






Numerical evaluation of heat transfer parameters in shell and tube exchangers using water-based TiO₂ nanoparticles

Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque, Magister¹ , Leaynery Alexander Narvaez Ramos, Estudiante² , Williams Marino Vila Lujan, Estudiante³ , Dylan Sebastián Rodríguez Sánchez, Estudiante⁴ , Luis Fernando Junior Saldaña Bernuy, Magister⁵ 

¹César Vallejo University, UCV Campus Chimbote, Perú, rchucuya@ucv.edu.pe






^{2,3,4}National University of Santa, Perú, 202011035@uns.edu.pe, 202011050@uns.edu.pe, 202011049@uns.edu.pe

³Paulista State University “Júlio De Mesquita Filho”, Brasil, luis.bernuy@unesp.br

Abstract—The objective of this research is to evaluate, through a numerical simulation, the heat transfer parameters using a mixture of water and 5% nanoparticle (TiO₂) as hot fluid in a tube and shell type heat exchanger. For this, the thermal equipment was designed with 13 tubes with internal and external diameters of 0.004 and 0.006 m respectively, shell diameter 0.05 m, one passage through the tubes and one passage through the shell and with 5 deflectors. The material of the tubes is copper and the shell is steel, the working fluids used in the research are water as cold fluid (tube side) and 5% TiO₂ nanoparticle mixture as hot fluid (shell side). It was obtained that the exit temperatures for increasing the hot flow of 0.0208 kg/s, 0.0250 kg/s and 0.0375 kg/s, maintaining the cold fluid constant, the temperatures vary between 2.5% and 4.4% for the cold flow and between 5% and 10% for hot flow. Regarding the velocity field, a uniform behavior was observed between the baffles, that is, it is not affected by the fluid flow in the heat exchanger, which is an indicator that the design is efficient. This conclusion is reinforced with the uniform pressure field in the inside of the shell. The heat transfer parameters evaluated were the heat flux increases and this due to the presence of the nanoparticle in the order of 17.6%, the convective coefficient on the side of the tubes increased by 1.2% and a decrease in the overall heat transfer coefficient. heat transfer which decreases by 37.8%.

Keywords – nanoparticle, heat exchanger, convective coefficient and global heat transfer coefficient

Evaluación numérica de los parámetros de transferencia de calor en intercambiadores de tubo y coraza utilizando nanopartículas TiO_2 en base de agua.

Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque, Magister¹, Leaynery Alexander Narvaez Ramos, Estudiante², Williams Marino Vila Lujan, Estudiante³, Dylan Sebastián Rodríguez Sánchez, Estudiante⁴, Luis Fernando Junior Saldaña Bernuy, Magister⁵

¹Universidad César Vallejo, UCV Campus Chimbote, Perú, rchucuya@ucv.edu.pe

^{2,3,4}Universidad Nacional del Santa, Perú, 202011035@uns.edu.pe, 202011050@uns.edu.pe, 202011049@uns.edu.pe

³Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Brasil, luis.bernuy@unesp.br

Resumen – La presente investigación tiene por objetivo evaluar mediante una simulación numérica los parámetros de transferencia de calor utilizando como fluido caliente una mezcla de agua y nanopartícula (TiO_2) al 5% en un intercambiador de calor tipo tubo y coraza. Para ello se diseñó el equipo térmico con 13 tubos de diámetros internos y externos son 0.004 y 0.006 m respectivamente, diámetro de la coraza 0.05 m, un paso por los tubos y un paso por la coraza y con 5 deflectores. El material de los tubos es de cobre y la coraza de acero, los fluidos de trabajo utilizados en la investigación son agua como fluido frío (lado de los tubos) y mezcla de nanopartícula TiO_2 a 5% como fluido caliente (lado de la coraza). Se obtuvo que las temperaturas de salida para incremento de flujo caliente de 0.0208 kg/s, 0.0250 kg/s y 0.0375 kg/s manteniendo el fluido frío constante, las temperaturas varían entre 2.5% y 4.4% para el flujo frío y entre 5% y 10% para el flujo caliente. Sobre el campo de velocidad se observó un comportamiento entre los baffles uniforme es decir no se ve afectado por el flujo del fluido en el intercambiador de calor el cual es un indicador que el diseño eficiente, esta conclusión es reforzada con el campo de presión uniforme en el interior de la coraza. Los parámetros de transferencia de calor evaluados fueron la el flujo de calor se incrementa y esto debido a la presencia de la nanopartícula en la orden de 17.6%, el coeficiente convectivo del lado de los tubos aumento en 1.2% y una disminución del coeficiente global de transferencia de calor el cual disminuye en 37.8%.

Palabras claves – nanopartícula, intercambiador de calor, coeficiente convectivo y coeficiente global de transferencia de calor

I. INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos fósiles, tales como petróleo, gas natural y carbón, representan actualmente el 83% de la demanda mundial de energía. Se proyecta un incremento en su consumo en los años venideros, evidenciado por estimaciones que indican un aumento del 15% en la demanda energética global para el año 2050 [1].

La investigación en tecnologías emergentes se orienta a maximizar la eficiencia de los recursos y minimizar las pérdidas

energéticas. Los intercambiadores de calor, esenciales en los procesos de transmisión y conversión de energía, emergen como un área de investigación prometedora [2].

A nivel industrial, se realiza un análisis exhaustivo de los fenómenos de transferencia de calor debido a su impacto directo en las operaciones técnicas, económicas y ambientales. Este enfoque ha motivado una serie de investigaciones destinadas a optimizar estos procesos, buscando mejorar su eficiencia con el fin de reducir costos operativos y emisiones. Los intercambiadores de calor son dispositivos diseñados para transferir energía térmica de un fluido a otro sin mezclarlos, permiten aprovechar la transferencia de calor con el fin de mantener temperaturas adecuadas en diversos procesos y aplicaciones, tales como; Producción de Energía, procesamiento químico, calentadores, frigoríficos, radiadores, etc. Es por ello que desempeñan un papel crucial tanto a nivel industrial como en la sociedad en general.

En el ámbito industrial, estos dispositivos son fundamentales para la eficiencia de numerosos procesos, contribuyendo significativamente a la optimización de la transferencia de energía térmica. Permiten el control preciso de las temperaturas, mejoran la eficiencia operativa y reducen los costos asociados. A nivel social, su impacto se traduce en productos y servicios más eficientes y sostenibles, lo que influye directamente en la vida cotidiana.

Desde la generación de energía hasta la producción de bienes de consumo, los intercambiadores de calor son pilares esenciales para el progreso industrial y el bienestar general de la sociedad [3].

La necesidad de optimizar la transferencia de calor en los costos de producción ha impulsado la investigación de nuevos fluidos con propiedades mejoradas, ya que los fluidos convencionales, como agua, aceite o etilenglicol, presentan limitaciones en su eficiencia [4]. Para superar esta limitación y optimizar la transferencia de calor, se recurre a la introducción de nanopartículas en el fluido, creando lo que se conoce como nanofluido [5]. Las propiedades térmicas únicas de las nanopartículas mejoran la capacidad de transferencia de energía

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

térmica del fluido resultante [6]. Según estudios de [7], [8], los nanofluidos emergen como solución al ofrecer alta estabilidad de suspensión y mayor capacidad de intercambio térmico incluso en concentraciones bajas.

Dada la innovación de los nanofluidos y sus propiedades mejoradas, se ha generado un considerable interés académico, posicionándolos como elementos centrales en futuras tecnologías de gestión térmica [9]. Se anticipa que los nanofluidos contribuirán a una transferencia de calor más eficiente, satisfaciendo la creciente demanda de ahorro energético [10]. Esta eficiencia no solo implica beneficios energéticos y económicos, sino también ventajas técnicas, permitiendo la reducción de tamaño y peso en los intercambiadores de calor [11].

Los resultados obtenidos con el uso de nanofluidos han sido fructíferos hasta el momento. [12] llevaron a cabo una investigación numérica con el propósito de analizar los coeficientes convectivos y globales de transferencia de calor en un intercambiador de calor de tipo casco y tubos, utilizando nanofluidos de Al_2O_3 , con un diámetro promedio de 25 nm, y de TiO_2 , con un diámetro promedio de 10 nm. Según los informes, para un número de Reynolds de 9.000 y concentraciones de 0,3%, 0,5% y 0,75%, se observó que los coeficientes convectivos del nanofluido de Al_2O_3 superaron significativamente a los de agua en un 28,1%, 35,82% y 41,79%, respectivamente. Asimismo, los coeficientes convectivos del nanofluido de TiO_2 superaron a los de agua en un 27,27%, 37,5% y 34,09%. Estos incrementos impactaron positivamente en los coeficientes globales de transferencia de calor, registrando aumentos del 27,26%, 34,48% y 52,21% con el nanofluido de Al_2O_3 , y del 24,27%, 31,98% y 31,02% con el nanofluido de TiO_2 .

Asimismo, [13] llevaron a cabo una investigación numérica para analizar el rendimiento térmico de un intercambiador de calor de tubo y coraza. En este análisis, emplearon tanto agua como nanopartículas de Al_2O_3 en concentraciones de 5,0%, 10,0%, 15,0% y 20,0%. Según los resultados, estos niveles de concentración produjeron un aumento del coeficiente de transferencia de calor por convección del 31,29%, 45,53%, 53,65% y 78,77%, respectivamente. Por otro lado, [14] llevaron a cabo una evaluación numérica de la convección forzada en microcanales de sección rectangular utilizando nanopartículas de Al_2O_3 en concentraciones de 0,1%, 1,0%, 3,0% y 4,0%. Los resultados obtenidos indicaron que el nanofluido cumplió de manera efectiva su función de enfriamiento, evidenciando un aumento en el coeficiente convectivo del 2,22%, 4,17%, 6,94% y 15,55%, respectivamente.

[15] presentaron un estudio que tuvo como propósito examinar el impacto de los nanofluidos en las propiedades de transferencia de calor en un intercambiador de calor de tipo casco y tubos. Los autores evaluaron cuatro tipos de nanopartículas en concentraciones del 0,5%, 1,0%, 1,5% y 2,0%, destacándose Al_2O_3 y TiO_2 por sus resultados superiores. Según los autores, el nanofluido de Al_2O_3 incrementó el coeficiente global de transferencia de calor en un 6,85%,

11,57%, 17,48% y 20,04%, mientras que el nanofluido de TiO_2 aumentó en un 6,11%, 12,96%, 17,09% y 33,83%.

Es notable destacar que los resultados obtenidos subrayan la relevancia de la implementación de nanofluidos en calidad de fluidos refrigerantes en intercambiadores de calor. La elección de examinar un intercambiador de calor del tipo casco y tubos no solo se limita a su disponibilidad, sino también a su aplicabilidad. Según lo señalado por [16], este tipo de intercambiador es el más predominante en comparación con otras variantes, principalmente debido a su estructura estandarizada, desempeño y eficacia superior, lo que lo hace apto para diversas aplicaciones [17]. Este estudio se centra en analizar el impacto de un nanofluido creado mediante la introducción de nanopartículas de óxido de aluminio (TiO_2) en agua. Este tipo de nanofluido, ampliamente estudiado, se presenta como una opción prometedora en intercambiadores de calor para soluciones energéticas, ya que equilibra eficazmente costos accesibles con resultados altamente positivos [18].

En el contexto de la creciente importancia de optimizar la eficiencia en los sistemas de transferencia de calor, se ha generado un interés significativo en la aplicación de nanofluidos en intercambiadores de calor. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo realizar en una evaluación numérica de los parámetros de transferencia de calor en intercambiadores tubo y coraza, centrándose específicamente en la utilización de nanopartículas de TiO_2 en base de agua. Los objetivos primordiales de esta investigación se centran en esclarecer las posibles mejoras en eficiencia térmica y transferencia de calor que podrían surgir de la introducción de nanofluidos en intercambiadores tubo y coraza. La exploración de estas mejoras tiene el potencial de ofrecer soluciones innovadoras para la gestión térmica, utilizando un software computacional CFD (Computational Fluid Dynamics), se evalúa las variables termodinámicas más relevantes en su proceso; Temperatura, presión y velocidad. Contribuyendo así al desarrollo continuo de tecnologías avanzadas en transferencia de calor.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este informe proporciona una descripción detallada de los enfoques y procedimientos empleados, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva bajo la metodología de Kern para el diseño y dimensionamiento del intercambiador de calor de tipo tubo y coraza.

2.1. Parámetros geométricos

Los parámetros geométricos del intercambiador de calor son mostrados en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

	PARAMETRO GEOMETRICO	CANTIDAD	UNIDAD
A_s	Área de flujo transversal	0.072	m^2
A_t	Área de un tubo	5.6548×10^{-3}	m^2
d_e	Diámetro externo del tubo	0.006	m
d_i	Diámetro interno del tubo	0.004	m
L	Longitud del tubo	0.3	m
N_t	Número de tubos	13	
D_b	Diámetro del haz de tubos	0.03387	m
C	Clarencia diametral (holgura)	0.0083387	m
D_s	Diámetro de la concha	0.0422088	m
D_e	Diámetro externo de la coraza	0.05	m
D_i	Diámetro interno de la coraza	0.044	m
A_{tubo}	Área de paso de un tubo	1.25664×10^{-5}	m^2
IB	Espaciamento de los deflectores	0.05	m
B	Corte del deflector	0.011	m
N_{df}	Número de deflectores	5	
A_c	Área perpendicular al flujo	0.0044	m^2
P_t	Distancia entre centros de tubos	0.0075	m
d_{eq}	Diámetro equivalente	0.0042603	m

2.2. Simulación

El diseño del intercambiador realizado en el programa SolidWorks se muestra en la Fig. 1.

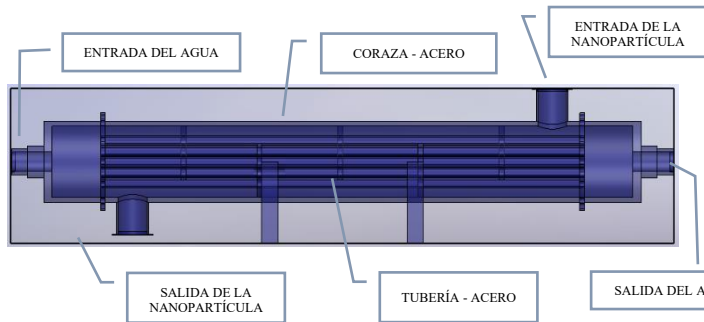


Fig. 1. Proyección de entrada y salida de ambos fluidos y material del intercambiador de calor de tubo y coraza.

2.3. Criterio de iteraciones con las condiciones iniciales

Para realizar la evaluación numérica se consideraron los datos mostrados en la Tabla II.

TABLA II
CONDICIONES INICIALES

Parámetro	Especificaciones de la nanopartícula Óxido de titanio
Símbolo químico	TiO_2
Morfología	Esférico
Apariencia	Polvo blanco
Pureza	99.5 %
Tamaño medio de grano, nm	20-36.5 nm
Densidad	4010 kg/m^3
Calor específico del fluido	$690 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$
Conductividad térmica del fluido	$8.7 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
Olor	Inodoro
Punto de inflamabilidad	No inflamable
Grado de peligro	No tóxico

Las propiedades del fluido y de las nanopartículas se muestra en la Tabla III.

TABLA III
PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Propiedades	H_2O	TiO_2
$\rho (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	998.2	4250
$c_p (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	4182	686.2
$K (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.6	80.2
$\mu (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0001	-

El resultado del proceso de convergencia de las iteraciones se muestra en la Fig. 2.

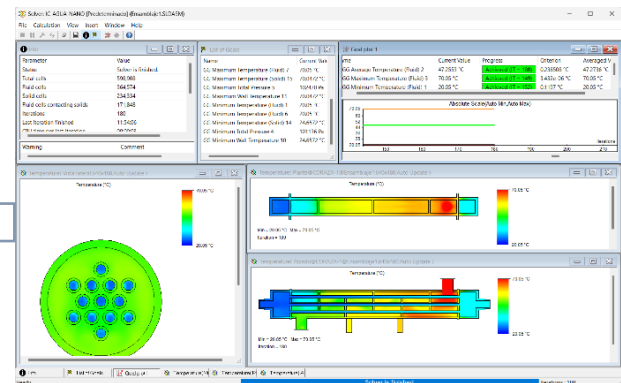


Fig. 2. Iteraciones de convergencia

Las Fig. 2, 3, y 4 revelan la interfaz extraída del programa SolidWorks.

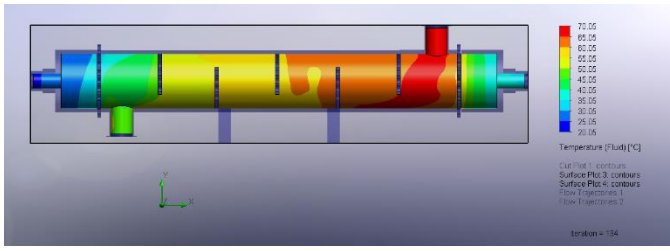


Fig. 3. Comportamiento de temperatura en la coraza

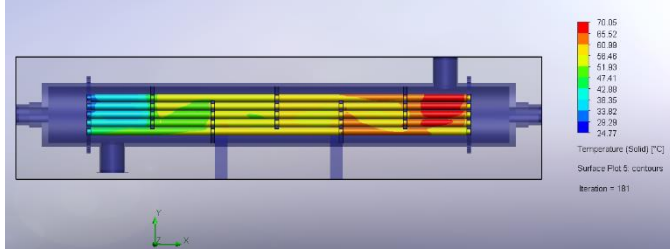
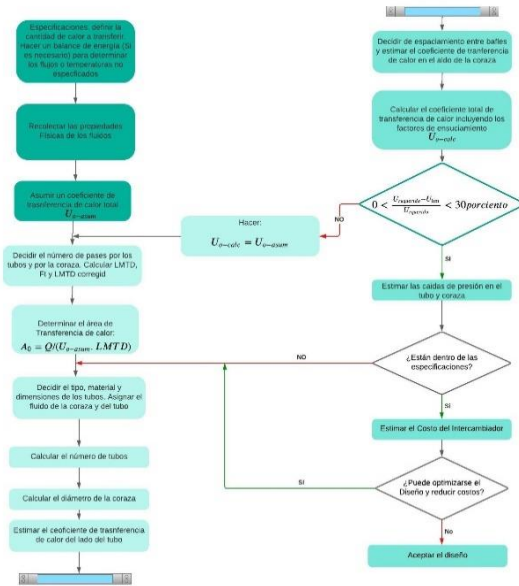


Fig. 4. Comportamiento de temperatura en los tubos



2.4.1. Transferencia de calor

Cálculo de calor (Q, kW):

$$Q_c = V_c \rho_c C_{pc} (T_{sc} - T_{ec}) \quad (1)$$

Temperatura media logarítmica (LMTD, K):

$$LMTD = \frac{(T_{ec} - T_{sf}) - (T_{sc} - T_{ef})}{\ln \left(\frac{T_{ec} - T_{sf}}{T_{sc} - T_{ef}} \right)} \quad (2)$$

Cálculo de los factores R y P:

$$R = \frac{T_{ec} - T_{sc}}{T_{sf} - T_{ef}} \quad (3)$$

$$P = \frac{T_{sf} - T_{ef}}{T_{ec} - T_{ef}} \quad (4)$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U, kW/m²K)

$$U = \frac{Q}{LMTD * F * A_s} \quad (5)$$

Área de un tubo (A_t, m²):

$$A_t = \pi d_e L \quad (6)$$

Número de tubos (N_t):

$$N_t = \frac{A_s}{A_t} \quad (7)$$

La elección del arreglo y la distancia entre los tubos es un aspecto crucial en el diseño, y se opta por seleccionar entre un arreglo triangular o cuadrado, cada uno con parámetros específicos representados por K y n. Estos valores están detallados en la Tabla IV para proporcionar una referencia clara en la toma de decisiones en el diseño del sistema.

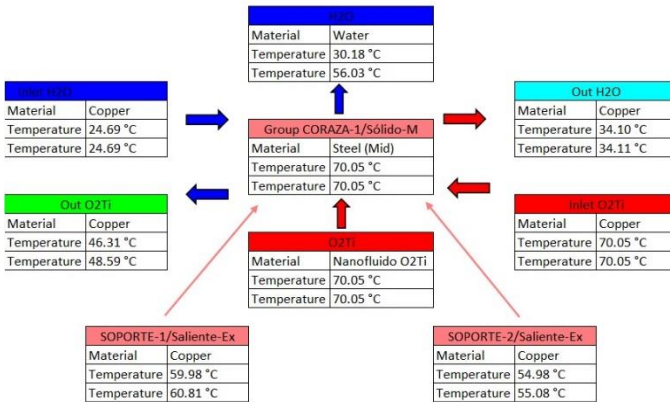


Fig. 5. Diagrama de componentes y parámetros característicos de temperatura

2.4. Formulación matemática

A partir de los parámetros de entrada establecidos en los apartados 2.1, 2.2 y 2.3, se seleccionarán las ecuaciones y modelos teóricos adecuados para caracterizar el Intercambiador de calor de tubo y coraza según la metodología de Kern. Dicha metodología sugiere una serie de pasos que se muestra a continuación en el siguiente esquema.

TABLA IV
ELECCIÓN DE UN ARREGLO Y NUMERO DE PASES

Número de pases	Arreglo Triangular de los tubos	
	$S_t = 1,25 d_o$	
	K_1	n_1
1	0,319	2,142
2	0,249	2,207
4	0,175	2,285
6	0,0743	2,499
8	0,0365	2,675

Diámetro del haz de tubos (D_b , m):

$$D_b = d_e \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} \quad (8)$$

La holgura se extrae a partir de la Fig. 6.

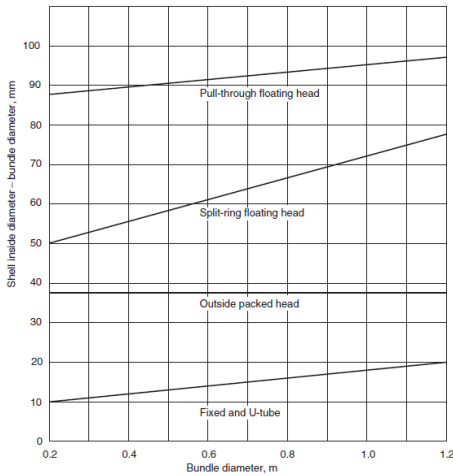


Fig. 6. Holgura o clarancia entre la corza y el haz de tubos
Nota. Procesos de Transferencia de Calor. Donald Q. Kern

Diámetro de la corza (D_s , m):

$$D_s = D_b + C \quad (9)$$

Área de paso de un tubo (A_{tubo} , m²):

$$A_{tubo} = \frac{\pi(D_i)^2}{4} \quad (10)$$

Cálculo de la velocidad lineal del fluido frío (v_f , m/s):

$$v_f = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f A_{tubo} N_t} \quad (11)$$

Número de Reynolds del fluido que circula por el interior de los tubos (Re_f):

$$Re_f = \frac{\rho_f \cdot v_f \cdot d_i}{\mu_f} \quad (12)$$

El coeficiente adimensional j_h para el fluido frío se extrae de la Fig. 7.

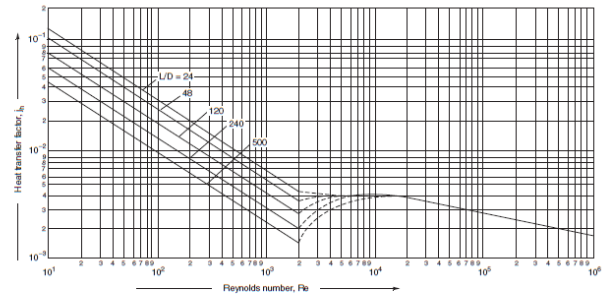


Fig. 7. Gráfica para hallar j_h con el número de Reynolds
Nota. Procesos de Transferencia de Calor. Donald Q. Kern

Determinación de la temperatura de la pared del tubo (T_p , K):

$$T_p = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{ec} + T_{sc}}{2} + \frac{T_{ef} + T_{sf}}{2} \right) \quad (13)$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el lado del tubo (h_i , kW/m²K):

$$h_i = (j_h Re_f P_{rf}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{fw}} \right)^{0.14}) \frac{k_f}{d_i} \quad (14)$$

Elección del espaciamiento de los deflectores (IB):

$$IB = 0.05 \text{ a } 0.5 \text{ m}$$

Corte del deflector (B):

$$B = \frac{D_i}{z} \quad (15)$$

z - es un valor que se puede tomar entre 3 y 9

Número de deflectores (N_{df}):

$$N_{df} = \left(\frac{L}{IB} \right) - 1 \quad (16)$$

Área perpendicular al flujo (A_c , m²):

$$A_c = \frac{D_i IB (P_t - d_e)}{P_t} \quad (17)$$

Velocidad del fluido por el lado de la corza (G_{Sc} , m/s):

$$G_{Sc} = \frac{\dot{m}_c}{A_c} \quad (18)$$

Velocidad lineal del fluido que circula por la corza (v_c , m/s):

$$v_c = \frac{G_{Sc}}{\rho_c} \quad (19)$$

Diámetro equivalente (d_{eq}) para distribución triangular equilátera:

$$d_{eq} = \frac{1.10}{d_e} (P_t^2 - 0.917 \cdot d_e^2) \quad (20)$$

Diámetro equivalente para distribución cuadrada equilátera:

$$d_{eq} = \frac{1.27}{d_e} (P_t^2 - 0.785 \cdot d_e^2) \quad (21)$$

Número de Reynolds por el lado corza (Re_c):

$$Re_c = \frac{\rho_c \cdot v_c \cdot d_{eq}}{\mu_c} \quad (22)$$

Número de Prandtl por el lado de la coraza (P_{rc}):

$$P_{rc} = \frac{C_{pc} \cdot \mu_c}{k_c} \quad (23)$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el lado del tubo (h_s , kW/m²K):

$$h_s = (j_h Re_c P_{rc}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{cw}} \right)^{0.14}) \frac{k_c}{d_{eq}} \quad (24)$$

El factor j_h para fluido caliente se obtiene de la *Figura 7* anteriormente mostrada.

Cálculo el coeficiente total de transferencia de calor incluyendo los coeficientes de ensuciamiento o incrustación (U , kW/m²K):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_{od}} + \frac{d_e \cdot \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2 \cdot k_t} + \frac{d_e}{d_i} \cdot \frac{1}{h_{id}} + \frac{d_e}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i} \quad (25)$$

2.4.2. MODELO NUMÉRICO

Para el proceso de simulación, el programa necesita resolver las ecuaciones de conservación.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{du_i}{dx_i} = 0 \quad (27)$$

Ecuación de momento:

$$\frac{du_i u_j}{dx_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((v + v_{turb}) \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} \right) \right) \quad (28)$$

Ecuación de energía:

$$\frac{du_i T}{dx_i} = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_{turb}} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (29)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de los fluidos en el interior del intercambiador de muestra en la Fig. 8.

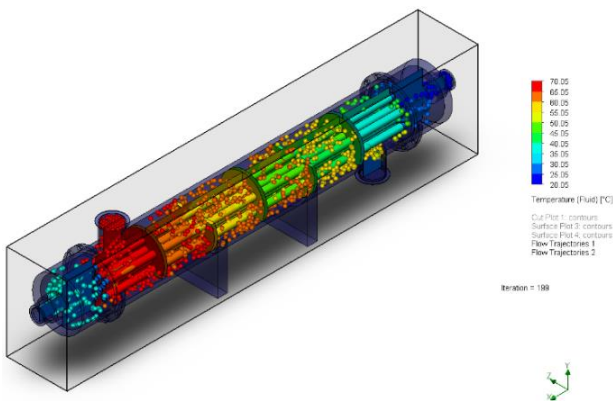


Fig. 8. Comportamiento en el interior del intercambiador de calor de tubo y coraza con respecto a su temperatura (°C)

El comportamiento térmico en el interior de un intercambiador de calor de tubo y coraza en relación con la temperatura (°C) es esencial para comprender su eficiencia y operación. Este tipo de intercambiador facilita la transferencia de calor entre dos fluidos: uno que circula a través de los tubos (fluido frío) y otro que se desplaza por el espacio entre los tubos y la carcasa (fluido caliente). La temperatura dentro del intercambiador experimenta variaciones a lo largo de su estructura, influida por diversos factores como la velocidad de flujo de los fluidos, la conductividad térmica de los materiales empleados, el diseño específico del intercambiador y las condiciones operativas del sistema.

3.1. Comportamiento de Temperatura

El comportamiento de temperatura para los 3 regímenes de flujo evaluados, se muestra en las Fig. 9., 10 y 11.

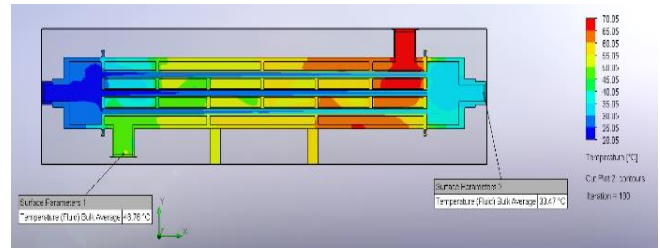


Fig. 9. Comportamiento de la temperatura (°C) con un flujo de 0.02083kg/s

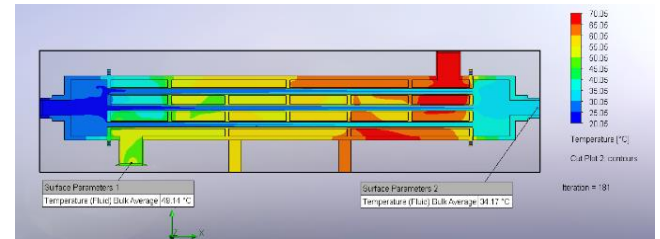


Fig. 10. Comportamiento de la temperatura (°C) con un flujo de 0.025 kg/s

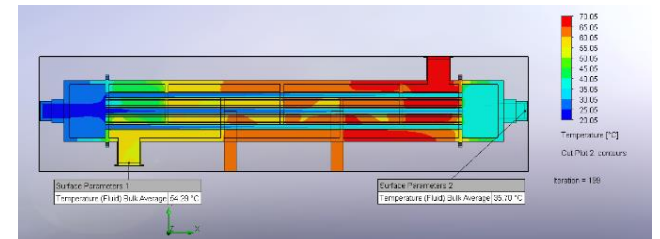


Fig. 11. Comportamiento de la temperatura (°C) con un flujo de 0.0375 kg/s

A medida que incrementamos la velocidad de flujo de las nanopartículas en el espacio de la coraza en un intercambiador de calor, se evidencia un notorio incremento en la eficiencia de la transferencia de calor, respaldado por investigaciones previas como señala el estudio de Smith et al. [19]. Este fenómeno se traduce en un aumento significativo de la temperatura del fluido que atraviesa el interior de los tubos al alcanzar la salida del intercambiador. La manipulación controlada del flujo de nanopartículas emerge como un factor esencial para optimizar

la transferencia de calor en aplicaciones de intercambiadores de calor avanzados, enfatizando la relevancia de estrategias que permitan una gestión precisa de las nanopartículas en el diseño y operación de estos sistemas.

3.2. Comportamiento de Velocidad

El comportamiento de temperatura para los 3 regímenes de flujo evaluados, se muestra en las Fig. 12., 13 y 14.

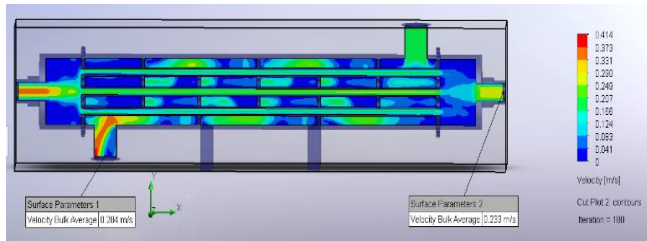


Fig. 12. Comportamiento de la velocidad (m/s) con un flujo de 0.02083 kg/s.

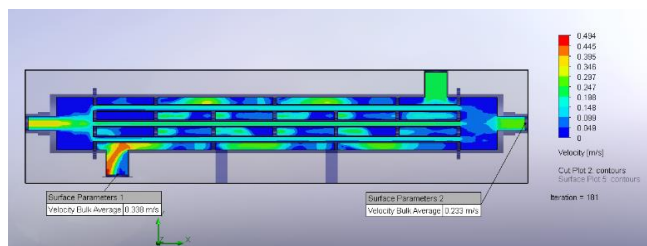


Fig. 13. Comportamiento de la velocidad (m/s) con un flujo de 0.025 kg/s.

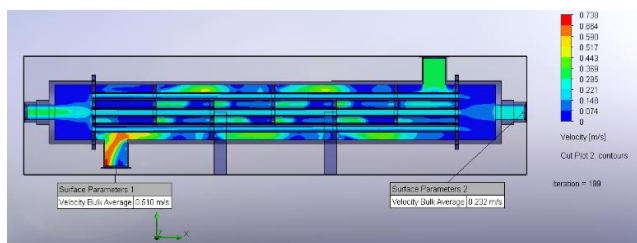


Fig. 14. Comportamiento de la velocidad (m/s) con un flujo de 0.0375 kg/s

A pesar de la variación en la concentración del flujo de nanopartículas, se puede constatar que el comportamiento de la velocidad en el interior de la coraza no se ve afectado por el flujo del fluido en el intercambiador de calor. Este resultado indica una cierta independencia entre la concentración de nanopartículas y la dinámica del flujo, lo cual puede ser atribuido a la naturaleza de las interacciones a nivel molecular y a la distribución homogénea de las nanopartículas en el sistema. Este fenómeno, respaldado por estudios como el de Chen et al. [20], subraya la importancia de comprender las complejas interrelaciones entre la concentración de nanopartículas y las características del flujo para un diseño eficiente de intercambiadores de calor.

3.3. Comportamiento de Presión

El comportamiento de presión se muestra en la Fig. 15.

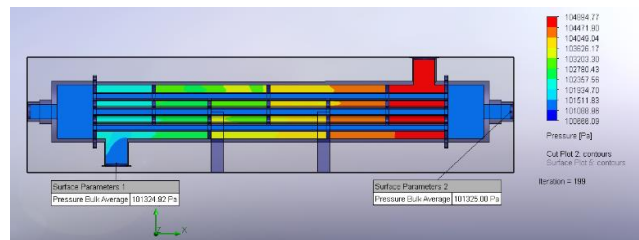


Fig. 15. Comportamiento de la presión (Pa) con un flujo de 0.0375 kg/s.

En el análisis del intercambiador de calor, se observa una caída de presión insignificante en el interior de la coraza y los tubos, a pesar de la variación en la concentración del flujo de nanopartículas. Este resultado sugiere que la presencia y variación de la concentración de nanopartículas no ejercen un impacto significativo en la pérdida de presión en el sistema. Este fenómeno puede estar vinculado a la distribución uniforme de las nanopartículas y su interacción limitada con el flujo del fluido, lo cual concuerda con hallazgos previos, como los de Li et al. [21]. La mínima caída de presión observada destaca la eficiencia y viabilidad de la configuración del intercambiador de calor en términos de resistencia al flujo.

A continuación, se presenta una tabla resumen que condensa los valores derivados de la simulación, los cuales han sido obtenidos mediante un análisis detallado del comportamiento del flujo. Se destaca que conforme se incrementa la concentración de nanopartículas, se observa una influencia notable en los parámetros térmicos en sus respectivos valores de salida. Este efecto se evidencia especialmente en magnitudes como la transferencia de calor, la conductividad térmica y el coeficiente de transferencia global del sistema. La interrelación entre la concentración de nanopartículas y estos parámetros térmicos subraya la importancia de considerar cuidadosamente el impacto de la concentración en el rendimiento térmico del sistema.

TABLA V
RESUMEN DE PARÁMETROS TÉRMICOS PARA CADA CASO
DE EVALUACIÓN

Flujo del agua (kg/s)	Flujo del nanofluido (kg/s)	Temperatura del agua (°C)		Temperatura del nanofluido (°C)		PARÁMETROS TÉRMICOS		
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Q (kW)	h_s (W/m ² °C)	U (W/m ² °C)
0.02083	0.0208	20.04	33.47	70.04	46.76	1.169	1155.00	1106.00
	0.0250	20.04	34.32	70.04	49.10	1.243	1160.00	1005.00
	0.0375	20.04	35.83	70.04	54.06	1.375	1169.00	802.90

IV. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño geométrico del intercambiador de calor tipo tubo y coraza, para 13 tubos cuyos diámetros internos y externos son 0.004 y 0.006 m respectivamente, además el diámetro de la coraza 0.05 m, el diseño fue para un paso por los tubos y coraza, con 5 deflectores. El material de los tubos es de cobre y la coraza de acero, los fluidos de trabajo utilizados en la investigación son agua como fluido frío (lado de los tubos) y mezcla de nanopartícula TiO₂ a 5% como fluido caliente (lado de la coraza).

Se realizó la simulación mediante el software SolidWorks Flow Simulation a partir de la estabilidad de flujo de extrajeron los parámetros de evaluación como el campo de temperatura, los flujos ingresaron a 70.04 °C y 20.04 °C para el fluido caliente y frío respectivamente, se obtuvo las temperaturas de salida para diversos regímenes de flujo variando entre 2.5% y 4.4% para el flujo frío y entre 5% y 10% para el flujo caliente. Sobre el campo de velocidad se observó un comportamiento entre los baffles uniforme es decir no se ve afectado por el flujo del fluido en el intercambiador de calor el cual es un indicador que el diseño eficiente, esta conclusión es reforzada con el campo de presión uniforme en el interior de la coraza.

Sobre los parámetros de transferencia de calor se obtuvo que para incrementos del flujo caliente que corresponde a la mezcla de agua y nanopartícula TiO₂ al 5% la transferencia de calor se incrementa y esto debido a la presencia de la nanopartícula en la orden de 17.6%. Para el coeficiente convectivo del lado de los tubos también hay un aumento 1.2% esta tendencia al incremento de calor y subsecuente aumento del coeficiente convectivo está relacionado a una disminución del coeficiente global de transferencia de calor el cual disminuye en 37.8%.

REFERENCIAS

- [1] British Petroleum, "Statistical Review of World Energy," London, 2021.
- [2] M. Khan, M. Aziz, and A. Wijayanta, "Prediction of heat transfer enhancement of delta-wing tape inserts using artificial neural network," *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 27, 2021.
- [3] M. Habibishandiz y M. Saghir, "A critical review of heat transfer enhancement methods in the presence of porous media, nanofluids, and microorganisms," *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 30, 2022.
- [4] M. Amani *et al.*, "Latest developments in nanofluid flow and heat transfer between parallel surfaces: A critical review," *Adv Colloid Interface Sci*, v. 294, 2021.
- [5] N. Acharya, F. Mabood, and I. Badruddin, "Thermal performance of unsteady mixed convective Ag/MgO nanohybrid flow near the stagnation point domain of a spinning sphere," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 134 2022
- [6] C. Ho, K. Liu, T. Yang, S. Rashidi, y W. Yan, "Experimental study on cooling performance of water-based hybrid nanofluid with PCM and graphene nanoparticles," *Case Studies in Thermal Engineering*, v.33, 2022.
- [7] P. Murmu *et al.*, "Role of phase separation in nanocomposite indium-tin-oxide films for transparent thermoelectric applications," *Journal of Materiomics*, v. 7, p. 612–620, 2021.
- [8] R. Pourrajab, A. Noghrehabadi, and M. Behbahani, "Thermo-hydraulic performance of mesoporous silica with Cu nanoparticles in helically grooved tube," *Appl Therm Eng*, v. 185, 2021.
- [9] R. Kumar, V. Deshmukh, and R. Bharj, "Performance enhancement of photovoltaic modules by nanofluid cooling: A comprehensive review," *Int J Energy Res*, v. 44, p. 6149–6169, 2020.
- [10] M. Eltaweel and A. Abdel, "Energy and exergy analysis for stationary solar collectors using nanofluids: A review," *Int J Energy Res*, v. 45, p. 3643–3670, 2021.
- [11] A. Borode, N. Ahmed y P.Olubambi, "A review of heat transfer application of carbon-based nanofluid in heat exchangers," *Nano-Structures and Nano-Objects*, v. 20, 2019.
- [12] R. Ullah, T. Ishtiaq, and H. Mamun, "Heat transfer enhancement in shell and tube heat exchanger by using Al₂O₃/water and TiO₂/water nanofluid," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., 2019.
- [13] V. Ghazanfari, M. Imani, M. M. Shadman, Y. Amini, and F. Zahakifar, "Numerical study on the thermal performance of the shell and tube heat exchanger using twisted tubes and Al₂O₃ nanoparticles," *Progress in Nuclear Energy*, v. 155, 2023.
- [14] B. Buonomo, L. Cirillo, O. Manca, S. Nardini, and S. Tamburrino, "Numerical investigation on forced convection in rectangular cross section micro-channels with nanofluids," *J Phys Conf Ser*, v. 796, 2017.
- [15] S. Perumal, V. Venkatraman, R. Sivanraju, A. Mekonnen, S. Thanikodi, and R. Chinnappan, "Effects of nanofluids on heat transfer

- characteristics in shell and tube heat exchanger,” *Thermal Science*, v. 26, p. 835–841, 2022.
- [16] M. Hojjat, “Nanofluids as coolant in a shell and tube heat exchanger: ANN modeling and multi-objective optimization,” *Appl Math Comput*, v. 365, 2020.
- [17] R. Ferraresi, V. de Campos, G. Cicelini, W. da Silva, R. Reis, and V. Ferraresi, “Análise de Ensaios Não-Destrutivos para Inspeção de Tubos de Trocadores de Calor do Tipo Casco & Tubos: Campo Remoto (RFT) versus Sistema de Inspeção Rotativa Interna (IRIS),” *Soldagem & Inspeção*, v. 26, pp. 1–17, 2021.
- [18] A. Bhattad et al., “Studies on Evaluation of the Thermal Conductivity of Alumina Titania Hybrid Suspension Nanofluids for Enhanced Heat Transfer Applications,” *ACS Omega*, 2023.
- [19] Smith, J., et al. (2019). "Enhancing Thermal Conductivity in Heat Exchange Systems using Nanoparticles." *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, v. 7, 2019.
- [20] Chen, L., et al. "Impact of Nanoparticle Concentration on Flow Characteristics in Heat Exchangers." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996.