen de agua (tanque/tubos)	2.4

El experimento se realizó en un día claro el día 29 de abril a partir de las 7 horas. La geometría y el enmallado que se muestran en las IMÁGENES 3 y 4 respectivamente, ambas fueron construidas con el paquete Desing Modeler y Meshing (ANSYS Inc.).



**IMAGEN 3: Geometría calentador solar**

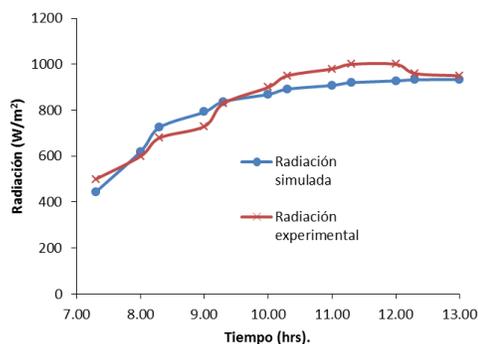


**IMAGEN 4: Enmallado no estructurado, principalmente tetraédrico con 176, 562 elementos**

Se trabajó con un modelo de radiación solar, donde se consideraron las variaciones de la

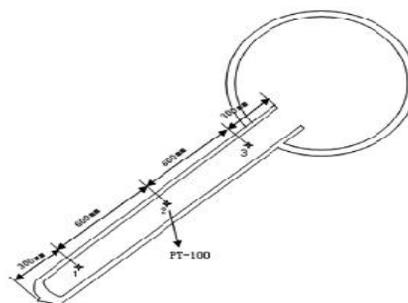
densidad, viscosidad, el calor específico y la conductividad con la temperatura utilizando polinomios. Las condiciones de frontera utilizadas en los tubos fueron 1.- convectiva con un coeficiente de transferencia de calor de  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$  (el cual se obtuvo mediante un proceso iterativo) y una temperatura del ambiente de  $290 \text{ K}$ . 2.- Radiación para la parte superior de los tubos con un valor de absorptividad de  $0.97$  y transmitividad de  $0.91$ .

Para validar la simulación numérica CFD, se consideraron 6 horas que corresponden de 7:00 a.m. a 1:00 p.m. [6], la curva comparativa de radiación del día 29 de abril se muestra en la IMAGEN 5. Se puede observar una gran concordancia entre ambas curvas de radiación para la fecha y ubicación geográfica mencionada con anterioridad.



**IMAGEN 5: Radiación sobre el calentador solar experimental y simulado.**

Al igual que en la parte experimental [5], se monitorearon 3 puntos a lo largo de un tubo evacuado y dentro del tanque de almacenamiento como se muestra en la IMAGEN 6.



**IMAGEN 6: Puntos de monitoreo; tt3: termopar 3 en tubo, tt2: termopar 2 en tubo, tt1: termopar 1 en tubo. (Posiciones de manera descendente por el tubo).**

Partiendo de este modelo se simuló ahora con las condiciones ambientales típicas del estado de Guanajuato para 3 diferentes relaciones de volumen de agua entre el tanque de almacenamiento y los tubos, manteniendo fijo el volumen en los tubos. Los datos para dicho estudio se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Relaciones de volumen del agua

Calentador solar en condiciones ambientales de Guanajuato		Relación de vol.
Vol. Tanque	Vol. Tubos	
130 L	54 L	2.4
270 L	54 L	
54 L	54 L	5
54 L	54 L	
54 L	54 L	1
54 L	54 L	

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la simulación numérica CFD mediante el modelo de radiación y los resultados obtenidos experimentalmente en el trabajo de R. Tang et al. [6] se muestran en la IMAGEN 7, donde podemos observar bastante aproximación entre los perfiles de temperatura obtenidos mediante la simulación y los valores obtenidos de manera experimental (tt3.- termopar 3 en tubo, tt2.- termopar 2 en tubo y tt1.- termopar 1 en tubo). El incremento en la temperatura comienza a partir de las 7:30 a.m. con una radiación de  $444 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de  $298 \text{ K}$ . El aumento total de temperatura en un tiempo de 6 horas fue de  $27 \text{ K}$ . Alcanzando experimentalmente la mayor temperatura de  $326 \text{ K}$  a un valor de radiación de  $950 \text{ W/m}^2$  y para la simulación numérica CFD de  $327 \text{ K}$ . La diferencia entre los resultados obtenidos de manera experimental y los resultados por simulación es de  $\pm 2.3 \text{ K}$ .

Como parte del trabajo de simulación, se optó por crear un plano el cual nos facilitara observar de una manera más clara la distribución de velocidad por medio de vectores apreciando así el efecto termosifón esperado dentro calentador solar, ver IMAGEN 8. Podemos observar como la velocidad

aumenta en la zona adyacente a la pared de calentamiento, la velocidad aumenta y cambia de dirección con respecto al fluido que se encuentra en el centro. A su vez, es más visible en esta imagen el efecto termosifón, donde se observa el descenso del agua fría desde el tanque hacia dentro del tubo, posteriormente asciende el agua caliente de regreso al tanque.

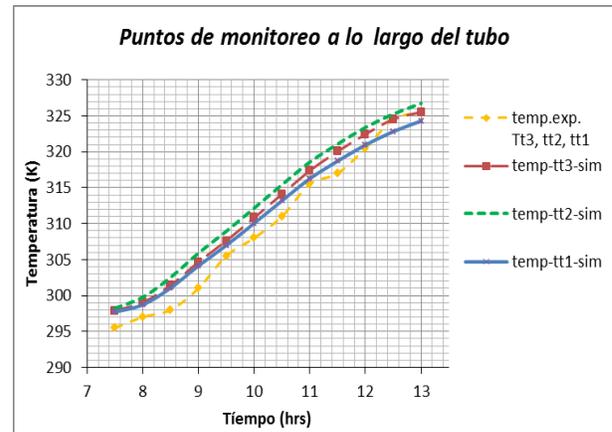


IMAGEN 7: perfiles de temperatura obtenidos de manera experimental y por simulación

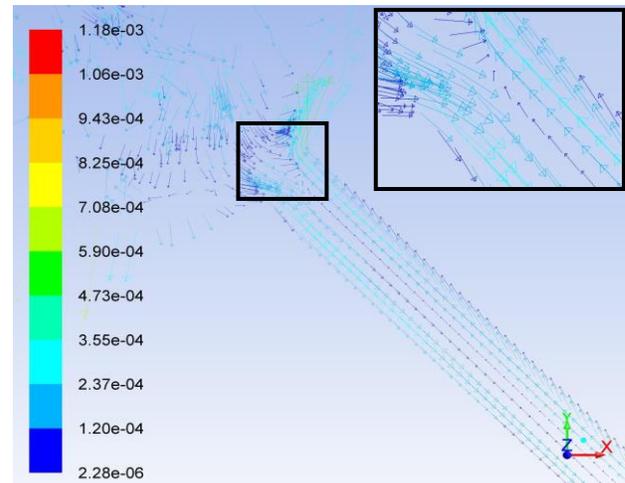


IMAGEN 8: Efecto termosifón

Después de validar dichos resultados se procedió a variar la relación de volumen del agua entre el tanque de almacenamiento y tubos de los cuales se obtuvieron los perfiles de temperatura mostrados en la IMAGEN 9 para una relación de 5, y 1; las cuales fueron comparadas con los perfiles obtenidos con una relación de volumen de 2.4 siendo esta la relación del calentador solar

comercial estudiado anteriormente, considerando ahora la radiación en el estado de Guanajuato en un día claro del mes mismo día del mes de abril (Noria Alta).

Se puede observar claramente en el gráfico que para una relación mayor de volumen se tiene un descenso en la temperatura por el contrario si se tiene una relación menor de volumen la temperatura tiende a elevar su valor, esto lo acreditamos al aumento en la cantidad de agua almacenada en el tanque. Por el caso contrario si la relación de volumen de agua (tanque/tubos) es menor hay menor cantidad de volumen por lo tanto la transferencia de calor es más rápida y mayor.

Se debe tomar en cuenta que solo se modificó la geometría del tanque haciéndolo más grande o más pequeño para incrementar o disminuir su volumen de almacenamiento de agua caliente según sea el caso, manteniendo la misma cantidad y dimensiones de los tubos lo cual deja espacio para nuevos estudios donde se modifique el número de tubos, así como la dimensión de los mismos.

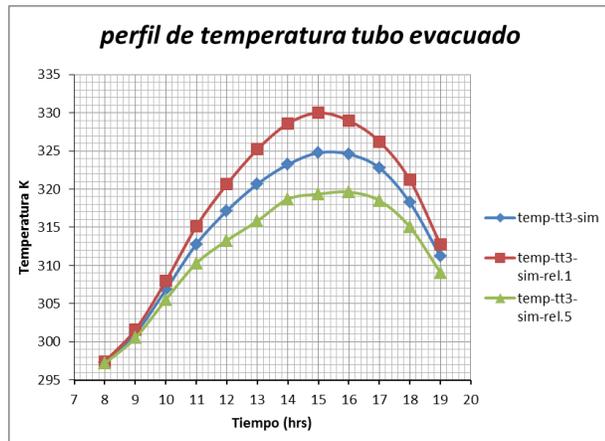


IMAGEN 9: Perfiles de temperatura para diferentes relaciones de volumen y un tiempo de simulación 12hrs (de 7:00am a 7:00pm)

## CONCLUSIONES

Del presente trabajo se puede concluir que el modelo de radiación solar utilizado es una herramienta factible para la simulación numérica CFD en calentadores solares ya que nos aproxima mucho al comportamiento de un sistema

experimental comercial como se mostró mediante la simulación realizada.

A su vez el análisis numérico mediante dinámica computacional nos permitió estudiar el comportamiento térmico e hidráulico de un mismo calentador solar con diferentes relaciones de volumen y para el estado de Guanajuato, mostrando el comportamiento de una mayor temperatura para una relación de volumen de 1 que de 5 siempre y cuando se mantenga el mismo volumen y geometría en los tubos.

## AGRADECIMIENTOS

Mis más grandes agradecimientos a la Universidad de Guanajuato, por darnos la oportunidad de desarrollarnos en proyectos como estos los cuales nos permiten aprender más de temas de nuestro interés y formar nuevas experiencias para nuestra vida profesional. Al Dr. Jorge Arturo Alfaro Ayala por brindarme su apoyo, conocimiento y asesoría durante mi estancia en el verano de investigación, al alumno de maestría el Ing. Oscar Alejandro López Núñez por su apoyo en este trabajo y así como también a mi familia por estar a mi lado siempre.

## REFERENCIAS

- [1] Conae, ANES, GTZ (2007). Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México. (Procalsol), 1-13. Recuperado de <http://www.conae.gob.mx> (Julio 2016).
- [2] A. Montoya, E. Palo, W. Cabana, L. Soria. (2011). Estudio de evaluación de eficiencia de un calentador solar de tubos al vacío con tanque acumulador, de la empresa D'SOL. 1-14
- [3] G.L. Morrison., I. Budihardjo, M. Behnia. (2004). Measurement and simulation of flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater. Solar Energy 78 (2005) 257-267
- [4] O. Farias, J. Camacho. (2011). Análisis de la transferencia de calor en un calentador solar utilizando CFD. Memorias de la VIII Reunión internacional de ingeniería mecánica, 1-10.
- [5] J. Bracamonte, J. Parada, J. Dimas, M. Baritto. (2015). Effect of the collector tilt angle on thermal efficiency and stratification of passive water in glass evacuated tube solar water heater. Applied Energy, 155 (2015) 648- 659.
- [6] R. Tang, Y. Yang, W. Gao (2011). Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles. Solar Energy, 85(2011) 1381-1389.