

Estudio computacional del comportamiento de un calentador de agua con una resistencia tipo C

Computational study of the behavior of a water heater with a type C resistance

Carlos A. Jiménez-Carballo¹

Fecha de recepción: 3 de diciembre, 2024
Fecha de aprobación: 4 de abril, 2025

Jiménez-Carballo, C.A. Estudio computacional del comportamiento de un calentador de agua con una resistencia tipo c. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 157-169.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7649>



¹ Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
 carjimenez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1783-3159>

Palabras clave

Calentador de agua; dinámica de fluidos computacional; modelo de turbulencia k- ϵ ; transferencia de calor en fluidos; método de elemento finito.

Resumen

El propósito principal de este trabajo es estudiar computacionalmente el comportamiento fluídico y térmico del agua en un calentador de agua con una resistencia tipo C. Para esto, se desarrolló una simulación numérica multifísica basada en la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), donde se utiliza el Método de Elementos Finitos (FEM) y para la cual se acoplaron el modelo de flujo turbulento k- ϵ y las ecuaciones de conservación de la energía térmica y la ley de Fourier de la transferencia de calor. Como consecuencia de las simulaciones realizadas, se obtuvieron los perfiles de velocidades y vorticidad del flujo, la caída de presiones en la entrada y la salida del calentador, así como las temperaturas máximas alcanzadas en la salida del calentador para diferentes combinaciones de potencia de calor y caudales. Finalmente, se determinaron cuáles son las combinaciones de potencia y caudal que permiten que un usuario del calentador no sufra lesiones en la piel debido a la temperatura de salida del agua.

Keywords

Water heater; computational fluid dynamics; k- ϵ turbulence model; heat transfer in fluids; finite element method.

Abstract

The main purpose of this work is to computationally study the fluidic and thermal behavior of water in a water heater with a type C resistance. For this, a multiphysics numerical simulation based on Computational Fluid Dynamics (CFD) was developed, where the Finite Element Method (FEM) is used, and the k- ϵ turbulent flow model and the equations of thermal energy conservation and Fourier's law of heat transfer were coupled. As a result of the simulations carried out, the velocity and vorticity profiles of the flow, the pressure drop at the inlet and outlet of the heater, as well as the maximum temperatures reached at the outlet of the heater for different combinations of heat power and flow rates were obtained. Finally, the combinations of power and flow rates that prevent a user of the heater from suffering skin injuries due to the outlet water temperature were determined.

Introducción

Los calentadores de agua proveen agua caliente para distintos usos en residencias, empresas y otros establecimientos, desde la higiene personal hasta actividades industriales. Son elementos fundamentales. En el mercado hay diferentes tipos de sistemas de calentamiento de agua: eléctricos, de gas, solares e híbridos, cada uno con características y beneficios específicos [1].

Los calentadores de agua domésticos tienen niveles de potencia diferentes. Los modelos eléctricos oscilan entre 1.5 kW y 5 kW. En cambio, los calentadores a gas varían más, con rangos comunes entre 7 kW y 30 kW, según su tipo y tamaño. La potencia apropiada depende del caudal de agua y la velocidad para alcanzar la temperatura deseada. Por ejemplo, en el Cuadro 1 se muestra la temperatura máxima (T) alcanzada por el agua a diferentes caudales (C) y potencias (P) [2].

Cuadro 1. Temperatura máxima alcanzada por el agua para distintas potencias y caudales [2].

P (kW)	C (l/min)								T (°C)
	1.2	1.6	1.8	2.0	2.6	3.2	4.0	4.3	
1.8	22								
2.4		22	19	17	13				
3.0		27	24	22	17				
3.5		31	28	25	19				
5.7						26	20	19	

La seguridad térmica es fundamental al usar calentadores de agua. La temperatura elevada del agua puede ser peligrosa para la piel humana. La exposición al agua a una temperatura de 60 °C puede provocar quemaduras de tercer grado en un lapso de aproximadamente cinco segundos, según investigaciones y directrices de seguridad. Es posible que se produzca daño en un lapso inferior a un segundo a temperaturas elevadas, como 70 °C. El tiempo recomendado para permanecer en el agua de acuerdo con la temperatura del agua se muestra en el Cuadro 2. Los calentadores de agua deben tener termostatos y dispositivos de control para limitar la temperatura del agua, lo cual asegura un uso seguro del equipo y previene posibles quemaduras [3].

Cuadro 2. Relación tiempo/temperatura para quemaduras [3].

Temperatura (°C)	Tiempo para producir una quemadura seria
49	Más de 5 min
51	Entre 1.5 min y 2 min
54	Cerca de 30 s
57	Cerca de 10 s
60	Menos de 10 s
63	Menos de 5 s
66	Cerca de 1.5 s
68	Cerca de 1 s

Algunos de los calentadores domésticos de agua utilizan una resistencia tipo C, el cual es un elemento calefactor cuyo diseño maximiza el contacto con el agua, lo que permite una transferencia de calor más eficiente. Las resistencias de tipo C se distinguen por su durabilidad y la facilidad de limpieza, aunque su reemplazo puede ser algo complicado dependiendo del modelo del calentador.

Investigaciones previas han demostrado que la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD²) y el Método de Elementos Finitos (FEM³) permiten analizar el comportamiento fluido y la distribución de temperaturas en calentadores de agua [4]. Por ejemplo, en [5] utilizaron CFD y FEM para determinar coeficientes de transferencia de calor en calentadores de flujo continuo, aunque sin considerar configuraciones de resistencia no lineales. Por otro lado, Paul y Masukume en [6] utilizaron CFD para simular la eficiencia de calentadores solares, encontrando que la configuración del tubo y las condiciones de flujo son determinantes para la eficiencia térmica. Recientemente, en [7] analizaron el rendimiento para los calentadores de

2 Por sus siglas del inglés Computational Fluid Dynamics.

3 Por sus siglas del inglés Finite Element Method.

agua a gas para cuatro geometrías diferentes utilizando CFD, donde los resultados mostraron que las geometrías en espiral aumentan significativamente el número de Nusselt al crear flujos secundarios con una caída de presión mucho menor.

El objetivo principal de trabajo es analizar el comportamiento térmico y fluido del agua en un calentador convencional que posee una resistencia en forma de C, esto con ayuda de FEM. Específicamente, se construirá una simulación numérica multifísica de la interacción fluido-térmica del agua en el calentador utilizando la CFD basada en FEM, en la cual se utiliza el modelo de flujos turbulentos k-ε, de números de Reynolds bajos y el modelo de transferencia de calor en fluidos. A partir de dicho modelo se estudiará el comportamiento del flujo del agua del calentador, así como las temperaturas máximas que alcanza el agua en la salida del calentador. Finalmente, se establecerán las combinaciones de potencia y caudal para que, al usar el calentador, este no llegue a generar daños en la piel de las personas.

Metodología

En la Figura 1 se muestra la propuesta del diseño de una resistencia tipo C del calentador de agua convencional, el cual está hecho de cobre. Sus dimensiones se muestran en el Cuadro 3. En la Figura 2 se presenta una vista superior del calentador donde se puede observar el diámetro de la entrada y salida del agua, así como sus posiciones con respecto a la resistencia y al centro de la carcasa. En la Figura 3 se puede ver una vista frontal de la resistencia tipo C del calentador, así como de la carcasa.

Cuadro 3. Dimensiones de la propuesta de la resistencia del calentador de agua.

Parámetro	Valor en mm
Diámetro de los tubos de entrada y salida de agua	12.62
Diámetro de la resistencia del calentador	8.0
Diámetro del calentador	50.0
Altura de la resistencia del calentador	152
Altura del calentador	160

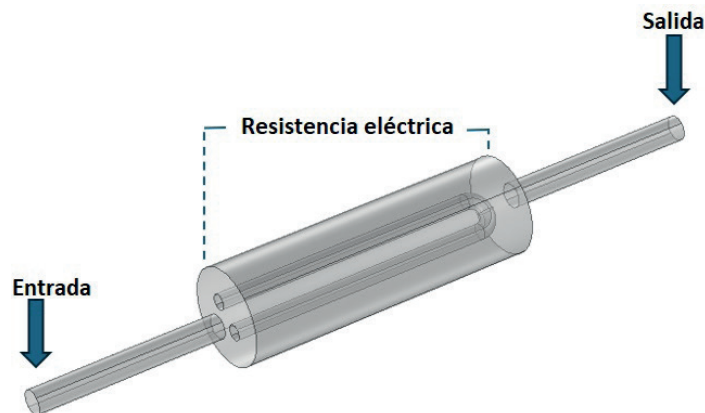


Figura 1. Propuesta de resistencia de un calentador de agua doméstico.

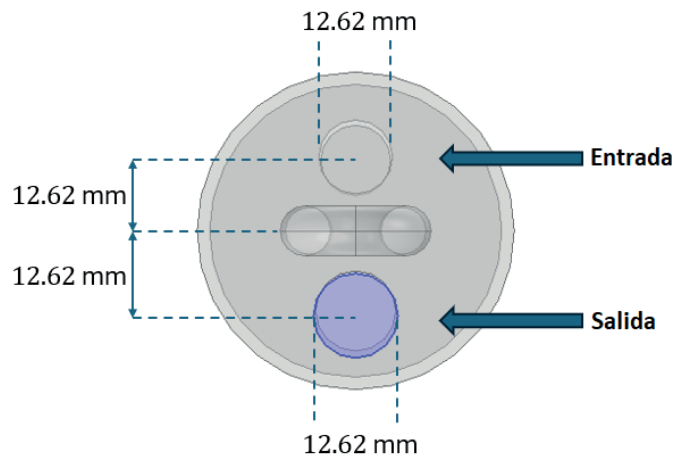


Figura 2. Vista superior de la resistencia del calentador de agua doméstico.

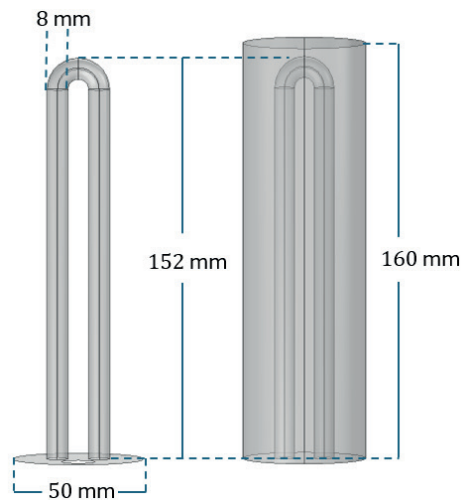


Figura 3. Vista frontal de la resistencia del calentador de agua doméstico.

Instrucciones de modelado y simulación

Para el desarrollo del modelo computacional para analizar el comportamiento fluídico y térmico del agua en el calentador se consideró que la misma es un fluido continuo, incompresible, isotrópico y newtoniano. Además, el efecto de la gravedad es despreciable y se ignora el calentamiento por radiación térmico. Para analizar dicho comportamiento se realizó una simulación multifísica en el programa COMSOL Multiphysics®, versión 6.2 la cual involucra a las interfaces física “Flujo Turbulento k- ϵ , Re bajos” y “Transferencia de calor en fluidos”. La primera se utiliza para analizar el movimiento del fluido con el objetivo de obtener los campos de velocidades, presiones y vorticidad para flujos turbulentos con números de Reynolds bajos⁴; mientras que la segunda se realizó con el propósito de determinar la distribución de temperaturas.

4 Para este estudio se define a los flujos turbulentos con números bajos de Reynolds a aquellos donde este último este entre 2000 y 10000.

La interfaz física “Flujo Turbulento k-ε, Re bajos” del software Comsol Multiphysics, se utiliza para simular flujos de fase única a altos números de Reynolds. La interfaz física es adecuada para flujos incompresibles y flujo compresible a números de Mach⁵ bajos [8]. Esta interfaz física resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes [9]:

$$\text{Conservación del momento} \Rightarrow \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\nabla(p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \vec{F}, \quad (1)$$

$$\text{Conservación de la masa} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0, \quad (2)$$

donde ρ, p, μ y \vec{v} son la densidad, la presión, la viscosidad y la velocidad del fluido, respectivamente, \vec{F} son las fuerzas externas (como la fuerza de gravedad fuerza electromagnética, etc) y \mathbf{K} es el tensor de esfuerzos viscosos y se determina:

$$\mathbf{K} = (\mu + \mu_T)(\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T), \quad (3)$$

en el que μ_T es la viscosidad turbulenta que se define como [10]:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu(\rho, \mu, k, \varepsilon, l_w) \quad (4)$$

El comportamiento turbulento del flujo se modela con dos ecuaciones de transporte adicionales [11]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} f_\varepsilon(\rho, \mu, k, \varepsilon, l_w) \quad (6)$$

donde la ecuación (5) describe la evolución de la energía cinética turbulenta (k) y la ecuación (6) representa la ecuación de transporte de la tasa de disipación de energía (ε). En las ecuaciones (4), (5) y (6) las $C_\mu, C_{\varepsilon 1}$ y $C_{\varepsilon 2}$ son constantes empíricas, σ_k y σ_ε son los coeficientes de difusión para k y ε , P_k es el término de producción de k , el cual se determina como:

$$P_k = \mu_T [\nabla\vec{v} : (\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T)] \quad (7)$$

Además, en las ecuaciones (4) y (6), los términos f_μ y f_ε se conocen factores de corrección los cual dependen de las propiedades del flujo y la distancia de la pared. Por otro lado, los valores típicos que utiliza el modelo para las constantes empíricas son $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ y $\sigma_\varepsilon = 1.3$ [12].

Para mejorar la precisión del comportamiento del flujo cerca de las paredes solidas se utilizan las ecuaciones de correcciones de pared, las cual son:

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4 \quad (8)$$

5 El número de Mach (Ma) se define como la comparación entre la rapidez del fluido v y la rapidez del sonido en dicho fluido v_s , esto es $Ma \equiv \frac{v}{v_s}$ [8].

$$l_w = \frac{1}{G} - \frac{l_{ref}}{2} \quad (9)$$

donde l_w es la longitud característica de la capa límite turbulenta cerca de la pared, l_{ref} es una longitud de referencia asociada al problema y G es el factor de gradiente relacionado con las propiedades del flujo.

La interfaz física “Transferencia de calor en fluidos” la cual se utiliza para modelar la transferencia de calor en fluidos por conducción, convección y radiación [13]. Dicha interfaz resuelve las ecuaciones de conservación de energía térmica y ley de Fourier [14]:

$$\rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (10)$$

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (11)$$

donde c_p es el calor específico, \vec{v} es la velocidad la cual es gobernada por las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes, \vec{q} es el flujo de calor y T es la temperatura. En la ecuación (10), el término $\rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T$ describe la energía térmica que es arrastrada por el movimiento del fluido, es decir, el transporte de calor por convección. El segundo término, $\nabla \cdot \vec{q}$, representa el flujo de calor por conducción dentro del sistema, que ocurre debido a diferencias de temperatura. Por otro lado, Q representa una fuente térmica genérica, Q_p corresponde al calor generado por disipación viscosa, y Q_{vd} incluye otras posibles contribuciones específicas del problema.

Para construir la simulación, se escoge la opción 3D en dimensión de espacio. Se seleccionan las interfaces mencionadas y el tipo de estudio deseado. Se construye la geometría utilizando los datos del Cuadro 3. Se establece “Water, liquid⁶” como el fluido de trabajo y “Copper⁷” para la resistencia. Posteriormente se definen las condiciones físicas del flujo turbulento k-ε para números de Reynolds (Re) bajos, donde para este trabajo se consideró el intervalo $2000 \leq Re \leq 10000$, por lo que primero se verificó si bajo los parámetros físicos de entrada (velocidad), el agua, cumple con dicho criterio. Seguidamente, se establecen como valores iniciales los valores iniciales de la energía cinética turbulenta (k_0) y la tasa de disipación ε_0 para cada velocidad de entrada (v), las cuales se determinan con las expresiones [5]:

$$k_0 = \frac{3}{2} (I v_0)^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon_0 = C_\mu^{3/4} \frac{k_0^{3/2}}{L} \quad (13)$$

donde I es la intensidad de turbulencia la cual, para un flujo turbulento, en una tubería se aproxima a 0.05, L es la longitud de escala turbulenta, que para un flujo interno se estima como $L = 0.07D$, donde D es el diámetro de la tubería. Adicionalmente, se establece el recíproco de la distancia de pared inicial G_0 . En la entrada del agua se asigna la velocidad del fluido (v) a partir de los valores indicados en el Cuadro 4. En la salida se define la presión igual a cero.

6 Según los materiales de Comsol Multiphysics, el agua se encuentra en la sección Built In [15].

7 En la lista de materiales de Comsol Multiphysics, el cobre se encuentra en la sección Built In [15].

En relación con la interfaz física transferencia de calor en fluidos, primero asigna una temperatura inicial del agua de 20 °C. En la entrada se incluye un flujo de entrada con temperatura la misma temperatura y en el contorno de salida se define un flujo de salida. La resistencia tipo C se configura como como fuente de calor a la cual se le asocia una tasa de calor P en Watts y los contornos externos se configuran como contornos abiertos.

Para acoplar a las interfaces “Flujo turbulento $k-\epsilon$, Re bajos” y “Transferencia de calor en fluidos” se utiliza el acople multifísico “flujo no isotérmico”. En cuanto al mallado, se utiliza una discretización de aristas en la región correspondiente a la resistencia, mientras que para las demás áreas se selecciona un mallado libre triangular. Posteriormente, se establece un barrido paramétrico respecto al parámetro de velocidad inicial, conforme a las velocidades indicadas en el Cuadro 4, y se lleva a cabo el estudio correspondiente.

Resultados

En esta sección se exponen los resultados más importantes de estudio del comportamiento del fluido y térmico del agua en el calentador con la resistencia tipo C.

Comportamiento del flujo del agua

Para este caso, el fluido que se analizó tiene velocidades de entrada entre 0.16 m/s ($C = 1.2$ l/min) y 0.57 m/s ($C = 4.3$ l/min). En el Cuadro 4 se muestra el número de Reynolds (Re) y el número de Mach (Ma) para dichas velocidades, donde se tiene que los valores del Re del flujo en la entrada del calentador se encuentran entre 2000 y 10000, lo que implica que el flujo cumple con las condiciones deseadas para este trabajo, o sea en la entrada el agua se comporta como un flujo turbulento con bajo número de Reynolds. Por otro lado, los valores de Ma , señalan que el flujo está significativamente por debajo de la velocidad del sonido, lo que confirma que se trata de un flujo subsónico y no compresible.

Cuadro 4. Caudales, velocidades de entrada, número de Reynolds y número de Mach del agua en estudio.

C (l/min)	1.2	1.6	1.8	2.0	2.7	3.2	4.0	4.3
V (m/s)	0.16	0.21	0.24	0.27	0.35	0.43	0.53	0.57
Re	2019	2650	3029	3407	4417	5426	6689	7193
Ma ($\times 10^{-6}$)	107	140	160	180	233	287	353	380

En la Figura 4 se presentan los perfiles de velocidad del agua en el calentador para algunas de las velocidades de entrada mostradas en el Cuadro 4, desde 0.16 m/s a 0.57 m/s. Para el caso de velocidades bajas, el flujo se vuelve más homogéneo y con gradientes de velocidad más bajos, pero, a medida que la velocidad de entrada aumenta, las velocidades máximas dentro del calentador también aumentan, concentrándose en el centro del canal. Al mismo tiempo, los cambios de velocidad se vuelven más marcados cerca de las paredes y la salida. A altas velocidades, el flujo se vuelve más dinámico y heterogéneo, con una mayor energía cinética y una interacción más intensa con las superficies del calentador. Asimismo, se puede ver que dentro del cilindro del calentador el agua del fluido se reduce en comparación con la velocidad de entrada, lo cual facilita que el agua se caliente de mejor manera.

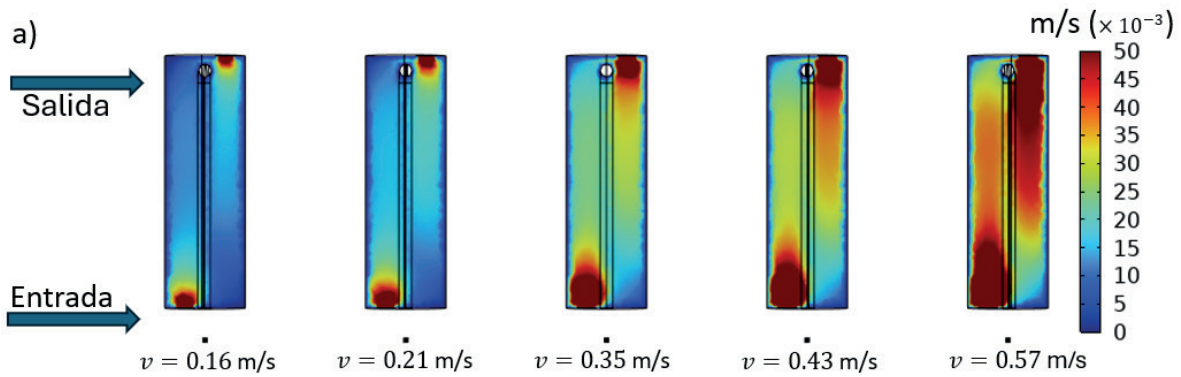


Figura 4. Perfiles de velocidad del fluido en el calentador para algunas de las velocidades de entrada del agua presentadas en el Cuadro 4.

En la Figura 5 se muestra la circulación del agua en el calentador para una velocidad de entrada de 0.57 m/s, en donde se puede apreciar que el flujo del agua desacelera al entrar al calentador, pero además las líneas de flujo siguen una trayectoria prácticamente directa hacia la salida y no se muestran remolinos ni turbulencia elevada, lo que significa que para las velocidades de entrada analizadas en este trabajo en el calentador no se van a presentar vibraciones importantes.



Figura 5. Circulación del agua en el calentador, considerando que la velocidad de entrada del agua es de $v = 0.57$ m/s.

En la Figura 6 se observa la caída de presión, la cual aumenta de forma no lineal con la velocidad de entrada del agua. A velocidades de entrada bajas, la caída de presión es mínima debido a que el flujo de entrada se encuentra en el régimen transitorio laminar-turbulento y además de que hay bajas pérdidas por fricción. A medida que la velocidad se incrementa, la disminución de presión aumenta de manera acelerada a causa de gradientes de velocidad más altos y fricción incrementada. Cuando la velocidad es elevada, el aumento se vuelve más notable, lo que sugiere una potencial evolución hacia un flujo turbulento, lo cual destacaría la importancia de controlar la velocidad para optimizar la eficiencia del sistema.

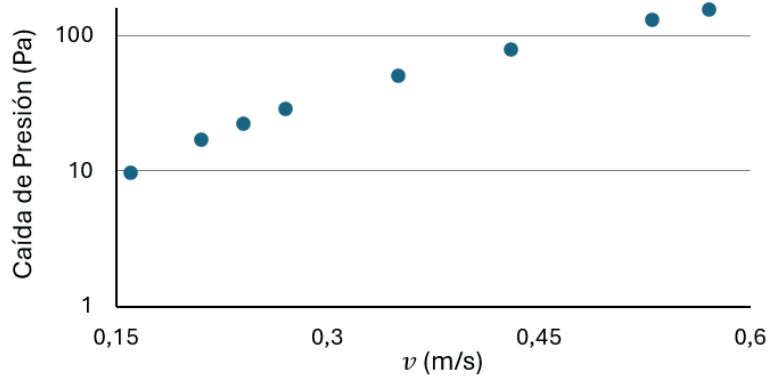


Figura 6: Caída de presión en función de la velocidad de entrada v .

En la Figura 7 se pueden ver los perfiles de vorticidad del agua en el calentador para algunas de las velocidades de entrada mostradas en el Cuadro 4, donde se aprecia que en general los valores más altos de vorticidad se presentan en las paredes del calentador y en el centro de la resistencia, lo cual implica que existe una mayor interacción entre el fluido y la estructura en dichos lugares, así como gradientes de velocidad más marcados. Para el caso de velocidades de entrada bajas ($v = 0.16$ m/s y $v = 0.21$ m/s) la vorticidad es mínima lo cual indica la presencia de un flujo laminar y más estable, lo cual es de esperar, pues de acuerdo con el Cuadro 4, esos casos se encuentran dentro de la zona de transición de flujo laminar-turbulento. A medida que la velocidad de entrada aumenta, las áreas de alta vorticidad también aumentan, especialmente en las partes de entrada, de salida y paredes, lo que implica que, a altas velocidades, el flujo presenta una mayor inestabilidad y puede transitar hacia la turbulencia.

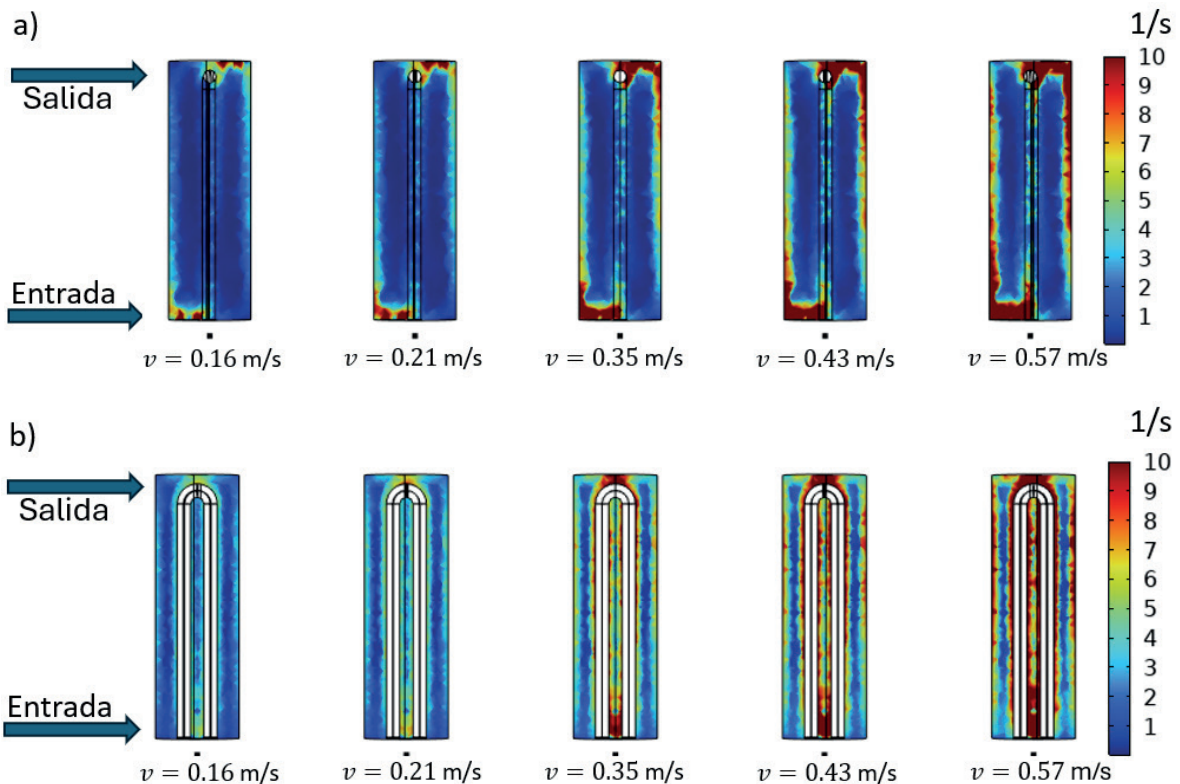


Figura 7. Perfiles de vorticidad del agua en el calentador para diferentes velocidades de entrada del agua a) vista plano yz b) vista plano xz.

Perfiles de temperatura

Para este caso, se analizó el aumento de la temperatura del agua en el calentador con la resistencia tipo C, donde se consideró que la potencia en dicha resistencia está entre 1800 W y 5700 W, además el caudal de agua en el calentador está entre 1.2 l/min y 4.3 l/min. En el Cuadro 5 se presenta la temperatura máxima T con la que sale el agua del calentador, para diferentes combinaciones de potencia eléctrica (P) y caudal (C). Para valores mayores de P se obtienen valores más altos de T para un mismo valor de C , por ejemplo, para $C = 1.2$ l/min, T se incrementa desde 42.6 °C con $P = 1.8$ kW hasta 91.4 °C con $P = 5.7$ kW. Esto es lo esperado dado que una mayor transferencia de energía térmica permite calentar el agua de mejor manera. Además, del Cuadro 5 se tiene que para valores más altos de C , T disminuye para un mismo valor de P , lo cual sucede debido a que el agua se mueve más rápido, lo que reduce el tiempo de esta en contacto con la residencia del calentador y, por ende, la energía absorbida. Por ejemplo, con $P = 2.4$ kW, T cae de 50.2 °C a 28.4 °C al aumentar C de 1.2 l/min a 4.3 l/min.

Cuadro 5: Temperatura máxima alcanzada por el agua para distintas potencias y caudales en el calentador con resistencia tipo C.

P (kW)	C (l/min)								T (°C)
	1.2	1.6	1.8	2.0	2.6	3.2	4.0	4.3	
1.8	42.6	37.2	35.1	33.4	30.3	28.4	26.8	26.3	
2.4	50.2	43.0	40.1	37.8	33.7	31.2	29.1	28.4	
3.0	57.7	48.7	45.1	42.3	37.2	34.0	31.3	30.6	
3.5	64.0	53.5	49.3	46.0	40.0	36.3	33.2	32.3	
5.7	91.4	74.5	67.6	62.3	52.6	46.6	41.6	40.1	

Si se analizan las temperaturas máximas alcanzadas por el agua en términos del tiempo recomendado para permanecer en el agua (Cuadro 2), las temperaturas en color rojo del Cuadro 5 representan aquellas combinaciones de P y C que no son recomendables utilizar en el calentador propuesto, esto debido a que puede provocar lesiones serias en la piel. Las temperaturas en amarillo y anaranjado corresponden a aquellas donde las personas pueden permanecer bajo el agua por un tiempo entre 10 s y 2 min. Finalmente, las combinaciones de C y P que generan temperaturas máximas de color verde, son aquellas en las que las personas corren menos riesgo de sufrir una quemadura.

Conclusiones

A partir de este trabajo se desarrolló un análisis multifísico del comportamiento del agua en una propuesta de un calentador doméstico con una resistencia tipo C, esto con ayuda del Método de Elementos Finitos, el cual facilitó una comprensión detallada del comportamiento térmico y del flujo del agua [5]. Primero, se aplicó un modelo del flujo turbulento $k-\epsilon$ para números de Reynolds bajo para estudiar el flujo del agua, esto debido a que el flujo de entrada del agua al calentador tenía números de Reynolds entre 2000 y 10000. A través de la simulación numérica se obtuvieron los perfiles de velocidad y vorticidad, así como la caída de presiones del agua entre la entrada y salida del agua en el calentador, con lo cual determinó que para las velocidades de entrada de 0.16 m/s, 0.21 m/s y 0.24 m/s, el agua dentro del calentador se comportó de forma laminar, esto debido a valores bajos de vorticidad y velocidades. Para el resto de las velocidades de entrada aplicadas se encontró que el flujo si se comporta como un flujo turbulento.

Con ayuda del modelo de transferencia de calor de fluidos utilizado se encontraron las temperaturas máximas que alcanza el agua al salir del calentador, esto para diferentes combinaciones de potencia en la resistencia y caudales de agua. Se encontró que a mayores caudales, para una misma potencia, la temperatura de salida es menor, mientras que, para mayores potencias de calor en la resistencia para un mismo caudal, mayor es dicha temperatura. Se determinaron las combinaciones de caudal y potencia de calor que pueden ser seguras, así como las peligrosas para la piel con lo que se concluye que es esencial alcanzar un equilibrio adecuado para prevenir sobrecalentamientos que podrían representar riesgos para los usuarios. Gracias a este estudio, se logró asegurar que las temperaturas del agua se mantuvieran dentro de límites seguros para evitar posibles daños en la piel, resaltando la relevancia de emplear modelos matemáticos en la creación de dispositivos seguros y efectivos.

Agradecimientos

Se agradece a la Escuela de Física del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Wattco, "Elementos de Calefacción Industrial," 2024. [Online]. Available: <https://www.wattco.com/es>
- [2] Aquapower, "Temperature; Technical Drawings - AquaPower AQM 2-1 Operation And Installation," 2024. [Online]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/1213569/Aquapower-Aqm-2-1.html>
- [3] Manuals+, "Manual del usuario del calentador de agua eléctrico Rheem," 2024. [Online]. Available: <https://es.manuals.plus/rheem/rheem-electric-water-heater-manual-pdf>
- [4] S. F. Ahmed *et al.*, "Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 25, 2021, Art. no. 100981. doi: 10.1016/j.tsep.2021.100981.
- [5] V. E. Márquez-Baños, J. J. Valencia-López, O. García-Aranda, and C. Heard, "Determinación computacional del coeficiente de transferencia de calor en calentadores eléctricos de flujo continuo, mediante dinámica de fluidos computacional," *Información Tecnológica*, vol. 27, no. 5, pp. 151–162, 2016, doi: 10.4067/S0718-07642016000500017.
- [6] Z. Paul and P.-M. Masukume, "Efficiency optimization in solar water heaters: A comparative CFD study of design configurations," *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, vol. 2, no. 4, 2023, doi: 10.56578/peet020405.
- [7] A. Parsaei and K. Goudarzi, "Numerical investigation of the performance improvement of instantaneous gas water heater by introducing new geometries for the heat exchanger," *Journal of Building Engineering*, vol. 89, 2024, Art. no. 109275, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109275>.
- [8] COMSOL, *Introduction to the CFD Module*, COMSOL Inc., 2023. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.cfd/IntroductionToCFDModule.pdf>
- [9] J. Claycomb, *Mathematical methods for physics: using maple & matlab*, 1st ed. Dulles, VA, USA: Mercury Learning & Information, 2018.
- [10] S. P. Suresha, G. J. Reddy, and H. Basha, "Turbulent low-Reynolds-number k- ϵ model effect on buoyancy-driven free convection flow past a vertical cylinder," *Indian Journal of Physics*, vol. 98, no. 2, pp. 659–677, Feb. 2024, doi: 10.1007/s12648-023-02797-7.
- [11] D. O. A. Cruz and F. T. Pinho, "Turbulent pipe flow predictions with a low Reynolds number k- ϵ model for drag reducing fluids," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 114, no. 2–3, pp. 109–148, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0377-0257(03)00119-8.
- [12] M. T. Schobeiri, *Fluid mechanics for engineers: A graduate textbook*. Berlin, Germany: Springer, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-11594-3.
- [13] COMSOL, *Heat Transfer Module User's Guide*, COMSOL Inc., 2023. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>
- [14] Z. Chai and T. S. Zhao, "Lattice Boltzmann model for the convection-diffusion equation," *Physical Review E*, vol. 87, no. 6, Jun. 2013, Art. no. 063309, doi: 10.1103/PhysRevE.87.063309.

- [15] COMSOL, *Material Library User's Guide*, COMSOL Inc., 2023. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.matlib/MaterialLibraryUsersGuide.pdf>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA ChatGPT. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.