

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR CON GEOMETRÍA FRACTAL

Paulina Acosta
paulinacostac@gmail.com

Benjamín Moreno
mbmoreno96@gmail.com

Oscar Chávez
oscar.cl@chihuahua.tecnm.mx

Israel Rosas
israel.ry@chihuahua.tecnm.mx

Víctor Ambríz
victor.ad@chihuahua.tecnm.mx

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

RESUMEN.

Para el presente artículo se realizó la investigación experimental del rendimiento de un intercambiador con geometría fractal, en la que se comparó el diseño convencional de un intercambiador de calor de doble tubo con uno equipado con aletas fractales triangulares. Se llevó a cabo el análisis partiendo de construir los dos intercambiadores para después realizar ensayos variando los caudales y la temperatura de uno de los flujos. Se recolectaron cuarenta y cinco pruebas efectivas para cada intercambiador, gracias a ellas se pudo adquirir el coeficiente global de transferencia de calor para obtener datos cuantitativos y comparar los resultados obtenidos de ambos. Finalmente se obtuvo que el intercambiador realizado con geometría fractal tuvo un desempeño significativo en contraste con el intercambiador convencional. Este estudio ayuda a evaluar cómo la geometría fractal puede incrementar la eficiencia energética en aplicaciones industriales que involucran transferencia de calor.

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

ABSTRACT.

For the present article, experimental research was conducted on the performance of a heat exchanger with fractal geometry. The study compared a conventional design of a double-pipe heat exchanger with one equipped with triangular fractal fins. The analysis involved constructing both heat exchangers and conducting tests by varying flow rates and temperature of one of the streams. Forty-five effective trials were conducted for each heat exchanger, from which the overall heat transfer coefficient was obtained to acquire quantitative data and compare results between the two designs. Ultimately, it was found that the heat exchanger with fractal geometry exhibited significantly better performance compared to the conventional one. This study contributes to assessing how fractal geometry can enhance energy efficiency in industrial applications involving heat transfer.

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

1. INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica nos enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor no sólo explica cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predice la rapidez con la que bajo condiciones específicas tiene lugar la transferencia [1].

Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes, pero al mismo tiempo evitan que estos dos fluidos se mezclen entre sí. En la práctica los intercambiadores de calor son de uso común en una amplia variedad de aplicaciones, desde los sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento del aire hasta los procesos químicos y la producción de energía en plantas grandes [2].

Las distintas aplicaciones de la transferencia de calor requieren diferentes tipos de componentes y configuraciones del equipo para dicha transferencia. El intento de acoplar los accesorios para la transferencia de calor a cada tipo de necesidades, dentro de las restricciones específicas, ha conducido a numerosos tipos de diseños innovadores de intercambiadores de calor [2].

Estos se fabrican en diversos tipos y según su aplicación en el diseño de estos debe de tomarse en cuenta distintos aspectos como esfuerzos mecánicos, dilataciones térmicas en las tuberías, problemas de corrosión, depósito de sólidos en las líneas de flujo, caídas de presión, peso y tamaño del intercambiador, entre otros [3]. Siendo este último un aspecto muy importante a considerar basándose principalmente en el espacio que ocupan los dispositivos internos, al tener un alto nivel de rendimiento y teniendo la necesidad de disipar el calor. Una alternativa para

optimizar el espacio dentro del intercambiador es la geometría fractal.

Mandelbrot nos muestra el concepto de fractal como un conjunto de estructuras irregulares y complejas descritas a través de algoritmos matemáticos y computacionales; los cuales reemplazan a los puntos, rectas, circunferencias y demás figuras provenientes de la matemática tradicional. Estos objetos tienen como características fundamentales las propiedades de autosimilitud y la de convivir con extraños paisajes formados por dimensiones fraccionarias [4].

Los fractales se presentaron a mediados del siglo XX, como una nueva herramienta de trabajo, con el objetivo de poder analizar y modelizar objetos irregulares de la naturaleza [5] hoy en día varios matemáticos estudian los fractales desde el punto de vista teórico y aplicado.

La aplicación de la geometría fractal está muy presente en intercambiadores de calor (principalmente en las aletas de disipadores), esta investigación compara un intercambiador de calor de doble tubo, el cual consta de dos tubos concéntricos de diámetros diferentes donde uno de los fluidos pasa por el tubo más pequeño, en tanto el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos [2].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la presente investigación se realizó la comparación del desempeño de dos intercambiadores de calor de doble tubo con flujos paralelos, uno de ellos con aletas fractales, se analizará el rendimiento en general del intercambio de calor, esperando que la geometría fractal ofrezca una mejora en la eficiencia de transferencia de calor.

Los perfiles de los intercambiadores se muestran en la figura 1, a la izquierda, se observa el intercambiador de tubos simples, a la derecha el intercambiador de aletas fractales.

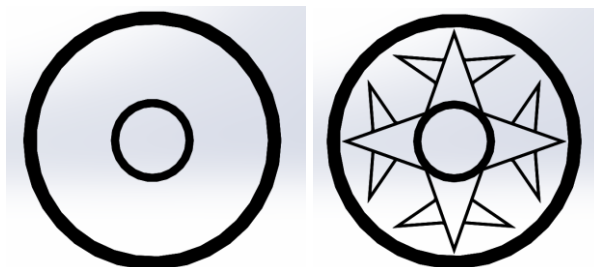


Fig. 1, secciones transversales de los intercambiadores.

El perfil que se propone utilizar en el intercambiador está basado en el fractal conocido como copo de nieve Koch mostrado en la figura 2.

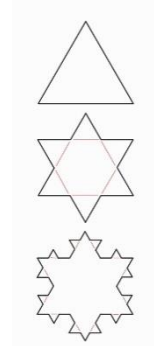


Fig. 2, geometría fractal copo de nieve Koch.

Con la finalidad de poder observar directamente la diferencia en el cambio de temperatura se hicieron dos prototipos lo más parecidos posible, ambos intercambiadores son de tubos concéntricos a contraflujo.

Se toma como primer intercambiador el realizado sólo con un tubo interno de cobre y un tubo exterior de PVC. El segundo intercambiador se realizó, de manera similar, con un tubo interno de cobre y uno exterior de PVC, la diferencia entre ellos son las aletas del tubo fractal que fueron realizadas con láminas previamente dobladas en forma de triángulo de material de cobre, posteriormente soldadas con estaño para tener uniones entre ellas y el tubo. Cabe resaltar que las aletas fueron colocadas a lo largo de la sección longitudinal del tubo, el resultado se revela en la figura 3.

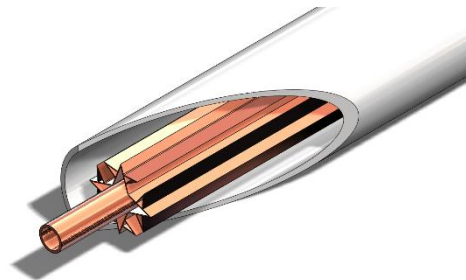


Fig. 3, vista transversal del intercambiador con aletas fractales

3. MARCO TEÓRICO

3.1 GEOMETRÍA FRACTAL

Los fractales son objetos cuya estructura geométrica se repite indefinidamente a diferentes escalas. Por lo que no importa si el objeto se amplía o reduce, el patrón

observado siempre será el mismo. Estos han sido tema de estudio por varios años y se han aplicado en diferentes áreas de la ingeniería como las telecomunicaciones, así como en otras áreas del conocimiento como la biología y la medicina, por mencionar algunas [6].

3.2 DIFERENCIA MEDIA LOGARITMICA DE TEMPERATURAS.

Es un concepto utilizado en transferencia de calor, especialmente en el diseño, análisis y evaluación de la eficiencia de intercambiadores de calor. Sirve para evaluar la transferencia de calor entre dos fluidos que están en contacto a través de una superficie sólida [2].

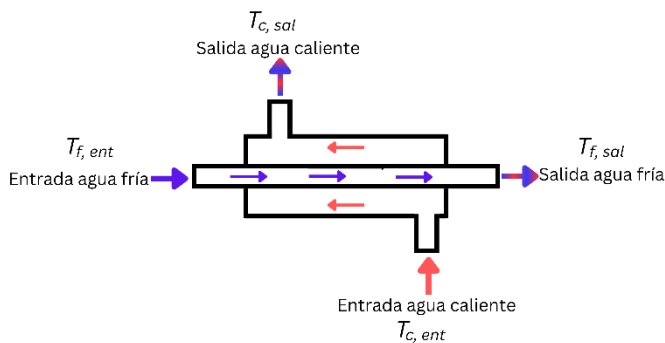


Fig. 4, Diagrama de un intercambiador de calor de tubos paralelos a contraflujo

Para el análisis en cuestión utilizamos la siguiente nomenclatura para las temperaturas de entrada y salida (especificadas en figura 4):

$t_{c,ent}$: Temperatura en la entrada del agua caliente

$t_{c,sal}$: Temperatura a la salida del agua caliente

$t_{f,ent}$: Temperatura en la entrada del agua fría

$t_{f,sal}$: Temperatura a la salida del agua fría

Las diferencias de temperatura a los extremos del intercambiador son:

$$\Delta t_1 = t_{c,sal} - t_{f,ent}$$

$$\Delta t_2 = t_{c,ent} - t_{f,sal}$$

Y la diferencia media logarítmica de temperaturas es:

$$\Delta t_{ml} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}. \quad (1)$$

3.3 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los coeficientes totales de transferencia de calor requeridos para cumplir con las condiciones de proceso, deben ser determinados de la ecuación de Fourier cuando la superficie A es conocida y Q y Δt son calculados a partir de las condiciones de proceso. Entonces

$$U = \frac{Q}{A \Delta t_{ml}}, \quad (2)$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor, A el área de contacto por el que pasa el fluido frío y Δt_{ml} es la diferencia media logarítmica de temperaturas del intercambiador.

La manera en la que se obtendrá Q es por medio de la fórmula de razón de la transferencia neta de calor que se utiliza para los sistemas de flujo estacionario [2]:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta t, \quad (3)$$

Tomaremos $\dot{m}$ como el gasto de masa (flujo másico) C_p es el calor específico de la sustancia a presión constante y Δt es la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del flujo que pasa por el tubo de cobre.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL.

El experimento se llevó a cabo utilizando un banco de pruebas para evaluar el desempeño de los intercambiadores de calor. El sistema constaba de dos circuitos de agua, uno para el fluido caliente, cuya temperatura fue controlada mediante una resistencia blindada. Para el segundo circuito se empleó agua a temperatura ambiente, la cual denominaremos como el fluido frío. La distribución del banco de pruebas se muestra en la figura 5

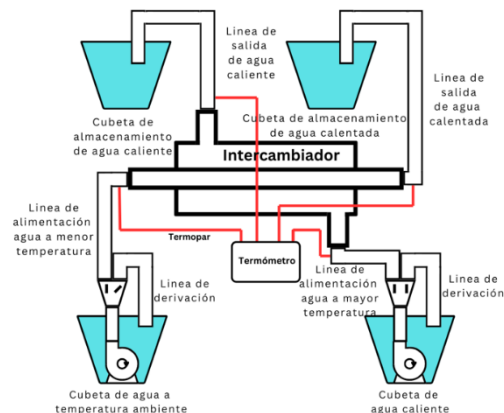


Fig. 5, Distribución de la mesa de trabajo.

Las variables que fueron tomadas para el experimento fueron: el caudal y la temperatura. El caudal del fluido frío y del fluido caliente se controló variando la apertura de las válvulas en un 25, 50, 75 y 100 por ciento, el valor nominal de los flujos se puede muestra en las tablas 1 y 2. Para cada experimento, se establecieron cuatro caudales diferentes para ambos fluidos. Para la variable de temperatura se ajustó el agua caliente en cuatro niveles: 70, 60, 50, y 40 grados centígrados.

Se establecieron un total de sesenta y cuatro configuraciones experimentales para cada intercambiador de calor, derivadas de la combinación de las siguientes variables: cuatro temperaturas del fluido caliente, cuatro caudales de agua fría y cuatro caudales de agua caliente.

Tabla 1, valores de caudales para el intercambiador fractal

Intercambiador fractal		
No. de Configuración	Caudal de agua caliente [LPS]	Caudal de agua fría
Config. 1	0.0698	0.0755
Config. 2	0.0698	0.0760
Config. 3	0.0698	0.0445
Config. 4	0.0698	0.0216
Config. 5	0.0626	0.0831
Config. 6	0.0626	0.0739
Config. 7	0.0626	0.0439
Config. 8	0.0626	0.0412
Config. 9	0.0464	0.0801
Config. 10	0.0464	0.0693
Config. 11	0.0464	0.0513
Config. 12	0.0464	0.0261
Config. 13	0.0356	0.0766
Config. 14	0.0356	0.0734
Config. 15	0.0356	0.0448
Config. 16	0.0356	0.0394

Tabla 2, valores de caudales para el intercambiador liso

Intercambiador liso		
No. de Configuración	Caudal de agua caliente [LPS]	Caudal de agua fría
Config. 1	0.0671	0.0782
Config. 2	0.0671	0.0699
Config. 3	0.0671	0.0407
Config. 4	0.0671	0.0335
Config. 5	0.0594	0.0719
Config. 6	0.0594	0.0720
Config. 7	0.0594	0.0440
Config. 8	0.0594	0.0425
Config. 9	0.0474	0.0723
Config. 10	0.0474	0.0680
Config. 11	0.0474	0.0450
Config. 12	0.0474	0.0271
Config. 13	0.0232	0.0744
Config. 14	0.0232	0.0726
Config. 15	0.0232	0.0512
Config. 16	0.0232	0.0250

4.1 EQUIPOS Y MATERIALES:

Se utilizó el siguiente equipo para las mediciones de temperatura:

- Termómetro termopar TASI modelo TA612C de 4 canales. Se utilizó para medir la temperatura del agua en las entradas y salidas del intercambiador.
- Multímetro Klein Tools MM400. Este multímetro midió la temperatura en el depósito de agua caliente con la finalidad de iniciar las pruebas a la temperatura deseada.

Las aletas se fabricaron soldando láminas de cobre previamente cortadas y dobladas. En la figura 6 se observa la colocación de las láminas sobre el tubo.



Figura 6, vista frontal del tubo con la primer aleta fractal soldada.

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

Para la realización de pruebas el fluido utilizado fue el agua. En la tabla 3 se pueden enlistar las propiedades con su respectivo valor que fueron tomados en cuenta en el experimento.

Tabla 3. Propiedades del fluido [2]

Propiedad	Valor
Densidad ρ	$1000 \frac{kg}{m^3}$
Calor Específico C_p	$4.22 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Conductividad térmica K	$0.607 \frac{kgW}{m \cdot ^\circ C}$
Viscosidad ν	$0.000404 \frac{kg}{m \cdot s}$

4.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

Se configuraron las válvulas Y para los flujos deseados, como se muestra en las tablas 1 y 2. Después se calentó el agua hasta alcanzar la temperatura objetivo (70 °C para

el primer caso) para después comenzar a bombear el agua a través del intercambiador, se tomó video para calcular los caudales reales usando el tiempo que se demoró en llenar un volumen conocido (250 ml) de un cilindro graduado, primero se tomó video para después procesar el tiempo de la salida del agua caliente y posteriormente a la salida del agua fría. Luego, con ayuda del termómetro de cuatro canales se capturaron las temperaturas de entrada y salida de ambos flujos.

Sin modificar la configuración de las válvulas se reguló manualmente la temperatura hasta alcanzar la siguiente temperatura objetivo (60° C) y se repitieron los mismos pasos hasta haber probado con las cuatro temperaturas establecidas.

Después de haber completado las cuatro primeras pruebas, sin modificar la apertura de la válvula de fluido caliente, se procedió a configurar la válvula del fluido frío para poder seguir con las siguientes cuatro pruebas donde se varía nuevamente la temperatura. Para finalmente completar sesenta y cuatro configuraciones.

Los resultados fuera de los límites esperados fueron descartados para evitar la influencia de posibles errores en el procedimiento.

4.4 CONSIDERACIONES Y CONTROLES:

La temperatura del agua fría no se controló, solo se dejó a temperatura ambiente, que oscilaba entre los 17 y 20 °C. Dado que tomo un breve periodo de tiempo alcanzar un estado estacionario, la temperatura del agua caliente no siempre fue exactamente la temperatura objetivo.

5. RESULTADOS

5.1 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se utilizó coeficiente global de transferencia de calor para comparar los resultados obtenidos entre ambos intercambiadores, para ello se hizo uso de la ecuación global de transferencia de calor (2), así como la ecuación de la capacidad calorífica del fluido (3)

Igualando (2) y (3) la variable de calor:

$$UA \Delta t_{ml} = mc_p \Delta t$$

de aquí,

$$U = \frac{mc_p \Delta t}{A \Delta t_{ml}} \quad (4)$$

Aunque en la elaboración de pruebas se capturó el flujo volumétrico, tomando en cuenta que gracias a la densidad del agua; 1 kg = 1 L, el flujo másico es igual al flujo volumétrico. Los valores constantes como el calor específico se pueden consultar en la tabla 1, para Δt se tomó solo las temperaturas del agua fría (flujo en el interior del tubo de cobre), y tanto Δt como Δt_{ml} se evaluaron para cada prueba.

Por último, el área corresponde a la cara interna del tubo de cobre la cual es:

$$A = \pi * D_i * L \quad (5)$$

Cabe mencionar que el área de los dos intercambiadores fue la misma, ya que fueron elaborados bajo la misma longitud y diámetro. En el caso del tubo modificado con geometría fractal, se despreció el área de las aletas construidas ya que el área de contacto del agua fría que circuló por el intercambiador sólo fue por el tubo.

5.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados generales que se obtuvieron de las pruebas de los intercambiadores y que se pueden ver en la figura 7, arrojan que el intercambiador fractal tiene un coeficiente de transferencia de calor mayor que el intercambiador con tubo de superficie lisa, tal como se esperaba en un principio.

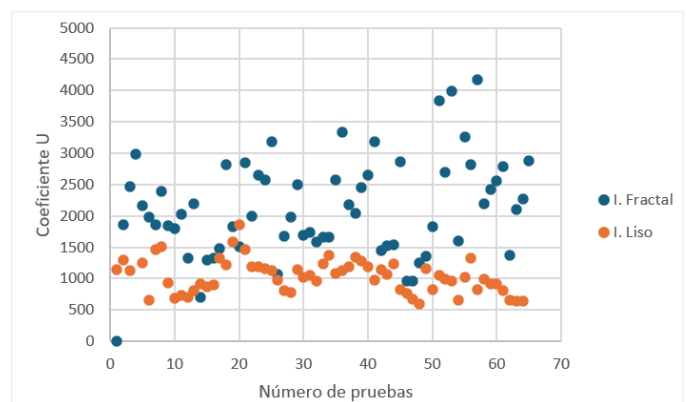


Figura 7, comparación del coeficiente global de transferencia de calor entre ambos intercambiadores.

En la figura 8, se muestra la comparación de los efectos de los flujos y temperaturas en los dos intercambiadores. En donde se generó un cociente de flujo másico realizando la división del flujo del exterior del tubo entre

el flujo del interior del tubo (hablándose del tubo interno del intercambiador), ambos obtenidos de las pruebas realizadas. Expresado de la siguiente manera:

$$\dot{m}^* = \frac{\dot{m}_{int}}{\dot{m}_{ext}}. \quad (6)$$

Se generó el cociente para igualar los flujos de ambos intercambiadores, que en un principio y bajo las condiciones propuestas por el diseño experimental, se conjetura sean los mismos, y así poder comparar el efecto de la geometría sobre el efecto de la temperatura en la transferencia de calor.

De manera similar del procedimiento descrito, se calculó el cociente del coeficiente global de transferencia de calor (U) de ambos intercambiadores, que se obtuvo dividiendo el coeficiente de transferencia de calor del intercambiador fractal sobre el mismo coeficiente, pero ahora del intercambiador de tubo liso. Por lo que la ecuación resultante fue:

$$U^* = \frac{U_{fractal}}{U_{liso}}. \quad (7)$$

En la misma figura se puede observar que cuando el cociente de flujos es menor a uno, el flujo interno es muy lento, mientras que va creciendo el cociente, se aumenta la transferencia de calor, por lo que la geometría es irrelevante en estos casos.

El efecto de la temperatura sobre el intercambiador no se distingue ya que, como se aprecia, tienen la misma dispersión (mayor a 1).

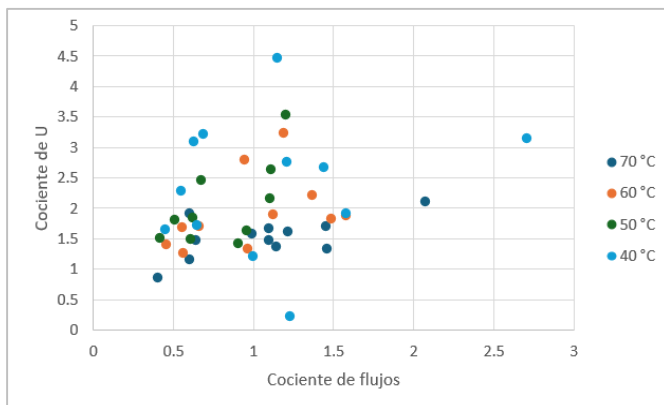


Figura 8, comparación de efectos generales de flujos y temperaturas.

6. CONCLUSIONES

En la presente investigación comparativa entre intercambiadores de calor de doble tubo con flujos paralelos, uno convencional y otro con aletas fractales triangulares, se evaluó la eficiencia en la transferencia de

calor bajo diferentes condiciones operativas. La geometría fractal demostró, en general, ser altamente efectiva en mejorar el coeficiente global de transferencia de calor (U).

Los resultados muestran consistentemente que el intercambiador de calor con aletas fractales superó significativamente al diseño convencional en la mayoría de las condiciones probadas. En particular, se observó una mejora notable en las relaciones de U fractal/U liso, indicando una eficiencia mejorada desde el 20% hasta el 400%, también se observó un par de situaciones en las que el intercambiador convencional tuvo un mejor desempeño que el fractal, esto fue debido a la variación de flujos que se realizó, mientras más lento circulaba el flujo, mayor tiempo de transferencia por lo que la geometría no era un factor relevante. Estos casos corresponden a menos del 5% de las pruebas consideradas.

Los hallazgos muestran el potencial significativo de la implementación de la geometría fractal para optimizar intercambiadores de calor en diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, se detectan áreas de interés para continuar investigando, como pueden ser los procesos de manufactura y la viabilidad económica para la implementación de estos diseños.

7. REFERENCIAS

- [1] J. P. Holman, *Transferencia De Calor*. Cia. Ed. Cont., 1992. P, 1
- [2] Y.A. Cengel, A.J. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*, México McGrawHill, 2011,
- [3] J. Manrique, *Transferencia De Calor*. HarperCollins Publ., 1977
- [4] B. Mandelbrot, *La geometria fractal de la naturaleza*. TusQuets, 2002.
- [5] J. N. Ureña and M. A. Quesada, "Fractales: la frontera entre el arte y las matemáticas," Univ. Jaén, p. 57, 2005.
- [6] C. A. Debenardi, L. E. Martínez, F. A. Godínez, F. J. Solorio y R. Chávez, "Transferencia de calor en aletas de geometría pre-fractal: Experimentos y simulaciones numéricas", Mem. Del Xxvii Congr. Int. Anu. Somim, 2021. [En línea]. Disponible:

https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A4_49.pdf

[7] D. Q. Kern, Procesos de transferencia de calor.
Compaia Ed. Cont., 1993.