





Simulación por CFD y validación de transferencia de calor en placas planas

CFD simulation and validation of heat transfer in flat plates

- Alicia García Delgado ¹
- Mario Alberto Rodríguez Angeles ²
- Mayra Margarita May Vázquez ³
- Luz Yareli Durán Morales ⁴

Recibido: 28 de abril de 2022

Aceptado: 21 de abril de 2023

DOI: <https://doi.org/10.26495/icti.v10i1.2404>



Resumen

La rapidez de transferencia de calor entre una placa y los fluidos que la rodean en un tópico ampliamente estudiado. Este puede analizarse mediante el uso de ecuaciones semiempíricas o por ecuaciones de transporte. Mientras que en el primer método se suelen tener restricciones de uso, el segundo resulta ser matemáticamente complicado sobre todo debido a la convección. El uso de la Dinámica computacional de Fluidos (CFD) para resolver las ecuaciones de transporte puede reducir la dificultad y el tiempo que se requiere para su solución. Para garantizar que en estas simulaciones se obtengan resultados confiables, se debe realizar una sintonización, es decir, validar los modelos y parámetros mediante la comparación con resultados experimentales. En el presente trabajo se realizó la sintonización de la simulación de la transferencia de calor a través de una placa plana. Se elaboró un dispositivo para analizar experimentalmente el flujo de calor entre dos fluidos separados por una placa plana posteriormente se simuló este mismo sistema usando el software Fluent V20 estudiantil. Se simuló la convección natural en la placa utilizando propiedades del aire como funciones de la temperatura. El estudio fue verificado utilizando placas de diferentes materiales (hierro, vidrio y acrílico) y la comparación de los resultados se utilizó para modificar los modelos matemáticos utilizados y ajustar los parámetros utilizados como la conductividad térmica. Los resultados finales mostraron una diferencia promedio de menos de 1.5°C entre las temperaturas experimentales y las obtenidas por simulación.

- **Palabras clave:** Sintonización, experimentación, CFD, Transferencia de calor

¹Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Santa cruz de Juventino Rosas, México, aliciagarcia98@gmail.com.

²Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Santa cruz de Juventino Rosas, México, mrodriguez_ptc@upjr.edu.mx.

³ Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, mm.mayvazquez@ugto.mx.

⁴ Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Santa cruz de Juventino Rosas, Correo electrónico, lduran_ptc@upjr.edu.mx

Abstract

The rate of heat transfer between a plate and the fluids that surround it is a widely studied topic. This can be analyzed by using semi-empirical equations or by transport equations. While the first method usually has restrictions on its use, the second one turns out to be mathematically complicated, mainly due to convection. The use of Computational Fluid Dynamics (CFD) to solve the transport equations can reduce the difficulty and the time required for their solution. To guarantee that reliable results are obtained in these simulations, a tuning must be carried out, that is, the models and parameters must be validated by comparing them with experimental results. In the present work, the tuning of the simulation of the heat transfer through a flat plate was carried out. A device was developed to experimentally analyze the heat flow between two fluids separated by a flat plate, later this same system was simulated using the student Fluent V20 software. Natural convection in the plate was simulated using air properties as functions of temperature. The study was verified using plates of different materials (iron, glass and acrylic) and the comparison of the results was used to modify the mathematical models used and adjust the parameters used such as thermal conductivity. The final results showed an average difference of less than 1.5°C between the experimental temperatures and those obtained by simulation.

Keywords: Tuning, experimentation, CFD, heat transfer

1. INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor a través de un sólido sumergido en un fluido, es un tema básico que ha sido estudiado desde hace muchos años. El ejemplo más simple de este tema es el de un fluido intercambiando calor con una placa plana, en el cual se determina ya sea el calor transferido o bien la temperatura del sistema en algún punto. Sin embargo, que el sistema sea simple, no indica que la solución del problema también lo sea, pues la transferencia de calor desde o hacia un fluido implica el cálculo de coeficientes convectivos, los cuales dependen de muchos factores como el tipo de flujo, condiciones de frontera, propiedades de los materiales, entre otros. En la literatura pueden encontrarse correlaciones empíricas para el cálculo de los coeficientes convectivos (Cengel 2011), las cuales son establecidas dependiendo de las geometrías utilizadas y el régimen de flujo establecido, esto nos lleva a tener un gran número de ecuaciones para la solución de problemas convectivos.

Los coeficientes de calor convectivo pueden predecirse mediante experimentos detallados o mediante herramientas de modelado computacional que aplican esquemas de discretización (elemento finito, volumen de control, entre otros) para simplificar las ecuaciones que gobiernan el fluido (continuidad, momento y calor) y que normalmente no tendrían una solución analítica. Los experimentos tienen la ventaja de proporcionar resultados para un problema específico, pero para medir correctamente los datos se necesitan de equipos costosos que en ocasiones son difíciles de adquirir. Además, los experimentos requieren de mucho tiempo para su preparación y los resultados tienen errores de precisión. Por otro lado, el modelado por computadora ha demostrado ser una herramienta útil para predecir los resultados en análisis de transferencia de calor (Wang et al., 2019; Iwaniszyn et al., 2021; Lindqvist et al., 2021), pero el modelo debe validarse primero con resultados experimentales de sistemas equivalentes al real para verificar la precisión de la solución.

Actualmente, las simulaciones mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) han ganado popularidad para el estudio de la transferencia de calor, debido a que presentan una forma relativamente económica y práctica de realizar análisis en diferentes sistemas. Por medio de esta

herramienta se pueden realizar una gran variedad de análisis, desde básicos hasta aplicados a la ingeniería. Por ejemplo, Neale et al. (2006a) calcularon el coeficiente de transferencia de calor convectivo usando el código comercial Fluent, los resultados fueron validados para dos casos de estudio de flujo laminar en placas planas paralelas bajo diferentes condiciones térmicas. Neale et al. (2006b) en un trabajo posterior, determinaron los coeficientes de transferencia de calor convectivo en sistemas de flujo turbulento y la transferencia de calor por convección forzada en placas planas. Por su parte Dehnavi et al. (2008) calcularon los coeficientes de transferencia de calor por convección para partículas poliméricas en un reactor.

En el área de ingeniería se han logrado realizar exitosamente estudios complejos por medio de simulación por CFD, enfocados en la generación y optimización de equipos como colectores solares de placas (Marroquín-De Jesús et al., 2013; Ekramian et al., 2014; Martinopoulos et al., 2010; Pandey y Chaurasiya, 2017; Selmi, 2008) o intercambiadores de calor de placas (Chien et al., 2019; Rios-Iribe et al., 2016; Tiwari et al., 2014).

También, en el caso del área de materiales, la simulación por CFD ha permitido la caracterización de dispositivos a partir del análisis térmico (Choiński et al., 2016; Li et al., 2015). La CFD puede ser especialmente útil en cálculos aplicados a sistemas de aislamiento térmico, en donde una simulación del sistema aislado puede resolver posibles problemas que se presenten después de haber instalado el aislamiento. En la literatura pueden encontrarse diversos trabajos sobre el análisis de materiales aislantes y la optimización de sistemas de aislamiento térmico usando técnicas de CFD (Aravind et al., 2015; Golder et al., 2021; Zavattoni et al., 2014). Los estudios de aislamiento podrían ampliarse, realizando también las pruebas de caracterización de las propiedades térmicas de los materiales por CFD, sobre todo para el caso de la conductividad térmica. Aunque ya existe en la literatura tablas con valores de la conductividad térmica de varios materiales aislantes (Ricciu et al., 2018), continuamente se están desarrollando nuevos materiales aislantes, sobre todo aquellos que son naturales (Florea y Manea, 2019; Petranek et al., 2013; Zach et al., 2013). Dado esto, las simulaciones por CFD podrían ser una opción viable para la evaluación de la conductividad térmica cuando no se tengan los instrumentos de laboratorio adecuados.

Como se mencionó anteriormente, para obtener resultados confiables en las simulaciones, se requiere primero un proceso de validación de los resultados, en el cual la simulación se vaya refinando mediante el ajuste de los modelos matemáticos utilizados y las ecuaciones o valores con los que se calculen las propiedades, cuyo proceso se conoce como sintonización de la simulación. Es evidente entonces que el éxito de una simulación depende en gran manera de que se halla llevado a cabo una buena sintonización previa y que los resultados estén validados al menos para un sistema real equivalente al que se está estudiando.

En este trabajo se presenta el proceso de sintonización y la validación de los resultados obtenidos para la simulación por CFD de la transferencia de calor sobre una placa plana entre dos fluidos. La validación se lleva a cabo mediante la comparación con datos experimentales mostrados en este mismo trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo consta de una parte experimental y una simulación sobre un sistema cerrado y aislado de los alrededores, de tal forma que solo se consideró la transferencia de calor a través de las placas probadas.

Experimentación

Se elaboró el sistema mostrado en la figura 1, el cual tiene forma de prisma cuadrado con paredes y tapa de poliestireno expandido de 2.5 cm de grosor con el fin de restringir el paso del calor hacia o desde el ambiente. La cámara interna tiene una sección transversal de 9 cm x 9 cm y un largo de 15 cm, y está dividida en 2 zonas, una de 10 cm de largo y otra de 4.4 cm. Entre las dos zonas se realizó una ranura para colocar las placas de prueba del experimento a presión, mientras que en uno de los extremos se realizó una pequeña perforación por donde se tomaron las temperaturas de la placa posteriormente.

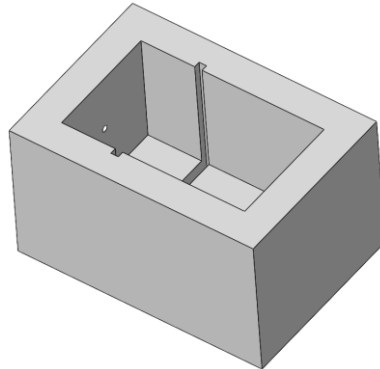


Figura 1: Sistema experimental utilizado.

Fuente: elaboración propia

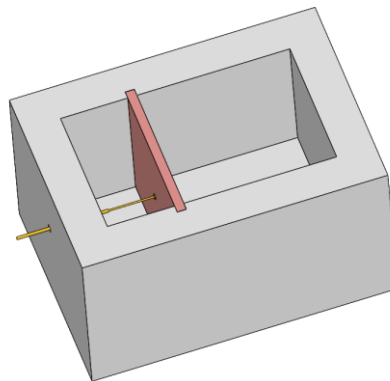


Figura 2: Posicionamiento de la placa de prueba y el termopar.

Fuente: elaboración propia

Se colocó una placa de hierro de 0.64 cm de grosor en la ranura y se selló por las orillas para evitar que se filtren los fluidos por los espacios entre la placa y el dispositivo, quedando el sistema como el mostrado en la figura 2. La cámara grande limitada por la placa se llenó con agua caliente, mientras que la cámara más pequeña se dejó vacía. Se colocó la tapa del sistema y se selló herméticamente. Se midieron las temperaturas del aire, del agua y de la placa en varios puntos utilizando un termómetro digital marca Fulgore; los valores obtenidos fueron promediados y se registraron como valores iniciales. A partir del momento inicial, se tomaron temperaturas en varios puntos de la placa del lado del aire, cada 20 s hasta un total de 100 s y se graficaron sus valores promedio con respecto del

tiempo. Al terminar las mediciones se retiró la placa y se repitió el procedimiento para una placa de vidrio y una placa de acrílico.

Simulaciones

Las simulaciones matemáticas del sistema se llevaron a cabo utilizando las herramientas de ANSYS V20 estudiantil. Con base en las mismas medidas internas del sistema estudiado, se generó una geometría simplificada usando el software Design Modeler representando únicamente la zona de la placa y de los fluidos. El mallado se realizó en Meshing utilizando elementos hexaédricos regulares en cada zona.

Para reducir el impacto del tamaño de las celdas en los resultados de las simulaciones se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de malla. Para ello, se elaboraron varias mallas cambiando el tamaño de celdas de tamaño desde 1 cm hasta 0.3 cm y se llevaron a cabo simulaciones en estado bajo las mismas condiciones que las reales para un tiempo simulado de 60 s. Debido a que la variable de interés es el cambio de temperatura de la placa de prueba con respecto al tiempo, se graficó esta con respecto al número de celdas totales para determinar el mejor tamaño de celda. Dado que el grosor de la placa es mucho menos que las otras dos zonas del sistema, se llevó a cabo un segundo análisis de malla únicamente en la placa utilizando elementos con tamaños entre 0.3 y 0.12 cm. Dado que el proceso de transferencia de calor en el sistema es transitorio, también se analizó el tamaño de los pasos de tiempo probando valores desde 0.05 hasta 1 s, manteniendo constante el tamaño de malla.

La malla final, obtenida después del análisis de sensibilidad, se utilizó para correr las simulaciones para cada placa utilizada utilizando el software Fluent. Las paredes exteriores del sistema fueron declaradas como adiabáticas mientras que las paredes de la placa se acoplaron para permitir la transferencia de calor. Las simulaciones fueron llevadas a cabo en estado transitorio, utilizando el modelo de multifase VOF. En cuanto al modelo viscoso, se consideró que la transferencia de calor entre la pared y los fluidos adyacentes se da por convección natural y por lo tanto las velocidades de los fluidos serán bajas, por lo cual se utilizó el modelo $k-\omega$ SST, con corrección para números de Reynolds bajos.

Para las propiedades del agua y del aire, se consideró que el rango de temperaturas en el que se lleva a cabo el experimento es amplio y no es factible utilizar propiedades constantes. Debido a esto, se utilizaron los valores reportados por Cengel (2011) para la densidad, la viscosidad, el calor específico y la conductividad térmica para un rango entre 30 y 100 °C. Con esto valores se elaboraron gráficas y se realizaron regresiones polinómicas apropiadas para obtener una función de cada propiedad con respecto a la temperatura. Posteriormente, los coeficientes de las funciones se utilizaron para el cálculo de las propiedades durante las simulaciones. Por otro lado, debido a la sugerencia de las fuentes consultadas, las propiedades de las placas fueron consideradas como constantes, tomando los valores reportados por Cengel (2011) para el hierro y el vidrio y los reportados por (Incropera y DeWitt, 1999) para el acrílico.

Las simulaciones fueron inicializadas con valores idénticos a los medidos al inicio de la experimentación y se obtuvieron medidas de temperatura promedio para las paredes de las placas en la misma zona que en la parte experimental. Estos valores fueron comparados con los resultados experimentales y se analizaron las diferencias para realizar un ajuste sistemático en los parámetros de la simulación hasta lograr una predicción de los fenómenos ocurridos en el sistema con un alto grado de precisión.

3. RESULTADOS

Temperaturas experimentales

Los valores de la temperatura en la placa de hierro tomados en un mismo momento no mostraron variación con respecto al punto de medición, por lo que se considera que para cualquier momento la temperatura es constante en toda la placa. Para las placas de acrílico y vidrio, los valores de la temperatura medida en diferentes puntos variaron en menos de 0.5 °C, dado que este valor es muy pequeño comparado con el cambio de temperatura promedio registrado en las placas con respecto del tiempo, se considera que no es significativo y por lo tanto los promedios no se verán afectados por valores extremos.

Los valores iniciales medidos para las placas fueron de 305 K mientras que la temperatura inicial para el aire y el agua fue de 304 K y 358 K respectivamente. Los valores promedio de la temperatura de la placa con respecto del tiempo se muestran graficados en la figura 3. Se puede observar que, debido a que el hierro tiene una conductividad térmica mucho más alta que los otros dos materiales, incrementa rápidamente su temperatura en los primeros 40 segundos del experimento y a partir de ahí, baja la velocidad de calentamiento y se establece un incremento de temperatura más o menos lineal. Por el contrario, tanto el vidrio como el acrílico registran un aumento de temperatura casi imperceptible en los primeros 20 segundos, pero este se va acelerando pasado este tiempo.

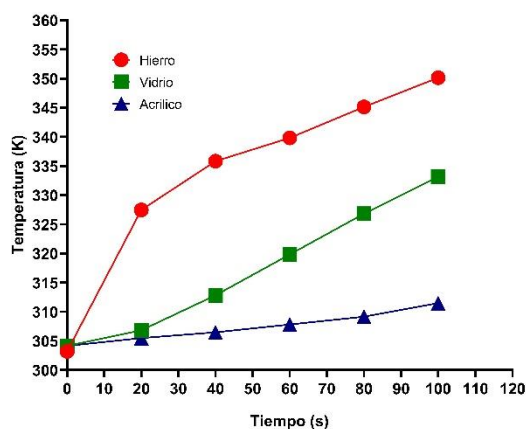


Figura 3. Comportamiento de la temperatura de las placas experimentales con respecto al tiempo. Fuente: elaboración propia

Análisis de sensibilidad

La figura 4 muestra los resultados del análisis de malla variando el tamaño de las celdas. La malla de menor tamaño contenía 832 celdas con un tamaño de 1.2 cm, mientras que la de mayor tamaño contenía 41,209 elementos de 0.3 cm. La curva revela que los resultados del incremento de la temperatura de la placa son altamente dependientes del tamaño de las celdas utilizadas en las zonas de los fluidos, sobre todo para las mallas menores ya que en la malla más pequeña se obtuvo un valor de la diferencia de temperatura 40% más bajo que la malla de mayor tamaño. Se observó también que, para mallas con más de 5,000 elementos, la solución comienza a estabilizarse y se obtienen errores cada vez menores. Dado esto, la malla seleccionada para realizar el análisis fue de un tamaño de 19,573 elementos, correspondiente a un tamaño de celda de 0.4 cm.

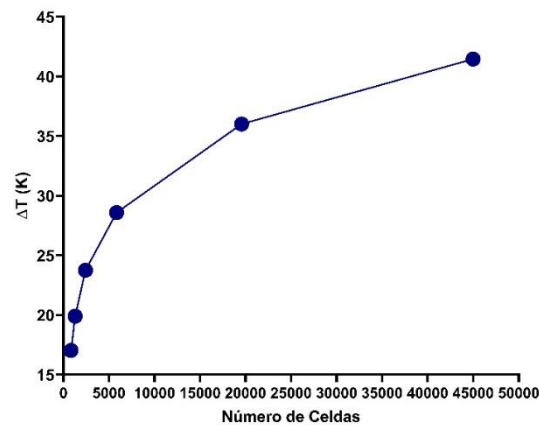


Figura 4: Resultados de la simulación del cambio de temperatura en la placa con respecto al número de celdas utilizadas en las zonas de los fluidos.

Fuente: elaboración propia

Para el análisis del tamaño de malla en la zona de la placa se utilizó el tamaño de celda de 0.4 cm para las zonas de los fluidos, variando únicamente el tamaño de las celdas de las placas. De acuerdo con la figura 5, el análisis muestra que no hay cambios significativos en el cambio de temperatura con respecto al tamaño de la malla, por lo cual se puede elegir cualquier tamaño de celda. El tamaño elegido fue de 0.2 cm tomando como parámetros de decisión la nitidez en la visualización de los perfiles de temperatura en la placa y los recursos computacionales necesarios para la simulación, los cuales tienen efectos contrarios en el tamaño de malla y por lo tanto deben ser balanceados. La malla final obtenida se muestra en la figura 6.

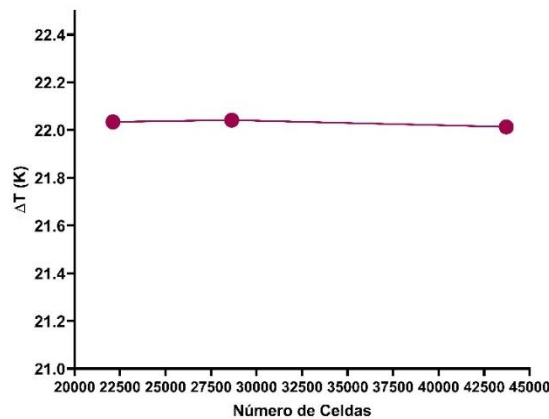


Figura 5. Resultados de la simulación del cambio de temperatura en la placa con respecto al número de celdas utilizadas en la zona del sólido.

Fuente: elaboración propia

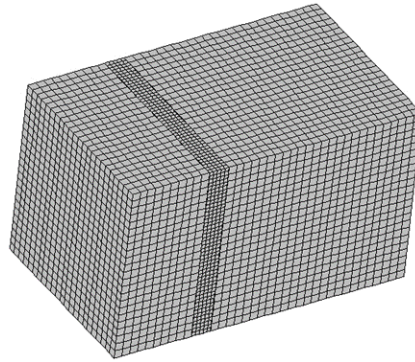


Figura 6. Malla final utilizada para las simulaciones.

Fuente: elaboración propia

El análisis del tamaño del paso de tiempo no mostró muchos cambios para valores menores a 1 s, ya que la variación es menor del 5% con respecto al paso de tiempo más bajo tomado. Por otro lado, para pasos de tiempo de 1 s y superiores la variación es mayor del 10%. Tomando en cuenta esto, se eligió un paso de tiempo de 0.5 s con el fin de reducir el tiempo de cómputo.

Comparación entre los resultados de simulación y experimentación

Las gráficas de los resultados de la temperatura de las placas con respecto al tiempo se observan en la figura 7. Las gráficas de la placa de hierro son las que muestran los menores errores entre ellas, sin embargo, se puede apreciar una marcada diferencia entre las pendientes de estas y, aunque hasta los 100 segundos el acoplamiento entre ellas parece correcto, es muy posible que al incrementar el tiempo simulado el error aumente.

Las gráficas para el vidrio y el acrílico presentan una tendencia más clara a tener una divergencia más amplia entre el comportamiento térmico experimental y el predicho por la simulación. En el caso de la placa de vidrio, el aumento de la temperatura es prácticamente lineal a partir de los 20 segundos según lo muestran los resultados experimentales y este mismo comportamiento lo muestran los valores predichos por la simulación. Por otro lado, para el acrílico se observa experimentalmente una gráfica del tipo polinómica, el cual también es bien predicho por la simulación según los valores arrojados. Aunque los comportamientos del aumento de la temperatura obtenidos por la simulación son semejantes a los reales, se puede observar que, al igual que en el caso de la placa del hierro las diferencias entre las gráficas del experimento y de la simulación son las pendientes. Incluso en la gráfica polinomial mostrada para el acrílico, si se realiza un análisis de la pendiente que hay entre dos puntos del tiempo, resulta evidente el mismo problema.

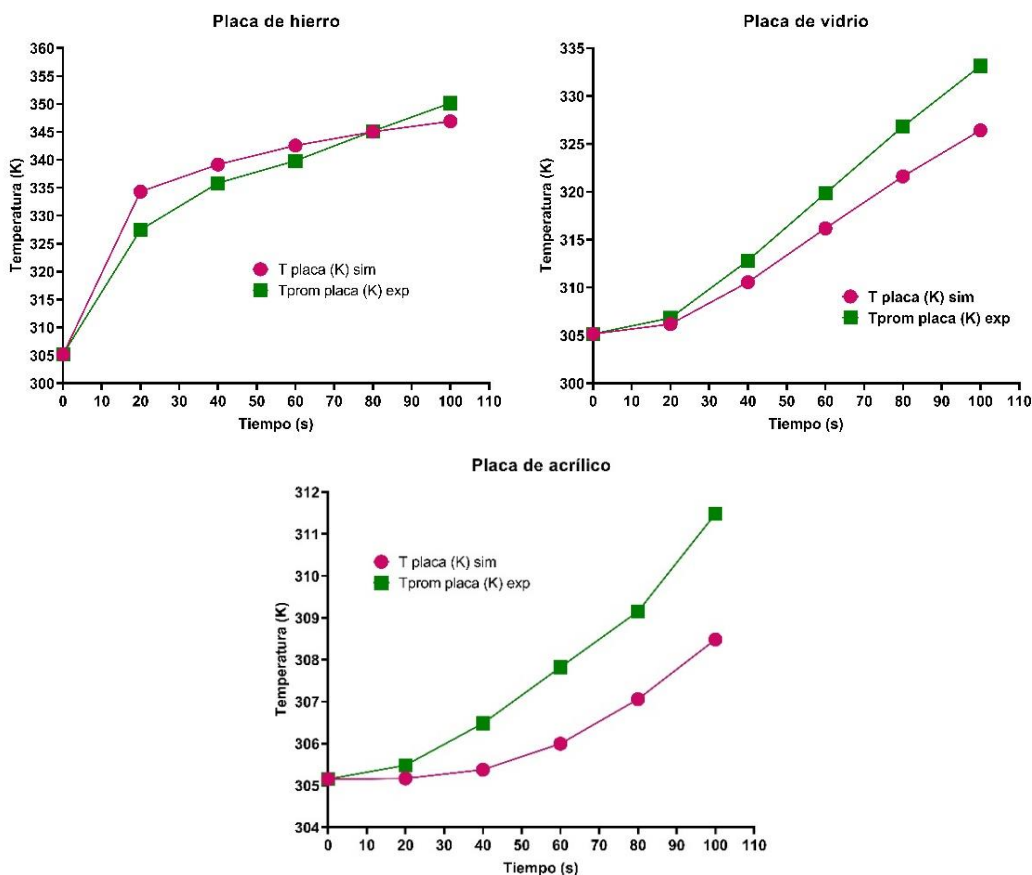


Figura 7: Gráficas comparativas del aumento de temperatura real contra obtenido por simulación.
Fuente: elaboración propia

4. DISCUSIÓN

Dependencia del incremento de temperatura con el tamaño de malla

Los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de malla mostraron una dependencia de la temperatura con respecto al tamaño de las celdas en la zona de los fluidos, no así en la zona del sólido. Se puede decir que este fenómeno es causado por el mecanismo principal de transferencia de calor en cada zona, ya que en el sólido la transferencia de calor es por conducción mientras que en los fluidos se da mayormente por convección. El coeficiente convectivo de transferencia de calor está fuertemente influenciado por el movimiento del fluido, y se sabe que este aumenta su valor al incrementarse la velocidad del fluido; de hecho, en sistemas con flujo turbulento, la aparición de remolinos promueve la disipación de energía de forma eficiente.

Un análisis a los vectores de velocidad de los fluidos, mostrados en la figura 8, muestra que, de hecho, existe turbulencia en ambos lados de la placa. En el lado derecho, el agua cede calor en la zona cercana a la placa, y debido a esto aumenta su densidad provocando una corriente descendente; a su vez, el agua en el fondo del sistema, momentáneamente menos denso del agua que desciende, se eleva. Este efecto conjunto genera un movimiento global en todo el dominio del agua. En el lado izquierdo, el aire sufre el efecto contrario, ya que al calentarse el aire cerca de la placa se vuelve

menos denso y se eleva. Sin embargo, la baja viscosidad del aire permite que el fluido se mueva con mayor libertad que el agua por lo que la velocidad local aumenta al igual que la turbulencia.

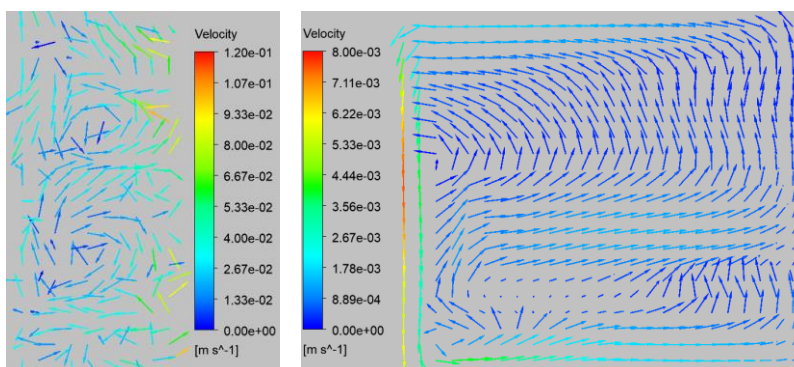


Figura 8. Vectores de velocidad en el aire (izquierda) y el agua (derecha) a los 100 s.
Fuente: elaboración propia

Matemáticamente, a nivel microscópico, la transferencia de calor en flujos turbulentos se aproxima utilizando una conductividad térmica turbulenta o “de remolino” (Bird, Stewart & Lightfoot, 2002), la cual se calcula a través de modelos análogos a la viscosidad turbulenta, donde uno de los factores a considerar es la variación de la velocidad. En simulaciones por volumen finito como la presente, la precisión del cálculo de la variación de la velocidad es dependiente de la separación de los nodos de cálculo, esto es, del tamaño de las celdas, de manera que mientras menor es el tamaño de las celdas la precisión del cálculo es mayor. De esta manera, el cambio en el tamaño de celdas en la malla afecta también al cálculo de la transferencia de calor en la zona de los fluidos, sobre todo a aquellos que presentan gradientes de velocidad altos, como en este caso el aire. La zona sólida, por otro lado, no presenta este problema, debido a que la conductividad térmica que se considera es solo una propiedad del material y fue definida como constante.

Detección de errores en los parámetros de la simulación

Las gráficas de la figura 7 mostraron una discrepancia entre los resultados de las simulaciones con respecto a los experimentales. Para realizar una correcta sintonización de la simulación, se deben analizar tanto los modelos matemáticos utilizados como los valores de los parámetros o las ecuaciones de cálculo de estos, con el fin de detectar posibles errores y corregirlos, adecuando sistemáticamente la simulación.

Primeramente, se realiza un análisis cualitativo de los fenómenos ocurridos durante el calentamiento del sistema. En la sección 4.1 se señaló el impacto que tiene la velocidad interna del fluido en la transferencia de masa, por lo tanto, la velocidad del calentamiento del sistema debe ser congruente con los vectores de velocidad mostrados en la figura 8. En la figura 9 se muestran los perfiles de temperatura en el sistema, la zona del agua muestra un enfriamiento casi estratificado, mientras que la zona del aire muestra un calentamiento casi uniforme. Ambos fenómenos son congruentes con el análisis realizado para los vectores, ya que la corriente generada en el agua por el cambio de densidad provoca una acumulación de agua fría en la parte inferior mientras el agua a mayor temperatura sube y se acumula en el extremo opuesto y, por otro lado, la alta turbulencia en el aire genera un mezclado constante en toda la zona lo que evita la estratificación de las temperaturas como en el caso del agua.

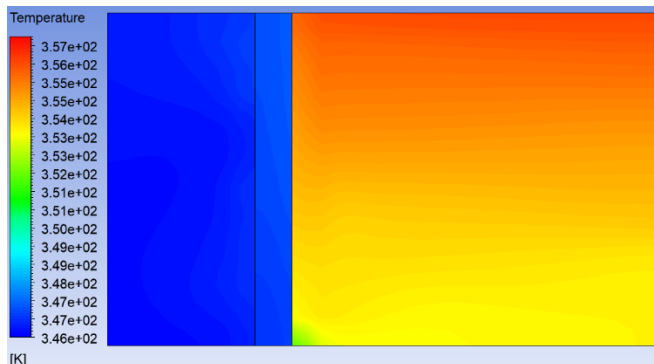


Figura 9. Perfiles de temperatura en el sistema completo a los 100 s.
 Fuente: elaboración propia

Más aún, modificando las escalas de temperatura como en la figura 10, se puede observar que el calor pasa mayoritariamente desde el agua hacia el aire a través de la parte superior de la placa y que la zona más fría del agua corresponde a la esquina inferior izquierda, justamente donde la corriente generada arrastra toda el agua que ya ha intercambiado calor. El efecto de la turbulencia también se acentúa en estas figuras, ya que puede observarse que mientras en el agua la diferencia entre la temperatura más alta y más baja es de casi 5 °C, en la zona del aire es de menos de 1 °C.

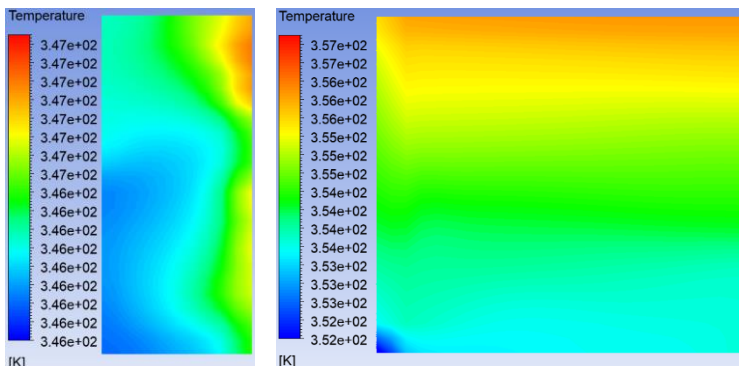


Figura 10. Perfiles de temperatura a los 100 s con límites ajustados para cada fase.
 Fuente: elaboración propia

En cuanto al análisis cuantitativo, analizando nuevamente las gráficas de la figura 7, aunque los resultados no son estadísticamente correctos, se puede observar que entre las gráficas experimentales y sus contrapartes procedentes de la simulación existe una cierta similitud, ya que, como se mencionó anteriormente las diferencias principales son las pendientes. De hecho, es posible demostrar que las diferencias entre los valores experimentales y simulados tienen una cierta tendencia con respecto al tiempo.

La evidencia analizada sugiere entonces que los fenómenos ocurridos en el intercambio de calor están siendo predichos correctamente, sin embargo, existe un parámetro que ha sido considerado de forma errónea y, considerando la evidencia de las gráficas, el parámetro es una constante. Los parámetros que podrían cambiar de esta manera las gráficas puede ser la conductividad térmica de las placas, el coeficiente convectivo de transferencia de calor, y el flujo de calor mismo. Tomando en cuenta que los coeficientes convectivos son calculados a partir de las condiciones de los fluidos y no son un parámetro que se haya ingresado, estos quedan descartados. La conductividad térmica, por otro lado, si es un parámetro de entrada y cabe la posibilidad de que exista una discrepancia del valor

real del material de las placas utilizadas con el reportado en la literatura. En cuanto al flujo de calor, aunque este tampoco es un parámetro de entrada, hay una posibilidad de que, durante la experimentación, se hayan tenido fugas de calor a pesar del intento de aislar el sistema. Sin embargo, esto haría que el flujo de calor entre los fluidos fuera más lento por lo que el cambio de temperatura sería más rápido en la simulación debido a que en esta sí se consideraron paredes adiabáticas. Esto es así para la placa de hierro, pero para las otras dos placas ocurre lo contrario, por lo tanto, el parámetro más probable a corregir es la conductividad térmica.

Corrección de las simulaciones

Para la mayoría de los materiales, las propiedades térmicas son un parámetro dependiente de la temperatura, a consecuencia de la dilatación del material. La conductividad térmica es uno de estos parámetros y cambia en los materiales dependiendo de la naturaleza de ellos. Para materiales simples y de ordenamiento cristalino como el hierro, la relación entre la conductividad térmica y la temperatura es una función casi lineal y con una pendiente baja, lo que representa cambios ligeros en su valor. Por ejemplo, para un rango entre 300 y 400 K, la variación de la conductividad térmica es de poco más del 6%.

El vidrio, a diferencia del hierro, está considerado dentro de los materiales cerámicos y tiene un ordenamiento amorfo. Por su naturaleza, es un tanto más complicada su estandarización en comparación de los metales y, al igual que estos últimos, sus propiedades pueden variar si no se realizó un enfriamiento adecuado durante su fabricación, solo que los defectos son un poco más difíciles de detectar para el vidrio cuando ya están en el mercado. El vidrio tiene un comportamiento peculiar con respecto a la temperatura, pero han sido varios los autores que han hecho investigaciones sobre su conductividad térmica, por ejemplo Jund y Jullien (1999) reportan un gráfico en donde se muestra que para el rango de 300 a 400 K la conductividad térmica del vidrio está entre 1.1 y 1.2 W/m K. Por otro lado, en el trabajo realizado por Wang et al. (2021), se reporta una conductividad de 0.974 W/m K a 303 K.

Para los polímeros como el acrílico, el problema puede ser mayor, ya que sus propiedades suelen cambiar dependiendo del grado de polimerización y el porcentaje de cristalinidad, incluso cuando se trata del mismo material. La estandarización de estos materiales se basa en las propiedades promedio por lo que es probable que en empresas pequeñas se puedan producir materiales con secciones fuera de las especificaciones estándar. Pero incluso teniendo un polímero dentro de los estándares, las propiedades pueden variar debido a la naturaleza de estos, por ejemplo Rühl (2017) reporta para el acrílico una conductividad térmica de 0.19 W/m K a temperatura ambiente, sin embargo especifica que para polímeros amorfos existe una gran dependencia de este valor con respecto a la temperatura, que se incrementa por debajo de su temperatura de transición vítrea y después de esta decrece. Este comportamiento también fue estudiado años antes por Dos Santos et al. (2013) y Agrawal et al. (2013) quienes presentan en sus respectivos trabajos curvas experimentales para la conductividad térmica del acrílico. Estos trabajos, sin embargo, presentan fuertes discrepancias en cuanto a los valores de la conductividad reportados, ya que los primeros señalan que para un rango entre 290 y 380 K los valores de la conductividad van de 0.20 a 0.25 W/m K, mientras que los segundos, para el mismo rango de temperaturas muestran valores de 0.11 a 0.19 W/m K, lo que demuestra que probablemente los materiales tengan características diferentes.

La información de los materiales mostrada, refuerza la teoría de que el problema en la incongruencia entre las curvas experimentales y las obtenidas en la simulación pudo ser el valor de la conductividad térmica utilizado, dado que el hierro es quien tiene un menor cambio en las conductividades térmicas

y el acrílico es quien muestra una mayor variación en cuanto a los valores reportados en la literatura y esto concuerda con las observaciones de las gráficas para cada material.

Debido a esto, se llevaron a cabo más simulaciones para cada material variando la conductividad térmica de los materiales de la placa. Los valores de la temperatura resultante se utilizaron para elaborar una curva mediante la cual se recalculó la conductividad térmica correcta. La Tabla 1 muestra las variaciones realizadas para los valores, se puede notar que los valores nuevos obtenidos se encuentran dentro de los rangos presentados en la literatura.

Tabla 1. Comparación de los valores de la conductividad térmica antes y después del ajuste.

Material	k (W/m K)	
	Inicial	Final
Hierro	80.2	79.5
Vidrio	0.7	0.79
Acrílico	0.18	0.21

Fuente: elaboración propia

Finalmente, las conductividades calculadas fueron utilizadas para generar nuevas curvas para la simulación, las cuales se muestran en la figura 11. Se puede observar que estas nuevas curvas tienen un mejor ajuste que las presentadas en la figura 7, por lo tanto, se puede decir que se llegó a la sintonización de la simulación y los resultados quedan validados.

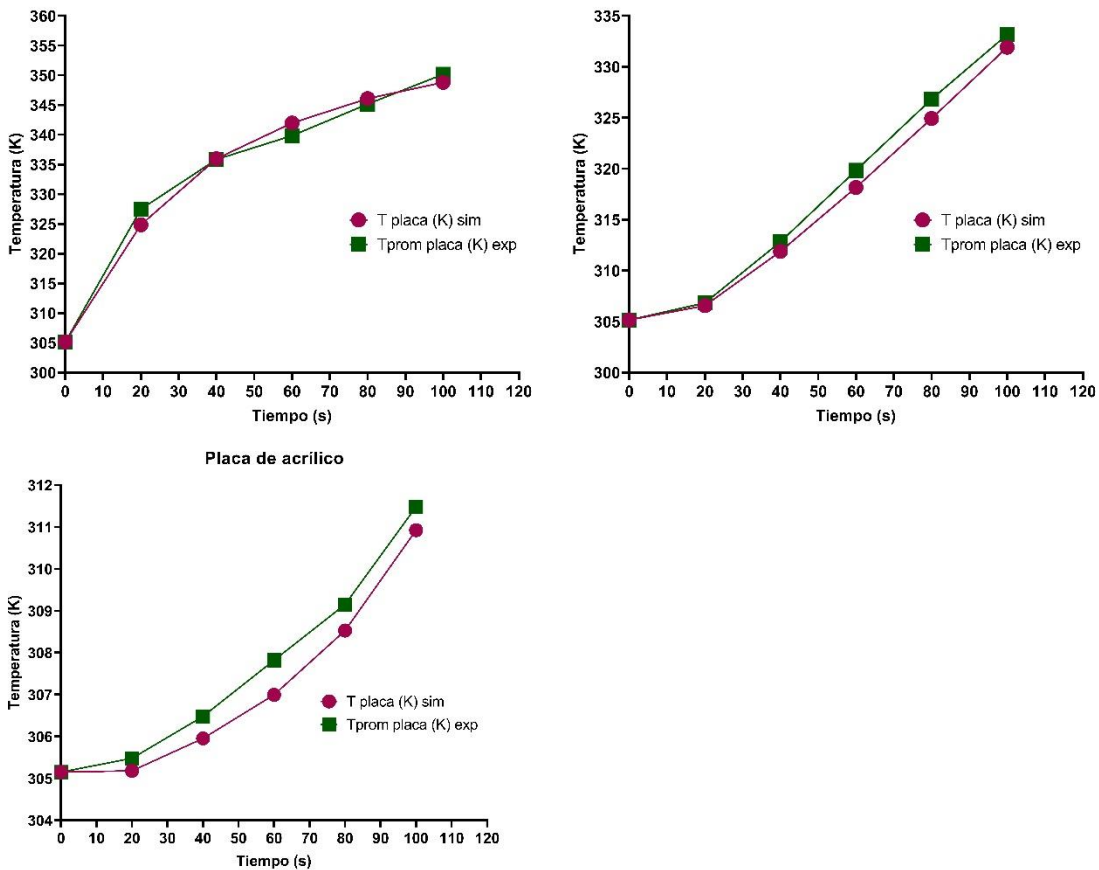


Figura 11. Gráficas comparativas del aumento de temperatura experimental contra obtenido por simulación usando las nuevas conductividades térmicas.

Fuente: elaboración

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se realizó la sintonización y la validación de los resultados de la simulación por CFD de la transferencia de calor a través de una placa plana. El análisis de malla llevado a cabo para el sistema, mostró una gran dependencia de los resultados para el cambio de temperatura con respecto al tamaño de celdas, así como al paso de tiempo, lo cual demuestra que, resulta fundamental realizar este análisis con el fin de encontrar una malla y paso de tiempo adecuados para obtener resultados confiables.

Las simulaciones por CFD predijeron correctamente el comportamiento de todas las fases durante el proceso de intercambio de calor, tanto en la hidrodinámica como en la transferencia de calor. Sin embargo, la conductividad térmica de los materiales de las placas mostraron ser un factor clave para que los valores predichos por la simulación se aproximaran a los experimentales. Debido a esto, se recomienda que para realizar predicciones de sistemas de transferencia de calor como este, se tenga certeza en las propiedades térmicas de los materiales que se están utilizando para el rango de temperaturas en que se va a evaluar. Por otro lado, dado que se ha demostrado con este trabajo que se pueden predecir correctamente los valores por medio de la simulación, un análisis como este también puede ser utilizado para calcular la conductividad térmica de un material desconocido, en cuyo caso el sistema experimental deberá mejorarse para evitar al máximo la existencia de fugas de calor

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Alicia García Delgado: Autora principal del trabajo, desarrollo del arreglo experimental y sus mediciones y las simulaciones del sistema bajo la supervisión de los asesores.

Mario Alberto Rodríguez Angeles: Director del proyecto, supervisión en general, desarrollo de la metodología del proyecto, revisión y análisis de resultados generales.

Mayra Margarita May Vázquez: Elaboración de metodología de simulación, apoyo y supervisión en simulaciones por CFD, análisis de resultados y propuestas de cambios y mejoras en simulaciones.

Luz Yareli Durán Morales: Análisis y propuestas de los materiales utilizados, asesora en el desarrollo del diseño experimental, revisión e interpretación de resultados experimentales.

REFERENCIAS

- Agarwal S., Saxena N.S., Kumar V. (2014) Temperature Dependence Thermal Conductivity of ZnS/PMMA Nanocomposite. En V. Jain, A. Verma (Eds) *Physics of Semiconductor Devices* (pp. 737–739). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03002-9_190
- Aravind Kumar, A., Nagesh Babu, B., & Somya, S. (2015). Numerical Simulation of Thermal Comfort Performance in a Room with Different Insulating Materials Using Computational

- Fluid Dynamics. *Key Engineering Materials*, 650, 29–37. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.650.29>
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2002). *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons, Inc.
- Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill
- Chien, N. B., Jong-Taek, O., Asano, H., & Tomiyama, Y. (2019). Investigation of Experiment and Simulation of a Plate Heat Exchanger. *Energy Procedia*, 158, 5635–5640. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.575>
- Choiński, D., Wodołański, A., Skupin, P., Stachańczyk, D., & Niedźwiedz, M. (2016). Analysis of the thermal properties of a heat flow chip calorimeter using CFD. *Applied Thermal Engineering*, 96, 508–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.100>
- Dehnavi, M. A., Shahhosseini, S., Hashemabadi, S. H., & Ghafelebashi, S. M. (2008). CFD based evaluation of polymer particles heat transfer coefficient in gas phase polymerization reactors. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(10), 1375–1379. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.07.017>
- Dos Santos, W.N., de Sousa, J.A., & Gregorio, R. (2013) Thermal Conductivity Behaviour of Polymers around Glass Transition and Crystalline Melting Temperatures. *Polymer Testing*, 32(5), 987-994. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.05.007>.
- Ekramian, E., Etemad, S. G., & Haghshenasfard, M. (2014). Numerical Analysis of Heat Transfer Performance of Flat Plate Solar Collectors. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.11159/jffhmt.2014.006>
- Florea, I., & Manea, D. L. (2019). Analysis of Thermal Insulation Building Materials Based on Natural Fibers. *Procedia Manufacturing*, 32, 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.207>
- Golder, S., Narayanan, R., Hossain, M. R., & Islam, M. R. (2021). Experimental and CFD Investigation on the Application for Aerogel Insulation in Buildings. *Energies*, 14(11), 3310. <https://doi.org/10.3390/en14113310>
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall.
- Iwaniszyn, M., Jodłowski, P. J., Sintera, K., Gancarczyk, A., Korpyś, M., Jędrzejczyk, R. J., & Kołodziej, A. (2021) Entrance effects on forced convective heat transfer in laminar flow through short hexagonal channels: Experimental and CFD study. *Chemical Engineering Journal*, 405, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126635>
- Jund, P., & Jullien, R. (1999) Molecular-Dynamics Calculation of the thermal Conductivity of vitreous silica. *Physical Review B*, 59(21), 13707–13711. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.13707>
- Li, Y., Guo, B., Huang, G., Kubo, S., & Shu, P. (2015). Characterization and thermal performance of nitrate mixture/SiC ceramic honeycomb composite phase change materials for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 81, 193–197. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.008>
- Lindqvist, K., Skaugen, G., & Meyer, O. H. H. (2021). Plate fin-and-tube heat exchanger computational fluid dynamics model. *Applied Thermal Engineering*, 189, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116669>
- Marroquín-De Jesús, Á., Olivares-Ramírez, J. M., Jiménez-Sandoval, O., Zamora-Antuñano, M. A., & Encinas Oropesa, A. (2013). Analysis of Flow and Heat Transfer in a Flat Solar Collector with Rectangular and Cylindrical Geometry Using CFD. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(4), 553–561. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72265-0](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72265-0)
- Martinopoulos, G., Missirlis, D., Tsilingiridis, G., Yakinthos, K., & Kyriakis, N. (2010). CFD modeling of a polymer solar collector. *Renewable Energy*, 35(7), 1499–1508. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.004>

- Neale, A., Derome, D., Blocken, B. J. E., & Carmeliet, J. (2006a). CFD calculation of convective heat transfer coefficients and validation—Part 2: Turbulent flow. En *IEA Annex 41 Working Meeting, Kyoto, Japan*.
- Neale, A., Derome, D., Blocken, B. J. E., & Carmeliet, J. (2006b). CFD calculation of convective heat transfer coefficients and validation – Part I: Laminar flow. En *IEA Annex 41 Working Meeting, Kyoto, Japan*.
- Pandey, K. M., & Chaurasiya, R. (2017). A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.078>
- Petranek, V., Guzii, S., Krivenko, P., Sotiriadis, K., & Kravchenko, A. (2013). New Thermal Insulating Material Based on Geocement. *Advanced Materials Research*, 838–841, 183–187. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.838-841.183>
- Ricciu, R., Besalduch, L. A., Galatioto, A., & Ciulla, G. (2018). Thermal characterization of insulating materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1765–1773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.057>
- Rios-Irbe, E. Y., Cervantes-Gaxiola, M. E., Rubio-Castro, E., & Hernández-Calderón, O. M. (2016). Heat transfer analysis of a non-Newtonian fluid flowing through a Plate Heat Exchanger using CFD. *Applied Thermal Engineering*, 101, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.094>
- Rühl A. (2017). *On the Time Temperature Dependent Behaviour of Laminated Amorphous Polymers Subjected to Low-Velocity Impact*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54641-3>
- Selmi, M., Al-Khawaja, M. J., & Marafia, A. (2008). Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector. *Renewable Energy*, 33(3), 383–387. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.02.003>
- Tiwari, A. K., Ghosh, P., Sarkar, J., Dahiya, H., & Parekh, J. (2014). Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in plate heat exchanger using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 85, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.015>
- Wang, M., Zheng, M., Chao, M., Yu, J., Zhang, X. & Tian, L. (2019). Experimental and CFD estimation of single-phase heat transfer in helically coiled tubes. *Progress in Nuclear Energy*, 112, 185-190. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.12.015>
- Wang, X., Shan, S., Shi, S. Q., Zhang, Y., Cai, L. & Smith, L. M. (2021) Optically Transparent Bamboo with High Strength and Low Thermal Conductivity. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 13. 1662–1669. <https://dx.doi.org/10.1021/acscami.0c21245>
- Zach, J., Hroudová, J., Brožovský, J., Krejza, Z., & Gailius, A. (2013). Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems. *Procedia Engineering*, 57, 1288–1294. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.162>
- Zavattoni, S. A., Gaetano, A., Montorfano, D., Barbato, M. C., Ambrosetti, G., & Pedretti, A. (2014). A Novel CSP Receiver Based on Airlight Energy Technology - Optimization of the Thermal Insulation System by Means of CFD Analysis. *Energy Procedia*, 49, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.063>