

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR CON ESTRUCTURA INTERNA FRACTAL A BAJAS DIFERENCIAS DE TEMPERATURA EN RÉGIMEN DE FLUJO DE TRANSICIÓN LAMINAR-TURBULENTO

Acosta Saul¹, García Ángel¹, Morales Luis¹, Rosas Israel¹, Chávez Oscar¹, Ambriz Víctor¹

¹Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Av. Tecnológico #2909
614-201-2000

*Autor correspondiente: acostasaulm@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio experimental comparativo entre un intercambiador de calor concéntrico convencional y uno modificado con una estructura interna de geometría fractal, operando bajo condiciones de flujo de transición de régimen laminar a turbulento y con bajas diferencias de temperatura. El objetivo fue evaluar el rendimiento térmico de ambos dispositivos mediante el método ε -NTU, analizando parámetros como la efectividad, el número de unidades de transferencia térmica, y su relación con el número de Reynolds. Los resultados muestran que el intercambiador fractal ofrece una mejora significativa en la transferencia de calor y efectividad térmica en comparación con el diseño tradicional para todo el rango de Reynolds. La geometría fractal demostró ser una estrategia eficiente para incrementar el desempeño térmico sin aumentar el volumen del sistema, lo que sugiere su potencial aplicación en sistemas compactos y de alta eficiencia energética.

Palabras claves: intercambiador de calor, geometría fractal, coeficiente global de transferencia de calor

ABSTRACT

This work presents a comparative experimental study between a conventional concentric heat exchanger and a modified one with a fractal geometry internal structure, operating under transitional flow conditions from laminar to turbulent regime and with low temperature differences. The objective was to evaluate the thermal performance of both devices using the ε -NTU method, analyzing parameters such as effectiveness, number of heat transfer units, and their relationship with the Reynolds number. The results show that the fractal exchanger offers a significant improvement in heat transfer and thermal effectiveness compared to the traditional design across the entire Reynolds number range. The fractal geometry proved to be an efficient strategy to increase the thermal performance without increasing the system volume, suggesting its potential application in compact and energy-efficient systems.

Keywords: heat exchanger, fractal geometry, overall heat transfer coefficient

INTRODUCCIÓN

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para facilitar la transferencia de energía térmica entre dos fluidos a diferente temperatura, sin que exista contacto directo ni mezcla

entre ellos. El principio fundamental que rige su funcionamiento es que el calor fluye naturalmente del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura, hasta alcanzar un equilibrio térmico [1]. Este tipo de equipos posee una gran variedad de aplicaciones, que abarcan desde sistemas domésticos de calefacción y climatización, hasta procesos industriales de alta complejidad, como la generación de energía en plantas termoeléctricas [2].

La historia del desarrollo de los intercambiadores de calor se remonta al año 1878, cuando el alemán Albrecht Dracke registró la primera patente de un intercambiador de placas, marcando así un hito en la ingeniería térmica y sentando las bases para las innovaciones que seguirían en el diseño y la optimización de estos dispositivos [3].

A lo largo de la historia se han desarrollado diversos tipos de intercambiadores de calor, adaptados a las distintas necesidades de transferencia térmica en aplicaciones industriales y domésticas. Uno de los diseños más comunes es el intercambiador de tubos concéntricos. Este tipo de intercambiadores con una configuración de contraflujo optimiza la transferencia de calor al mantener una mayor diferencia de temperatura entre los fluidos a lo largo del recorrido. [2]

Actualmente se tienen diferentes métodos que permiten mejorar el desempeño de los intercambiadores. Entre estos, uno de los más efectivos para incrementar la transferencia de calor es el aumento del área de contacto entre los fluidos involucrados. Este enfoque pertenece a los métodos pasivos, y puede resultar en un aumento de la efectividad térmica hasta en un 305% [4]. Tal método consiste en la implementación de sistemas con aletas. Esto incrementa el área de contacto térmico y presenta una estructura más ligera, adecuada para condiciones donde el espacio y el peso son críticos, sin embargo, cabe resaltar que el incremento solo es en el líquido en contacto por ello se pueden tener aletas internas y externas [5,6,7]. Estos diseños pueden presentar varias formas, por ejemplo: recto, helicoidales o discontinuos. La implementación de estos diseños puede alterar el flujo mejorando su transferencia de calor. [8]

Benoît Mandelbrot se le considera el padre de la geometría fractal ya mostró por primera vez el concepto de “fractal” en 1970 para designar el conjunto de propiedades geométricas específicas de similitud interna e invariancia de escala [9]. Las estructuras fractales están presentes en numerosos patrones de la naturaleza, desde la organización de las células hasta la distribución de las galaxias [9,10,].

En este contexto, la geometría fractal cobra relevancia, ya que permite maximizar el área superficial sin necesidad de aumentar significativamente el volumen del sistema. A diferencia de la geometría euclidiana, las geometrías fractales ofrecen la ventaja de ampliar el área de intercambio térmico de manera eficiente [10].

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La efectividad térmica de un intercambiador de calor es un parámetro crucial en su diseño y operación, especialmente cuando se busca optimizar la transferencia de energía entre dos fluidos sin contacto directo. Actualmente, existen diferentes configuraciones geométricas que buscan mejorar este proceso, siendo necesario evaluar comparativamente su desempeño bajo condiciones controladas.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar experimentalmente la efectividad térmica a bajas diferencias de temperatura de un intercambiador concéntrico con una estructura interna de geometría fractal comparándolo con un intercambiador concéntrico tradicional operando bajo las mismas condiciones de flujo de transición de régimen laminar a régimen turbulento. Para esta evaluación, se emplea el método E -NTU, que permite calcular la efectividad térmica del sistema a partir de parámetros conocidos. Este enfoque proporciona una base sólida para comparar el rendimiento de ambos intercambiadores y analizar los beneficios de incorporar estructuras internas complejas como los fractales.

MARCO TEÓRICO

La efectividad térmica se define como la relación entre la transferencia de calor real, Q , del intercambiador y la transferencia máxima posible de la forma

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}. \quad (1)$$

Por otro lado, se tiene que el número unidades de transferencia térmica o NTU, por sus siglas en inglés *Number of heat Transfer Units*, es una medida de la capacidad de transferencia de calor del intercambiador y está dada por

$$NTU = \frac{UA_T}{C_{min}}, \quad (2)$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor, A_T el área de total del intercambiador y C_{min} es la menor de las

capacidades caloríficas fría y caliente que corresponden al producto del flujo másico, $\dot{m}$, y el calor específico, c_p , del fluido, $C_f = \dot{m}_f c_p$ para el lado frío y $C_c = \dot{m}_c c_p$ para el lado caliente.

En el análisis de intercambiadores, el flujo de calor promedio se puede evaluar mediante

$$Q_{prom} = UA_T \Delta T_{ln}. \quad (4)$$

El término ΔT_{ln} es la media logarítmica de la diferencia de temperaturas dada por

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}. \quad (5)$$

con $\Delta T_1 = T_{c2} - T_{f1}$ y $\Delta T_2 = T_{c1} - T_{f2}$.

Por otra parte, haciendo un balance de energía, el calor cedido por el fluido caliente se puede obtener mediante

$$Q_c = \dot{m}_c c_p (T_{c1} - T_{c2}). \quad (6)$$

Y el calor ganado por el fluido frío se obtiene mediante

$$Q_f = \dot{m}_f c_p (T_{f2} - T_{f1}). \quad (7)$$

Con lo anterior, el flujo de calor promedio en el intercambiador se calcula como:

$$Q_{prom} = \frac{Q_c + Q_f}{2},$$

Se tiene también que el flujo de calor depende de la velocidad del fluido dentro del intercambiador. El parámetro adimensional utilizado para caracterizar la velocidad es el número de Reynolds,

$$Re = \frac{v d_H \rho}{\mu}, \quad (8)$$

donde v es la velocidad promedio en el ducto, d_H el diámetro hidráulico, ρ es la densidad del fluido y μ su viscosidad dinámica.

METODOLOGÍA

La Figura 1 muestra un esquema del arreglo experimental utilizado. Esta configuración experimental es la misma tanto para el intercambiador concéntrico tradicional como para el modelo con estructura fractal. El fluido caliente se impulsó mediante una bomba con un caudal máximo de 0.34 L/s, mientras que el fluido frío se hizo circular con una bomba con un caudal máximo de 0.29 L/s. En la entrada de cada circuito se coloca una válvula de control manual, que permite regular el flujo de los fluidos durante cada ensayo. Para la medición de

temperaturas, se instalaron termopares tipo K en las entradas y salidas tanto del lado caliente como del frío. Esto permite registrar las temperaturas de entrada y salida del flujo caliente, T_{c1} y T_{c2} , y de entrada y salida del fluido frío., T_{f1} y T_{f2} . La Figura 2 muestra el arreglo experimental utilizado.

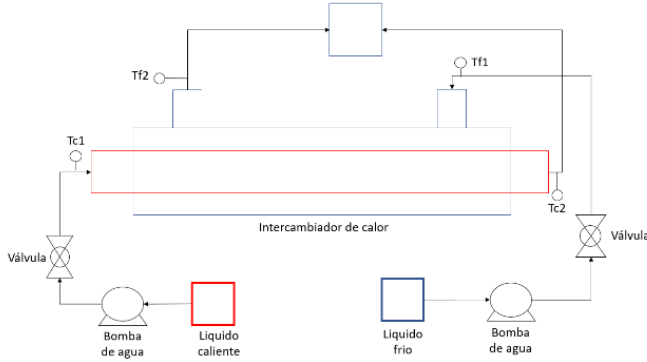


Figura 1. Diagrama del set de pruebas

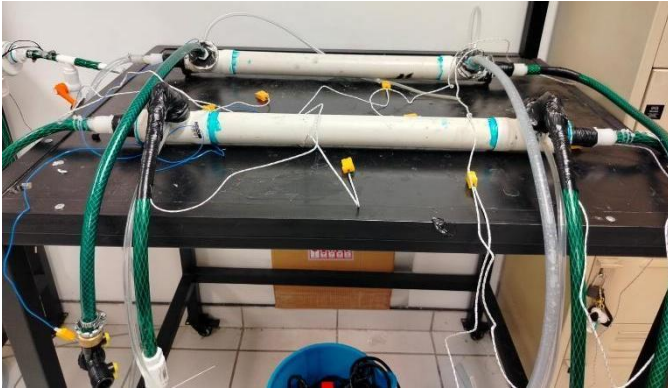


Figura 2. Arreglo experimental.

Estructura interna de los intercambiadores de calor

En la Figura 10 se presentan los perfiles de los intercambiadores evaluados: a la izquierda se muestra el intercambiador de tubos concéntricos simples y a la derecha el intercambiador con aletas de geometría fractal. Este último incorpora un perfil basado en el fractal conocido como copo de nieve de Koch en su segunda iteración [11].

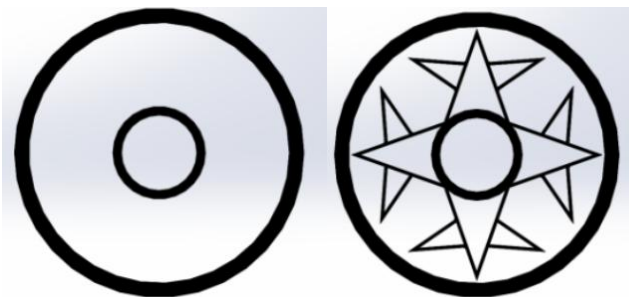


Figura 10: Sección transversal de los intercambiadores de calor

Propiedades de los fluidos

Se utilizó agua como fluido de trabajo tanto para el lado frío como para el caliente. La Figura 3 presenta las propiedades termofísicas del fluido empleado en los experimentos. Estos valores fueron considerados constantes durante el análisis y corresponden a las condiciones promedio de temperatura en las que se realizaron las pruebas.

Propiedad	Fluido frío Temp=20°C	Fluido caliente Temp=50°C
Densidad (ρ)	998 kg/m ³	988 kg/m ³
Viscosidad cinemática (μ)	0.001 m ² /s	0.00059 m ² /s
Calor específico (C_p)	4182 J/kg*°C	4181 J/kg*°C

Figura 3. Propiedades termofísicas de los fluidos

RESULTADOS

Los experimentos se realizaron variando el número de Reynolds del lado frío desde un régimen laminar de 1.9×10^3 hasta uno turbulento de 5.8×10^3 para una diferencia de temperaturas a la entrada de $T_{c1} - T_{f2} = 20$ °C. El Reynolds del lado caliente se mantuvo fijo en un régimen de transición de 3500 para todos los experimentos.

La Figura 4 muestra el calor transferido en función del número de Reynolds para ambos intercambiadores. La diferencia en el flujo de calor para cada intercambiador muestra que el intercambiador con estructura fractal presenta una capacidad de transferencia de calor considerablemente mayor en comparación con el intercambiador concéntrico convencional. Esta diferencia se incrementa conforme aumenta el número de Reynolds. Puede notarse que el flujo de calor aumenta ligeramente con el número de Reynolds para el intercambiador fractal, indicando que el desempeño mejora con el flujo mientras que para el concéntrico el valor se mantiene relativamente constante.

Esta tendencia es coherente con lo mostrado en la Figura 5, donde se representa el producto UA_T también en función del número de Reynolds. En todos los casos, el intercambiador fractal presenta valores significativamente superiores a los del intercambiador concéntrico. Dado que el calor transferido se puede calcular con la Ecuación 4, el incremento en UAT observado en el diseño fractal explica directamente el aumento en la transferencia térmica mostrado.

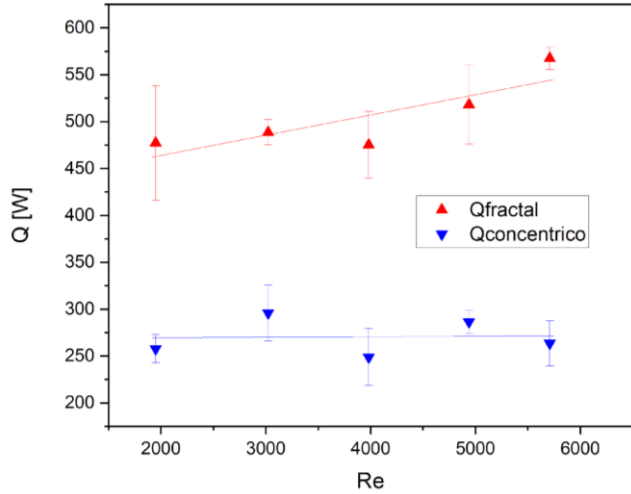


Figura 4: Gráfica del calor transferido en cada intercambiador de calor contra el número de Reynolds

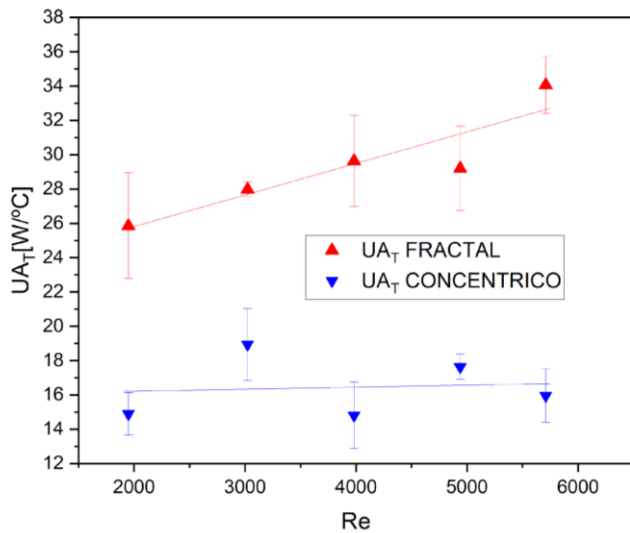


Figura 5: Gráfica de UA_T de cada intercambiador de calor contra el número de Reynolds

La Figura 6 muestra la variación de la efectividad térmica con el número de Reynolds para ambos tipos de intercambiadores de calor. Puede observarse que el intercambiador con geometría fractal presenta una mejora notable a medida que aumenta el número de Reynolds. En contraste, el intercambiador concéntrico convencional mantiene una efectividad relativamente constante, con poca sensibilidad ante el incremento del flujo. Este comportamiento sugiere que la estructura fractal favorece una convección más eficiente bajo condiciones de mayor velocidad, contribuyendo significativamente al rendimiento térmico global del sistema.

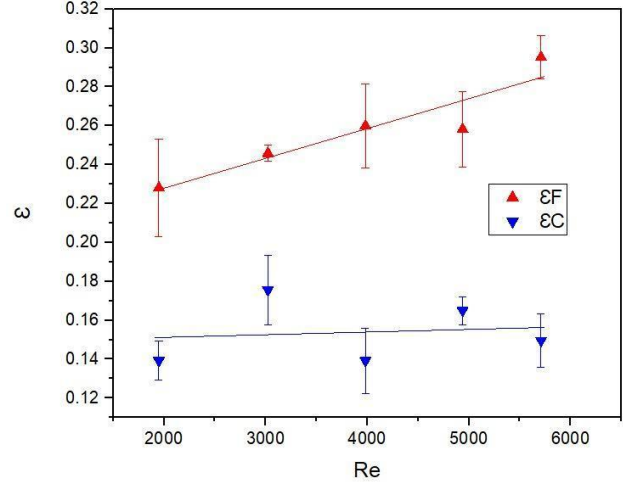


Figura 6: Efectividad contra el número de Reynolds

Por otra parte, la Figura 7 presenta la relación entre el número de unidades de transferencia térmica y el número de Reynolds para ambos intercambiadores de calor. Puede observarse que el comportamiento para las NTU de ambos intercambiadores es similar a la efectividad y el calor. Esto nuevamente pone de manifiesto el mejor desempeño de la geometría fractal.

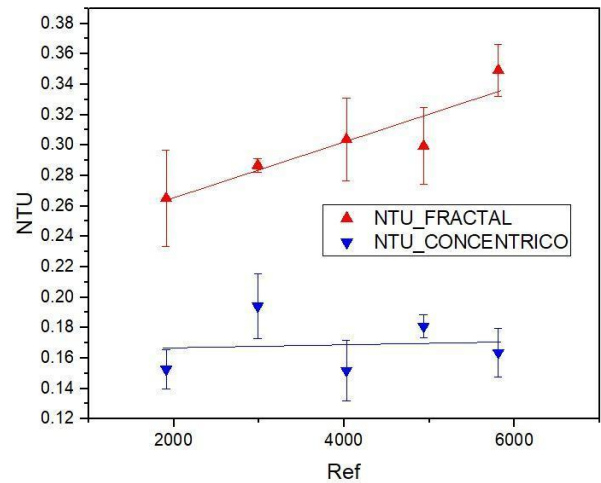


Figura 7: Gráfica de NTU contra el número de Reynolds

La Figura 8 presenta la relación entre la efectividad del intercambiador fractal y la del intercambiador concéntrico para los diferentes números de Reynolds. Esta gráfica permite visualizar de forma directa el grado de mejora proporcionado por la geometría fractal respecto al diseño tradicional. Los resultados muestran que, incluso en condiciones de flujo laminar, alrededor de $Re=2000$, el intercambiador fractal ya presenta una mejora superior al 50% en efectividad térmica. A medida que el número de Reynolds aumenta, esta ventaja se incrementa de manera gradual,

alcanzando valores cercanos al 80% en los casos donde el flujo ya es turbulento. Esta tendencia indica que el diseño fractal no solo es más eficiente en condiciones generales, sino que responde positivamente ante el incremento del régimen de flujo, manteniendo su superioridad térmica sobre el intercambiador concéntrico simple a lo largo de toda la gama analizada.

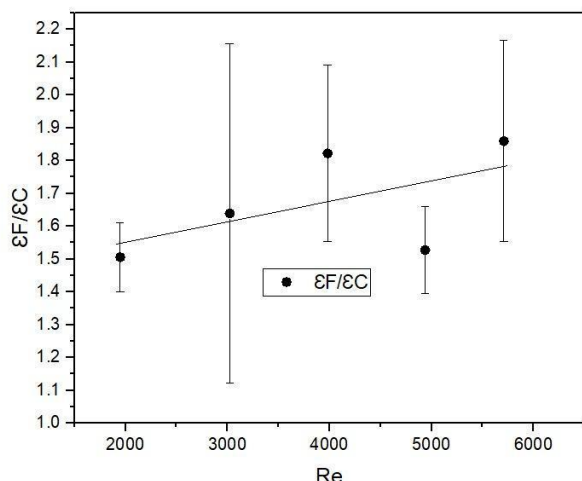


Figura 8: relación de la efectividad de los intercambiadores de calor contra el número de Reynolds

La Figura 9 muestra la gráfica ϵ -NTU para los dos intercambiadores. Puede verse que el intercambiador con geometría fractal tiene un mejor desempeño térmico alcanzado valores superiores de efectividad y unidades de transferencia térmica para los mismos Reynolds. Incluso el valor mínimo de efectividad registrado para el intercambiador fractal es superior al valor máximo alcanzado por el intercambiador concéntrico. Esta tendencia se mantiene a lo largo de toda la curva.

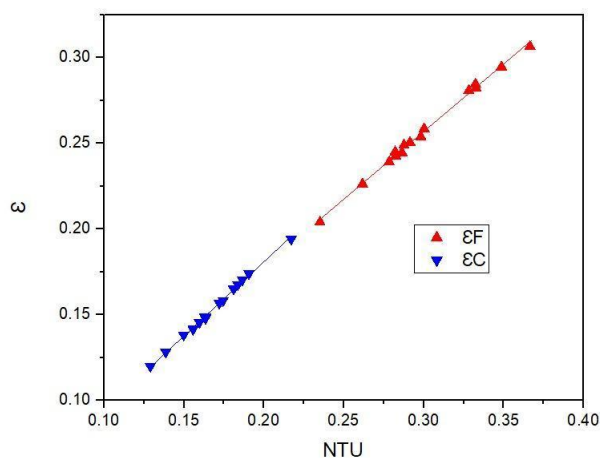


Figura 9: Gráfica de la efectividad en cada intercambiador de calor contra el NTU

CONCLUSIONES

Una vez analizados todos los resultados experimentales, se concluye que el intercambiador de calor con estructura interna fractal representa una mejora significativa respecto al diseño concéntrico convencional. La geometría fractal demostró un mayor rendimiento en todas las pruebas evaluadas, con un comportamiento progresivamente más eficiente conforme aumentó el número de Reynolds. Esta tendencia fue evidente tanto en la transferencia de calor como en el incremento del coeficiente global de transferencia térmica.

El análisis de la efectividad térmica en función del número de Reynolds mostró que el intercambiador fractal supera consistentemente al concéntrico en todo el rango evaluado, indicando que su desempeño mejora notablemente bajo condiciones de flujo más turbulento. Debe notarse que el diseño fractal.

Para todos los parámetros, el intercambiador fractal mostró dependencia con la velocidad de flujo, mejorando su desempeño térmico al aumentar el número de Reynolds. Por otra parte, el intercambiador concéntrico mostró ser prácticamente insensible a las condiciones de flujo manteniendo valores prácticamente constantes para todo el rango de flujo, desde completamente laminar hasta flujo completamente turbulento.

En conjunto, estos resultados sugieren que la incorporación de geometrías fractales en sistemas térmicos no solo aumenta el área efectiva de intercambio, sino que también optimiza el desempeño del intercambiador aun en condiciones de flujo de transición.

REFERENCIAS

- [1] Studocu, "Intercambiadores - INTERCAMBIADORES DE CALOR O. A. Jaramillo Centro de Investigación en Energía. - Studocu," Studocu.
<https://www.studocu.com/latam/document/universidad-de-costarica/termofluidos/intercambiadores/9383516>
- [2] Y.A. Cengel, A.J. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones, México McGrawHill, 2011,
- [3] C. Metz, "Who invented the heat exchanger? | Sterling TT," Sterling Thermal Technology, Feb. 26, 2025.
<https://www.sterlingtt.com/2022/11/08/invention-of-heat-exchanger/>
- [4] Transferencia de calor incrementada en espacios anulares con elementos helicoidales insertados, SciELO, 2014.
- [5] R. C. Rodríguez, R. B. P. J. J. González, y A. M. P. Bayón, TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE ALETAS Y TUBOS PLANOS UTILIZANDO GENERADORES DE VÓRTICES.
- [6] Y. W. Pai and R. H. Yeh, "Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of internal finned tubes," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 183, p. 122183, 2022. [Online]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122183>

- [7] M. R. Hajmohammadi, A. Doustahadi, and M. Ahmadian Elmi, "Heat transfer enhancement by a circumferentially non-uniform array of longitudinal fins assembled inside a circular channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 158, p. 120020, 2020. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120020>
- [8] V. M. Hameed and B. M. Essa, "Turbulent flow heat transfer and pressure loss in a double pipe heat exchanger with triangular fins," *International Journal of Energy and Environment*, vol. 7, no. 2, pp. 149–158, 2016.
- [9] D. Dehouve and D. Dehouve, "El fractal: ¿una noción útil para la antropología americanista?" https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1607-050X2017000100130
- [10] «ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN MEDIO FRACTAL», *REVISTA ELECTRO*, vol. 44, Art. n.o ISSN 1405-2172, oct. 2022. https://itchihuahua.mx/revista_electro/2022/SUB-1913.pdf
- [11] A. ; M. B. ; C. O. ; R. I. ; A. Acosta V., "Estudio Experimental del Desempeño de un Intercambiador de Calor con Geometría Fractal," Oct.12, 2024. https://itchihuahua.mx/revista_electro/2024/A35_314-320.html