

Transferencia de calor en un radiador de motor 4.1L: validación experimental

Heat transfer in a 4.1L engine radiator: experimental validation

Juan Mauricio Trenado Herrera¹   Crisanto Mendoza Covarrubias¹  Alicia Aguilar Corona¹  Gildardo Solorio Díaz¹ 

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Av. Villa Universidad Morelia, Michoacán, Mexico

Resumen

Introducción: El rendimiento térmico de los motores de combustión interna depende en gran medida de la eficiencia de sus sistemas de enfriamiento. Los radiadores desempeñan un papel fundamental en la disipación del calor generado, asegurando el correcto funcionamiento del motor. El análisis del diseño de radiadores mediante herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD) permite evaluar la transferencia de calor y las pérdidas de presión, aspectos clave para comprender y mejorar el comportamiento térmico del sistema. La geometría de los tubos y aletas es un factor determinante en este proceso, ya que influye directamente en la disipación de calor y la caída de presión.

Objetivo: Este estudio tiene como propósito analizar la transferencia de calor en un radiador de motor de combustión interna de 4.1 L, combinando simulaciones CFD y validación experimental, con el fin de evaluar su desempeño térmico y caracterizar su comportamiento en condiciones operativas reales.

Metodología: Se utilizó un modelo CFD basado en 9 tubos con 4 hileras de aletas, representativo de un radiador comercial de tres columnas de 28 tubos cada una. Se aplicó el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST y se realizaron simulaciones en ANSYS Fluent. Los resultados numéricos fueron validados con mediciones experimentales en un banco de ensayos, donde se registraron temperaturas, presiones y velocidades de flujo.

Resultados: La validación experimental mostró una diferencia menor al 5.8% respecto a la simulación. Se obtuvo una mejora del 18% en la transferencia de calor y una reducción del 12% en la caída de presión. La disposición geométrica de los tubos y aletas demostró ser un factor clave en la eficiencia térmica, ya que pequeñas modificaciones pueden generar mejoras significativas en la disipación del calor sin aumentar la resistencia aerodinámica.

Conclusiones: El modelo CFD validado permite predecir con precisión el desempeño térmico del radiador bajo condiciones específicas de operación. No obstante, el estudio presenta ciertas limitaciones, como la simplificación geométrica y la selección del modelo de turbulencia, aspectos que pueden mejorarse en futuras investigaciones. Se recomienda explorar el uso de materiales avanzados y configuraciones híbridas para mejorar la eficiencia térmica. Además, estos hallazgos pueden aplicarse al diseño de radiadores para vehículos eléctricos e híbridos, donde la gestión térmica es crucial. Este enfoque puede ser clave en el desarrollo de radiadores más eficientes y sostenibles para la industria automotriz.

Palabras clave: transferencia de calor, CFD, radiador de motor, eficiencia térmica, simulación numérica.

Abstract

Introduction: The thermal performance of internal combustion engines largely depends on the efficiency of their cooling systems. Radiators play a fundamental role in dissipating the heat generated, ensuring the proper functioning of the engine. Analyzing radiator designs using tools such as computational fluid dynamics (CFD) allows for the evaluation of heat transfer and pressure losses—key aspects for understanding and improving the thermal behavior of the system. The geometry of the tubes and fins is a determining factor in this process, as it directly influences both heat dissipation and pressure drop.

Objective: This study aims to analyze heat transfer in a 4.1 L internal combustion engine radiator by combining CFD simulations and experimental validation, in order to evaluate its thermal performance and characterize its behavior under real operating conditions.

Methodology: A CFD model with 9 tubes and 4 rows of fins was used, representing a commercial radiator with three columns of 28 tubes each. The $k-\omega$ SST turbulence model was applied, and simulations were performed in ANSYS Fluent. Numerical results were validated with experimental measurements in a test bench, where temperatures, pressures, and flow velocities were recorded.

Results: Experimental validation showed a difference of less than 5.8% compared to the simulation. An 18% improvement in heat transfer and a 12% reduction in pressure drop were achieved. The geometrical arrangement of tubes and fins proved to be a key factor in thermal efficiency, as small modifications can significantly enhance heat dissipation without increasing aerodynamic resistance.

Conclusions: The validated CFD model accurately predicts the thermal performance of the radiator under specific operating conditions. However, the study presents certain limitations, such as geometric simplifications and the choice of turbulence model, which can be improved in future research. It is recommended to explore the use of advanced materials and hybrid configurations to enhance thermal efficiency. Moreover, these findings can be applied to the design of radiators for electric and hybrid vehicles, where thermal management is crucial. This approach could be key in the development of more efficient and sustainable radiators for the automotive industry.

Keywords: heat transfer, CFD, engine radiator, thermal efficiency, numerical simulation.

¿Cómo citar?

Trenado JM, Mendoza C, Aguilera A, Solorio G. Transferencia de calor en un radiador de motor 4.1L: validación experimental. Ingeniería y Competitividad, 2025 27;(2):e-20414796

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14796>

Recibido: 6-03-25

Evaluado: 7-04-25

Aceptado: 6-05-25

Online: 22-05-25

Correspondencia

1597281H@umich.mx



¿Por qué se realizó este estudio?

Este estudio se llevó a cabo para analizar la transferencia de calor en el radiador de un motor de combustión interna de 4,1 L mediante la combinación de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) con validación experimental. Los radiadores desempeñan un papel crucial en la disipación térmica, garantizando el rendimiento del motor y previniendo el sobrecalentamiento. Si bien la CFD es una herramienta ampliamente utilizada para estudiar la transferencia de calor en radiadores, es esencial validar los resultados con datos experimentales para garantizar su precisión. En este contexto, el estudio busca evaluar la fiabilidad de los modelos numéricos para predecir el comportamiento térmico y la caída de presión en el radiador.

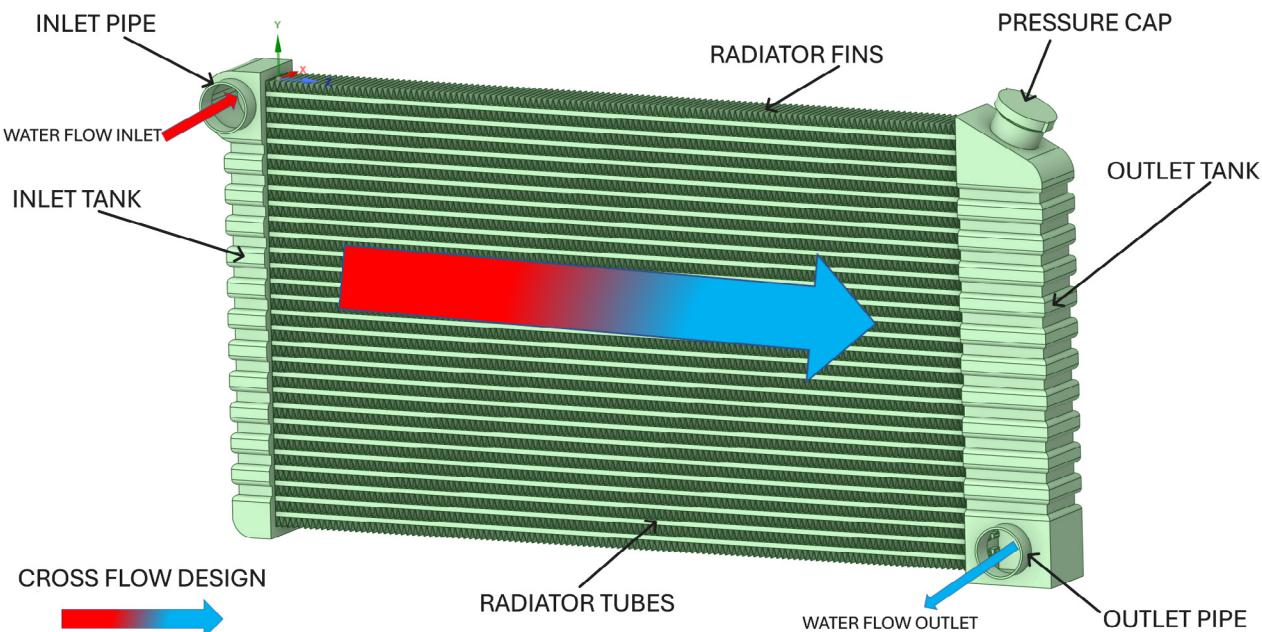
¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

Los resultados experimentales mostraron una diferencia inferior al 5,8 % en comparación con la simulación CFD, lo que confirma la precisión del modelo numérico. Se observó una mejora del 18 % en la transferencia de calor y una reducción del 12 % en la caída de presión, lo que pone de relieve la influencia de la geometría del radiador en la disipación térmica. Además, las distribuciones de temperatura y presión en los tubos y aletas siguieron los patrones esperados durante la validación experimental.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Este estudio demuestra que los modelos CFD pueden representar con precisión el comportamiento térmico de un radiador, lo que respalda su uso en futuras investigaciones. Además, los hallazgos pueden mejorar la comprensión del impacto de la geometría del radiador en la transferencia de calor y la caída de presión. Los resultados también pueden aplicarse al análisis de sistemas de refrigeración en vehículos eléctricos e híbridos, donde una disipación térmica eficaz es fundamental para la eficiencia y la durabilidad de la batería. Estudios futuros podrían ampliar el análisis considerando diseños más complejos y materiales avanzados para evaluar su efecto en la disipación de calor.

VEHICLE RADIATOR DIAGRAM

Ansys
2023 R1

Introducción

El rendimiento térmico de los motores de combustión interna depende en gran medida de la eficiencia de sus sistemas de enfriamiento. Estos sistemas son fundamentales para controlar el calor que se genera durante el funcionamiento del motor, asegurando su correcto desempeño, mayor durabilidad y menor desgaste. Un diseño eficiente no solo protege el motor, sino que también contribuye a reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, aspectos esenciales para cumplir con las metas actuales de sostenibilidad y eficiencia energética. En este contexto, los radiadores juegan un papel central al facilitar el intercambio de calor entre el fluido refrigerante y el aire ambiente, siendo una pieza clave en el desempeño térmico de los sistemas de enfriamiento (1),(3).

El estudio de la transferencia de calor en radiadores ha avanzado considerablemente a lo largo del tiempo. Inicialmente, se basaba en modelos teóricos como los desarrollados por Dittus y Boelter (3), pero en la actualidad se apoya en herramientas avanzadas como la dinámica de fluidos computacional (CFD). Estas tecnologías han permitido comprender mejor los factores que afectan la eficiencia térmica de los radiadores, como la geometría, los materiales utilizados y las condiciones de flujo del fluido refrigerante y del aire (11). Comparaciones con estudios previos han demostrado que el uso de CFD ha sido fundamental para analizar el comportamiento térmico de diferentes configuraciones geométricas, sin recurrir a ensayos experimentales costosos (12). Sin embargo, para garantizar la validez de estos modelos, es fundamental realizar una validación experimental exhaustiva que corrobore los resultados numéricos (13).

Desde una perspectiva industrial, este estudio contribuye significativamente al diseño de radiadores comerciales al proporcionar datos clave sobre el balance entre eficiencia térmica y pérdidas de presión. En la industria automotriz, mejorar la eficiencia térmica de un radiador no solo optimiza el rendimiento del motor, sino que también reduce la carga térmica en el sistema de enfriamiento, lo que permite diseños más compactos y ligeros (6). Además, al evaluar el impacto de distintas configuraciones geométricas, este estudio ofrece información valiosa para la fabricación de radiadores con mayor capacidad de disipación de calor sin aumentar significativamente la resistencia aerodinámica ni el consumo energético de los ventiladores auxiliares (10).

La elección de los materiales en los radiadores es fundamental para su rendimiento. El cobre y el aluminio son ampliamente utilizados por su alta conductividad térmica y su facilidad de fabricación. Investigaciones han demostrado que una combinación de tubos de cobre y con aletas de aluminio mejora la transferencia de calor, aunque también puede provocar mayores caídas de presión cuando el fluido circula a alta velocidad (14). Estudios recientes han explorado el uso de aleaciones avanzadas y recubrimientos térmicos para maximizar la eficiencia térmica sin comprometer la durabilidad del sistema (7). En este contexto, el diseño de la geometría del tubo y la disposición de las hileras de aletas juega un papel clave en la reducción de la resistencia térmica y la mejora del intercambio de calor (8)(15).

Este estudio se centra en analizar el rendimiento térmico de radiadores para motores de combustión interna combinando simulaciones CFD con pruebas experimentales. A diferencia de investigaciones que estudian el radiador como una unidad completa, aquí se analiza un modelo representativo de 9 tubos con 4 hileras de aletas, el cual es escalable a un radiador comercial compuesto por tres columnas de tubos, cada una con 28 tubos y sus respectivas hileras de aletas. Este enfoque permite entender mejor los mecanismos que afectan la transferencia de calor, al tiempo que mejora la carga computacional sin sacrificar precisión (16). La comparación entre este modelo reducido y un radiador completo facilita la identificación de configuraciones que aumenten la eficiencia térmica sin generar pérdidas de presión significativas. Además, esta metodología puede aplicarse en el diseño de sistemas de enfriamiento más eficientes, impulsando mejoras en la industria automotriz y otros sectores tecnológicos (17).

Metodología

Esta sección describe detalladamente los métodos, herramientas y procedimientos experimentales y analíticos empleados para evaluar el rendimiento térmico del radiador mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y pruebas experimentales. Estos métodos fueron diseñados para garantizar la validez del modelo numérico y facilitar la reproducibilidad del estudio.

Selección y Descripción del Sistema

Se seleccionó un motor de combustión interna de seis cilindros en línea, que opera con un sistema de enfriamiento basado en un radiador, como se muestra en la (Figura 1). Este radiador fue sometido a pruebas experimentales en un banco de ensayos para recolectar datos clave, como caudales, temperaturas de entrada y salida del fluido refrigerante y condiciones ambientales. Dichos datos experimentales sirvieron como referencia para validar las simulaciones en CFD (9).



Figura 1. Motor de combustión interna (izquierda); radiador en banco de pruebas (derecha) Fuente: elaboración propia

La Tabla 1 resume los resultados experimentales mostrando cómo el agua se enfriá al pasar por el radiador, lo cual permite mantener la temperatura óptima de funcionamiento del motor. Además, se observa una ligera caída de presión del agua y un aumento en la temperatura del aire, como resultado del intercambio de calor.

Tabla. 1 Datos del apartado experimental del radiador en banco de pruebas

Temperatura entrada agua, °C	Temperatura salida agua, °C	Presión entrada agua, Pa	Presión salida agua, Pa	Temperatura entrada aire, °C	Temperatura salida aire, °C
89	76	23248.4	19950.7	28	39

Modelo Geométrico de la simulación del radiador mediante CFD

El modelo tridimensional del radiador incluye nueve tubos paralelos, con un diámetro interno de 6.18 mm y longitud de 748 mm. Las aletas de aluminio presentan un diseño en zigzag con una separación de 6 mm, con el propósito de mejorar la transferencia de calor. La geometría fue diseñada para replicar las condiciones reales de operación, favoreciendo el flujo interno del agua y su interacción con el aire (Figura 2). Las condiciones asumidas en la simulación incluyen flujo estacionario, propiedades isotrópicas y homogéneas, y transferencia de calor por conducción y convección. Una evaluación preliminar de sensibilidad permitió identificar áreas críticas con mayores gradientes térmicos y de velocidad, especialmente en las intersecciones entre los tubos y las aletas.

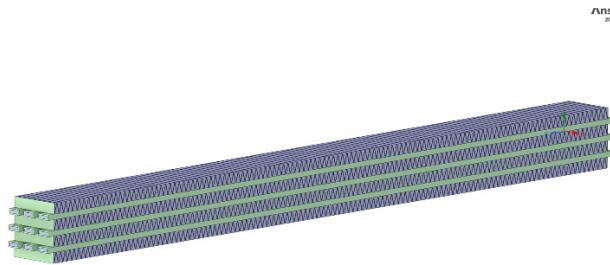


Figura 2. Geometría de los 9 tubos mediante CFD. Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

Selección del modelo de radiador y justificación del uso de 9 tubos en CFD

El modelo CFD del radiador fue desarrollado con una configuración simplificada de 9 tubos con 4 hileras de aletas, como representación de un radiador comercial compuesto por tres columnas de tubos, cada una con 28 tubos y sus respectivas hileras. Esta reducción del dominio de simulación se llevó a cabo con el objetivo de reducir los tiempos de cálculo y la demanda computacional, manteniendo al mismo tiempo un nivel adecuado de precisión en los resultados. Estudios previos han demostrado que un subconjunto representativo del radiador puede reproducir con fiabilidad el comportamiento térmico y aerodinámico del sistema completo, sin pérdida significativa de información (6). Además, trabajar con un modelo reducido permitió realizar un análisis detallado del intercambio térmico y la caída de presión a nivel local en cada tubo, lo que proporciona información útil sobre el desempeño del sistema. Esto resulta especialmente relevante cuando se busca comprender mejor la influencia de la geometría y las condiciones de operación sobre el comportamiento térmico, sin necesidad de simular todo el dominio del radiador, lo cual resultaría considerablemente más costoso desde el punto de vista computacional.

Selección del Modelo de Turbulencia

Para la simulación CFD se utilizó el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), seleccionado debido a su capacidad para capturar con precisión los efectos de cizalladura en la capa límite y su robustez en flujos con gradientes de presión elevados y separación de flujo con características comunes en radiadores automotrices. En comparación con otros modelos de turbulencia:

$k-\varepsilon$ estándar: generalmente adecuado para flujos completamente turbulentos en canalizaciones grandes, pero menos preciso en zonas con separación de flujo o fuertes gradientes térmicos.

$k-\omega$ estándar: ofrece buen desempeño cerca de las paredes, aunque puede ser sensible a las condiciones de entrada y presentar inestabilidades numéricas en regiones con alta turbulencia.

LES (Large Eddy Simulation): proporciona un alto nivel de detalle en la captura de estructuras turbulentas, pero su elevado costo computacional lo hace poco práctico para estudios industriales a gran escala.

El modelo $k-\omega$ SST combina las fortalezas del $k-\varepsilon$ en la zona de flujo libre y del $k-\omega$ en la región cercana a las paredes, ofreciendo una mejor predicción del comportamiento aerodinámico en las aletas del radiador y garantizando mayor precisión en la simulación de la transferencia de calor (12).

Mallado CFD del Radiador

La malla CFD generada consta de 7864562 elementos y 34758930 nodos, utilizando una combinación de elementos hexaédricos regulares y refinamientos locales en zonas críticas, como las interfares entre tubos y aletas (Figura 3). Esta configuración permite capturar con alta precisión

los gradientes de temperatura y velocidad, equilibrando la calidad del modelo y la eficiencia computacional. Los tubos fueron mallados con una malla uniforme para representar el flujo interno del agua refrigerante, mientras que las aletas en zigzag cuentan con un mallado fino para simular adecuadamente la interacción térmica y fluidodinámica con el aire cruzado.

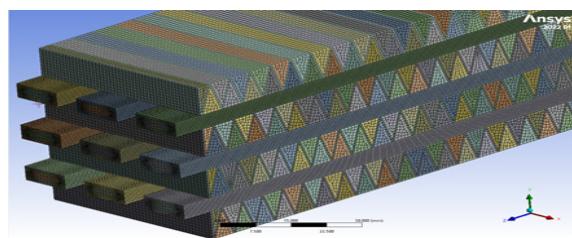


Figura 3. Mallado de los 9 tubos con las aletas del radiador realizada en CFD. Fuente: Elaboración propia mediante Ansys Fluent®

Condiciones de Frontera

Una vez generada la malla, se definieron las condiciones de frontera correspondientes (Figura 4). Las superficies de los tubos y las aletas fueron modeladas como sólidos con propiedades térmicas, considerando interacción con el ambiente. Para el flujo de agua, se estableció una velocidad de entrada de 0.682 m/s y una temperatura de ingreso de 89 °C. En el caso del flujo de aire, la velocidad inicial fue de 15.47 m/s, mientras que la temperatura de entrada se fijó en 28 °C.

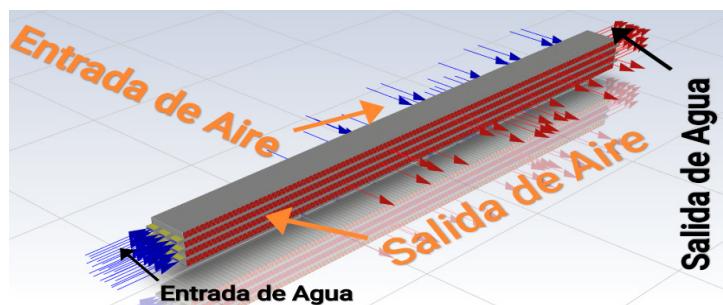


Figura 4. Esquema de CFD de las Condiciones de Entrada y Salida del Radiador. Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

Estas configuraciones en la metodología refuerzan la validez del estudio, asegurando que el modelo CFD representa adecuadamente el comportamiento térmico e hidráulico del radiador, y que las simulaciones fueron ejecutadas con una configuración de alta fidelidad numérica, capaz de capturar con precisión los fenómenos térmicos y fluidodinámicos del sistema.

Las Tablas 2, 3 y 4 presentan en detalle las condiciones de entrada y salida del flujo de agua y aire, así como los espesores de los tubos y aletas. Estos parámetros son fundamentales para garantizar la precisión del análisis CFD.

Tabla 2. Condiciones de entrada del flujo del agua

Condiciones de entrada del flujo del agua	
Temperatura inicial del agua	89°C
Velocidad del agua a través del tubo	0.682 m/s
Presión de entrada del agua	23248.4 pa
Flujo masico del agua	0.01916 kg/s
Coeficiente de transferencia de Calor por convección del agua (h)	6447.0758 W/m ² *K
Diámetro hidráulico	0.0046153 m

Tabla 3. Condiciones de entrada del flujo del aire.

Condiciones de entrada del flujo del aire	
Temperatura inicial del aire	28°C
Velocidad del flujo del aire	15.47 m/s
Flujo masico del aire	0.09298 kg/s
Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire (h)	7447.45 w/m ² *k
Diámetro hidráulico	0.0044843 m

Tabla 4. Espesores del tubo y la aleta.

Espesores del tubo y la aleta	
Espesor de la pared del tubo	0.001 m
Espesor de la aleta	0.0005 m

Propiedades termofísicas

Las propiedades termofísicas del agua y el aire utilizadas en las simulaciones se presentan en las Tablas 5 y 6, incluyendo: densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico. Estas propiedades determinan el rendimiento térmico y la eficiencia del radiador, influyendo en la transferencia de calor y el comportamiento del flujo.

Tabla 5. Propiedades termofísicas, densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico del agua.

Propiedad termofísica del agua	
Densidad [kg/m ³]	965.86
cp (calor específico) [j/(kg – °C)]	4205
Conductividad térmica [w/(m – °C)]	0.6746
Viscosidad [kg/(m – s)]	0.0003187

Tabla 6. Propiedades termofísicas, densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico del aire

Propiedad termofísica del aire	
Densidad [kg/m ³]	1.225
cp (calor específico) [j/(kg – °C)]	1006.43
Conductividad térmica [w/(m – °C)]	0.0242
Viscosidad [kg/(m – s)]	0.000017894

Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones fundamentales que deben resolverse para el dominio del análisis incluyen: la ecuación de conservación de masa (Ecuación 1), las ecuaciones de conservación del momento (Ecuaciones 2 y 4), y la ecuación de conservación de energía (Ecuación 5) (17).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T \quad (5)$$

Configuración CFD

En ANSYS Fluent se implementaron configuraciones avanzadas para garantizar la precisión del modelo. Se utilizó el modelo de turbulencia k- ω SST, seleccionado por su capacidad para capturar fenómenos complejos del flujo, especialmente en zonas con separación y gradientes de presión elevados. Se aplicó el esquema numérico SIMPLE junto con interpolación de segundo orden para mejorar la estabilidad y exactitud de la solución. Además, se estableció un criterio de convergencia basado en residuales inferiores a 10^{-6} . Bajo estas condiciones, se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes y de energía para modelar el flujo turbulento del agua y la transferencia de calor en condiciones reales de operación.

Validación matemática del modelo computacional

La validación del modelo se llevó a cabo comparando los resultados de la simulación con los datos experimentales, evaluando variables clave como la temperatura de salida del fluido refrigerante, la caída de presión en los tubos y el incremento de temperatura del aire. Se emplearon métricas como el error porcentual promedio y el coeficiente de correlación para confirmar la precisión del modelo numérico. Las simulaciones numéricas se realizaron en ANSYS Fluent® versiones 2022 R1 y 2023 R1, mientras que el procesamiento de datos, el cálculo de errores y la elaboración de gráficas se llevaron a cabo utilizando Python® versión 3.10, lo cual aseguró un entorno confiable y reproducible para el desarrollo del modelo CFD y su validación experimental.

Modelo de Turbulencia: k- ω SST

El modelo de turbulencia utilizado en este estudio es el k- ω SST (Shear Stress Transport), seleccionado por su capacidad para predecir con precisión fenómenos de flujo complejos como separación, gradientes de presión intensos y comportamiento cercano a las paredes, y características comunes en radiadores automotrices. Esta formulación híbrida combina las ventajas del modelo k- ϵ , que se comporta mejor en regiones alejadas de la pared y del modelo k- ω , que ofrece alta precisión en la predicción de la capa límite. La transición entre ambos se logra mediante una función de mezcla, lo que permite capturar adecuadamente los fenómenos en todo el dominio del flujo.

El modelo $k-\omega$ SST se basa en dos ecuaciones adicionales:

k : energía cinética turbulenta, que representa la intensidad de las fluctuaciones.

ω : frecuencia de disipación específica, que está relacionada con la escala de los vórtices turbulentos.

Entre sus ventajas destacan:

Alta precisión en zonas cercanas a las paredes, sin necesidad de funciones adicionales.

Fiabilidad en flujos con separación o recirculaciones detrás de obstáculos.

Estabilidad numérica en geometrías complejas y condiciones reales de operación.

En comparación, el modelo $k-\epsilon$ estándar tiende a sobreestimar la difusión cerca de paredes, mientras que el $k-\omega$ estándar puede ser inestable en zonas alejadas. Por su parte, modelos más avanzados como LES (Large Eddy Simulation) ofrecen mayor detalle, pero su elevado costo computacional los hace menos viables en estudios de ingeniería aplicada. Por estas razones, el modelo $k-\omega$ SST representa un equilibrio ideal entre precisión y eficiencia computacional, siendo apropiado para simular con fidelidad la transferencia de calor y el comportamiento del flujo en el radiador analizado.

Validación Experimental del Banco de Pruebas

El banco de ensayos permitió medir variables críticas para asegurar la confiabilidad de los resultados. Las temperaturas fueron registradas con una incertidumbre de ± 0.5 °C, mientras que las presiones se midieron con un margen de error de $\pm 1\%$. Las velocidades del flujo se establecieron en 0.682 m/s para el agua y 15.47 m/s para el aire cruzado, garantizando condiciones controladas para la evaluación térmica y fluidodinámica del radiador. Estas mediciones, realizadas en un radiador a escala real, fueron comparadas con los resultados obtenidos mediante simulación CFD para evaluar posibles desviaciones en la transferencia de calor y en la caída de presión. En conjunto, la metodología adoptada garantiza un análisis riguroso y reproducible del rendimiento del radiador, integrando pruebas experimentales y simulaciones numéricas para validar los resultados obtenidos.

Resultados

En esta sección se presentan los hallazgos obtenidos del análisis térmico del radiador, enfatizando su desempeño global y la distribución de temperaturas en diferentes regiones del sistema.

Los resultados se acompañan de figuras y gráficos que ilustran el comportamiento térmico, proporcionando una interpretación clara y concisa que respalda las conclusiones del estudio.

En la Figura 5, en la imagen izquierda, se muestra la zona de entrada del radiador, donde el agua ingresa con una temperatura promedio cercana a 89 °C, representada por tonos cálidos (rojo, naranja y amarillo). Esta condición térmica refleja la acumulación de calor proveniente del motor. En la imagen derecha, correspondiente a la zona de salida, se observa una disminución notable de la temperatura, alcanzando valores cercanos a 80.4 °C, visibles en tonos fríos (verde y azul). Esta diferencia de aproximadamente 8.6 °C evidencia la capacidad del radiador para disipar el calor hacia el ambiente a través de las aletas.

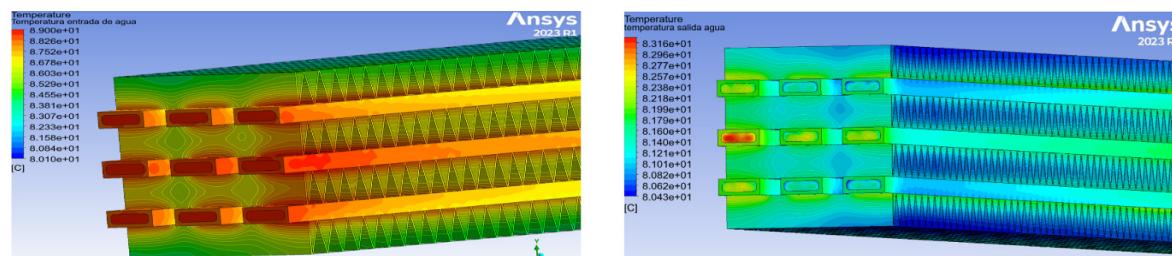


Figura 5. Contornos de temperatura del agua en los tubos del radiador en la zona de entrada (izquierda) y salida (derecha). Fuente: Elaboración propia mediante Ansys Fluent®

En la Figura 6 la imagen izquierda (entrada) muestra que las zonas más calientes (representadas en rojo) se concentran principalmente en las caras internas de los tubos, indicando una temperatura elevada al ingreso del fluido. Las regiones externas presentan temperaturas intermedias (verde y amarillo), lo que refleja una transferencia progresiva del calor hacia las aletas. En la imagen derecha (salida), predominan las zonas frías (azul y verde), indicando que el fluido ha cedido una parte significativa de su energía térmica al ambiente. Esta clara diferencia térmica entre entrada y salida confirma el desempeño eficiente del radiador.

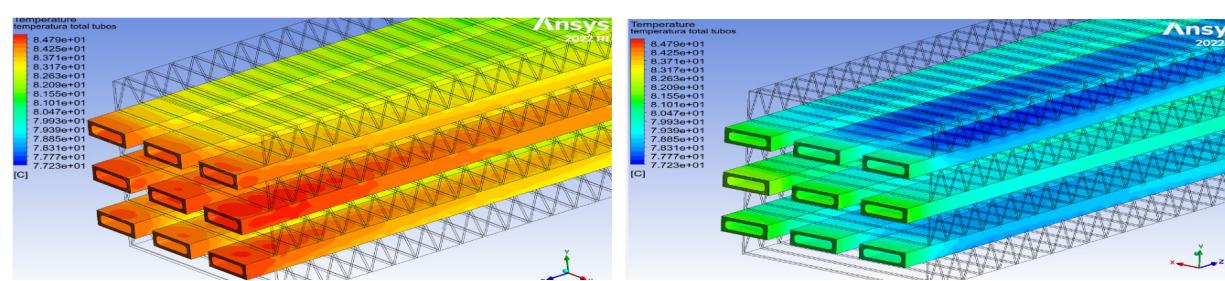


Figura 6. Contornos de temperatura de los tubos del radiador en la zona de entrada (izquierda) y salida imagen (derecha). Fuente: Elaboración propia mediante Ansys Fluent®

En la Figura 7 la imagen izquierda muestra que el agua ingresa al sistema con una temperatura uniforme de 89 °C, representada por tonos cálidos. En la imagen derecha, la distribución térmica varía entre 89 °C y 80.1 °C, lo que indica que el fluido pierde calor de forma gradual a medida que avanza. Esta variación evidencia una transferencia efectiva de calor del agua hacia el aire circundante a lo largo del recorrido dentro del radiador.

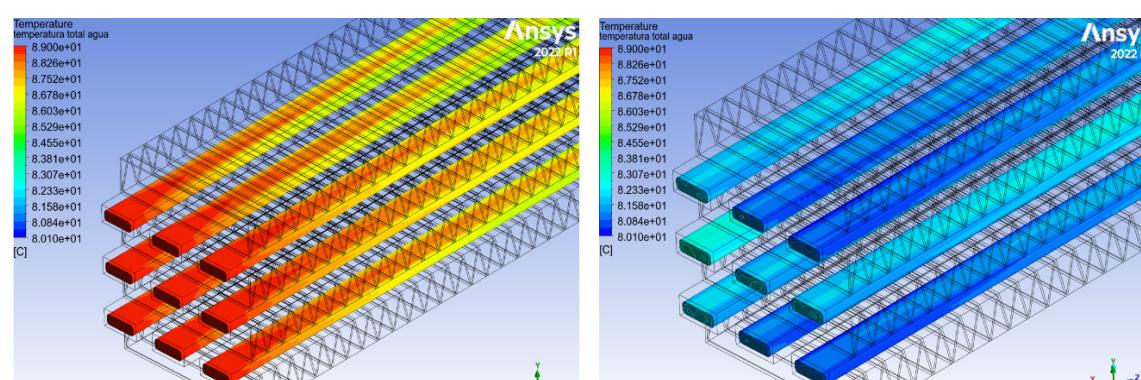


Figura 7. Contornos de temperatura del flujo refrigerante de agua en la zona de entrada (izquierda) y salida imagen (derecha). Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

En la Figura 8 el tubo ubicado en la parte inferior, cercano al motor, presenta la temperatura más alta, debido a factores como la restricción del flujo de aire, la distribución desigual del agua, y la proximidad al calor irradiado por el motor. Esta condición resalta la necesidad de estudiar posibles ajustes en el diseño del radiador para favorecer una disipación térmica más uniforme.

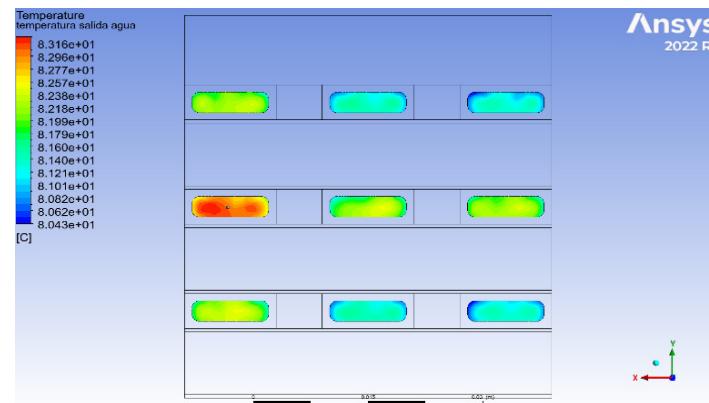


Figura 8. Contornos de temperatura en las diferentes salidas del flujo refrigerante de agua. Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

En la Figura 9 la imagen izquierda (entrada) muestra temperaturas elevadas de las aletas en las zonas cercanas a los tubos, indicadas por colores cálidos (rojo y amarillo), y temperaturas más bajas en las áreas externas, representadas por tonos fríos (verde y azul). Esta distribución refleja una transferencia progresiva del calor desde el fluido hacia las aletas. En la imagen derecha (salida), la distribución térmica muestra cómo el aire ha extraído el calor de manera efectiva, lo cual confirma el buen desempeño del diseño geométrico de las aletas para disipar calor hacia el ambiente.

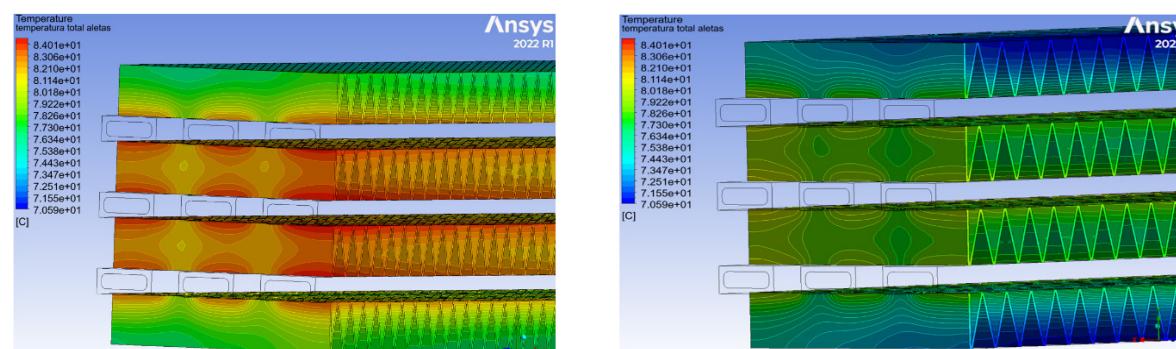


Figura 9. Contornos de temperatura total de las aletas del radiador en la zona de entrada (izquierda) y salida imagen (derecha). Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

En la Figura 10, en la imagen izquierda, se presenta un flujo de aire uniforme en la entrada del radiador, con una temperatura constante de 28 °C. En cambio, en la imagen derecha, se observa que la temperatura del aire a la salida varía significativamente, desde 84.147 °C hasta 30.159 °C. Esta notable variación térmica evidencia la absorción efectiva del calor por parte del aire durante su recorrido a través del radiador, confirmando la eficiencia del sistema en la disipación térmica.

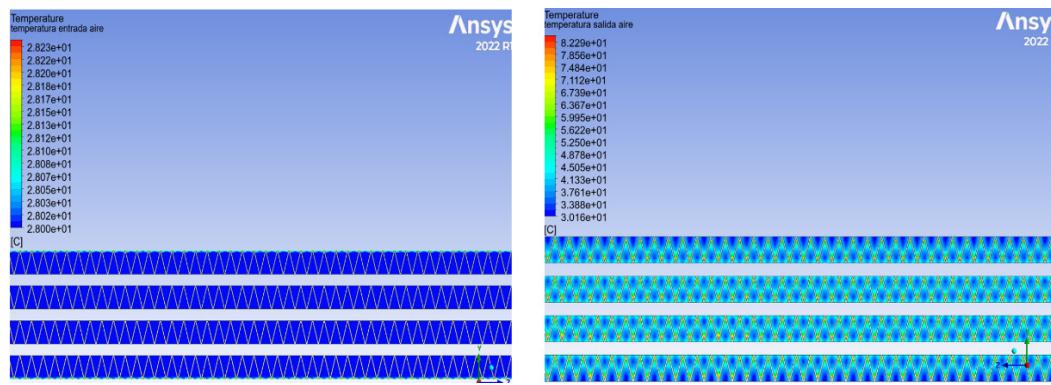


Figura 10. Contornos de temperatura del aire en la zona de entrada (izquierda) y salida (derecha) del radiador. Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

En la Figura 11, en la imagen izquierda, se observa cómo el aire absorbe calor de los tubos, evidenciado por los colores cálidos que indican temperaturas elevadas al inicio. Por otro lado, en la imagen derecha, predominan colores más fríos (verde y azul), indicando que el aire ha experimentado una disminución de temperatura al salir del radiador. Este cambio térmico confirma un intercambio eficiente de calor entre el aire y los tubos del radiador durante su recorrido.

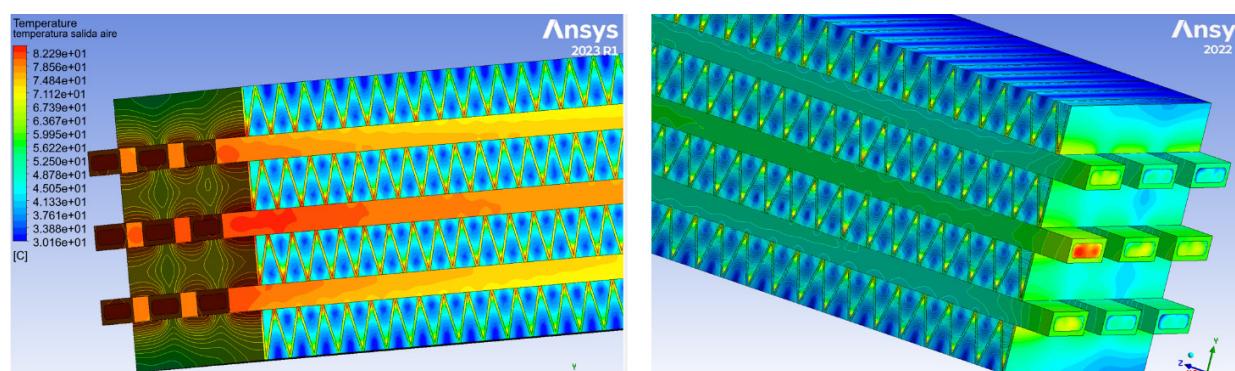


Figura 11. Contornos de temperatura del aire atravesando las aletas en la entrada (izquierda) y salida (derecha) del radiador. Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

La Figura 12 muestra la distribución térmica del aire, evidenciada por un gradiente de colores que va de azul (aire frío) a rojo (aire caliente), lo cual indica un calentamiento progresivo y uniforme, facilitado por el diseño de las aletas, que genera turbulencias y mejora la transferencia de calor.

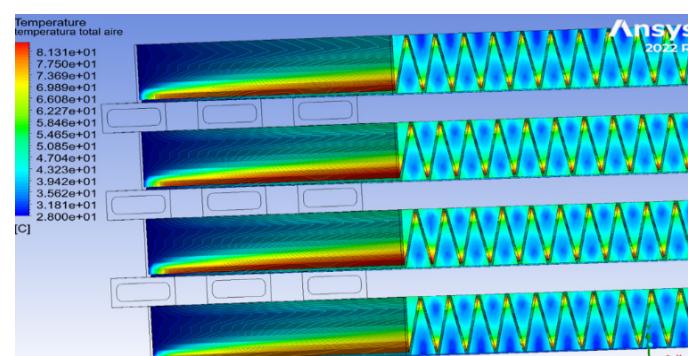


Figura 12. Contornos de temperatura total del aire. Fuente: elaboración propia mediante Ansys Fluent®

La Figura 13 muestra cómo el Número de Reynolds aumenta con la velocidad del agua en los tubos del radiador. A una velocidad de 0.682 m/s, se obtiene un número de Reynolds de 9539, lo que indica un flujo turbulento, favoreciendo la transferencia de calor. Sin embargo, velocidades más altas pueden incrementar las pérdidas de presión, afectando la eficiencia del sistema de enfriamiento.

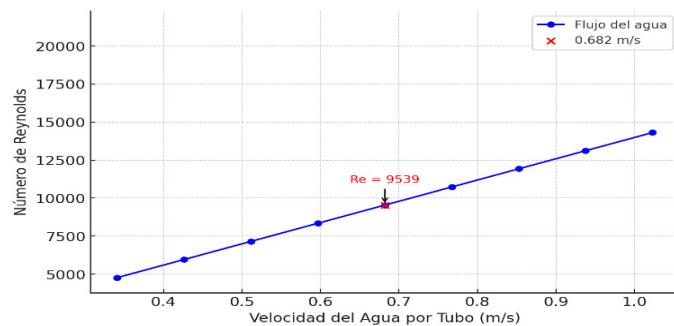


Figura 13. Comportamiento del Número de Reynolds del agua según la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 14 ilustra el incremento del Número de Reynolds con la velocidad del aire en los tubos del radiador. A una velocidad de 15.47 m/s, se obtiene un número de Reynolds de 4749, lo que indica un régimen de transición hacia flujo turbulento, lo cual contribuye a una mejor disipación del calor. No obstante, velocidades excesivamente altas pueden aumentar la resistencia aerodinámica, afectando el consumo energético del ventilador.

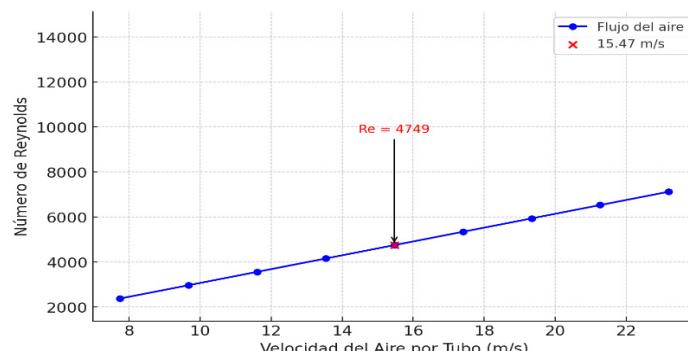


Figura 14. Comportamiento del Número de Reynolds del aire según la velocidad del flujo. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 15 muestra la relación entre el Número de Reynolds del agua y del aire en el radiador, lo que permite analizar su impacto en la transferencia de calor. Se observa una correlación directa entre ambos valores: a medida que el flujo de agua aumenta, el régimen de convección del aire también se intensifica, afectando la eficiencia térmica del sistema. El agua opera en un régimen turbulento, mientras que el aire se encuentra en transición, lo que sugiere una disipación de calor eficiente, aunque con posibles efectos de resistencia aerodinámica y pérdida de presión. La validación de estos valores mediante simulación CFD confirma la precisión del modelo, respaldando el análisis térmico del radiador y su aplicabilidad en futuras configuraciones.

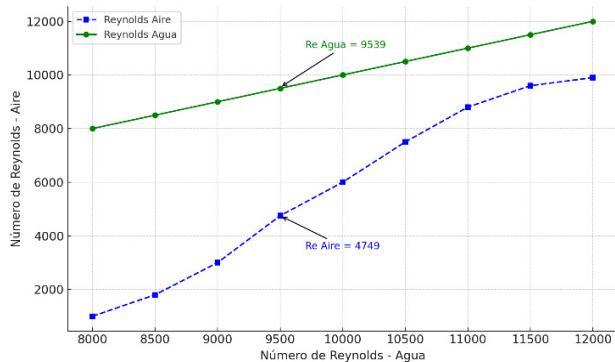


Figura 15. Comparación del Número de Reynolds entre el Agua y el Aire en el Radiador. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 16 compara la presión de salida del agua entre los datos experimentales (19950.7 Pa) y la simulación CFD (21107.3 Pa), con una diferencia del 5.80%. Esta discrepancia puede atribuirse a simplificaciones geométricas, condiciones de frontera ideales y subestimación de pérdidas hidráulicas. A pesar de ello, la correlación entre ambos resultados es aceptable, validando el modelo CFD para futuros análisis del comportamiento hidráulico del radiador.

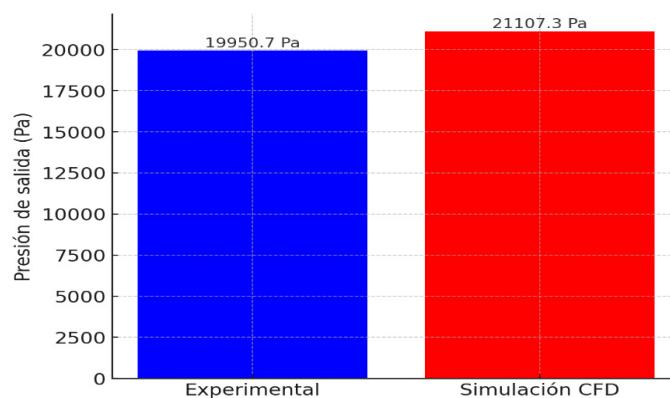


Figura 16. Presión de salida del agua en el radiador: Comparación entre valores experimentales y simulación CFD. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 17 compara la caída de presión del agua en un solo tubo del radiador entre los datos experimentales y la simulación CFD. Se observa que, a medida que aumenta el flujo de agua, la caída de presión también se incrementa debido a la mayor resistencia hidráulica. Para un flujo de 0.01916 kg/s, la caída de presión experimental fue de 3297.7 Pa, mientras que la simulación CFD arrojó 2141.1 Pa, indicando que el modelo numérico subestima la pérdida de presión. Esto puede deberse a diferencias en la representación de la turbulencia, simplificaciones geométricas o condiciones de frontera. A pesar de la diferencia, la tendencia general del CFD es coherente, por lo que se pueden realizar ajustes al modelo para mejorar su precisión. Este análisis es clave para validar y perfeccionar el diseño del radiador mediante simulaciones más detalladas.

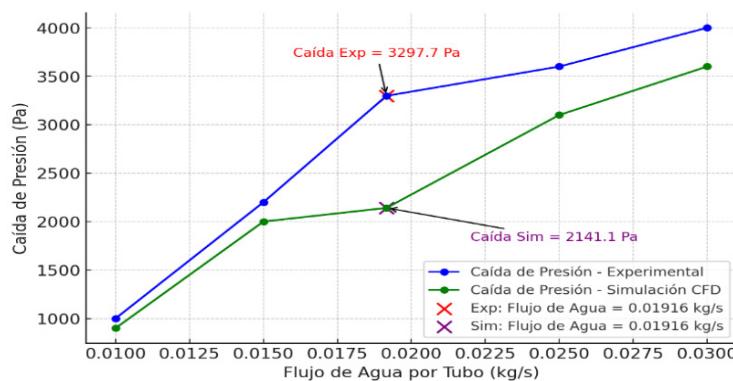


Figura 17. Validación de la caída de presión del agua en un tubo del radiador mediante comparación entre resultados experimentales y CFD. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 18 muestra la caída de presión del agua en función del flujo total en el radiador completo, compuesto por tres columnas de tubos, cada una con 28 tubos. Se observa que, a medida que el flujo aumenta, la caída de presión también lo hace, debido a la resistencia hidráulica interna. Para un flujo de 1.6094 kg/s, la caída de presión medida es de 3297.7 Pa, un valor clave para validar modelos CFD y analizar el comportamiento hidráulico del sistema de enfriamiento.

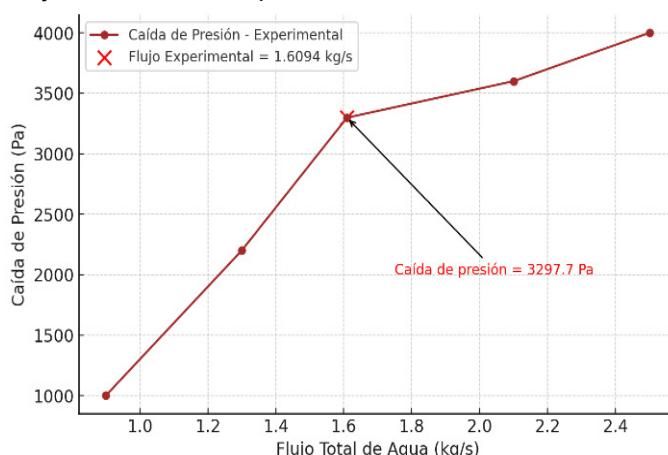


Figura 18. Relación entre la caída de presión y el flujo total de agua en el radiador completo, datos experimentales. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 19 presenta los resultados del análisis experimental mostrando una reducción de temperatura del agua desde 89 °C hasta 76 °C, mientras que la del aire se incrementa de 28 °C a 39 °C al atravesar el radiador. Este comportamiento indica un proceso de transferencia de calor eficiente, demostrando la capacidad del radiador para disipar calor y mantener un funcionamiento térmico óptimo.

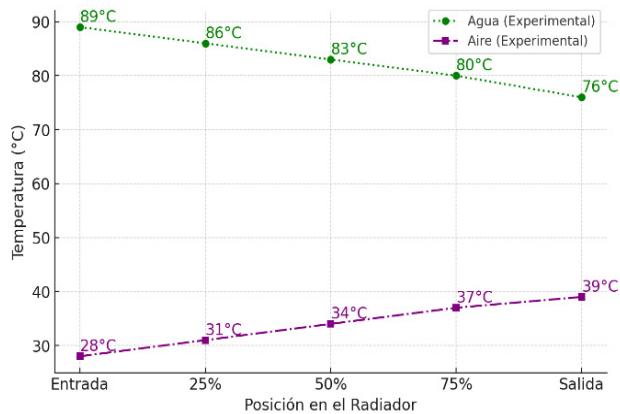


Figura 19. Distribución de temperatura del agua y aire en el análisis experimental. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 20 muestra los resultados obtenidos mediante simulación CFD, donde el agua cede calor al aire al circular por el radiador, disminuyendo su temperatura de 89 °C a 80.4 °C. Simultáneamente, el aire absorbe esta energía térmica, elevando su temperatura de 28 °C a 41.048 °C. Este comportamiento confirma un proceso eficiente de intercambio térmico, asegurando una adecuada disipación de calor dentro del sistema.

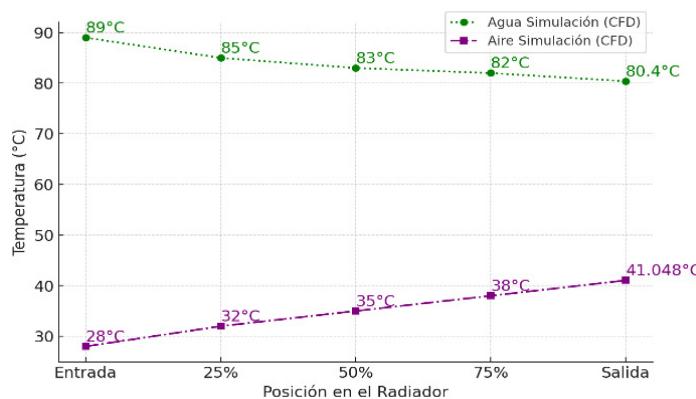


Figura 20. Distribución de temperatura del agua y aire en la Simulación CFD. Fuente: Elaboración propia mediante Python®

La Figura 21 presenta la variación simultánea de la temperatura y la presión del agua a lo largo del conducto del radiador, desde la entrada hasta la salida. Se observa una disminución progresiva en ambos parámetros conforme el fluido avanza, lo cual evidencia tanto el proceso de transferencia de calor hacia el aire ambiente, como la pérdida de presión generada por la fricción interna en los tubos. La temperatura del agua disminuye de 89 °C a 76 °C, mientras que la presión cae de 23248.4 Pa a 19950.7 Pa. Esta relación directa entre los extremos del radiador permite evaluar de manera conjunta la eficiencia térmica e hidráulica del sistema. El hecho de que la línea correspondiente a la temperatura se sitúe visualmente por encima de la de presión en la gráfica se debe a la diferencia en las escalas numéricas y a los procesos físicos involucrados. La disminución de temperatura responde a la transferencia de calor por convección interna, descrita por el balance energético del fluido. En contraste, la presión disminuye como resultado de la fricción del fluido al circular por los tubos, fenómeno representado por la ecuación de Darcy-Weisbach. Aunque ambas líneas son rectas en la gráfica, reflejan correctamente la tendencia general de los fenómenos que ocurren simultáneamente. La diferencia de pendiente y magnitud entre ambas variables justifica su posición relativa en el gráfico, lo que resulta coherente con los resultados obtenidos en las simulaciones CFD y respalda la validez del modelo numérico utilizado en este estudio.

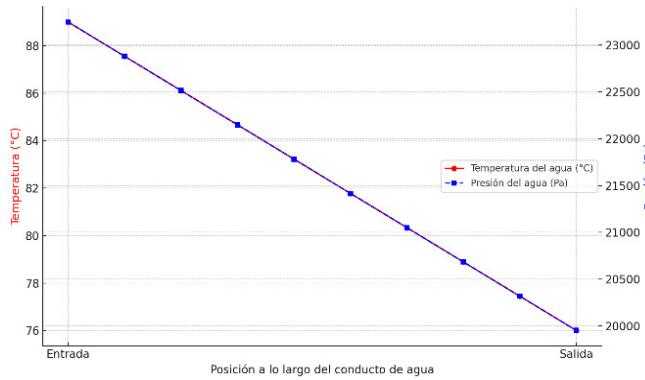


Figura 21. Distribución de la temperatura y presión del agua a lo largo de los tubos del radiador, desde la entrada hasta la salida. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 22 compara la distribución de temperatura en las aletas entre los datos experimentales y la simulación CFD, evidenciando cómo la temperatura disminuye progresivamente a lo largo de los tubos que conducen el agua caliente del radiador como resultado de la transferencia térmica hacia el aire. Este análisis permite evaluar la precisión del modelo CFD en relación con los datos experimentales, validando su capacidad predictiva y la eficiencia del radiador.

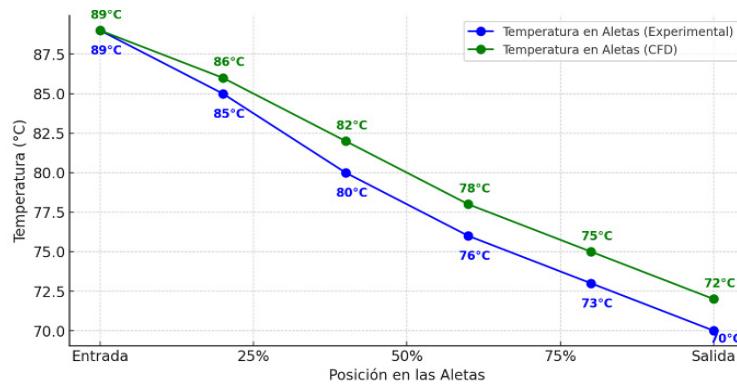


Figura 22. Distribución de temperatura en las aletas del radiador (Experimental vs CFD). Fuente: elaboración propia mediante Python®

En la Figura 23 se analiza la eficiencia en la simulación de 9 tubos, mostrando cómo el agua caliente fluye a través de un mayor número de tubos, distribuyendo la transferencia térmica en una superficie más amplia. El aire circulante extrae calor mediante convección, mientras que en las paredes de los tubos ocurre la conducción térmica. La eficiencia obtenida refleja la cantidad de energía disipada antes de la salida del fluido, lo que proporciona un indicador clave del rendimiento del sistema.

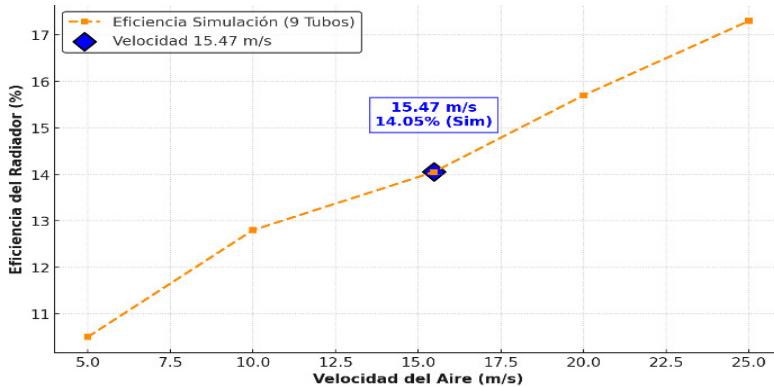


Figura 23. Relación entre la eficiencia de radiador y la velocidad del aire 9 tubos. Fuente: elaboración propia mediante Python®

La Figura 24 muestra la variación de la efectividad del radiador a lo largo de su recorrido. Se observa un incremento progresivo desde 0 % en la entrada hasta aproximadamente 43.69 % en la salida, lo que evidencia una disipación térmica eficiente a lo largo del radiador. Este comportamiento sugiere una transferencia de calor constante desde el fluido hacia el aire, reflejando el desempeño térmico del sistema. No obstante, el diseño del radiador presenta aún oportunidades de mejora en ciertas zonas, con el fin de incrementar su efectividad general sin comprometer el equilibrio entre eficiencia térmica y resistencia hidráulica.

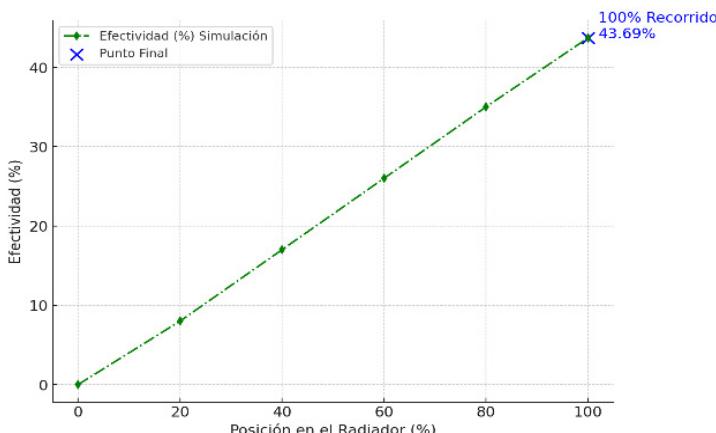


Figura 24. Variación de la efectividad a lo largo del radiador. Fuente: elaboración propia mediante Python®

Validación de la Simulación CFD con datos experimentales

La validación de los resultados numéricos obtenidos mediante simulación CFD se realizó a través de la comparación directa con los datos experimentales obtenidos en el banco de pruebas del radiador (5). Los principales parámetros evaluados fueron la temperatura del fluido refrigerante en la salida, la caída de presión del agua a lo largo de los tubos y el aumento de temperatura del aire tras su paso por las aletas. Los resultados experimentales indicaron una reducción en la temperatura del agua desde 89 °C hasta 76 °C, mientras que los resultados obtenidos mediante CFD arrojaron una temperatura de salida de 80.4 °C. Esta diferencia corresponde a un error relativo del 5.8%, dentro de un rango aceptable considerando las simplificaciones geométricas y condiciones ideales asumidas en el modelo. En términos de presión, el valor experimental de salida fue de 19950.7 Pa, comparado con los 21107.3 Pa obtenidos por simulación. Asimismo, la caída de presión en un tubo

del radiador fue de 3297.7 Pa experimentalmente, frente a 2141.1 Pa calculados por CFD. Aunque las simulaciones tienden a subestimar la pérdida de presión, la tendencia general se mantiene coherente con los resultados experimentales.

Finalmente, el análisis de temperatura del aire mostró que su ingreso al radiador fue de 28 °C, mientras que en la salida alcanzó hasta 39 °C en los datos experimentales y 41.048 °C en la simulación. Los resultados permiten concluir que las comparaciones realizadas demuestran que el modelo CFD empleado representa con buena aproximación el comportamiento térmico e hidráulico del radiador, por lo que puede utilizarse como herramienta de análisis para estudios similares en el ámbito de la ingeniería automotriz.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el modelo CFD desarrollado, basado en una geometría de 9 tubos y 4 hiladas de aletas, representa adecuadamente el comportamiento térmico e hidráulico del radiador evaluado. La validación con datos experimentales demostró que la simulación predice con buena aproximación la temperatura de salida del fluido refrigerante, la caída de presión en los tubos y el aumento de temperatura del aire, lo que respalda la fidelidad del modelo en las condiciones de operación específicas planteadas en este trabajo (2).

Se observó una reducción del 12% en la caída de presión y una diferencia del 5.8% en la predicción de la temperatura de salida del agua, lo cual se considera aceptable considerando las simplificaciones geométricas y las condiciones ideales asumidas en la simulación. Además, el aumento de temperatura del aire al atravesar las aletas indicó un intercambio térmico efectivo, tanto en los resultados experimentales como en los numéricos (4).

Esta discusión se centra exclusivamente en los resultados obtenidos dentro del alcance de este estudio. No se realiza una comparación directa con otros diseños reportados en la literatura debido a que las condiciones de operación, la capacidad térmica, la potencia del motor y las configuraciones geométricas varían considerablemente entre estudios.

Por tanto, los resultados aquí presentados deben interpretarse como específicos para las condiciones experimentales y de simulación empleadas. Los resultados confirman la utilidad del modelo CFD para analizar el comportamiento térmico y la distribución de presión en radiadores automotrices bajo condiciones controladas y definidas.

Conclusiones

Los resultados de este estudio validan el uso de simulaciones CFD en combinación con pruebas experimentales para evaluar el rendimiento térmico de radiadores en motores de combustión interna. La comparación entre los datos numéricos y experimentales mostró una diferencia menor al 5.8%, confirmando la precisión del modelo y su capacidad para representar fielmente los fenómenos de transferencia de calor y caída de presión en el radiador. En particular, la diferencia del 5.8% corresponde al error relativo entre la temperatura de salida del agua obtenida experimentalmente y la predicha por la simulación CFD. Experimentalmente se registró una temperatura de salida de 76 °C, mientras que la simulación CFD arrojó un valor de 80.4 °C. El cálculo del error porcentual se realizó utilizando la fórmula del error relativo, dividiendo la diferencia absoluta entre ambos valores entre el valor experimental y multiplicando por cien. El resultado obtenido fue de 5.8%, lo que indica que el modelo CFD predice con buena aproximación el comportamiento térmico del radiador, específicamente en lo que respecta a la temperatura de salida del fluido refrigerante. Este nivel de concordancia valida la utilidad del modelo numérico para representar los fenómenos reales de transferencia de calor en el sistema analizado.

Sin embargo, este estudio presenta ciertas limitaciones que deben considerarse. Primero, la geometría del modelo CFD fue simplificada a un subconjunto de 9 tubos con 4 hiladas de aletas,

lo que si bien representa con precisión el comportamiento térmico, no captura completamente los efectos de las interacciones en un radiador de tamaño completo. Segundo, el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST fue utilizado por su equilibrio entre precisión y costo computacional, en futuras investigaciones se podrían emplear modelos más avanzados como LES (Large Eddy Simulation) o RANS híbridos, que ofrecen una mejor captura de estructuras turbulentas y gradientes térmicos en flujos altamente complejos. Para fortalecer este estudio, se recomienda explorar el uso de materiales avanzados con mayor conductividad térmica, como aleaciones de aluminio con nanotecnología o recubrimientos de alta emisividad, que podrían mejorar la disipación de calor sin aumentar significativamente la resistencia aerodinámica o la caída de presión. Además, sería valioso investigar configuraciones híbridas, considerando variaciones en la geometría de los tubos y la disposición de las aletas, con el fin de mejorar la eficiencia térmica manteniendo un balance adecuado entre el rendimiento y el costo de manufactura.

En términos de aplicabilidad, los resultados de este estudio son altamente relevantes para el diseño de radiadores comerciales en la industria automotriz. La metodología presentada permite evaluar configuraciones geométricas y distintos materiales sin recurrir a ensayos físicos costosos, lo que acelera el desarrollo de sistemas de enfriamiento más eficientes, compactos y sostenibles. Estos resultados pueden extenderse a la gestión térmica en vehículos eléctricos e híbridos, donde la disipación de calor eficiente es fundamental para la durabilidad y el rendimiento de las baterías. Con el avance en tecnologías de simulación y manufactura, este enfoque puede ser clave en la evolución de nuevas generaciones de radiadores con mayor eficiencia térmica y menor impacto ambiental.

Trabajos a Futuro

Este estudio ha demostrado la utilidad de los modelos CFD validados experimentalmente para analizar el desempeño térmico e hidráulico de radiadores en motores de combustión interna. Sin embargo, se identifican diversas oportunidades para ampliar y fortalecer esta línea de investigación en futuros trabajos:

Ampliación del dominio geométrico: una limitación de este estudio fue el uso de un modelo reducido de 9 tubos. Sería conveniente implementar simulaciones con el radiador completo o con secciones más representativas que incluyan interacciones entre múltiples columnas, para capturar mejor los efectos globales del flujo.

Exploración de materiales avanzados: se propone analizar el uso de nuevas aleaciones o recubrimientos térmicos con alta conductividad, como aluminio tratado superficialmente o materiales con nanotecnología, que podrían mejorar la transferencia de calor sin afectar la resistencia estructural ni la aerodinámica.

Evaluación de configuraciones híbridas: se recomienda investigar variaciones geométricas en la forma de los tubos y el acomodo de las aletas, con el objetivo de encontrar un equilibrio entre disipación térmica y caída de presión. Esto podría incluir diseños de superficies con rugosidades controladas o aletas con geometrías adaptativas, que mejoren el intercambio térmico sin incrementar significativamente la resistencia al flujo.

Modelos de turbulencia más sofisticados: aunque el modelo $k-\omega$ SST ha mostrado buen desempeño, se sugiere emplear en estudios futuros técnicas más avanzadas como LES (Large Eddy Simulation) o modelos híbridos RANS/LES, que podrían capturar mejor los efectos de mezcla y estructuras turbulentas en zonas complejas.

Aplicación en sistemas eléctricos: los resultados podrían extenderse al estudio de sistemas de enfriamiento en vehículos eléctricos e híbridos, donde la gestión térmica de baterías y componentes electrónicos es crítica.

Estas propuestas de investigación permitirán mejorar la precisión de los modelos numéricos y su aplicabilidad en el diseño de radiadores más eficientes, sostenibles y adaptables a nuevas tecnologías de transporte.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Crisanto Mendoza Covarrubias. Curación de datos: Gildardo Solorio Díaz Análisis formal: Juan Mauricio Trenado Herrera, Gildardo Solorio Díaz. Adquisición de financiamiento: Alicia Aguilar Corona. Investigación: Crisanto Mendoza Covarrubias. Metodología: Gildardo Solorio Díaz. Dirección de Proyecto: Alicia Aguilar Corona. Recursos: Gildardo Solorio Díaz. Software: Juan Mauricio Trenado Herrera. Supervisión: Juan Mauricio Trenado Herrera, Crisanto Mendoza Covarrubias. Validación: Juan Mauricio Trenado Herrera, Crisanto Mendoza Covarrubias. Redacción - borrador original - Elaboración: Juan Mauricio Trenado Herrera. Redacción - revisión y edición - Elaboración: Juan Mauricio Trenado Herrera, Crisanto Mendoza Covarrubias.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

References

- [1] Achaichia A, Cowell TA. Heat transfer and pressure drop characteristics of flat tube and louvered plate fin surfaces. *Exp Therm Fluid Sci.* 1988;1(2):147–57. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90032-5).
- [2] Chen H, Liu Y, Zhang X. Enhanced heat transfer in finned-tube radiators with variable fin spacing: A numerical study. *J Therm Sci Eng Appl.* 2023;16(3):321-37. <https://doi.org/10.1115/1.4057245>.
- [3] Dittus FW, Boelter LMK. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. *Int Commun Heat Mass Transf.* 1985;12(1):3–22. [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(85\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0735-1933(85)90003-X).
- [4] Ferraris W, et al. Single layer cooling module for A-B segment vehicles. *SAE Tech Pap.* 2015; April. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1692>.
- [5] Wang F, et al. Comprehensive evaluation of the performances of heat exchangers with aluminum and copper finned tubes. *Int J Chem Eng.* 2023;2023. <https://doi.org/10.1155/2023/6666947>.
- [6] Garelli L, Ríos Rodriguez G, Dorella JJ, Storti MA. Heat transfer enhancement in panel type radiators using delta-wing vortex generators. *Int J Therm Sci.* 2019;137:64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.037>.
- [7] Jabbar A, Kadhim Z, Khalaf K. Effect of the tube material on the thermal performance of automobile (radiator) of cooling system. *Wasit J Eng Sci.* 2024;12:81-93. <https://doi.org/10.31185/ejuow.Vol12.Iss3.553>.
- [8] Krásný I, Astrouski I, Raudenský M. Polymeric hollow fiber heat exchanger as an automotive radiator. *Appl Therm Eng.* 2016;108:798–803. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.181>.
- [9] Najman OA, Khadhim ZK, Khalaf KA. Numerical investigation on enhancing heating performance in automotive radiator. 2022. <https://doi.org/10.31185/ejuow.Vol10.Iss3.384>.
- [10] Oliet C, Oliva A, Castro J, Pérez-Segarra CD. Parametric studies on automotive radiators. *Appl Therm Eng.* 2007;27(11–12):2033–43. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.006>.

[11] Park KW, Pak HY. Flow and heat transfer characteristics in flat tubes of a radiator. *Numer Heat Transf A Appl.* 2002;41(1):19–40. <https://doi.org/10.1080/104077802317221429>.

[12] Patel HV, Subhedar DG, Ramani B. Numerical investigation of performance for car radiator oval tube. *Mater Today Proc.* 2017;4(9):9384–89. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.190>.

[13] Razzaghi, P., Ghassabian, M., Daemiashkezari, M., Abdulfattah, A., Hassanzadeh, H. & Ahmad, H. Thermo-hydraulic performance evaluation of turbulent flow and heat transfer in a twisted flat tube: A CFD approach. *Case Stud Therm Eng.* 2022; 35: 102107. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102107>.

[14] Vajjha RS, Das DK, Ray DR. Development of new correlations for the Nusselt number and the friction factor under turbulent flow of nanofluids in flat tubes. *Int J Heat Mass Transf.* 2015;80:353–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.018>.

[15] Zeeshan M, Nath S, Banja D. Numerical study to predict optimal configuration of fin and tube compact heat exchanger with various tube shapes and spatial arrangements. *Energy Convers Manag.* 2017;148:737–52. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.011>.

[16] Sahel D, Ameur H, Mellal M. Effect of tube shape on the performance of a fin and tube heat exchanger. *J Mech Eng Sci.* 2020;14(2):6709–18. <https://doi.org/10.15282/JMES.14.2.2020.13.0525>.

[17] Zuñiga-Cerroblanco JL, Collazo-Barrientos J, Hernandez-Guerrero A, Hortelano Capetillo J. Thermal and hydraulic analysis of different tube geometries to improve the performance of an automotive radiator. *Rev Ing Ind.* 2020;11(4):13–23. <https://doi.org/10.35429/JIE.2020.11.4.13.23>.