

## Estudio térmico-fluido dinámico de un prototipo nivel laboratorio de un calentador solar que reutiliza botellas de plástico

Thermal-fluid dynamic study of a laboratory level prototype of a solar water heater that reuses plastic bottles

Jorge Arturo Alfaro Ayala<sup>1\*</sup>, Jesús Alberto Crespo Quintanilla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, CP 36050, México.

Correo electrónico: ja.alfaroayala@ugto.mx

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Este trabajo muestra una investigación del desempeño de un calentador solar que reutiliza botellas de plástico (material reciclado). El estudio se realizó mediante simulaciones numéricas con la dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) y pruebas experimentales de un prototipo nivel laboratorio que reutiliza botellas de plástico de tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés). El calentamiento de agua se realiza a través de la captación de la radiación solar sobre la superficie de las botellas de PET. El prototipo nivel laboratorio fue fabricado a base de filamento de plástico llamado ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) por medio de impresión 3D. Los resultados muestran que el calentador solar que reutiliza botellas de PET logra alcanzar una temperatura máxima de 315 K (42 °C). La validación del modelo numérico CFD se realizó con los datos adquiridos en los experimentos, resultando errores menores al 1.69%.

**Palabras clave:** Calentador solar; prototipo; PET; impresión 3D; simulación CFD.

### Abstract

This work presents an investigation of the performance of a solar water heater made of plastic bottles (recycled material). The study was carried out through numerical simulations with the computational fluid dynamics (CFD) and tests at a laboratory level prototype that reuses plastic bottles of polyethylene terephthalate (PET). Water is heated through the reception of the solar radiation on the surface of the PET bottle. The prototype was made of plastic filament called polylactic acid (PLA) using a 3D printing. The results showed that the solar water heater that reuses PET bottles reaches a maximum temperature of 315 K (42 °C). The validation of the CFD numerical model was made with the experimental results, obtaining relative errors less than 1.69%. This work presents an investigation of the performance of a solar water heater made of plastic bottles (recycled material). The study was carried out through numerical simulations with the computational fluid dynamics (CFD) and tests at a laboratory level prototype that reuses plastic bottles of polyethylene terephthalate (PET). Water is heated through the reception of the solar radiation on the surface of the PET bottle. The prototype was made of plastic filament called polylactic acid (PLA) using a 3D printing. The results showed that the solar water heater that reuses PET bottles reaches a maximum temperature of 315 K (42 °C). The validation of the CFD numerical model was made with the experimental results, obtaining relative errors less than 1.69%.

**Keywords:** Solar heater; prototype; PET; 3D printing; CFD simulation.

Recibido: 17 de noviembre de 2017

Aceptado: 8 de febrero de 2019

Publicado: 2 de octubre de 2019

**Como citar:** Alfaro-Ayala, J. A., & Crespo-Quintanilla, J. A. (2019). Estudio térmico-fluido dinámico de un prototipo nivel laboratorio de un calentador solar que reutiliza botellas de plástico. *Acta Universitaria* 29, e2147. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2147>

## Introducción

En este trabajo se integran dos tipos de tecnologías: *i*) calentadores solares de agua e *ii*) impresión 3D para investigar el desempeño de un calentador solar de agua que reutiliza botellas de tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés). A continuación, se describe cada una de ellas.

Por un lado, un calentador solar de agua (CSA) es un equipo térmico utilizado principalmente para proveer de agua caliente a casas y habitaciones, consta principalmente de una superficie que capta la radiación solar y un tanque donde se almacena el agua; el funcionamiento de este equipo es por medio del efecto termosifón.

En la figura 1 se muestra un esquema con los diferentes tipos de equipos solares y su clasificación (Careaga-Muñoz, 2015). Estos CSA se pueden clasificar de acuerdo con su nivel de temperatura, baja (menores a 100 °C) o alta (mayores a 300 °C). Generalmente los calentadores solares de baja temperatura son utilizados para abastecer agua caliente en los hogares y los de alta temperatura para aplicaciones industriales. El calentador solar de PET que se estudia en este trabajo se encuentra dentro de la clasificación de los CSA de baja temperatura.

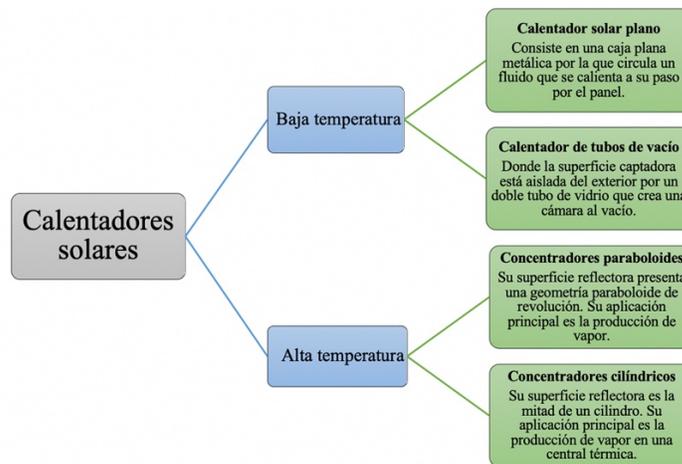


Figura 1. Clasificación de los calentadores solares  
Fuente: Careaga-Muñoz (2015).

Por otra parte, la impresión 3D es una herramienta que permite crear objetos tridimensionales de casi cualquier forma a partir de modelos diseñados por computadora, esto permite que sea relativamente sencillo fabricar piezas propias y generar prototipos a pequeña escala o nivel laboratorio. El procedimiento de impresión se asemeja a las impresiones de tinta; una vez generada la geometría, es necesario tener archivos con formatos estándar de extensión *.stl* para guiar a la impresora para que construya el objeto y así obtener el prototipo, de la misma forma que usamos archivos en formato *.doc* del software *Microsoft Word®* para imprimir en papel. El formato *.stl* representa el objeto geométrico digitalmente y el software libre utilizado para la impresión 3D se conoce como *CURA®*. Este software divide el modelo geométrico en una serie de capas para indicar las tres dimensiones (*x*, *y* y *z*) y la forma de impresión; posteriormente, la impresora 3D es guiada para crear el objeto a través del depósito de material, de tal manera que se vayan sumando una capa sobre la otra (Vazhnov, 2013).

La idea de investigar un calentador solar que reutiliza botellas de PET surgió debido a un problema ambiental que existe en México y en todo el mundo. De acuerdo con la Procuraduría Federal del Consumidor (Profeco), en México cada habitante desecha 6.5 kg de PET al año, lo que se traduce en alrededor de 195 botellas y de todo este PET de desecho (basura) solo el 21.5% se rescata para reciclarse el 0.5% está disperso en el ambiente, mientras que el 78% se mantiene en los rellenos sanitarios. Interpretando estos porcentajes, 8 de cada 10 botellas utilizadas por cada habitante en México no se reutilizan o reciclan.

Se realizó una revisión científica acerca de los trabajos de investigación y patentes existentes de calentadores solares tanto comerciales como con materiales reciclados. Los trabajos más importantes encontrados se describen a continuación.

Morillón (2011) investigó el ahorro económico y de energía que se obtendría al usar calentadores solares en los hogares de México. En el estudio se presenta un panorama de la energía solar y de calentadores solares en México. Se determinaron los beneficios energéticos, económicos y ambientales por el uso de CSA. Uno de los resultados más relevantes es el ahorro potencial de 4 807 285.24 KW/h de energía y una mitigación de 3342 t de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, Sedano, Vallín, Luna, Sedano & Morán (2011) trabajaron en el diseño y evaluación de un colector solar plano de tubos de cobre, considerando condiciones tales como la inclinación y dirección respecto al sol. Las coordenadas donde se realizaron las pruebas experimentales fueron 19° 45' N, 104° 21' O, en Autlán de Navarro, Jalisco. Una manera de elevar la eficiencia del calentador fue utilizar una válvula de compuerta activada por una celda electrónica de fotocontrol, esto permite que el agua fluya dentro del colector solo durante la presencia de radiación solar. El uso de esta válvula permite limitar pérdidas de calor en el termotanque por las noches, manteniendo por mayor tiempo el agua caliente dentro de este. Del Angel & Sarmiento (2004) presentan una metodología analítica para el cálculo de un sistema de calentamiento solar de agua para uso doméstico (albergue de estudiantes del estado de Veracruz). Aguilar-Viveros (2011) presentó el diseño e instalación de un calentador solar para un hotel en la ciudad de Veracruz. Se diseñaron todos los equipos que conforman el calentador solar y se redujeron los costos por consumo de energía convencional.

Contreras-Trejo (2012) diseñó e instaló un CSA elaborado a base de material reciclado para una casa en Coyopolan, Veracruz. El autor concluyó que la radiación solar puede ser altamente aprovechada por el CSA de material reciclado. Careaga-Muñoz (2015) desarrolló un prototipo de un CSA hecho con PET para su uso en una casa-habitación en la ciudad de Xalapa, Veracruz. Los resultados mostraron que se pueden alcanzar temperaturas máximas de 45 °C. López, Mantilla & Poveda (2012) realizaron un estudio que se enfocó en el diseño y construcción de varios tipos de calentadores solares con materiales reciclados en la ciudad de Bogotá, Colombia. El mejor diseño de calentador solar reutilizó botellas de PET, las cuales fueron manipuladas, cortadas, unidas en diferentes niveles y conectadas en un arreglo en serie mediante el uso de tubería de cloruro de polivinilo (PVC). Además, se encontró que el mejor ángulo de inclinación solar es 23.6° debido a que es donde se presentaron los máximos rendimientos térmicos. Luján, Isaza, Duque & Chica (2013) elaboraron un prototipo de calentador solar automatizado, el cual utiliza una serie de tubos construidos con botellas PET reutilizadas. El control implementado en el CSA permitió mantener la temperatura del agua dentro del tanque. Los niveles más altos de temperatura fueron de 50 °C. Reyes & Cornejo (2014) presentaron la construcción de un CSA con material reciclado. La construcción del CSA la realizaron con 60 botellas de plástico de 2 L unidas mediante tubos de cloruro de polivinilo clorado (CPVC). Las botellas utilizadas fueron pintadas de negro para favorecer la captación de la radiación solar. El trabajo muestra el procedimiento para la construcción del calentador solar que reutiliza botellas de PET. Finalmente, Miranda-Gassull (2011) diseñó un CSA que reutiliza PET para la población más desfavorecida económicamente. El estudio muestra manuales de elaboración y uso. Durante las pruebas del CSA se obtuvieron temperaturas máximas de 42 °C, además de un costo de construcción final de \$102.30 pesos.

En la figura 2 se muestran los diseños que adoptaron algunos autores antes mencionados (Contreras-Trejo, 2012; Luján *et al.*, 2013; Miranda-Gassull, 2011; Reyes & Cornejo, 2014 ).

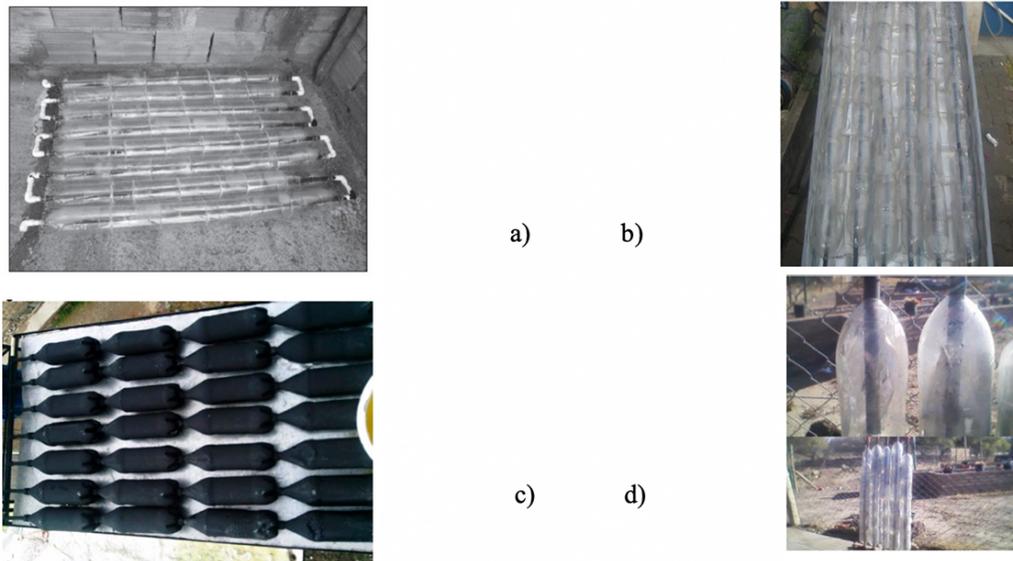


Figura 2. Diseños de calentadores elaborados

Fuente: a) Contreras-Trejo (2012), b) Lujan *et al.* (2013), c) Reyes & Cornejo (2014) y d) Miranda-Gassull (2011).

A continuación se describe la revisión de patentes de calentadores solares que utilizan materiales reciclados. Oshima (2008) patentó en China un CSA que diseñó y construyó, el cual puede ser hecho con PET o latas de aluminio, las cuales se conectan en serie y se ubican dentro de una caja rectangular (caja similar a la que utilizan los calentadores solares comerciales de placa plana). Una característica de este diseño es que se implementaron llaves de paso en la parte inferior del calentador para poder extraer el agua por cualquiera de los lados del equipo. Además, Harukara (2004) patentó en China un CSA que está conformado por un tubo donde pasa el agua caliente y un conjunto de latas de aluminio vacías con agujeros en la parte inferior y superior conectadas en serie. Naemura (2005) patentó un CSA que reutiliza botellas de PET. Este calentador está formado por un tubo de alimentación de agua en espiral, y en cada vuelta las botellas de agua están conectadas en serie. Cada una de las botellas se encuentra unida al tubo mediante conexiones de tornillería. Este CSA de material reciclado es capaz de suministrar agua caliente a una temperatura de confort para la ducha.

En las patentes mencionadas en esta sección, todos los CSA están hechos con configuraciones complicadas y adecuaciones del material reciclado previo a su construcción; es decir, se realiza una manufactura previa para construir el calentador solar.

En este trabajo, una de las principales ventajas es el sencillo ensamblaje de componentes entre botellas y tanque de almacenamiento, esto permite que el mantenimiento se realice de una manera más rápida, simple y sin tener que desarmar todo el calentador, ya que las botellas están en un arreglo en paralelo unidas al tanque de almacenamiento de agua caliente mediante la rosca de las propias botellas.

Por otra parte, se realizó una investigación científica de la posible liberación de sustancias químicas del PET por temperatura, ocasionada por la exposición a la radiación solar. Lo mencionado con anterioridad tiene como finalidad descubrir si se presenta algún efecto en la salud humana. Fan *et al.* (2014)

realizó un estudio del efecto de la temperatura para 16 marcas diferentes de botellas que almacenan agua potable en China. En este trabajo se observó la liberación de antimonio (Sb) y bisfenol A (BPA). El Sb en grandes cantidades y la exposición a este durante un largo periodo de tiempo puede provocar irritación de los ojos, piel y pulmones. Si la exposición continúa, se pudieran producir efectos más graves, tales como enfermedades pulmonares, problemas de corazón, diarrea, vómitos severos y úlceras estomacales. No se sabe exactamente si el Sb puede provocar cáncer o fallos reproductores. Por otra parte, el BPA es un compuesto disruptor endócrino (CDE) para el cual la evaluación de riesgo ha resultado ser polémica. Se ha llegado a conclusiones con respecto al BPA sobre posibles riesgos para la salud que varían entre "no hay ningún riesgo para ninguna parte de la población" a "existe un riesgo para toda la población". En varias investigaciones (Bach, Dauchy, Chagnon & Etienne, 2012; Berryman, Houde, DeBlois & O'Shea, 2004) se analizaron los componentes químicos tóxicos que contiene el agua almacenada en botellas de PET. En estos trabajos mencionan varios componentes, entre los que resaltan que el BPA es un químico perturbador endócrino que puede causar efectos nocivos en animales y, probablemente, en humanos.

La *European Food Safety Authority* (EFSA) 2008 estableció que el consumo total diario de BPA es de 0.05 mg/kg/peso corporal y estableció límites específicos de migración de 0.6 mg/kg. Los límites de BPA encontrados en botellas de agua varían mucho; sin embargo, las concentraciones caen en el rango de unos pocos ng/L. Por lo tanto, los valores calculados para un consumo de 2 L de agua al día para un adulto de 60 kg no excede la ingesta diaria. Amiridou & Voutsas (2011), en su estudio, encontraron bajas concentraciones de BPA, alrededor de 4 ng/L, en botellas de aguas que fueron expuestas a la luz solar. Shao *et al.* (2005) estudiaron el efecto de la temperatura en distintas botellas de PET de varios países; no detectaron liberación de BPA en el agua de las botellas de PET.

En otras investigaciones (Bach *et al.*, 2012; 2014), se realizaron estudios sobre los efectos de la exposición de las botellas de PET a la radiación solar y la migración química al agua dentro de las botellas de PET. La exposición de las botellas a la radiación solar fue durante 2 días, 6 días y 10 días. Los formaldehídos, acetaldehídos y Sb incrementaron su migración química con la exposición a la radiación solar en agua ultra pura. Sin embargo, en agua carbonatada, el dióxido de carbono promovió la migración y solo el formaldehído incrementó ligeramente con la exposición a la radiación solar. Ellos no detectaron aldehídos en agua no carbonatada; por lo tanto, concluyeron que la exposición solar no tiene efecto sobre estas sustancias. Llegaron a la conclusión de que la migración de aldehídos y de Sb dentro del agua ultra pura incrementó con la exposición a la radiación solar, sobre todo después de 10 días de exposición; sin embargo, no se excedieron los límites establecidos por la EFSA 2008.

En este trabajo, el prototipo de CSA que reutiliza botellas de PET es un diseño práctico y diferente a los mostrados en esta sección. Las botellas se instalan en un arreglo en paralelo y aprovecha la rosca de la botella de PET para ser conectada al tanque de almacenamiento de agua caliente y no requiere alguna manufactura previa para la construcción del CSA, lo que lo hace una mejor propuesta para el mantenimiento y eliminación de fugas de agua. El trabajo se enfoca en el estudio térmico-fluido dinámico de un prototipo nivel laboratorio mediante simulaciones numéricas Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). El desempeño del CSA es obtenido mediante un modelo de CFD y este es validado con los datos experimentales del prototipo nivel laboratorio construido mediante impresión 3D.

## **Materiales y Métodos**

Las dimensiones del prototipo nivel laboratorio del CSA con botellas de PET se presentan en la figura 3. El prototipo de CSA de PET tiene una capacidad volumétrica de 2.5 L. En este CSA, el área lateral de las botellas de PET permitió el calentamiento de agua a través de la captación de la radiación solar. El tanque se

construyó con filamento ácido poliláctico (PLA) con la ayuda de la impresión 3D, es aquí donde se almacena el agua que se va calentando dentro de las botellas (a través del efecto termosifón). El tanque se encuentra aislado para evitar, en la medida de lo posible, pérdidas de calor.

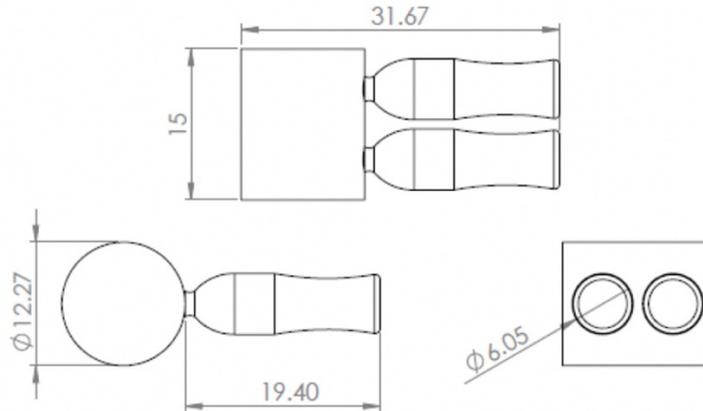


Figura 3. Dimensiones en centímetros del prototipo de CSA que reutiliza botellas de PET.  
Fuente: Elaboración propia.

La construcción del prototipo del CSA se realizó mediante el uso de una impresora 3D modelo MM1 de la marca MakerMex®. El tiempo total de impresión fue de aproximadamente 46 h. La impresión del prototipo del CSA se dividió en varias partes debido a la restricción de volumen de impresión con el que cuenta la impresora de 20cm x 20cm x 20cm (ancho, alto y profundo, respectivamente). La impresora 3D se utilizó debido a su rapidez, ya que en tres días se puede generar un prototipo funcional listo para realizar pruebas, además de la nula porosidad y gran resistencia del material. El ensamble final se muestra en la figura 4.



Figura 4. Prototipo nivel laboratorio del calentador solar realizado con impresión 3D.  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se construyó y ensambló el prototipo del CSA, el paso siguiente fue realizar pruebas exponiéndolo a la radiación solar. Las pruebas fueron realizadas con apoyo de equipos de adquisición de datos y medición de variables, como radiación solar y temperatura. Para la medición de la radiación solar que incide sobre la superficie de las botellas del calentador solar, se utilizó un piranómetro modelo SP Lite2 marca Kipp&Zonen®. La medición de las temperaturas del agua dentro del calentador solar, así como la

temperatura del aire en el ambiente, se realizaron con una tarjeta modelo NI 9213 con termopares tipo K, esta tarjeta es montada en un sistema NI cRIO-9030 y este es conectado a la computadora para la obtención de los datos.

Una vez teniendo los equipos anteriormente mencionados calibrados y funcionales, se realizaron las pruebas del CSA. Las pruebas del calentador se iniciaron a partir de las 8 a.m.; previo a esta hora, se realizaron actividades tales como llenar el calentador de agua, colocarlo en el ángulo y orientación correcta, colocar los termopares dentro del tanque para la medición del agua y afuera del CSA para la medición de la temperatura del aire en el ambiente y, por último, colocar el piranómetro en la misma posición que las botellas de PET para que midiera la radiación correspondiente. En la figura 5 se muestra una imagen del prototipo de CSA de PET en el ángulo y orientación indicado. El ángulo de inclinación de las botellas en paralelo nos permitirá aprovechar de mejor manera la radiación solar y, por otra parte, un mejor desempeño del efecto termosifón.

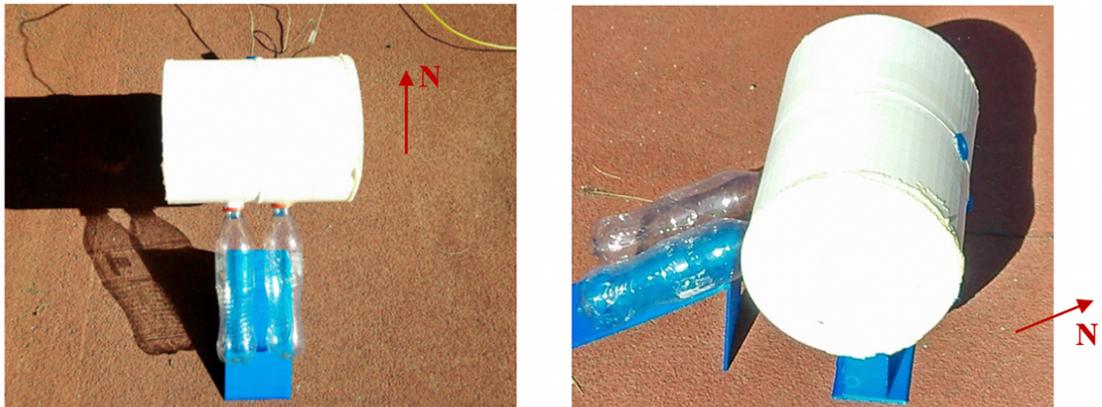


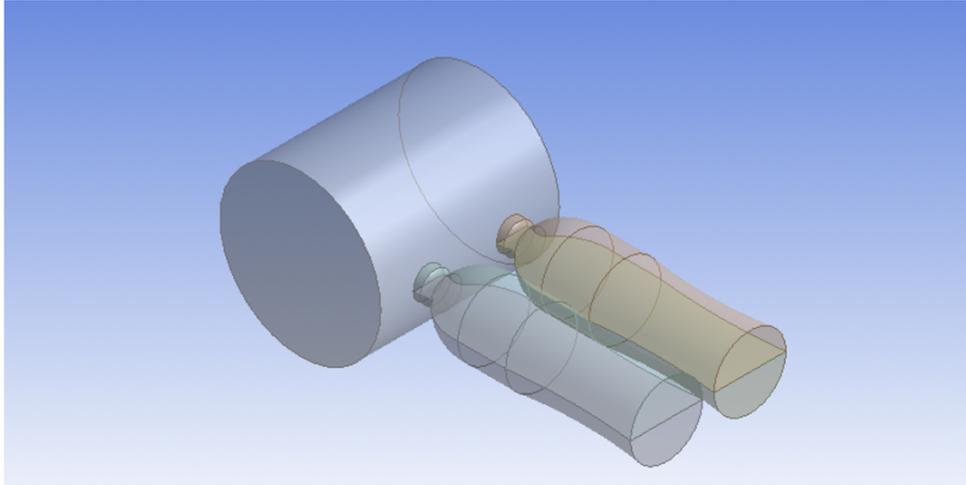
Figura 5. Ubicación norte-sur y ángulo de inclinación de las botellas del CSA de 45°.  
Fuente: Elaboración propia.

## Simulación numérica CFD

Se utilizó el método implícito para resolver los modelos matemáticos de las ecuaciones de continuidad, Navier-Stokes y energía. Estas ecuaciones diferenciales parciales representan los fenómenos de flujo de fluido y temperatura dentro del CSA. A su vez, también se hizo uso del modelo de carga solar (modelo de radiación) para determinar la radiación sobre las botellas de PET, de acuerdo con su localización geográfica, mes, día y hora. El análisis por medio de simulación numérica CFD requiere de un pre-proceso, proceso y post-proceso. Esto se refiere a la realización de la geometría, mallado, establecimiento de las condiciones de frontera, modelos matemáticos y configuración de parámetros particulares en la simulación del prototipo del CSA y, finalmente, la solución, es decir, la obtención de los resultados a través de gráficas, contornos o vectores. A continuación, se presenta el procedimiento que se realizó para llevar a cabo las simulaciones CFD del CSA que reutiliza botellas de PET.

## Geometría

En la figura 6 se muestra la geometría del CSA, la cual fue modelada en *Design Modeler*® de ANSYS®. Debido a la complejidad de la geometría de la botella, se cuidó que el volumen de esta fuera el de una botella real. La geometría del CSA contiene dos botellas de PET de 355 ml y la relación de volumen en el tanque al volumen de las botellas es de 2.5. Los parámetros y dimensiones utilizados en la geometría se presentan en la tabla 1.



**Figura 6.** Geometría del CSA que reutiliza botellas de PET en Design Modeler®.  
Fuente: Elaboración propia.

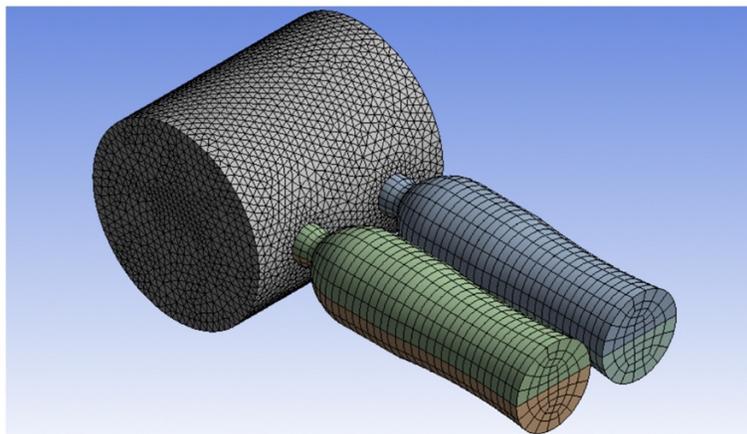
**Tabla 1.** Parámetros y dimensiones de la geometría.

Parámetros	Dimensión
Longitud de la botella	21 cm
Diámetro promedio de la botella	6 cm
Diámetro del tanque	12.5 cm
Longitud del tanque	15 cm
Número de botellas	2

Fuente: Elaboración propia

## Mallado

El número de elementos utilizados en las simulaciones numéricas CFD tuvo valores que van desde las 50 966 celdas hasta las 99 508 celdas. Se utilizó un mallado con una combinación de celdas tetraédricas y hexaédricas. Este rango de celdas utilizado permitió obtener los mejores resultados sin un requerimiento mayor de equipo de cómputo (independencia de malla). En la figura 7 se presenta la malla de la geometría estudiada.

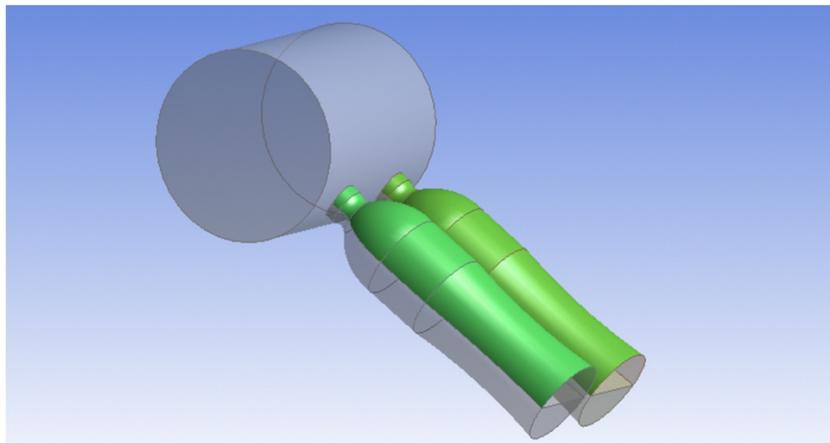


**Figura 7.** Mallado de la geometría en *Meshing*®.  
Fuente: Elaboración propia.

## Simulación

Se utilizó el software comercial ANSYS-Fluent® versión 16 como herramienta para la solución numérica de las ecuaciones gobernantes; el estudio se realizó considerando un sistema cerrado o masa de control en régimen laminar y estado transitorio. Los modelos que permitieron obtener la solución de los fenómenos que ocurren en un calentador solar son la ecuación de continuidad Navier- Stokes, la energía y el modelo de carga solar (ANSYS®, 2015). Además de estas ecuaciones, fueron consideradas las variaciones de las propiedades del agua con la temperatura.

Tres condiciones de frontera tipo pared fueron consideradas para definir el dominio computacional: La primera es una pared que considera aislada la superficie del tanque de almacenamiento de agua del CSA, la segunda es una pared que considera la superficie superior de las dos botellas con una exposición directa a la radiación solar, y la tercera considera una pared para la parte inferior de las botellas con exposición indirecta a la radiación solar. En la figura 8 se muestran las superficies donde se aplican las condiciones de frontera tipo pared que fueron establecidas en el modelo numérico.



**Figura 8.** Condiciones de frontera en el calentador.  
Fuente: Elaboración propia.

Para las simulaciones numéricas se definió la misma ubicación geográfica de donde se realizaron los experimentos del CSA propuesto. La ciudad fue Guanajuato, Gto., la cual es representada por una latitud de  $21.02^\circ$  y una longitud de  $-101.25^\circ$ . También, fueron considerados los meses en los que se realizaron las pruebas, estos fueron los meses de marzo y mayo, la hora de inicio de las pruebas fue a partir de las 8:00 h, la orientación de la malla fue de norte y sur, y la inclinación de las botellas fue de  $45^\circ$  con respecto a la horizontal tal como en los experimentos. Las simulaciones numéricas CFD se realizaron considerando un paso de tiempo de 600 seg (10 min).

## Resultados

En la figura 9 se muestra el movimiento del agua dentro de las botellas y del tanque de almacenamiento de agua debido a los cambios de densidad, el cual se conoce como efecto termosifón. El agua caliente por la radiación solar hace que exista una diferencia de densidades en el fluido que se ubica en la parte superior

de las botellas y se mueve hacia el tanque, mientras que el agua fría, como es más pesada, se mueve hacia la parte inferior de las botellas. Para lograr este efecto termosifón dentro de las simulaciones numéricas CFD, se hizo uso de polinomios para permitir la variación de las propiedades del agua con la temperatura, entre estas, la densidad.

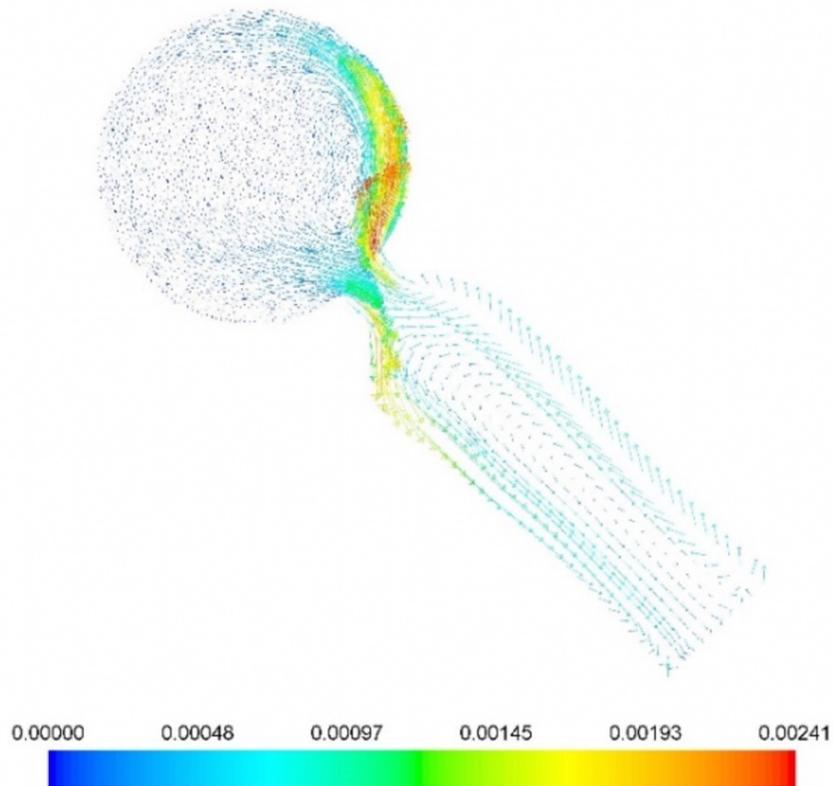


Figura 9. Vectores de velocidad dentro del calentador solar (m/s).  
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la validación de los resultados numéricos con los datos experimentales del comportamiento transitorio de la temperatura del agua dentro del CSA de PET durante la exposición a la radiación solar. Los resultados muestran el incremento de la temperatura del agua en el calentador solar de PET durante un día de cielo despejado en el mes de marzo y mayo.

La figura 10 muestra los resultados de la prueba realizada el día 22 de marzo. La prueba inicia a las 8:00 h, con una temperatura de 294 K (21 °C), y termina a las 16:00 h, con una temperatura 315 K (42 °C); un incremento de temperatura de 21 K en ocho horas de exposición solar. La radiación solar máxima registrada fue de 1100W/m<sup>2</sup> a las 15:00 h.



Figura 10. Resultados numéricos calentamiento 22 de marzo.  
Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2 muestra el porcentaje de error relativo en cada hora para la temperatura del agua dentro del CSA. Se observa que el porcentaje de error es ligeramente mayor a partir de las 13:00 h. Para esta simulación numérica CFD, el porcentaje de error es menor a 0.99%.

**Tabla 2.** Porcentaje de error calentamiento 22 de marzo.

Hora	Tambiente [K]	Tcalentador [K]	Tsimulación [K]	%Error
08:00	293.21	292.96	292.96	0.00
09:00	295.12	293.44	293.37	0.02
10:00	297.70	296.80	295.91	0.30
11:00	300.09	301.36	300.19	0.39
12:00	303.98	305.25	305.28	0.01
13:00	302.69	308.78	310.40	0.53
14:00	300.86	311.52	314.61	0.99
15:00	300.65	314.20	317.17	0.95
16:00	300.17	315.05	317.70	0.84

Fuente: Elaboración propia.

La figura 11 muestra los resultados de la prueba realizada el día 4 de mayo. La prueba inicia a las 8:00 h, con una temperatura de 294.5 K (21.5 °C), y termina a las 16:00 h, con una temperatura 314.5 K (41.5 °C), con un incremento de temperatura de 20 K en ocho horas de exposición solar. La radiación solar máxima registrada fue de 1000W/m<sup>2</sup> a las 15:00 h.



Figura 11. Resultados numéricos calentamiento 4 de mayo.  
Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 muestra el porcentaje de error relativo para la temperatura del agua dentro del CSA. Se observa que el porcentaje de error relativo es ligeramente mayor a partir de las 8:00 h, y se reduce a partir de las 13:00 h. Para esta simulación numérica CFD, el porcentaje de error es menor a 1.69%.

Tabla 3. Porcentaje de error calentamiento 4 de mayo.

Hora	Tambiente [K]	Tcalentador [K]	Tsimulación [K]	%Error
08:00	293.21	293.69	293.69	0
09:00	296.21	297.40	293.95	1.16
10:00	297.56	300.79	295.90	1.63
11:00	298.57	304.84	299.70	1.69
12:00	302.16	308.26	304.62	1.18
13:00	303.09	311.18	309.91	0.41
14:00	303.50	313.84	314.44	0.19
15:00	303.76	315.74	317.30	0.49
16:00	302.87	314.60	318.13	1.12

Fuente: Elaboración propia.

La figura 12 muestra las temperaturas en la superficie de las botellas de PET, obtenidos mediante las simulaciones numéricas CFD y mediante fotos tomadas con una cámara térmica para las 9:00 h, 12:00 h y 15:00 h. En esta parte de la validación se utilizó una cámara termográfica modelo Ti100, marca Fluke®. Se puede ver cómo las temperaturas experimentales sobre la botella y las obtenidas en la simulación son muy cercanas. A las 8:00 h, la diferencia de temperaturas es de apenas de 0.6 K; a las 12:00 h, esta diferencia aumenta ligeramente a 1.5 K; y a las 15:00 horas, la diferencia es de 3 K. A pesar del ligero incremento en la diferencia de temperaturas a lo largo del tiempo de prueba, los porcentajes de error relativo son menores a 0.93%.

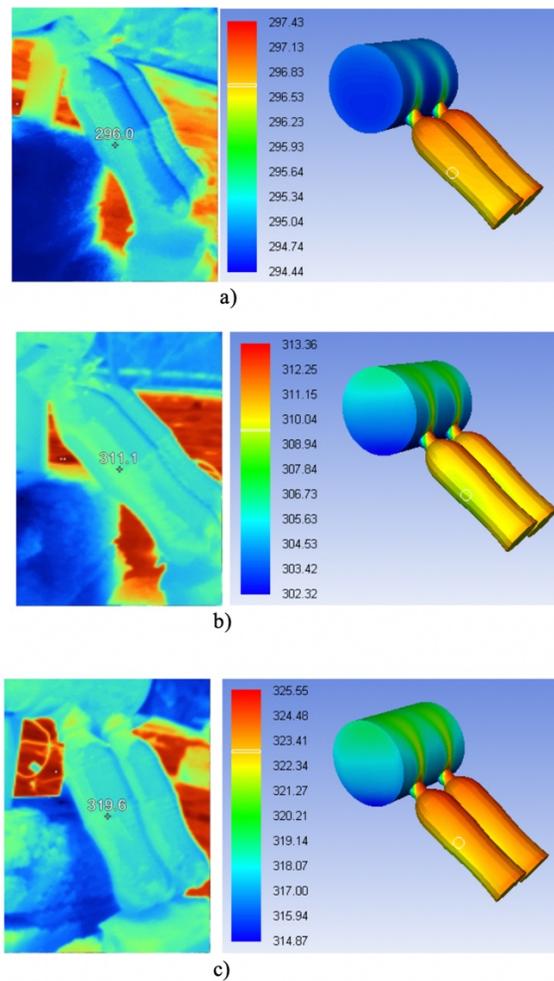


Figura 12. Validación de temperatura sobre la superficie del PET con cámara termográfica a las a) 9:00 h, b) 12:00 h y c) 15:00 h.  
Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

Se realizó un estudio numérico CFD de un CSA que reutiliza botellas de PET. Se construyó un prototipo nivel laboratorio mediante el uso de la tecnología de impresión 3D. Las simulaciones numéricas tuvieron las mismas condiciones ambientales, de frontera e iniciales, que las realizadas en las pruebas experimentales del prototipo nivel laboratorio. Los resultados numéricos CFD fueron validados, por un lado, con los datos experimentales de la temperatura del agua dentro del CSA que reutiliza botellas de PET y, por otra parte, con las temperaturas sobre la superficie de las botellas de PET obtenidas con una cámara térmica. Los resultados numéricos difieren en porcentajes de error menores a 1.69%, por lo que los modelos utilizados son adecuados para predecir el comportamiento de calentadores solares que reutilizan botellas de PET.

Este estudio del prototipo nivel laboratorio del CSA que reutiliza botellas de PET es la base para aprovechar el nivel de temperatura máxima de agua alcanzada de 315 K (42 °C), esta temperatura permite lograr condiciones adecuadas para tomar una ducha (30 °C-35 °C). Como trabajo a futuro, se realizará el escalamiento del CSA que reutiliza botellas de PET a un nivel prototipo comercial con apoyo de simulación

numérica CFD y, posteriormente, se realizará la construcción de un prototipo nivel comercial para su evaluación experimental. La ventaja de usar herramientas numéricas es reducir los costos en prototipos y sus correspondientes evaluaciones experimentales.

## Referencias

- Aguilar-Viveros, F. G. (2011). *Diseño e instalación de un sistema de calentamiento solar para un hotel en la ciudad de Veracruz* (Tesis de Ingeniería Mecánica Eléctrica). Universidad Veracruzana.
- Amiridou, D., & Voutsas, D. (2011). Alkylphenols and phthalates in bottled waters. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), 281–286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.031>
- ANSYS, Inc. (2015). *Fluent, ANSYS-FLUENT User's Guide*. Release 15.0. Canonsburg, PA.: ANSYS, Inc.
- American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc (ASHRAE). (2009). *Ashrae Handbook: Fundamentals* Atlanta, GA.: ASHRAE.
- Ashrae handbook-Fundamentals. (1992). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta, GA.
- Bach, C., Dauchy, X., Chagnon, M. C., & Etienne, S. (2012). Chemical compounds and toxicological assessments of drinking water stored in polyethylene terephthalate (PET) bottles: A source of controversy reviewed. *Water Research*, 46(3), 571–583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.062>
- Bach, C., Dauchy, X., Severin, I., Munoz, J. F., Etienne, S., & Chagnon, M. C. (2014). Effect of sunlight exposure on the release of intentionally and/or non-intentionally added substances from polyethylene terephthalate (PET) bottles into water: Chemical analysis and *in vitro* toxicity. *Food Chemistry*, 162, 63–71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.020>
- Berryman, D., Houde, F., DeBlois, C., & O'Shea, M. (2004). Nonylphenolic compounds in drinking and surface waters downstream of treated textile and pulp and paper effluents: A survey and preliminary assessment of their potential effects on public health and aquatic life. *Chemosphere*, 56(3), 247–255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.02.030>
- Byron, B. R., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). *Fenómenos de transporte* (2ª ed.). México: Limusa Wiley.
- Careaga-Muñoz, A. M. (2015). *Evaluación de la viabilidad de un calentador solar de agua hecho con polietileno tereftalato para uso domiciliario en base a las condiciones ambientales prevalecientes en la ciudad de Xalapa, Veracruz* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Universidad Veracruzana.
- Contreras-Trejo, J. D. (2012). *Diseño e implementación de un calentador solar elaborado a base de material reciclado para la casa UV en Coyoplan, Veracruz* (Tesis de Ingeniería Mecánica Eléctrica). Universidad Veracruzana.
- Del Angel, A., & Sarmiento, A. (2004). Sistema solar de calentamiento del agua del albergue de "Temaxcalapa, Veracruz". *Energética*, XXV(1), 60–67.
- Fan, Y., Zheng, J., Ren, J., Luo, J., Cui, X., & Ma, L. Q. (2014). Effects of storage temperature and duration on release of antimony and bisphenol A from polyethylene terephthalate drinking water bottles of China. *Environmental Pollution*, 192, 113–120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.012>
- Harukara, A. (2004). JP2004264009. *Solar water heater*. China: European Patent Office.
- López, G. A., Mantilla, J. A., & Poveda, B. H. (2012). Evaluación de un calentador solar de agua fabricado con tubería PVC en serie y envases PET translucidos. *Revista Tecnura*, 16, 120–128.
- Luján, A. F., Isaza, A. F., Duque, E. A., & Chica, S. (2013). Solar heater ecologic automated based in PET bottles. *Revista CINTEX*, 18, 145–165.
- Miranda-Gassull, V. (2011). *Sistema de calentamiento de agua sanitaria solar* (Tesis de Maestría en Arquitectura). Universidad Internacional de Andalucía.
- Morillón, D. (2011). Edificación sustentable en México: retos y oportunidades. Academia de Ingeniería México.
- Naemura, A. (2005). JP2005061670. Water heater. China. European Patent Office.
- Oshima, T. (2008). JP2008175515. Vessel used in solar water heater. China: European Patent Office.

- Reyes, D. F., & Cornejo, Y. A. (2014). Estado del arte de la construcción con material reciclable (Trabajo de grado de Ingeniero Civil). Universidad Católica de Colombia.
- Sedano, C., Vallín, D., Luna, A., Sedano, J., & Morán, J. (2011). Diseño y evaluación de un colector solar con parámetros de insolación para la Costa Sur de Jalisco, México. *9th Latin American and Caribbean Conference*. Medellín, Colombia.
- Shao, B., Han, H., Hu, J., Zhao, J., Wu, G., Xue, Y., Ma, Y., & Zhang, S. (2005). Determination of alkylphenol and bisphenol a in beverages using liquid chromatography/electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 530(2), 245–252.
- Vazhnov, A. (2013). *Impresión 3D, como va a cambiar el mundo*. Buenos aires, Argentina: Editorial Baikal.
- Vincent, P. (1981). *El cuerpo humano. Anatomía, fisiología, biología, higiene*. Barcelona, España: Editorial Reverte.