



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del rendimiento energético de distintos fluidos en un
intercambiador de microcanales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ignacio Liaño Cuquerella

DIRECTORES: Jose Iglesias Prado
Javier Pérez Vallejo

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del rendimiento energético de distintos fluidos en un
intercambiador de microcanales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

La creciente demanda de sistemas de gestión térmica eficientes en electrónica de potencia y dispositivos compactos exige nuevos enfoques en la selección de fluidos, especialmente aquellos compatibles con criterios medioambientales y de seguridad dieléctrica. En este contexto, cobra relevancia el análisis de fluidos alternativos con propiedades térmicas y eléctricas adecuadas, especialmente en configuraciones exigentes como los intercambiadores de microcanales. Este Trabajo de Fin de Grado evalúa el rendimiento energético de distintos fluidos en un intercambiador de microcanales, con especial atención a aceites vegetales como alternativas sostenibles al agua en refrigeración líquida.

Para ello, se ha utilizado un banco experimental basado en un sistema de refrigeración líquida para microprocesadores. Se han analizado comparativamente el agua y dos aceites vegetales (maíz y soja), bajo condiciones de operación realistas mediante el control del sistema hidráulico y eléctrico. Dadas las limitaciones experimentales impuestas por las propiedades termofísicas de los aceites, el estudio se ha complementado con un análisis teórico mediante figuras de mérito (FOM), que permite estimar su potencial térmico. El trabajo propone una metodología aplicable a futuras investigaciones sobre intercambiadores térmicos con fluidos alternativos, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles en refrigeración electrónica.

PALABRAS CLAVE

Refrigeración de dispositivos electrónicos, transferencia de calor, intercambiador de calor de microcanales, convección, aceites vegetales

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a mis padres, por empujarme siempre a ser mejor y no desistir conmigo, incluso en los momentos más difíciles. A mi novia, gracias por su apoyo durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado y, sobre todo, por su constante apoyo durante toda mi estancia en la Escuela Naval. También quiero agradecer a mi compañera Marta por su gran ayuda en el laboratorio y, por supuesto, un agradecimiento muy especial a todos mis compañeros de promoción, quienes han compartido conmigo cada paso de estos cinco años.

Por último, quiero agradecer de forma especial a mis tutores, Jose Iglesias Prado y Javier Pérez Vallejo. Por su constante ayuda y disponibilidad, sin la cual no habría sido capaz de sacar este trabajo adelante, muchas gracias.

Contenido

Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
1 Introducción y objetivos	5
1.1 Introducción	5
1.2 Objetivos	6
2 Estado del arte	7
2.1 Introducción	7
2.2 Intercambiadores de calor	9
2.2.1 Según el proceso de transferencia:	10
2.2.2 Según el tipo de construcción	11
2.3 Intercambiadores de microcanales	13
2.4 Estudio de los refrigerantes.....	14
2.4.1 Aceite de cártamo	15
2.4.2 Aceite de linaza.....	16
2.4.3 Aceite de soja.....	17
2.4.4 Aceite de girasol	17
2.4.5 Aceite de maíz	18
2.5 Aspectos fundamentales de la transferencia de calor.....	21
2.5.1 Ecuaciones fundamentales del intercambio de calor	21
3 Desarrollo del TFG.....	25
3.1 Descripción del banco de ensayos	25
3.1.1 Circuito hidráulico	25
3.1.1.1 Elementos clave del montaje hidráulico	26
3.1.2 Circuito eléctrico	27
3.1.2.1 Elementos clave del montaje eléctrico	27
3.2 Procedimiento experimental	28
3.2.1 Desarrollo del ensayo	29
3.2.2 Evaluación de la fiabilidad del ensayo	30
3.3 Análisis de datos	30
3.3.1 Coeficiente de convección y resistencias térmicas asociadas.....	30
3.3.2 Figuras de mérito	32
3.3.3 Propiedades termofísicas de los fluidos analizados.....	33
4 Resultados y validación de los ensayos.....	35

4.1 Validación con fluido de referencia	35
4.2 Análisis de los fluidos térmicos estudiados	36
4.3 Comparación con figuras de mérito	39
5 Conclusiones y líneas futuras	42
5.1 Conclusiones	42
5.2 Líneas futuras	43
6 Bibliografía.....	45
ANEXO I: IMPLICACIONES AMBIENTALES	48
ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Sistema de refrigeración del inventor Charles Tellier. [5]	7
Figura 2-2. Disipador de calor en un disco SSD. [6]	8
Figura 2-3. Métodos de transferencia de calor. [12]	9
Figura 2-4. Torres de enfriamiento industrial. [13]	10
Figura 2-5. Análisis térmico en intercambiador de carcasa y tubos. [13]	11
Figura 2-6. Tubo con lámina en espiral insertada para favorecer la turbulencia. [26]	11
Figura 2-7. Intercambiador de placas a contraflujo. [12]	12
Figura 2-8. Intercambiador de calor de microcanales de tipo placas. [17]	14
Figura 2-9. Fluido basado en aceite de soja (Envirotemp FR3). [26]	15
Figura 2-10. Aceites empleados para el estudio. Fuente propia	19
Figura 3-1. Esquema hidráulico. Fuente propia	26
Figura 3-2. Circuito hidráulico. Fuente propia	27
Figura 3-3 Circuito eléctrico. Fuente propia	28
Figura 3-4. Tablas de las propiedades termofísicas. Laboratorio Uvigo	34
Figura 4-1. Coeficiente de convección en función del caudal usando agua como fluido de trabajo. Fuente propia	35
Figura 4-2. Nusselt en función de Reynolds usando agua como fluido de trabajo. Fuente propia ..	36
Figura 4-3. Número de Nusselt frente al coeficiente de convección para a) aceite de soja y b) aceite de maíz. Fuente propia	36
Figura 4-4. Coeficiente de convección en función del caudal para a) el aceite de soja y b) aceite de maíz. Fuente propia	37
Figura 4-5. Número de Nusselt en función del número de Reynolds para el agua y los aceites estudiados. Fuente propia	38
Figura 4-6. Coeficientes de convección en función del caudal para el agua y los aceites estudiados. Fuente propia.	38
Figura 4-7. Comparación del calor transferido en función del número de Reynolds para agua y aceites. Fuente propia	39
Figura 4-9. Ratio entre Mo del aceite de soja y maíz en función de la temperatura. Fuente propia	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Resumen de los aceites. Fuente propia.....	20
Tabla 2-2. Tabla resumen fórmulas de interés. Fuente propia.....	24
Tabla 3-1. Exponentes número de Mouromtseff. [36].....	32
Tabla 4-1. Relación Mo Soja/ Mo Maíz. Fuente propia.	40
Tabla 4-2. Ratio de los coeficientes de convección del aceite de soja respecto al de maíz en función del caudal. Fuente propia	40

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El desarrollo tecnológico y la creciente demanda de dispositivos electrónicos eficientes han marcado un punto de inflexión en la gestión y optimización del uso de la energía. La tecnología, cada vez más presente en todos los aspectos de la vida cotidiana, ha impulsado la creación de dispositivos más compactos, potentes y multifuncionales. Desde los teléfonos inteligentes hasta los superordenadores utilizados en simulaciones científicas de gran escala, pasando por los vehículos eléctricos que están transformando el transporte, todos estos sistemas generan calor residual como una consecuencia inevitable de su funcionamiento. Sin una gestión térmica adecuada, el sobrecalentamiento comprometería no solo el rendimiento, sino también la vida útil y la seguridad de estos dispositivos. Ante este desafío, se han desarrollado diversas estrategias de disipación térmica, entre las cuales los intercambiadores de calor de microcanales han demostrado ser una de las soluciones más eficientes.

Los intercambiadores de microcanales se caracterizan por su diseño compacto y su capacidad para transferir calor de manera eficiente. Su diseño, basado en pequeños canales que permiten un flujo controlado de fluidos, favorece una elevada densidad de transferencia térmica con un tamaño reducido. Además, contribuyen a la optimización del uso de materiales y a la reducción del consumo energético en sistemas de enfriamiento, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones. Su implementación se extiende más allá de la electrónica de consumo, abarcando sectores como la industria aeroespacial, los centros de datos y los sistemas de energía renovable.

Actualmente, se estima que más de 500 millones de dispositivos electrónicos a nivel global integran intercambiadores de microcanales en sus sistemas de gestión térmica. Este número no deja de crecer, impulsado por tendencias como la miniaturización de los componentes electrónicos, el aumento de la densidad de potencia y la necesidad de cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas, que obligan a una búsqueda de mejora y eficiencia. Sin embargo, este avance también plantea retos significativos, entre los que destaca la selección adecuada de los fluidos de trabajo que circulan por los intercambiadores [1].

Los fluidos utilizados en los intercambiadores de microcanales desempeñan un papel crítico en su rendimiento. Deben cumplir con una amplia variedad de requisitos para garantizar su eficacia y sostenibilidad. Entre estos requisitos destacan su alta capacidad de transferencia térmica, que permite absorber y disipar el calor de manera eficiente; su baja viscosidad, que reduce las pérdidas por fricción y mejora el flujo [2]. Además, en un contexto en el que la sostenibilidad se ha convertido en una prioridad global, el perfil ambiental de estos fluidos es cada vez más relevante. Esto incluye su impacto en el

consumo energético del sistema, así como las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas tanto a su producción como a su uso.

1.2 Objetivos

A pesar de los avances logrados, persisten desafíos en la identificación e implementación de soluciones óptimas para la gestión térmica en sistemas electrónicos. El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es evaluar el rendimiento energético de distintos fluidos en un intercambiador de microcanales, con el fin de determinar la opción más eficiente en términos de transferencia de calor, consumo energético.

Para alcanzar este propósito, se llevará a cabo un análisis experimental del intercambiador, utilizando diferentes aceites vegetales como fluidos de trabajo en un banco de ensayos. Entre los objetivos específicos se incluyen la puesta a punto del banco de ensayos, el estudio experimental de las capacidades de transferencia de calor de los fluidos seleccionados, la comparación con figuras de mérito y modelos teóricos que predicen su comportamiento.

Los resultados obtenidos permitirán establecer criterios técnicos para la selección de fluidos en aplicaciones de refrigeración líquida de dispositivos electrónicos, contribuyendo al desarrollo de sistemas más eficientes y sostenibles. Asimismo, el estudio proporcionará datos que facilitarán la optimización en el uso de aceites como fluidos térmicos, buscando un equilibrio entre sus propiedades térmicas y su viabilidad técnica y económica.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Antes del desarrollo de la refrigeración artificial, las civilizaciones antiguas dependían de métodos naturales para conservar alimentos y mantener temperaturas adecuadas. Por ejemplo, los egipcios, griegos y romanos utilizaban cuevas naturales para almacenar nieve y hielo durante los periodos cálidos, permitiendo la conservación de alimentos y bebidas.

Con el paso del tiempo, surgió la necesidad de soluciones más avanzadas para gestionar el calor, especialmente con la revolución industrial y el posterior auge de la tecnología. A medida que iban avanzando, los sistemas industriales y los dispositivos electrónicos modernos generaban densidades de potencia térmica significativamente mayores que las observadas en aplicaciones históricas. Este aumento en la generación de calor hizo que las soluciones rudimentarias, como la disipación pasiva, resultaran inadecuadas.

En 1824, el inventor británico Robert Stirling patentó el primer intercambiador de calor, conocido como "regenerador de aire caliente". Este dispositivo permitía el calentamiento y enfriamiento del aire mediante una disposición de tubos y placas metálicas, y tuvo una amplia aplicación en sectores industriales como la industria textil y la fabricación de papel.

En la década de 1850, el inventor francés Charles Tellier desarrolló el primer sistema de refrigeración por compresión mecánica cuya disposición puede verse en la figura 2-1, este, utilizaba un intercambiador de calor para enfriar el gas refrigerante. Este sistema permitió la creación de refrigeradores modernos y sistemas de aire acondicionado [3].

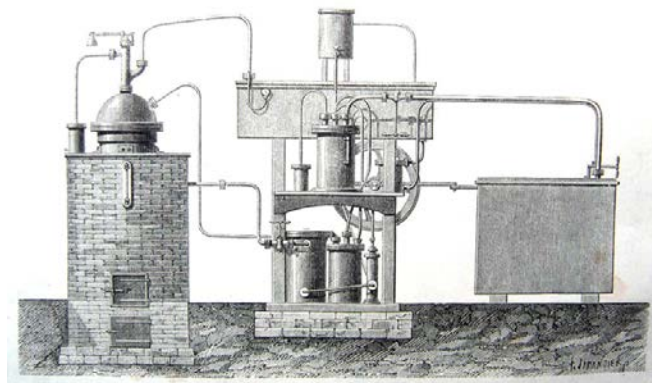


Figura 2-1. Sistema de refrigeración del inventor Charles Tellier. [5]

Estos sistemas marcaron un avance significativo al incrementar la eficiencia y permitir un mejor control térmico en aplicaciones industriales como plantas químicas, motores de combustión interna y sistemas de calefacción. Sin embargo, la tecnología evolucionó y las demandas energéticas crecieron, especialmente en el siglo XX con la llegada de los sistemas electrónicos y los procesos de alta densidad energética, momento en el que se hizo evidente que los intercambiadores tradicionales ya no eran suficientes.

Con el avance de la tecnología y la miniaturización de los componentes electrónicos, la gestión térmica se convirtió en un desafío crítico. El exceso de calor en los dispositivos electrónicos acorta su vida útil, limita sus capacidades y provoca daños irreparables [4]. Por ejemplo, en los discos SSD, temperaturas superiores a 60 °C pueden desencadenar mecanismos de protección que reducen su rendimiento, y temperaturas que superan los 70 °C pueden causar fallos permanentes [5]. Por lo tanto, es esencial implementar sistemas de refrigeración eficaces que mantengan las temperaturas operativas dentro de rangos seguros y que puedan adaptarse a las necesidades de espacio que las nuevas tecnologías imponen, garantizando así la fiabilidad y el rendimiento óptimo de los sistemas electrónicos (ver figura 2-2).



Figura 2-2. Disipador de calor en un disco SSD. [6]

De esta forma, los intercambiadores de calor de microcanales (MCHE, del inglés Micro channel exchanger) fueron introducidos en la década de 1980 como alternativa a los sistemas de refrigeración convencionales. Los ingenieros Tuckerman y Pease (1981) demostraron que estos dispositivos podían disipar hasta 790 W/cm², una mejora considerable respecto a métodos tradicionales donde se disipaban densidades de calor en el rango de 10 a 20 W/cm² [7]. Desde entonces, múltiples estudios han investigado variables como la geometría de los canales, los materiales empleados y la optimización de las condiciones operativas.

Investigaciones recientes han analizado cómo la eficiencia de estos intercambiadores depende de factores como la configuración de los canales, la naturaleza del fluido de trabajo y las condiciones de operación [8]. Adicionalmente, se ha observado que el uso de nanofluidos y tratamientos superficiales puede mejorar la transferencia térmica y minimizar la resistencia hidráulica en los microcanales [9]. No obstante, todavía existen obstáculos en cuanto a la selección del fluido térmico más adecuado para aplicaciones específicas.

2.2 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos diseñados para facilitar la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos o entre un fluido y una superficie sólida, sin que estos entren en contacto directo en la mayoría de los casos. Su aplicación es fundamental en sectores como la generación de energía, la industria química, la refrigeración y la climatización, donde permiten optimizar el aprovechamiento del calor y mejorar la eficiencia energética de los sistemas térmicos [10]. Como podemos ver en la figura 2-3, los intercambiadores de calor pueden transferir el calor mediante tres métodos:

- **Conducción:** este proceso ocurre cuando dos objetos con temperaturas diferentes entran en contacto físico, permitiendo que la energía térmica se transfiera desde la zona de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. Un ejemplo sería una olla de sopa caliente que transfiere calor a la mesa sobre la que se encuentra. En el ámbito industrial, dispositivos como enfriadores de procesos, hornos y unidades de refrigeración aprovechan la conducción.
- **Convección:** ocurre cuando la energía térmica es transportada por el movimiento de un fluido. Puede clasificarse en convección natural, donde el flujo es impulsado por diferencias de densidad generadas por cambios de temperatura, y convección forzada, donde el fluido es impulsado por diferencias de presión generadas por dispositivos tales como un ventilador o una bomba. Este mecanismo es clave en los intercambiadores de calor de aletas y en sistemas de refrigeración líquida en electrónica [11].
- **Radiación:** implica la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas sin necesidad de un medio material. Su relevancia en intercambiadores de calor es menor en comparación con la conducción y la convección, aunque puede ser importante en aplicaciones de alta temperatura, como en la industria metalúrgica y en sistemas de energía solar térmica [11].

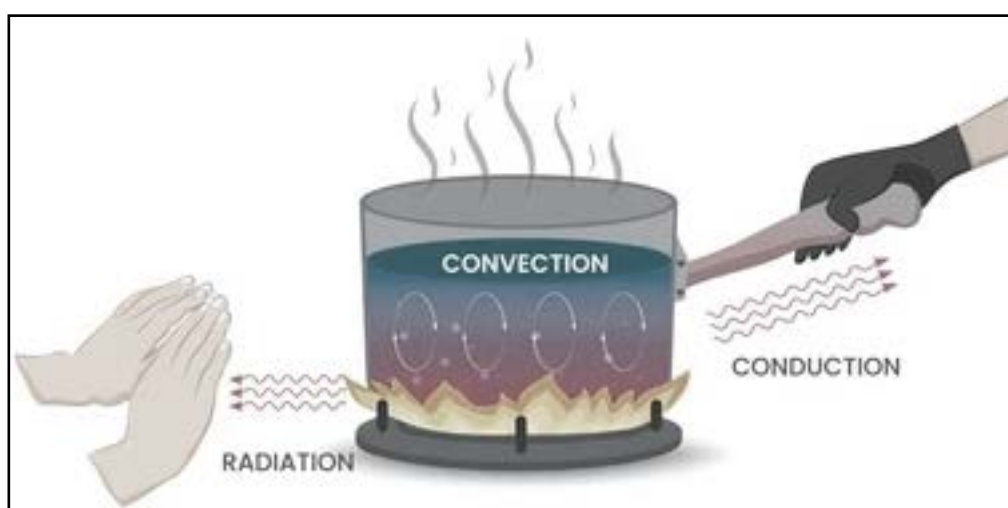


Figura 2-3. Métodos de transferencia de calor. [12]

A partir de lo anterior y teniendo en cuenta los diferentes tipos de intercambiadores de calor que existen, los cuales varían en disposición, materiales, tamaños y aplicaciones, es posible clasificarlos según diversos criterios:

2.2.1 Según el proceso de transferencia:

- Intercambiadores de contacto directo: facilitan la transferencia de calor mediante la mezcla de fluidos calientes y fríos. Se utilizan en procesos donde la interacción directa de los fluidos no representa un problema, como en torres de enfriamiento industriales y sistemas de condensación de gases como podemos ver en la figura 2-4. Aunque ofrecen una alta eficiencia térmica, su aplicación está limitada por la posibilidad de contaminación cruzada y la necesidad de separación posterior de los fluidos [10].
- Intercambiadores de contacto indirecto: permiten la transferencia de calor a través de una barrera sólida, evitando la mezcla de fluidos. En esta categoría se incluyen los intercambiadores de carcasa y tubos, placas y microcanales. Los dispositivos de microcanales han mostrado un aumento en la eficiencia térmica debido a su alta relación superficie-volumen y al control preciso del flujo de refrigerante [10].
- Intercambiadores regenerativos: estos dispositivos utilizan un medio sólido que actúa como un almacenamiento temporal de calor, transfiriendo la energía térmica de un fluido caliente a uno frío en diferentes momentos del ciclo de operación. Son ampliamente empleados en hornos de fusión de vidrio y en aplicaciones de recuperación de calor residual. Si bien estos intercambiadores pueden mejorar la eficiencia energética del proceso, su diseño requiere optimización para minimizar pérdidas térmicas y reducir la complejidad del sistema [10].

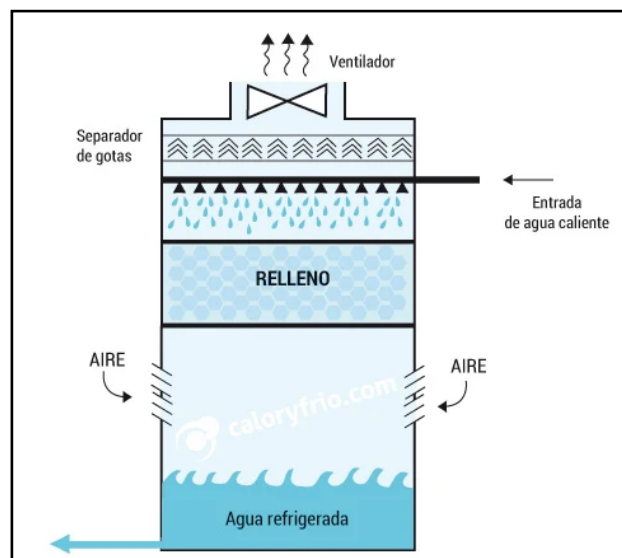


Figura 2-4. Torres de enfriamiento industrial. [13]

2.2.2 Según el tipo de construcción

- Intercambiadores de carcasa y tubo: como se puede ver en la figura 2-3, consisten en un conjunto de tubos (haz de tubos) contenidos dentro de una carcasa cilíndrica. Un fluido circula por el interior de los tubos, mientras que el otro fluye por el espacio entre los tubos y la carcasa. Son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales debido a su versatilidad y capacidad para manejar altas presiones y temperaturas.

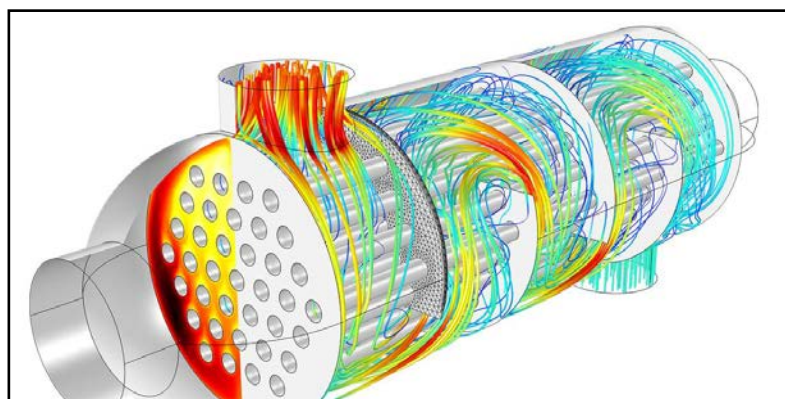


Figura 2-5. Análisis térmico en intercambiador de carcasa y tubos. [13]

- Intercambiadores de doble tubo: los intercambiadores de doble tubo son la configuración más simple dentro de los intercambiadores de calor de contacto indirecto. Están compuestos por un tubo interno que transporta un fluido caliente mientras que otro fluido frío circula en la dirección opuesta dentro de un tubo externo. Su desarrollo se remonta a la Revolución Industrial, cuando se buscaban soluciones eficientes para la transferencia de calor en procesos industriales. En los primeros diseños, se utilizaban tubos concéntricos de cobre y acero para mejorar la conducción térmica, optimizando el intercambio de energía entre fluidos calientes y fríos en procesos de calderas y generación de vapor. En la década de 1950, con la llegada de nuevas aleaciones y mejoras en la fabricación, los intercambiadores de doble tubo comenzaron a utilizarse en aplicaciones de refrigeración, petroquímica y generación de energía [14].

A pesar de su simplicidad, su eficiencia es menor en comparación con intercambiadores más avanzados, y su principal limitación radica en la restricción del área de transferencia de calor. Estudios recientes han demostrado que la transferencia de calor en intercambiadores de doble tubo puede mejorarse mediante el uso de aletas internas y técnicas de turbulización del fluido como puede verse en la figura 2-6.

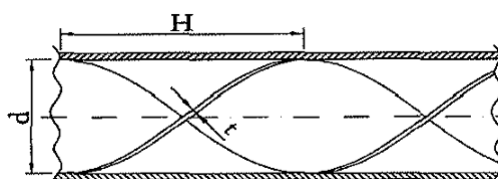


Figura 2-6. Tubo con lámina en espiral insertada para favorecer la turbulencia. [26]

- Intercambiadores de tipo serpentín: los intercambiadores de calor de tipo serpentín han sido utilizados desde principios del siglo XX en procesos de calefacción, refrigeración y generación de vapor. Su diseño se basó en la necesidad de mejorar la eficiencia térmica mediante un mayor tiempo de contacto entre el fluido caliente y el frío. Originalmente, estos intercambiadores se fabricaban en cobre y acero, pero con los avances en materiales, hoy en día se emplean aleaciones de aluminio y polímeros avanzados para mejorar su durabilidad y reducir costos de producción [15]. En la década de 1970, el auge de los sistemas HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) y energía solar térmica impulsó la investigación en intercambiadores de serpentín, optimizando su geometría para mejorar la transferencia de calor y reducir pérdidas de presión. Desde entonces, el desarrollo de nanofluidos y superficies texturizadas ha permitido incrementar su eficiencia, con aplicaciones en la industria química, aeroespacial y automotriz [16].
- Intercambiadores de placas: compuestos por una serie de placas metálicas delgadas y corrugadas, estos intercambiadores permiten el paso alternado de los fluidos por canales formados entre las placas. Estos intercambiadores de calor (PHE, por las siglas de Plate Heat Exchanger) surgieron como una solución eficiente para mejorar la transferencia térmica en la industria química y alimentaria en el siglo XX. Su desarrollo se remonta a la década de 1920, cuando se introdujeron los primeros diseños compactos con placas corrugadas para aumentar la turbulencia del fluido y, por ende, la eficiencia del intercambio térmico. Los avances recientes han estado dirigidos a la optimización geométrica de las placas, el uso de nanofluidos para mejorar la conductividad térmica y el desarrollo de materiales resistentes a la corrosión y a la incrustación.
La configuración de flujo en contracorriente maximiza la eficiencia térmica, por ello, es frecuente encontrar estos sistemas de esta manera como podemos ver en la figura 2-8. Las juntas de estanqueidad aseguran que los fluidos no se mezclen. Son ideales para aplicaciones que requieren una transferencia de calor eficiente en un espacio compacto [17].

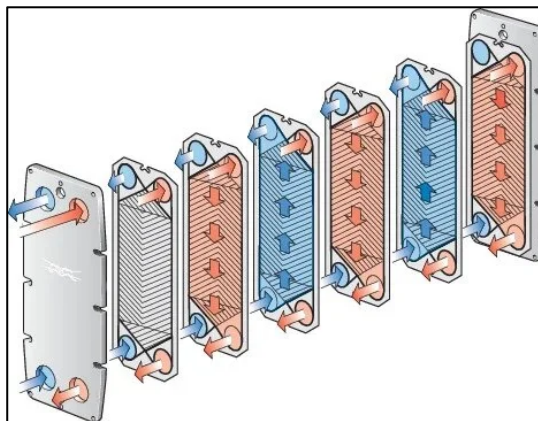


Figura 2-7. Intercambiador de placas a contraflujo. [12]

2.3 Intercambiadores de microcanales

Los intercambiadores de calor de microcanales han sido una de las innovaciones más significativas en el campo de la gestión térmica en las últimas décadas. Caracterizados por canales con dimensiones inferiores a 1 mm, estos dispositivos han demostrado una elevada eficiencia en la transferencia de calor y una reducción en el consumo energético en comparación con los intercambiadores de calor convencionales. Su desarrollo ha sido impulsado por la creciente demanda de sistemas de refrigeración más compactos y eficientes, especialmente en las industrias de la electrónica, aeroespacial y automotriz.

Desde su desarrollo en la década de 1980, los intercambiadores de microcanales han sido objeto de múltiples estudios enfocados en mejorar su eficiencia térmica y reducir sus limitaciones operativas. Los primeros trabajos, como los de Tuckerman y Pease, mostraron que estos dispositivos suponían una mejora significativa respecto a los sistemas tradicionales de refrigeración [7]. A lo largo de las décadas de 1980 y 1990, la investigación se centró en comprender los mecanismos de transferencia de calor y flujo de fluidos en microcanales ya que su comportamiento térmico y fluido no seguía siempre las leyes convencionales de la mecánica de fluidos clásica, debido a que las dimensiones reducidas hacían que factores geométricos tuvieran mayor relevancia. Esto llevó a su adopción en sistemas de refrigeración de alta eficiencia y en la industria aeroespacial, donde el control térmico era crucial.

Investigaciones posteriores han explorado estrategias para mejorar la transferencia de calor en estos intercambiadores. Algunos destacan que la eficiencia de estos dispositivos está altamente influenciada por la geometría de los microcanales, el tipo de fluido utilizado y las condiciones de operación [9]. Por otro lado, estudios recientes han propuesto el uso de nanofluidos y técnicas de optimización geométrica para reducir la resistencia térmica y mejorar la capacidad de transferencia de calor, entendiéndose resistencia térmica como la oposición al flujo de calor a través de un material [8].

Entre sus tipos encontramos distintas clasificaciones similares a las previamente descritas, nos centraremos en los distintos tipos de construcción que pueden adoptar estos sistemas:

- Intercambiadores de microcanales planos: consisten en placas planas con microcanales grabados o mecanizados (figura 2-7), apiladas y unidas mediante técnicas como la soldadura por difusión.
- Intercambiadores de microcanales tubulares: formados por tubos con múltiples microcanales en su interior, adecuados para aplicaciones que requieren soportar altas presiones.
- Intercambiadores de microcanales integrados: fabricados mediante técnicas avanzadas que permiten la integración de los microcanales directamente en componentes estructurales, ofreciendo diseños más compactos y eficientes.

En la actualidad, los intercambiadores de microcanales planos son los más empleados, especialmente en sistemas de aire acondicionado y refrigeración. Su diseño compacto y eficiente permite una reducción significativa en la carga de refrigerante y una mejora en la eficiencia energética. Además, la construcción en aluminio proporciona una alta resistencia a la corrosión y una menor huella de carbono en comparación con los intercambiadores tradicionales de aletas y tubos.

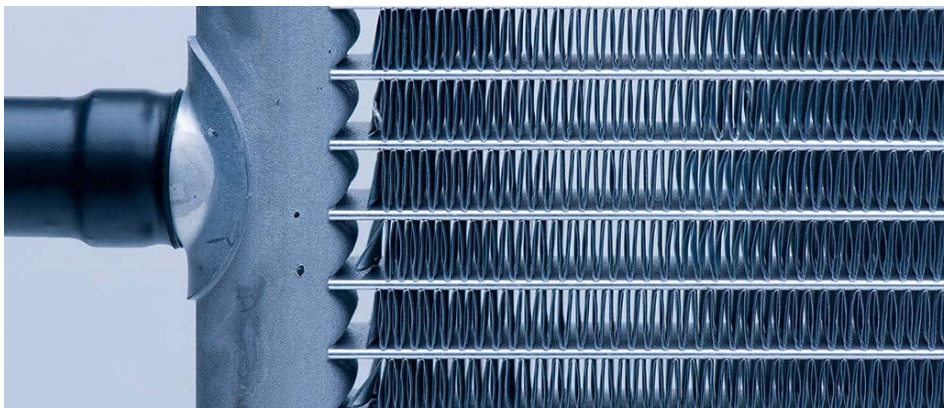


Figura 2-8. Intercambiador de calor de microcanales de tipo placas. [17]

2.4 Estudio de los refrigerantes

En los sistemas térmicos, los fluidos refrigerantes son sustancias empleadas para absorber y transferir calor desde un punto a otro, facilitando el control de temperatura en diversos procesos. Su selección depende de propiedades como la capacidad calorífica, conductividad térmica, viscosidad y estabilidad química.

El empleo de aceites como medio de enfriamiento se remonta a tiempos preindustriales. En la forja de metales, por ejemplo, se recurría a aceites vegetales o grasas animales para templar aceros y lograr enfriamientos más lentos que con agua [18]. Sin embargo, los primeros estudios científicos datan del siglo XX, una investigación pionera de 1940 realizada por el investigador Nikolai I. Kobasko analizó curvas de enfriamiento con aceite de colza y observó que este aceite vegetal lograba tasas de enfriamiento mayores que un aceite mineral convencional [19].

En las décadas siguientes, diversos investigadores compararon aceites vegetales (soja, colza, ricino) con aceites minerales y animales, evaluando su severidad de temple, viscosidad y estabilidad oxidativa. Estos estudios establecieron que muchos aceites vegetales podían lograr curvas de enfriamiento similares a las de aceites minerales, sin presentar la prolongada fase de ebullición filmante que limita la transferencia de calor [20]. Por ejemplo, en los años 1960 se descubrió que aceites de soja y colza tenían comportamientos de enfriamiento equivalentes a los de aceites de petróleo en procesos de temple. Se confirmó asimismo que ciertos aceites (p. ej., el de ricino) sufrían inestabilidad térmica, polimerizándose bajo aplicación de calor prolongada, lo cual limitaba su uso [19].

Paralelamente, en aplicaciones industriales fuera del temple, los aceites comenzaron a usarse donde el agua resultaba problemática. Ya en la primera mitad del siglo XX, los sistemas hidráulicos aeronáuticos emplearon fluidos a base de aceites vegetales debido a su baja congelación y propiedades lubricantes (se sabe que en aviación se usó aceite de ricino en sistemas de freno hidráulico) [21]. También en equipos eléctricos, hacia inicios del siglo XX, se adoptaron aceites minerales como refrigerante dieléctrico en transformadores. Más tarde, durante las crisis energéticas de los años 70 y ante preocupaciones ambientales, resurgió el interés por aceites vegetales como fluidos de transferencia de calor renovables. Un estudio de 1980 midió propiedades termofísicas (presión de vapor, calor específico, viscosidad, densidad, conductividad térmica) de aceites de maíz, soja, cacahuete y algodón para evaluar su uso en sistemas solares de calefacción u enfriamiento. Los resultados demostraron la viabilidad de estos aceites en rangos amplios de temperatura, sentando bases para su aprovechamiento en intercambiadores de calor sostenibles [22].

En las décadas recientes, los avances tecnológicos han permitido mitigar algunas limitaciones de los aceites. Por ejemplo, se desarrollaron aditivos antioxidantes y procesos de hidrogenación parcial para mejorar la estabilidad térmica de aceites vegetales, reduciendo su tendencia a oxidarse o polimerizarse con el uso prolongado.

Asimismo, la ingeniería genética y selectiva produjo variedades de plantas oleaginosas de alto contenido oleico (ácido graso monoinsaturado), como ciertas variantes de girasol o cártamo, cuyos aceites presentan mayor resistencia a la degradación oxidativa [23].

Estos avances han llevado los aceites vegetales del laboratorio a aplicaciones comerciales. Desde fines de los 1990 se introdujo, por ejemplo, un fluido dieléctrico basado en aceite de soja (Envirotemp FR3) para transformadores eléctricos, con gran éxito industrial. En 1998 se lanzó este producto y hoy más de 750 000 transformadores en el mundo operan con dicho aceite vegetal como refrigerante (ver figura 2-9), beneficiándose de su alta seguridad frente al fuego y biodegradabilidad [24].

Igualmente, en sistemas hidráulicos se han implementado aceites vegetales. Un caso notable es el elevador de la Estatua de la Libertad (EE.UU), que actualmente funciona con un fluido hidráulico biodegradable a base de aceite de soja [25].

En resumen, a lo largo de la historia se ha pasado de usos empíricos de aceites en refrigeración a una actualidad donde, gracias a avances científico-técnicos, varios aceites vegetales se consideran alternativas viables en intercambiadores de calor industriales, alineadas con objetivos de seguridad y sostenibilidad.



Figura 2-9. Fluido basado en aceite de soja (Envirotemp FR3). [26]

A continuación, se analizará la viabilidad de cinco aceites vegetales (linaza, cártamo, soja, maíz y girasol) como fluidos refrigerantes en intercambiadores de calor.

2.4.1 Aceite de cártamo

El aceite de cártamo (proveniente de las semillas de *Carthamus tinctorius*) es un aceite muy insaturado, típicamente rico en ácido linoleico. Esto implica, similar al girasol, una tendencia a la oxidación relativamente alta si no se estabiliza. Sin embargo, estudios recientes muestran un creciente interés industrial en este aceite por ciertas propiedades favorables. Presenta alta lubricidad e índice de

viscosidad (viscosidad menos dependiente de la temperatura) y un punto de inflamación seguro, características deseables en sistemas hidráulicos [23].

En términos de eficiencia térmica, el aceite de cártamo tiene propiedades comparables a otros aceites vegetales de semilla. Este fluido tiene un calor específico de entre 2 y 2,1 KJ/kg·K a 40 °C, algo más alto que el de aceites como el de soja o maíz. A esa misma temperatura, su viscosidad ronda los $25\text{--}30 \times 10^{-3}$ Pa·s, valores similares a los del aceite de girasol. Cuando la temperatura sube a 100 °C, la viscosidad baja hasta unos 5×10^{-3} Pa·s [27]. Por último, en cuanto a la conductividad térmica, se mantiene en torno a 0,15 W/m·K, por lo que no destaca especialmente en este aspecto. Como ventaja particular, su uso aportaría excelente lubricación en bombas y válvulas, así como compatibilidad ambiental. Esto sugiere que en un intercambiador de calor acoplado a maquinaria (p. ej., un enfriador de aceite lubricante), el cártamo cumpliría la doble función de refrigerar y lubricar eficientemente.

En conclusión, el aceite de cártamo es viable como fluido refrigerante, siempre que se mejore su estabilización oxidativa (vía aditivos o modificación química). Sus desarrollos actuales se enfocan en variedades genéticamente mejoradas y formulaciones antioxidantes para asegurar un desempeño prolongado.

2.4.2 Aceite de linaza

El aceite de linaza es conocido por su alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados (especialmente ácido α -linolénico). Esto significa que es propenso a oxidarse y polimerizarse cuando se expone al aire y calor, fenómeno aprovechado en su uso como aceite secante en pinturas, pero indeseable en sistemas de enfriamiento.

En aplicaciones como fluido térmico, esta tendencia implica que, sin aditivos, puede formarse lodo o depósitos en intercambiadores tras uso prolongado a alta temperatura. Pese a ello, su capacidad de permanecer líquido en rangos amplios de temperatura y sus buenas propiedades termofísicas básicas hacen posible su consideración como refrigerante.

El aceite de linaza tiene un calor específico moderado, entre 1,8 y 1,9 KJ/kg·K a unos 20–25 °C, aproximadamente la mitad que el del agua. Esto implica que transporta menos calor por unidad de masa, por lo que puede ser necesario un mayor caudal para lograr la misma capacidad de refrigeración.

Su conductividad térmica es baja, alrededor de 0,17 W/m·K a 20 °C, lo que reduce la velocidad a la que se transfiere el calor por conducción. Además, es bastante viscoso a temperatura ambiente, con valores cercanos a 30×10^{-3} Pa·s a 38 °C, y aún más viscoso a temperaturas más bajas, lo que penaliza su uso en sistemas de convección forzada, especialmente en tuberías estrechas o microcanales [27]. No obstante, al calentarse su viscosidad cae exponencialmente facilitando la circulación a altas temperaturas.

En cuanto a su rendimiento, existen pocos estudios específicos con aceite de linaza en intercambiadores de calor modernos, en parte debido a la mencionada necesidad de estabilizarlo. Técnicamente es viable utilizarlo si se controla la exposición al oxígeno o se adicionan antioxidantes potentes. Sus ventajas incluyen un punto de inflamación elevado, lo que lo hace seguro frente a fuego, y ser dieléctricamente inerte, útil en enfriamiento de equipos eléctricos. En resumen, el aceite de linaza puede actuar como fluido refrigerante, pero requiere acondicionamiento para contrarrestar su pobre estabilidad térmica [28]. Actualmente se investiga la mezcla de aceite de linaza con otros aceites más estables o hidrogenados para mejorar su desempeño como fluido de transferencia de calor.

2.4.3 Aceite de soja

El aceite de soja es uno de los aceites vegetales más estudiados y utilizados industrialmente. Representa cerca de un tercio de la producción mundial de aceites vegetales y ha encontrado aplicaciones técnicas importantes. Químicamente, presenta una composición química equilibrada, lo que le da una estabilidad oxidativa moderada. Un estudio comparativo de tendencia a la oxidación clasificó varios aceites y halló que la soja es algo menos estable que el maíz o la colza, pero similar al girasol común [19]. Esto implica que en uso prolongado puede deteriorarse si no se protege, pero la industria ha solventado este problema mediante hidrogenación parcial y antioxidantes. De hecho, en la formulación comercial del ya comentado Envirotemp FR3 para transformadores, aproximadamente un 98% es aceite de soja altamente refinado con inhibidores y menos de un 1.5% aditivos, lo que le confiere más de 10 años de vida útil como refrigerante dieléctrico [29].

En términos de propiedades térmicas, el aceite de soja es uno de los más representativos de los aceites vegetales. Tiene un calor específico en torno a 1,7–1,9 kJ/kg·K a temperatura ambiente, con una ligera tendencia a aumentar conforme sube la temperatura. Su conductividad térmica se encuentra alrededor de 0,15 W/m·K a 25 °C. En cuanto a la viscosidad, presenta un valor típico de $3,2 \times 10^{-2}$ Pa·s a 40 °C, lo que indica una viscosidad claramente superior a la del agua en frío, aunque sigue siendo manejable si se emplean bombas de cierta robustez en el diseño del intercambiador. Uno de sus puntos fuertes es su alto punto de inflamación, cercano a los 320 °C, además de ser un fluido no tóxico, lo que facilita su almacenamiento y transporte en condiciones seguras. Estas cualidades han motivado su adopción en entornos donde un derrame de aceite mineral sería catastrófico (acuíferos, reservas naturales, etc.).

Por otro lado, el aceite de soja ha demostrado un desempeño destacado como refrigerante en transformadores, es capaz de manejar sobrecargas 20-30% superiores que el aceite mineral antes de acortar la vida del equipo, gracias a su capacidad calorífica y propiedades dieléctricas [30].

Así, en intercambiadores de calor donde sustituye al agua, la soja ofrece la ventaja de operar a temperaturas más altas sin presión (por encima de 100 °C) y de lubricar componentes. Ya se emplea en enfriadores de aceite hidráulico y de motores en maquinaria agrícola y de construcción, como alternativa ecológica a fluidos convencionales. En resumen, el aceite de soja es uno de los candidatos más probados y confiables como fluido refrigerante vegetal, con amplia aceptación siempre que se mantenga estabilizado contra la oxidación.

2.4.4 Aceite de girasol

El aceite de girasol es uno de los más difundidos globalmente y presenta ciertas particularidades relevantes. El girasol convencional es muy alto en ácido linoleico lo que resulta en una escasa estabilidad térmica en su estado tradicional. Sin embargo, el desarrollo de aditivos y antioxidantes han revolucionado su perfil, volviéndolo mucho más resistente a la oxidación y térmicamente estable. Por tanto, al evaluar el girasol como fluido refrigerante es importante distinguir las variantes donde el girasol tiene un alto porcentaje de ácido oleico, preferible por su mayor vida útil a altas temperaturas [23].

En cuanto a sus propiedades térmicas, el aceite de girasol tiene uno de los calores específicos aparentes más altos entre los aceites vegetales comunes. A 35 °C, su calor específico alcanza unos 2 240 J/kg·K, un valor superior al que presentan aceites como el de soja o maíz [27]. Sin embargo, su conductividad térmica es relativamente baja, en torno a 0,17 W/m·K a 20 °C, lo que limita la rapidez con la que el calor se transfiere hacia el fluido, especialmente en aplicaciones de refrigeración líquida.

Esto evidencia que, si bien contiene bastante energía, su entrega de calor es más lenta que la del agua u otros fluidos más conductivos.

En la industria, el aceite de girasol (especialmente el alto oleico) ya se ofrece comercialmente como base de fluidos hidráulicos y térmicos biodegradables. Sus ventajas incluyen la no toxicidad y fácil biodegradabilidad, haciéndolo adecuado en industrias alimentarias o farmacéuticas donde un contacto accidental con productos no generaría contaminación peligrosa. También tiene un punto de inflamación elevado (316 °C) y es compatible con la mayoría de elastómeros y sellos utilizados en intercambiadores (no los hincha ni degrada como podrían hacerlo solventes) [20].

En conclusión, el aceite de girasol es un fluido refrigerante vegetal eficaz, especialmente en su forma estabilizada (alto oleico). Proporciona buena capacidad calorífica y un desempeño de transferencia de calor adecuado, con la salvedad de su menor conductividad que puede requerir superficies de intercambio ligeramente mayores. Sus beneficios en seguridad y ambiente lo hacen muy atractivo para sustituir al agua en escenarios de alta temperatura o al aceite mineral en circuitos de enfriamiento, siempre evaluando el costo (puede ser más caro que otros aceites más básicos). Continúa siendo objeto de investigación, particularmente en sistemas de energía solar térmica y almacenamiento de calor, donde su compatibilidad alimentaria y sostenibilidad añaden valor.

2.4.5 Aceite de maíz

El aceite de maíz (germen de maíz) comparte muchas características con el de soja, aunque su composición difiere ligeramente, en estudios de estabilidad térmica se ha ubicado al aceite de maíz como más resistente a la oxidación que el de soja o girasol [27]. En la práctica, el maíz ha sido objeto de investigaciones para usos térmicos desde hace décadas. Junto con la soja, fue evaluado en 1980 por Ingley midiendo sus propiedades de 35 °C a 180 °C, y se confirmó que podía operar sin cambios de fase ni degradación significativa en ese rango [22].

Desde el punto de vista térmico, el aceite de maíz tiene un calor específico de aproximadamente 1,7 KJ/kg·K a 30 °C, aumentando hasta unos 2,3 KJ/kg·K a 180 °C [27]. Su viscosidad dinámica es muy similar a la del aceite de soja, en torno a 3×10^{-2} Pa·s a 40 °C, y aproximadamente 7×10^{-3} a 100 °C, según datos experimentales. Esto significa que, aunque en frío es bastante denso, a temperaturas de operación típicas presenta un comportamiento fluido adecuado. Su conductividad térmica se sitúa alrededor de 0,16 W/m·K a temperatura ambiente [31]. En enfriadores de proceso, el aceite de maíz aporta la ventaja de ser económicamente accesible (es un subproducto abundante de la industria alimentaria) y biodegradable. Comparado con el agua, permite trabajar a temperaturas más altas sin presurización y no causa corrosión acuosa en tuberías. Sus desventajas frente al agua son la menor capacidad calorífica y mayor viscosidad, pero en contrapartida tolera entornos bajo cero mejor (no congela hasta aproximadamente -10 °C o menos, dependiendo de impurezas), lo cual es útil en climas fríos donde el agua requeriría anticongelante.

En resumen, el aceite de maíz es técnicamente viable como fluido refrigerante en intercambiadores, con un rendimiento térmico similar al de otros aceites vegetales comunes. Se beneficia de una estabilidad ligeramente superior a la de la soja, y de un probado comportamiento lubricante. Su eficiencia de enfriamiento podrá ser ligeramente menor que la del agua en igualdad de condiciones, pero ofrece robustez operativa en escenarios de alta temperatura y eco-compatibilidad. Por ello, continúa siendo estudiado y es un candidato atractivo para reemplazar aceites minerales en aplicaciones industriales de transferencia de calor.



Figura 2-10. Aceites planteados para el estudio. Fuente propia

En comparación con el agua, los aceites vegetales presentan características térmicas distintas, lo que los hace adecuados para ciertas aplicaciones industriales donde el agua no es viable. En términos de capacidad de enfriamiento, el agua supera a los aceites debido a su elevado calor específico ($4,18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, el doble que los aceites vegetales) y su alta conductividad térmica ($0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ frente a $0,15\text{--}0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en los aceites) como podemos ver en la gráfica 2-1. Esto permite al fluido absorber y transferir calor de forma eficiente, lo que se traduce en sistemas más compactos y con un menor consumo energético. No obstante, en aplicaciones donde la compatibilidad eléctrica y la fiabilidad a largo plazo son críticas, como en la refrigeración de componentes electrónicos, los aceites presentan ventajas clave frente al agua. Al tratarse de fluidos dieléctricos, resultan más seguros en entornos donde exista riesgo de contacto con circuitos eléctricos. Además, ofrecen un mayor rango operativo y beneficios adicionales como:

- Mayor estabilidad térmica
- Operación en climas fríos sin anticongelantes
- Menor corrosión e impacto ambiental
- Capacidades lubricantes

En general, los aceites vegetales son una alternativa viable al agua en sistemas de alta temperatura, climas fríos y procesos donde se busca reducir la corrosión y mejorar la seguridad ambiental. No obstante, su menor eficiencia térmica y mayor viscosidad deben ser consideradas en el diseño del sistema.

ACEITE	DENSIDAD (g/cm ³ a 15°)	T° DE HUMO* (°C)	T° DE SOLIDIFICACIÓN (°C)	COMPOSICIÓN DE ACIDOS GRASOS (%)	VISCOSIDAD (Pa·s)
Aceite de cártamo	0.925 a 0.920	150	12/15	▪ ácido linoleico 48-74 ▪ ácido oleico 14-39	0,06-0,07
Aceite de Linaza	0.926 - 0.930	152	-20/-18	▪ ácido α-linolénico 53,3- 57,3 ▪ ácido oleico 20,1- 27,7 ▪ ácido linoleico 12,7-22,4	0,072
Aceite de Soja	0.910 - 0.940	160	-16/-5	▪ ácido linoleico 50-55 ▪ ácido oleico 19-25 ▪ ácido palmítico 7-10 ▪ ácido esteárico 5-7	0,055
Aceite de Maíz	0.917 - 0.925	232	-10	▪ ácido linoleico 58- 56 ▪ ácido oleico 24-22 ▪ ácido palmítico 4-6 ▪ ácido esteárico 5-6	0,04
Aceite de Girasol	0.918 - 0.923	107(sr)-232(r)	-16/-18	▪ ácido linoleico 48-74 ▪ ácido oleico 14-39	0,085

Tabla 2-1 Resumen de los aceites. Fuente propia

2.5 Aspectos fundamentales de la transferencia de calor

Para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en el análisis del intercambio de calor de microcanales, es fundamental validar los datos experimentales mediante correlaciones teóricas y modelos matemáticos. La validación permite evaluar la precisión de las mediciones, detectar posibles errores y asegurar la coherencia entre los valores obtenidos y las predicciones teóricas.

El comportamiento térmico de los aceites como fluidos de trabajo en un intercambiador de calor está determinado por sus propiedades termofísicas, tales como la conductividad térmica (k), la capacidad calorífica (cp), la viscosidad (μ) y la densidad (ρ). Estas propiedades influyen directamente en la convección y en la transferencia de calor dentro del sistema. Para ello, introduciremos a continuación una serie de fórmulas que serán esenciales para el desarrollo de nuestro trabajo.

2.5.1 Ecuaciones fundamentales del intercambio de calor

➤ Transferencia de calor por convección

Describe el proceso de transferencia de calor por convección entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, estableciendo que la velocidad de transferencia térmica es proporcional a la diferencia de temperatura existente entre la superficie y el fluido que la rodea.

Se rige por la ley de enfriamiento de Newton:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f)$$

donde:

- q es el calor transferido [W]
- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²·K]
- A es el área de intercambio térmico [m²]
- T_s es la temperatura de la superficie del canal [K]
- T_f es la temperatura media del fluido [K]

➤ Número de Nusselt

Es un número adimensional que cuantifica la transferencia de calor por convección en relación con la conducción térmica dentro de un fluido. El coeficiente de convección se puede expresar por tanto en términos del número de Nusselt (Nu):

$$Nu = \frac{h \cdot Dh}{k}$$

siendo:

- Dh es el diámetro hidráulico del microcanal
- k es la conductividad térmica del fluido [W/m·K]

- Para flujo laminar en tubos, una correlación común es:

$$Nu = 4.36 \text{ (flujo completamente desarrollado con flujo de calor constante en la pared)}$$

- Para flujos en estado transitorio ($1200 < Re < 80000$):

la correlación de Gnielinski es una forma práctica para estimar la transferencia de calor en flujos que se encuentran en el rango de transición a turbulento [32]. En esta zona, el comportamiento del fluido es complejo, ya que comienza a romperse la estructura ordenada del flujo laminar, pero sin alcanzar todavía la mezcla intensa de un régimen completamente turbulento.

En este estado de transición podemos definir el numero de Nusselt como:

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot (Re - 100) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

siendo “ f ” el factor de fricción de Darcy, que se obtiene a partir de la ecuación de Blasius para flujo turbulento en tubos lisos [33]:

$$f = (0.79 \cdot \ln(Re) - 1.64)^{-2}$$

y Re y Pr definidos a continuación para la correlación de flujos turbulentos.

- Para flujo turbulento, se puede usar la correlación de Dittus-Boelter [34]:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.8}$$

siendo:

- Re el número de Reynolds, que indica si el flujo es laminar o turbulento:

$$Re = \frac{\rho v D h}{\mu}$$

- Pr el número de Prandtl, que mide la relación entre la difusión de momento y la difusión térmica:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k}$$

➤ Balance energético del fluido

Describe la conservación de la energía en un sistema fluido, considerando las transferencias de calor, trabajo y la variación de energía interna, cinética y potencial. Se expresa matemáticamente mediante la primera ley de la termodinámica aplicada a un volumen de control.

$$q = \dot{m} c_p \cdot (T_{salida} - T_{entrada})$$

Donde:

- $\dot{m}$ es el caudal másico del fluido [kg/s]
- c_p es la capacidad calorífica del aceite [J/kg·K].
- $T_{entrada}$ y T_{salida} son las temperaturas del fluido antes y después del intercambio de calor [K].

Concepto	Fórmula	Descripción	Unidades	Contexto de Uso
Transferencia de calor por convección	$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f)$	Relación entre el calor transferido y la diferencia de temperatura.	q (W), h (W/m ² K), A (m ²), T (K o °C)	Determinar la tasa de transferencia de calor entre un fluido y una superficie sólida.
Número de Nusselt	$Nu = \frac{h \cdot Dh}{k}$	Relaciona la convección con la conducción térmica en un fluido.	Adimensional	Indica la eficiencia del transporte de calor por convección comparado con la conducción pura.
Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho v Dh}{\mu}$	Relaciona fuerzas inerciales con fuerzas viscosas. Define régimen laminar o turbulento.	Adimensional	Determina si el flujo es laminar ($Re < 1200$), transitorio ($1200 < Re < 80000$) o turbulento ($Re > 80000$). Importante para seleccionar correlaciones de transferencia de calor.
Número de Prandtl	$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k}$	Relaciona la difusión de cantidad de movimiento y la difusión térmica.	Adimensional	Indica si la conducción o la convección domina en la transferencia de calor dentro del fluido.
Balance energético del fluido	$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)$	Conservación de energía en un fluido en movimiento.	Q (W), $\dot{m}$ (kg/s), c_p (J/kg·K), T (K o °C)	Evalúa la cantidad de energía intercambiada en intercambiadores de calor, tubos o conductos.

Tabla 2-2. Tabla resumen fórmulas de interés. Fuente propia

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del banco de ensayos

Para el desarrollo de este trabajo de fin de grado se utilizará el banco de ensayos desarrollado en un TFG previo al del AF Cámara Colmenero [35]. Este banco de ensayos se centra en un intercambiador de calor de microcanales como objeto de estudio y consta de los elementos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento. A continuación, se describen los componentes del banco de ensayos.

3.1.1 Circuito hidráulico

El circuito hidráulico es el sistema encargado de la circulación del fluido de trabajo a través del intercambiador de calor y los distintos componentes auxiliares que garantizan el correcto funcionamiento del banco de ensayos. Su diseño permite la transferencia de calor controlada y la medición precisa de los parámetros térmicos del sistema.

El funcionamiento del circuito se basa en un ciclo cerrado como podemos ver en las figuras 3-1 y 3-2. Este circuito inicia en el depósito de almacenamiento, desde donde el fluido es conducido hasta el intercambiador de calor. En este punto, el fluido absorbe la energía térmica generada por las placas calefactoras, aumentando su temperatura. A continuación, la bomba hidráulica impulsa el fluido hacia el disipador de calor, donde cede el calor adquirido previamente. Finalmente, antes de regresar al depósito para reiniciar el ciclo, el fluido atraviesa un caudalímetro, que permite medir el flujo volumétrico o volumétrico del sistema.

Este diseño asegura un control preciso de la transferencia térmica dentro del banco de ensayos, permitiendo evaluar el comportamiento de distintos fluidos en el intercambiador de microcanales.

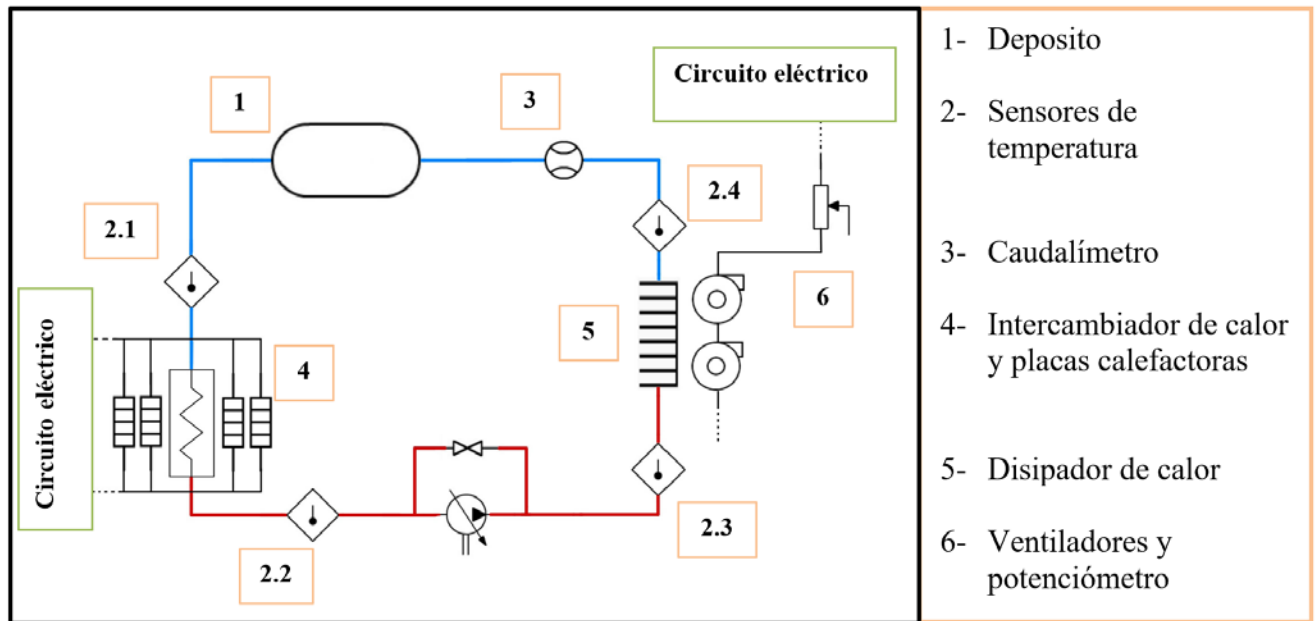


Figura 3-1. Esquema hidráulico. Fuente propia

3.1.1.1 Elementos clave del montaje hidráulico

- o El intercambiador de calor de microcanales es el componente clave en este estudio, ya que su rendimiento térmico es el eje central del análisis. Su función principal es transferir el calor generado por las placas calefactoras al fluido refrigerante que circula en su interior, permitiendo evaluar las capacidades del sistema. Para caracterizar su comportamiento, es fundamental conocer la temperatura de la pared interna, lo que facilita el cálculo de los coeficientes de convección.
- o La bomba hidráulica es un componente fundamental en el circuito, ya que se encarga de impulsar el fluido refrigerante tras su paso por el intercambiador de calor, asegurando la circulación continua dentro del sistema de ensayo. Funciona con una alimentación externa de 12 V en corriente continua y permite regular el caudal mediante un “baipás”, ajustando el flujo a través del intercambiador mediante una llave de paso.
- o El disipador de calor facilita la evacuación del calor absorbido por el fluido refrigerante. Está compuesto por un serpentín de microcanales, diseñado en un patrón en zigzag para maximizar la superficie de contacto con el aire en flujo cruzado, y dos ventiladores, que generan convección forzada para mejorar la disipación térmica.
- o El depósito actúa como el punto de almacenamiento y recirculación del fluido refrigerante dentro del circuito hidráulico. Con una capacidad de 500 ml, permite la carga y circulación del fluido seleccionado para los ensayos.

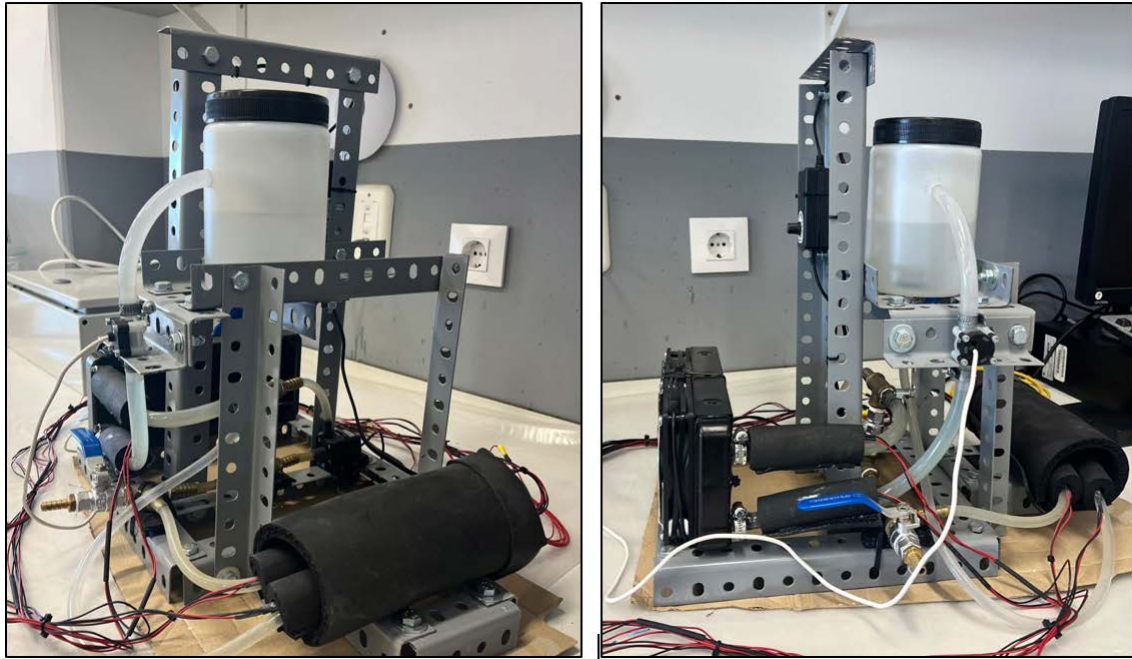


Figura 3-2. Circuito hidráulico. Fuente propia

3.1.2 Circuito eléctrico

El circuito eléctrico permite el suministro y control de la energía necesaria para el funcionamiento del sistema (figura 3-3). Su diseño garantiza la regulación de los distintos parámetros eléctricos que influyen en el comportamiento térmico y en las características del intercambiador de microcanales. Este circuito está configurado para proporcionar la alimentación adecuada a los distintos componentes, permitiendo ajustar las condiciones de ensayo según los requerimientos del estudio. A través de mecanismos de control, se logra una regulación precisa de la potencia térmica, el caudal del fluido y la disipación de calor, asegurando un funcionamiento estable y seguro del circuito.

3.1.2.1 Elementos clave del montaje eléctrico

- o Las placas calefactoras son el elemento encargado de suministrar calor al intercambiador de microcanales, simulando la disipación térmica que se busca analizar en los fluidos de trabajo. Están diseñadas con cuatro placas calefactoras (dos superiores y dos inferiores) para operar con una alimentación eléctrica controlada, lo que permite ajustar la potencia térmica generada y evaluar su impacto en la transferencia de calor. Su regulación es fundamental para garantizar ensayos precisos y reproducibles.
- o Un potenciómetro permite controlar la cantidad de energía suministrada a las placas calefactoras. Este dispositivo ajusta la tensión de salida en función de las necesidades del ensayo, permitiendo modificar la potencia térmica aplicada al intercambiador de calor. Su uso facilita la variación controlada de temperatura, asegurando un comportamiento estable del sistema de calefacción. Este elemento buscará ser actualizado por una versión controlada desde el programa de LabVIEW.

- o Un potenciómetro instalado en el disipador de calor permite regular la velocidad de los ventiladores encargados de la disipación térmica. Ajustando su resistencia, se puede modificar la intensidad del flujo de aire generado, lo que influye directamente en la capacidad del enfriamiento del fluido refrigerante. Este control es clave para optimizar el balance térmico del sistema y estudiar el efecto de diferentes condiciones de disipación.
- o El filtro de corriente tiene la función de reducir interferencias y ruidos eléctricos en el sistema de alimentación. Su implementación garantiza un suministro eléctrico más estable y protege los componentes sensibles ante posibles fluctuaciones o perturbaciones en la red. De este modo, se mejora la precisión de los datos obtenidos en los sensores y se prolonga la vida útil de los dispositivos eléctricos del montaje.
- o La CEBEK FE136 24 V es la fuente de alimentación que proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de los distintos elementos del sistema, como la bomba hidráulica y los ventiladores del disipador de calor. Su capacidad de ofrecer un suministro estable y regulado es fundamental para mantener un flujo continuo del fluido refrigerante y garantizar el correcto desempeño de todos los dispositivos eléctricos del banco de ensayos.

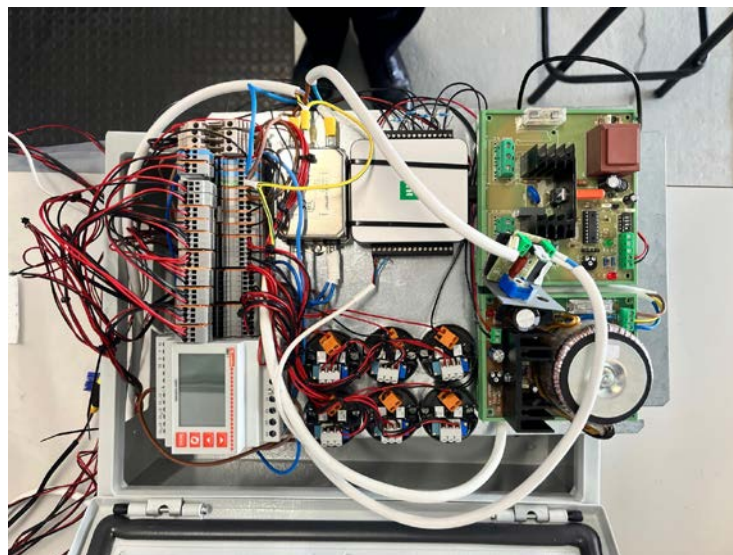


Figura 3-3 Circuito eléctrico. Fuente propia

3.2 Procedimiento experimental

El presente apartado describe la metodología experimental utilizada para estudiar la transferencia de calor en aceites vegetales mediante un intercambiador de calor de microcanales. Definición de variables y condiciones del ensayo.

Para caracterizar la transferencia de calor en el sistema, se establecen las siguientes variables de control y medición:

- o Fluido de trabajo: Ensayo preliminar con agua, seguido por aceites vegetales en pruebas posteriores.
- o Rango de caudal volumétrico: 30 – 70 L/h.
- o Temperaturas:
 - Temperatura de entrada al intercambiador de calor (T_{ie})
 - Temperatura de salida del intercambiador de calor (T_{is})
 - Temperatura de superficie del intercambiador de calor (T_{sup})
 - Temperatura de entrada al disipador (T_{de})
 - Temperaturas de salida del disipador (T_{ds})
 - Temperatura de la pared de los canales del intercambiador (T_{pared})
- o Potencia de los ventiladores del disipador: ajustable mediante potenciómetro.

3.2.1 Desarrollo del ensayo

Antes de comenzar cada ensayo, es importante seguir un conjunto de pasos bien definidos para que todas las pruebas se realicen en las mismas condiciones. Esto ayuda a evitar que factores externos afecten los resultados y asegura que los datos sean comparables entre sí. A continuación, se explica el procedimiento que se seguirá en cada experimento.

- 1- Preparación del sistema, carga del fluido: para iniciar el ensayo, se introduce el fluido de interés en el depósito, asegurándose de que el circuito quede completamente limpio al vaciar cualquier residuo del fluido anterior. Una vez cargado, se procede a purgar el sistema para eliminar posibles burbujas de aire que podrían afectar la circulación y la transferencia de calor.
- 2- Configuración de las condiciones del ensayo: se establecen los parámetros experimentales según los objetivos del estudio. Entre los principales ajustes se incluyen:
 - Regulación del caudal, mediante el control del baipás.
 - Ajuste de la temperatura o potencia de las placas calefactoras, según los valores deseados.
 - Control de la disipación térmica, modificando la velocidad de los ventiladores a través del potenciómetro.
 - Selección del modo de calentamiento, optando por activación superior, inferior o en ambas.
 - Determinación de los sensores Pt-100 a emplear, eligiendo entre los ubicados en el intercambiador de calor, el disipador, la pared o la superficie del sistema.
- 3- Estabilización del sistema: se monitorean las variables del sistema y se espera hasta alcanzar el estado estacionario, asegurando que los valores de temperatura y caudal sean constantes antes de la toma de datos.
- 4- Registro de datos mediante LabVIEW: se programa la adquisición de datos, especificando tanto el número de mediciones como la frecuencia de muestreo.

- 5- Reajuste de condiciones para nuevos ensayos: una vez completado un conjunto de mediciones, se reinicia el proceso en el paso 3 para establecer nuevas condiciones experimentales y repetir el ensayo bajo diferentes configuraciones.

3.2.2 Evaluación de la fiabilidad del ensayo

Para garantizar la validez de los resultados obtenidos, se aplican los siguientes criterios:

1. Análisis de incertidumbre en sensores de temperatura y caudal: se evalúa la precisión de los sensores Pt-100 y del caudalímetro, asegurando su calibración y considerando la propagación de errores en los cálculos. También se controla el entorno del ensayo para minimizar influencias externas en las mediciones.
2. Repetibilidad de las mediciones: se realizan ensayos en condiciones idénticas y se analizan las variaciones entre mediciones. Si los resultados presentan dispersión significativa, se repiten las pruebas para asegurar su consistencia.
3. Corrección de errores experimentales: se identifican y eliminan valores atípicos, asegurando que las mediciones se realicen en estado estacionario. También se supervisa el correcto funcionamiento del equipo y se ajustan posibles influencias externas.
4. Comparación con modelos teóricos y estudios previos: se contrastan los resultados obtenidos con ecuaciones empíricas y datos de referencia para verificar su coherencia. Si se detectan discrepancias significativas, se revisan las condiciones del ensayo y los cálculos utilizados.

3.3 Análisis de datos

Para llevar a cabo un análisis de resultados riguroso, y con ello una correcta validación de estos, es necesario comprender una serie de conceptos previos. Estos, junto con los ya expuestos en el estado del arte, proporcionan el contexto necesario para una interpretación adecuada de los datos obtenidos.

3.3.1 Coeficiente de convección y resistencias térmicas asociadas

El presente apartado tiene como finalidad la obtención del coeficiente de convección h para los distintos fluidos utilizados en el intercambiador de microcanales. Esta magnitud permite cuantificar la capacidad del fluido para intercambiar calor con la superficie interna del canal, y constituye un parámetro central en la evaluación del rendimiento térmico del sistema.

El cálculo se basa en el balance de energía aplicado al fluido en régimen estacionario. Se parte de la estimación de la potencia térmica absorbida:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{salida} - T_{entrada})$$

y se combina con la expresión clásica del coeficiente de convección:

$$h = \frac{\dot{Q}}{A_s \cdot \Delta T}$$

donde A_s es el área interna de intercambio y ΔT el salto térmico producido en el intercambiador. A partir de los datos experimentales obtenidos (temperaturas y caudal) las dimensiones del intercambiador

y las propiedades del fluido estudiado, se calculan estas magnitudes, permitiendo la determinación de h para cada condición de ensayo.

Para poder determinar h se hace uso de la analogía eléctrica de la transferencia de calor, mediante un modelo de resistencias térmicas en serie. En el intercambiador estudiado existen tres resistencias térmicas:

- R_k : resistencia térmica por conducción en la pared.
- R_{cap} : resistencia capacitiva asociada al calentamiento del volumen de fluido en tránsito.
- R_c : resistencia térmica por convección entre la pared y el fluido.

Las resistencias térmicas se pueden determinar mediante expresiones analíticas basadas en la geometría y las propiedades del sistema:

$$R_k = \frac{e}{k_s \cdot A_s}$$

$$R_{cap} = \frac{1}{\dot{m} \cdot c_p}$$

$$R_c = \frac{1}{h \cdot A_s}$$

siendo e el espesor de la pared conductora, k_s la conductividad térmica del sólido y A_s el área transversal al flujo de calor.

La resistencia térmica total (R_T) es el sumatorio de las resistencias térmicas previamente descritas:

$$R_T = R_k + R_{cap} + R_c$$

Por otro lado, la R_T también se puede calcular como:

$$R_T = \frac{\Delta T}{\dot{Q}}$$

Por lo tanto, es posible determinar la R_c a partir de la resistencia térmica total:

$$R_c = R_T - R_k - R_{cap}$$

Esto nos permitirá obtener el coeficiente de convección (h) despejando de la expresión de la resistencia de convección (R_T):

$$h = \frac{1}{R_c \cdot A_s}$$

3.3.2 Figuras de mérito

Las figuras de mérito constituyen herramientas adimensionales que permiten estimar la eficiencia relativa de distintos fluidos térmicos sin necesidad de realizar ensayos experimentales completos. Estas figuras se construyen a partir de las propiedades termofísicas de los fluidos (conductividad térmica, viscosidad dinámica, densidad, calor específico, entre otras).

Una de las figuras de mérito más empleadas es el número de Mouromtseff, definido generalmente como:

$$Mo = \left(\frac{k^l}{\mu^n \cdot c_p^m \cdot \rho^p} \right)$$

donde k es la conductividad térmica, μ la viscosidad dinámica, c_p la capacidad calorífica a presión constante y ρ la densidad. Los exponentes n , m , p varían según el régimen de flujo considerado [36].

Para nuestro estudio se usaron los siguientes exponentes:

	l	m	p	n
Dittus-Boelter heating	0,8	0,6	0,4	0,4
Dittus-Boelter cooling	0,8	0,7	0,3	0,5
Simon	0,8	0,67	0,33	0,47
Vajjha and Das	0,8	0,5	0,5	0,3

Tabla 3-1. Exponentes número de Mouromtseff. [36]

En aplicaciones térmicas, la comparación del rendimiento de distintos fluidos también debe considerar el coste energético asociado a su transporte. En este contexto, la potencia de bombeo constituye un parámetro relevante, especialmente en configuraciones donde el fluido circula a través de geometrías confinadas, como los intercambiadores de microcanales.

Para flujo laminar plenamente desarrollado, con velocidad constante y bajo un flujo de calor uniforme aplicado en la superficie del tubo, se propuso una expresión para estimar la razón entre la potencia de bombeo requerida por un fluido de estudio y la de un fluido base [36]. Esta razón, (W_{nf}/W_{bf}) puede evaluarse como función de la viscosidad dinámica (η) y la densidad (ρ) de ambos fluidos:

$$\left(\frac{\dot{W}_{bf}}{\dot{W}_{nf}}\right)_{laminar} = \frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} \cdot \left(\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\right)^2$$

Para el caso de flujo turbulento plenamente desarrollado bajo las mismas condiciones térmicas se tiene:

$$\left(\frac{\dot{W}_{bf}}{\dot{W}_{nf}}\right)_{turbulento} = \left(\frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\right)^2$$

Además de calcular individualmente las dos figuras de mérito previamente definidas, el número de Mouromtseff y la razón de potencia de bombeo, se llevó a cabo un análisis comparativo entre ellas, con el objetivo de estudiar su relación con los coeficientes de transferencia de calor por convección obtenidos experimentalmente. Este enfoque permitió evaluar la consistencia entre los indicadores teóricos y el comportamiento térmico real de los fluidos, así como establecer comparaciones cuantitativas entre los aceites vegetales analizados (maíz y soja) y el fluido base (agua).

3.3.3 Propiedades termofísicas de los fluidos analizados.

Visto lo anterior, sabemos que las propiedades del fluido juegan un papel fundamental en la precisión del cálculo. En el caso de los aceites de soja y maíz, se partió de una base de datos experimental, obtenidas mediante distintos ensayos realizados en laboratorios de la Universidad de Vigo, que recogió los valores de viscosidad, densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica en función de la temperatura.

A partir de estos datos, se realizaron ajustes cuadráticos que permiten interpolar cada propiedad dentro del intervalo térmico de operación. Estos ajustes se aplican a la temperatura media de cada ensayo, las regresiones se llevaron a cabo utilizando Microsoft Excel. El modelo cuadrático adoptado presenta la forma general:

$$f(T) = aT^2 + bT + c$$

siendo T la temperatura media absoluta en grados Kelvin a la que se midieron las distintas propiedades.

De esta forma se obtuvieron los datos de las propiedades termofísicas de los fluidos estudiado para todas las temperaturas, los datos de partida pueden verse en la figura 3-4:

Densidad (kg/m ³)	Temperatura (K)	Agua	Soja	Maíz
	283,15	1000,1	927,5	925,98
	293,15	998,6	920,9	922,59
	303,15	996,0	914,3	916,84
	313,15	992,6	907,7	908,73
	323,15	988,4	901,1	898,26
	333,15	983,6	894,5	885,44
Viscosidad (Pa·s)	Temperatura (K)	Agua	Soja	Maíz
	283,15	0,5805	0,1723	0,1060
	293,15	0,5989	0,1720	0,0694
	303,15	0,6159	0,1713	0,0434
	313,15	0,6310	0,1703	0,0280
	323,15	0,6440	0,1690	0,0232
	333,15	0,6548	0,1674	0,0290
Cp (KJ/Kg·K)	Temperatura (K)	Agua	Soja	Maíz
	283,15	4192,800	1,899	2,248
	293,15	4171,949	1,935	2,289
	303,15	4153,906	1,966	2,333
	313,15	4137,327	1,994	2,378
	323,15	4121,259	2,018	2,425
	333,15	4105,144	2,037	2,473
K (W/m·K)	Temperatura (K)	Agua	Soja	Maíz
	283,15	0,00130	0,10579	0,1729
	293,15	0,00100	0,06962	0,1725
	303,15	0,00080	0,04430	0,1718
	313,15	0,00065	0,02981	0,1709
	323,15	0,00055	0,02617	0,1697
	333,15	0,00047	0,03338	0,1683

Figura 3-4. Tablas de las propiedades termofísicas. Laboratorio Uvigo

4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS

En este apartado se lleva a cabo la interpretación de los resultados experimentales obtenidos en el banco de ensayos. Para ello, se realizan comparaciones basadas en las denominadas figuras de mérito, con el fin de evaluar el comportamiento térmico de los distintos fluidos ensayados. Asimismo, se procurará establecer correlaciones teóricas que permitan respaldar y generalizar los resultados obtenidos, facilitando así un estudio más riguroso del fenómeno analizado.

4.1 Validación con fluido de referencia

Como punto de partida para la validación del banco de ensayos, se ha seleccionado el agua como fluido de referencia, dado que sus propiedades termofísicas están ampliamente caracterizadas en la literatura y su comportamiento en intercambiadores de calor es bien conocido. De este modo, se permite verificar la fiabilidad de las mediciones y la consistencia del procedimiento experimental antes de proceder al análisis con fluidos menos convencionales.

A partir de los datos obtenidos experimentalmente en el banco de ensayos, se han calculado los coeficientes de transferencia de calor por convección para distintos caudales. Como podemos ver en la figura 4-1, los resultados muestran una clara tendencia ascendente del coeficiente de convección conforme se incrementa el caudal volumétrico del fluido. Este comportamiento es coherente con la teoría de la convección forzada, ya que un mayor caudal implica una mayor velocidad del fluido, lo que favorece la formación de capas límite térmicas más delgadas y, en consecuencia, una mejora del intercambio térmico.

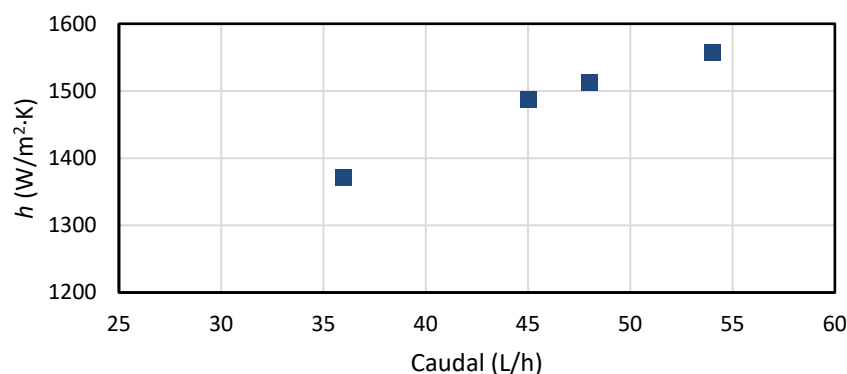


Figura 4-1. Coeficiente de convección en función del caudal usando agua como fluido de trabajo. Fuente propia

De la misma forma, los resultados de la figura 4-2 ponen de manifiesto cómo el aumento de la turbulencia, reflejado en un mayor número de Reynolds, favorece una mejor transferencia de calor por convección. Esto se debe a que un flujo más turbulento conlleva un mayor movimiento de las moléculas del fluido, lo que provoca un mayor transporte de energía térmica. La relación creciente entre ambos valores no solo concuerda con el comportamiento esperado, sino que también refuerza la fiabilidad del ensayo y la coherencia de los datos obtenidos.

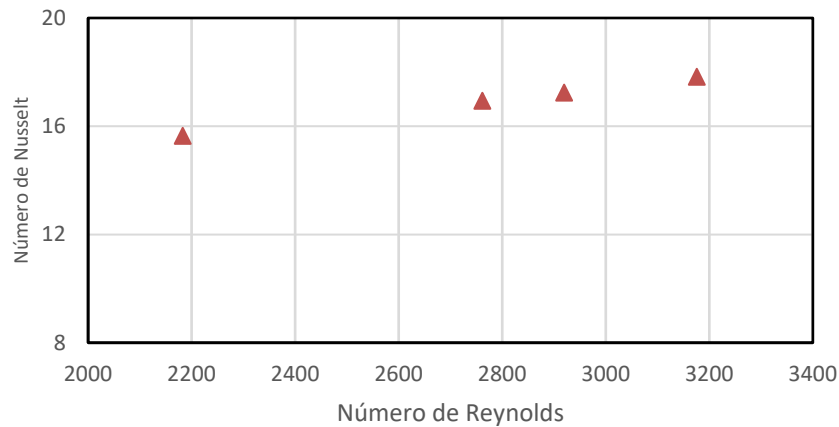


Figura 4-2. Nusselt en función de Reynolds usando agua como fluido de trabajo. Fuente propia

4.2 Análisis de los fluidos térmicos estudiados

En primer lugar, se procede al análisis detallado del comportamiento térmico de los aceites vegetales empleados (aceite de soja y maíz), para lo cual se han calculado a partir de los datos experimentales de los ensayos los valores del número de Reynolds, el número de Nusselt, el coeficiente de convección y el flujo de calor transferido. Al contrario que en el caso del agua en el que el régimen de flujo se encuadra en el transitorio, para ambos aceites vegetales estudiados, se observó régimen laminar en todos los casos analizados. Por lo tanto, es razonable esperar valores relativamente bajos de Nu y h . Esto se explica debido a las propiedades termofísicas de estos fluidos, específicamente su elevada viscosidad y su baja conductividad térmica en comparación con el agua. La alta viscosidad limita significativamente la velocidad alcanzable, resultando en números de Reynolds bajos y en menor transporte convectivo de calor, como se observa en las figuras 4-3 y 4-4. El número de Nusselt aumenta con el número de Reynolds debido a que un flujo más turbulento contribuye a una mejor transferencia de calor por convección.

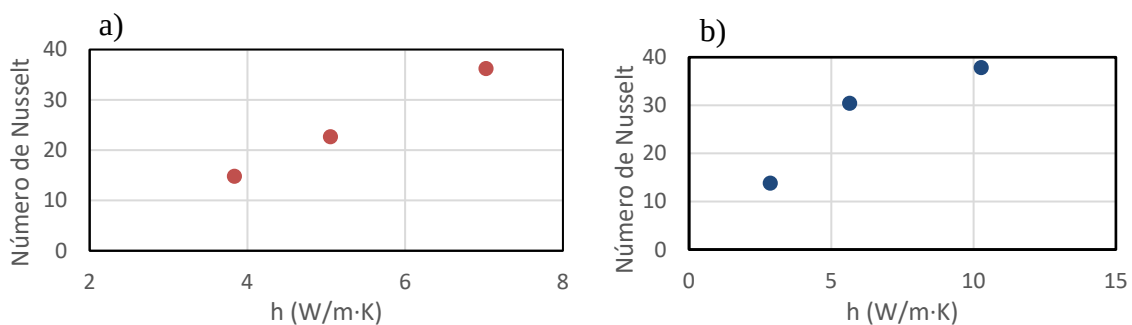


Figura 4-3. Número de Nusselt frente al coeficiente de convección para a) aceite de soja y b) aceite de maíz. Fuente propia

Seguidamente, observamos el efecto directo del caudal sobre la transferencia de calor mediante el análisis del coeficiente de convección. Si bien la teoría de la convección laminar sugiere que incrementos moderados en el caudal producen mejoras limitadas en el intercambio térmico, son los resultados experimentales los que permiten confirmar y matizar esta tendencia. En este estudio, el comportamiento observado se apoya fundamentalmente en la evidencia experimental

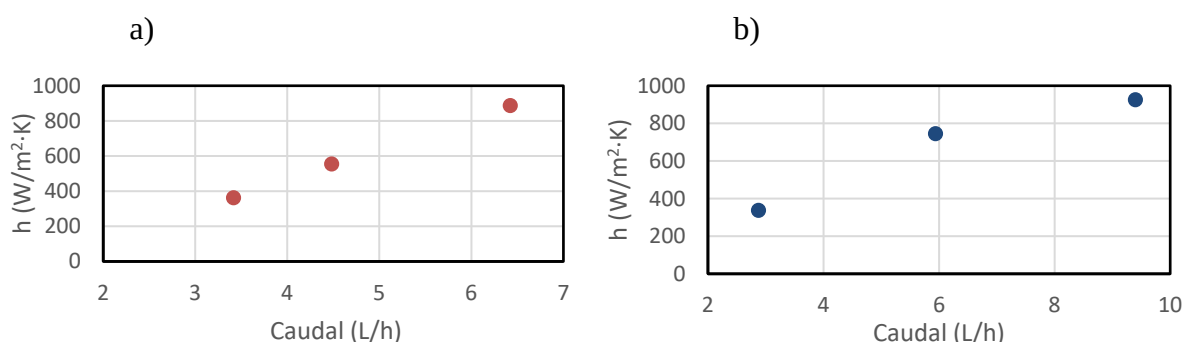


Figura 4-4. Coeficiente de convección en función del caudal para a) el aceite de soja y b) aceite de maíz. Fuente propia

Cabe destacar que los ensayos realizados con aceites vegetales se han visto condicionados por las propias limitaciones del sistema de impulsión. La elevada viscosidad de estos fluidos ha dificultado el funcionamiento de la bomba hidráulica, impidiendo alcanzar caudales superiores. Esta restricción técnica ha limitado el rango de números de Reynolds evaluados, lo que debe tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

Una vez analizados los resultados específicos para los aceites vegetales, se realiza una comparación directa con los datos previamente obtenidos para el agua. Hay que tener en consideración que estos fluidos han trabajado en regímenes de flujo claramente distintos (agua en transición y aceites en laminar). Para poder llevar a cabo una comparativa válida y rigurosa, se emplean figuras adimensionales como el número de Nusselt, que permiten normalizar parcialmente las diferencias debidas a los caudales empleados.

La superioridad del agua frente a los aceites en términos de transferencia de calor se observa claramente en las gráficas experimentales, donde presenta valores significativamente más altos tanto en el número de Nusselt como en el coeficiente de convección. Esta diferencia se mantiene incluso si se considerasen condiciones de caudal equivalentes. Desde un punto de vista teórico, esta tendencia era esperable, dado que el agua posee una menor viscosidad y una mayor conductividad térmica que los aceites, lo que favorece un mejor comportamiento convectivo en el intercambiador de microcanales.

Dado que los números de Reynolds obtenidos para agua y aceites difieren en varios órdenes de magnitud, se ha empleado una escala logarítmica en el eje horizontal para facilitar la representación y comparación de los datos experimentales en la figura 4-5.

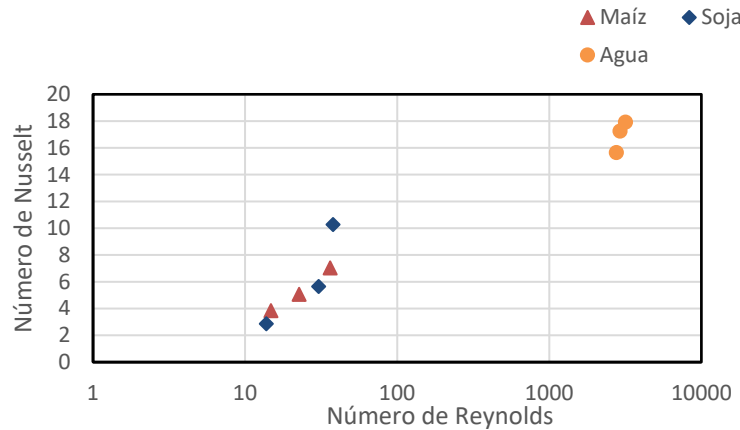


Figura 4-5. Número de Nusselt en función del número de Reynolds para el agua y los aceites estudiados. Fuente propia.

Por otro lado, es importante destacar que el régimen laminar en los aceites vegetales limita significativamente el aumento del intercambio térmico con incrementos moderados de caudal. En contraste, el agua, al operar en régimen transitorio, reduce considerablemente el espesor de la capa límite térmica, facilitando una mayor transferencia de calor. Este efecto es visible de forma muy clara al comparar los valores absolutos del coeficiente de convección (ver figura 4-6).

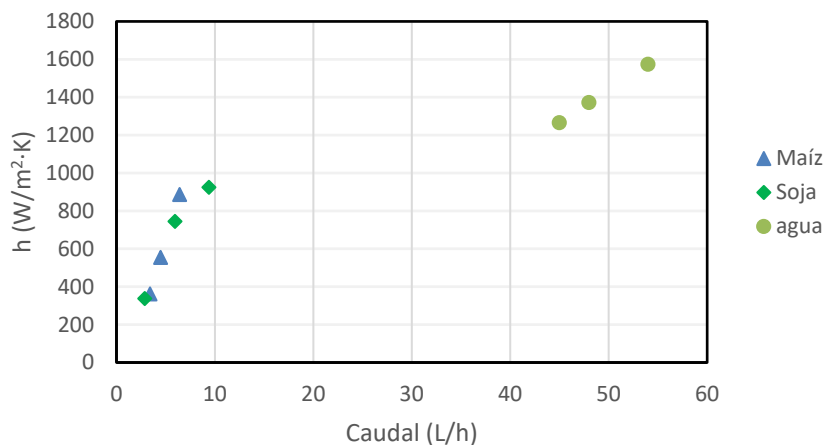


Figura 4-6. Coeficientes de convección en función del caudal para el agua y los aceites estudiados. Fuente propia.

Cabe señalar que los datos representados en la figura 4-6 corresponden a fluidos que operan en regímenes de flujo distintos: mientras que el agua se encuentra en régimen transitorio, los aceites lo hacen en régimen laminar. Esta diferencia debe tenerse en cuenta al interpretar los resultados comparativos.

Finalmente, la comparación del calor transferido ($\dot{Q}$) proporciona la tasa de transferencia de calor. La mayor capacidad del agua para transportar calor queda reflejada en los valores experimentales obtenidos, confirmando la ventaja de este fluido en términos de eficiencia energética frente a los aceites bajo las condiciones de ensayo consideradas.

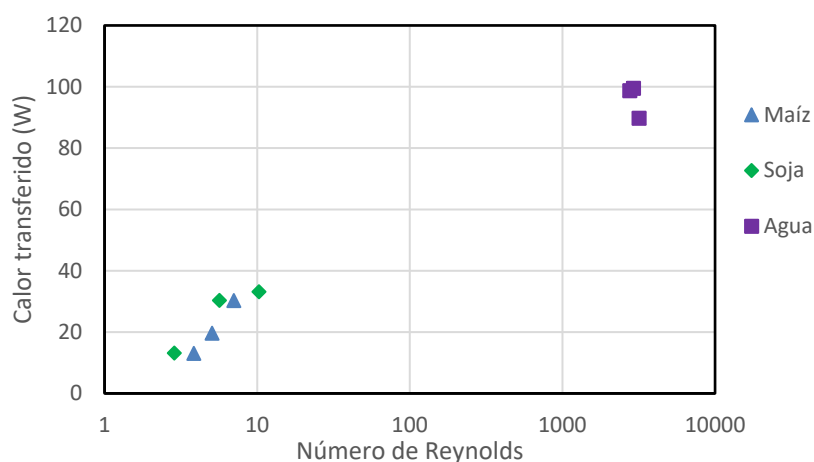


Figura 4-7. Comparación del calor transferido en función del número de Reynolds para agua y aceites. Fuente propia

A pesar de que los resultados obtenidos muestran una tendencia coherente con los principios teóricos de la transferencia de calor, no pueden considerarse concluyentes en cuanto a la evaluación comparativa de los aceites como fluidos alternativos de intercambio térmico. La falta de un mayor número de datos experimentales, especialmente en condiciones de operación más variadas, limita la posibilidad de establecer una valoración definitiva sobre su rendimiento frente al agua.

4.3 Comparación con figuras de mérito

Dada la limitación en la cantidad y variedad de datos experimentales obtenidos, especialmente para los aceites vegetales, se ha considerado oportuno complementar el análisis mediante el uso de figuras de mérito (FOM). Estas herramientas permiten realizar una evaluación comparativa entre fluidos prescindiendo de las condiciones experimentales concretas, ya que se basan en propiedades termofísicas fundamentales y relaciones adimensionales que se obtuvieron en laboratorios de la Universidad de Vigo. En este contexto, las FOM permiten estimar tanto la capacidad teórica de transferencia de calor de cada fluido (mediante la figura de mérito de Mouromtseff), como su viabilidad energética en términos de potencia de bombeo requerida.

A partir de los cálculos realizados para estimar el número de Mouromtseff en sus distintas formulaciones, incluyendo las propuestas de Dittus-Boelter (modo heating y cooling), Simons y Vajha and Das, se ha llevado a cabo una comparación entre los aceites de soja y maíz mediante la razón entre sus respectivos valores. Los resultados de este análisis predictivo, que adquiere especial relevancia ante la falta de conclusiones claras en el estudio experimental, indican que el aceite de maíz presenta, mayor eficiencia térmica en comparación con el de soja como podemos ver en la figura 4-8. Además, esta diferencia queda reflejada de forma representativa en la tabla 4-1.

Mo_{soja}/Mo_{maiz}				
T (K)	Dittus-Boelter heating	Dittus-Boelter cooling	Simons	Vaijha and Das
283,15	0,935180746	0,950978025	0,946211025	0,889346052
293,15	0,93184379	0,947547498	0,942808799	0,88627703
303,15	0,932316801	0,947857736	0,943168449	0,887206196
313,15	0,893662959	0,918868901	0,898722384	0,83851646
323,15	0,89151411	0,917344369	0,896091773	0,835876927

Tabla 4-1. Relación Mo Soja/ Mo Maíz. Fuente propia.

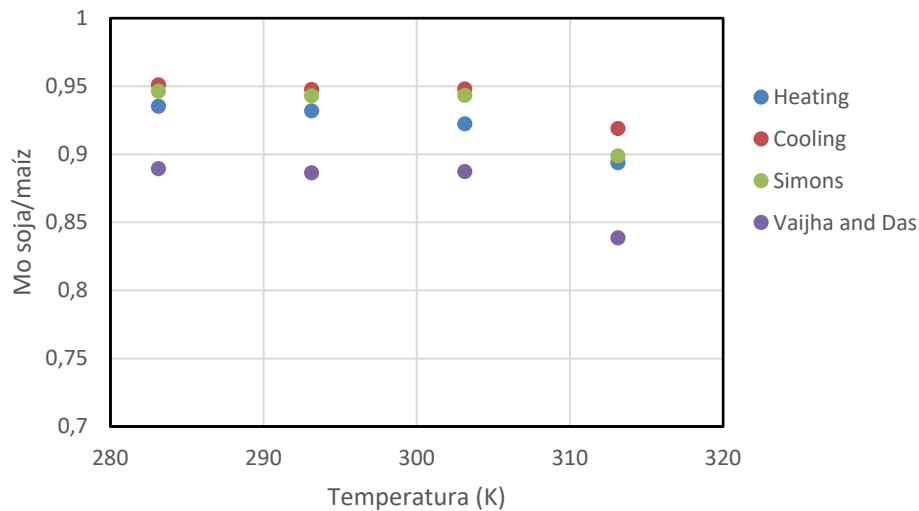


Figura 4-8. Ratio entre Mo del aceite de soja y maíz en función de la temperatura. Fuente propia

En la figura precedente se observan valores muy próximos a la unidad, lo cual indica que, si bien el aceite de maíz presenta una eficiencia ligeramente superior en términos predictivos, la diferencia con respecto al aceite de soja es reducida. Esta proximidad a la unidad sugiere que, según este criterio teórico, ambos fluidos presentan un comportamiento térmico relativamente similar.

Dado que las figuras de mérito y los coeficientes de convección se expresan en magnitudes diferentes y no pueden compararse de forma directa, se ha optado por analizar su coherencia relativa a través del cociente entre fluidos. Para ello, comparando las tablas 4-1 y 4-2, donde se representan las ratios soja/maíz tanto para la figura de mérito de Mouromtseff como para los coeficientes de convección, permite observar si ambos enfoques conducen a conclusiones consistentes respecto al comportamiento relativo de los fluidos. La similitud en las tendencias observadas refuerza la coherencia entre ambos enfoques y sugiere que, a pesar de la limitación en el número de datos experimentales, estos resultan consistentes y válidos dentro del marco comparativo establecido.

$\dot{V}$	h_{soja}/h_{maiz}
3,1475	1,04283923
5,212	1,34361022
7,9125	0,93149132

Tabla 4-2. Ratio de los coeficientes de convección del aceite de soja respecto al de maíz en función del caudal. Fuente propia

En conjunto, los análisis realizados, tanto experimentales como predictivos mediante figuras de mérito, han permitido establecer una visión amplia y razonada del comportamiento de los aceites vegetales frente al agua como fluidos de intercambio térmico. Si bien las limitaciones técnicas han restringido el número de datos experimentales disponibles, los resultados obtenidos muestran coherencia con las tendencias teóricas esperadas, lo que refuerza su validez dentro del marco comparativo. La implementación de figuras de mérito ha sido clave para complementar la interpretación de los datos, especialmente en condiciones donde la comparación directa no era posible.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente trabajo ha tenido como objetivo evaluar el rendimiento energético de distintos fluidos en un intercambiador de microcanales, con especial atención a la comparación entre fluidos convencionales, como el agua, y aceites vegetales seleccionados por sus características. Para ello, se empleó y validó un banco de ensayos específico, basado en un circuito hidráulico con sistema de adquisición de datos gestionado mediante LabVIEW. La puesta a punto del sistema fue satisfactoria y permitió realizar ensayos bajo condiciones controladas, cumpliendo con uno de los principales objetivos del proyecto.

Durante la fase experimental, se realizaron múltiples ensayos con agua y con dos aceites vegetales, soja y maíz. En el caso de los aceites, se llevaron a cabo tres ensayos para cada fluido, variando el caudal de circulación. En cada ensayo se recogieron hasta 150 datos de cada una de las variables del sistema, incluyendo temperaturas en distintos puntos del sistema, caudales y tiempos. Estos datos permitieron trazar perfiles térmicos y observar tendencias de comportamiento térmico. Sin embargo, debido a las limitaciones técnicas impuestas por la bomba hidráulica empleada, los caudales alcanzados con los aceites fueron muy bajos, lo que condicionó el régimen de flujo a una zona estrictamente laminar, en contraste con los ensayos con agua, donde se alcanzaron condiciones de régimen transitorio. Esta diferencia impidió establecer una base común de comparación directa entre los tres fluidos.

Pese a la limitación en el rango de operación, los datos recogidos fueron coherentes y permitieron observar tendencias claras en el comportamiento térmico del sistema al emplear fluidos con propiedades físicas contrastadas. Se observó que, en general, el coeficiente de convección para los aceites era sensiblemente inferior al obtenido con agua, tal como era previsible por su menor conductividad térmica y capacidad calorífica, así como por su alta viscosidad. Este resultado, aunque no concluyente en términos de magnitudes comparables, valida las bases teóricas que sustentan el análisis térmico de estos fluidos. La correcta respuesta del sistema ante variaciones de caudal y temperatura en cada ensayo sugiere que el banco de pruebas se comporta de forma fiable incluso con fluidos complejos como los aceites.

Ante la imposibilidad de establecer una comparación concluyente a partir de datos experimentales, se optó por complementar el análisis mediante el uso de figuras de mérito (FOM), una herramienta predictiva que permite comparar el rendimiento térmico relativo de distintos fluidos a igualdad de condiciones geométricas y de flujo. Aplicando este enfoque, se pudo estimar la capacidad de transferencia de calor relativa del aceite de maíz y del de soja, siendo el primero ligeramente más

favorable. No obstante, se subraya que estas conclusiones tienen un carácter orientativo, ya que las diferencias observadas fueron mínimas y no se basan en condiciones experimentales homogéneas con respecto al agua.

Cabe destacar que, a pesar de que los aceites mostraron un rendimiento térmico inferior al agua en todos los escenarios evaluados, su capacidad dieléctrica, no abordada experimentalmente, pero reconocida en la literatura, sugiere un campo de estudio muy prometedor. Esta propiedad los hace especialmente interesantes en contextos donde la refrigeración de componentes electrónicos debe ir acompañada de aislamiento eléctrico, un aspecto que merece una investigación más profunda.

En resumen, se ha logrado usar, modificar y validar un sistema experimental apto para estudiar el comportamiento térmico de diferentes fluidos en intercambiadores de microcanales. Aunque las limitaciones técnicas impidieron obtener datos plenamente comparables entre todos los fluidos, el trabajo realizado ha permitido observar comportamientos coherentes con la teoría, validar el funcionamiento del banco y establecer una metodología sólida para estudios posteriores. La aplicación del enfoque predictivo mediante FOM ha proporcionado una vía alternativa para evaluar el potencial de los aceites vegetales, que, junto con sus propiedades dieléctricas, confiere a este estudio un valor añadido de cara al desarrollo de soluciones térmicas más sostenibles.

5.2 Líneas futuras

Con el objetivo de consolidar los avances obtenidos y superar las limitaciones encontradas, se propone como línea principal de trabajo futuro la mejora del banco de ensayos, especialmente en lo relativo a la bomba hidráulica. Sustituir el sistema actual por una bomba capaz de trabajar de forma eficiente con fluidos viscosos, como los aceites vegetales, permitiría alcanzar los caudales necesarios para operar en régimen comparable al del agua, asegurando así una base experimental más homogénea. Asimismo, sería recomendable incorporar caudalímetros específicos para aceites, con mayor precisión en rangos bajos de flujo, y optimizar el sellado y compatibilidad química de todos los componentes del circuito.

Una vez realizada esta mejora técnica, resultaría de gran interés repetir el estudio experimental incluyendo una gama más amplia de aceites vegetales. Aceites como el de linaza, cártamo o girasol, que ya han sido caracterizados en el estado del arte, podrían ofrecer comportamientos diferenciados en función de sus propiedades térmicas y reológicas. Esta ampliación permitiría establecer criterios más completos para la selección de fluidos en aplicaciones de refrigeración líquida, e incluso identificar combinaciones o mezclas que optimicen el equilibrio entre capacidad de intercambio y facilidad de bombeo.

De forma paralela, resulta especialmente relevante considerar el estudio del fluido dieléctrico Envirotemp FR3, una solución comercial basada en aceite vegetal refinado que ha demostrado excelentes propiedades térmicas y estabilidad operativa en aplicaciones de alta exigencia, como transformadores eléctricos. Analizar experimentalmente este fluido en el banco de ensayos permitiría establecerlo como una posible referencia de “aceite optimizado” y, a su vez, identificar qué características o aditivos podrían replicarse en otros aceites de menor coste. El conocimiento derivado de dicho estudio podría trasladarse a la formulación de aceites vegetales modificados, capaces de alcanzar un mejor rendimiento térmico sin perder sus propiedades ecológicas.

Por último, se propone explorar soluciones tecnológicas dirigidas a reducir la viscosidad de los aceites vegetales, uno de los principales obstáculos identificados en este trabajo. En este sentido, el uso de aditivos comerciales (como modificadores del índice de viscosidad o depresores del punto de fluidez), así como la investigación de nanofluidos a base de aceites, aparecen en la literatura como vías

prometedoras. Si bien estas técnicas pueden incrementar la complejidad del sistema, también podrían ofrecer mejoras notables en la conductividad térmica sin penalizar en exceso el comportamiento hidráulico. Una alternativa concreta dentro de esta línea es el uso de etilcelulosa, un derivado de la celulosa que ha demostrado en estudios recientes su eficacia como modificador de viscosidad en aceites vegetales. Al mezclarse con estos, puede mejorar su estabilidad y facilitar el flujo sin comprometer otras propiedades clave. Aplicar este tipo de estrategias con criterio técnico y validación experimental permitiría convertir a los aceites vegetales en candidatos reales para sistemas de refrigeración sostenible basados en microcanales.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Microchannel Heat Exchanger Market», abr. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://exactitudeconsultancy.com/es/reports/16776/microchannel-heat-exchanger-market>
- [2] «Expert Q&A: Heat transfer fluids explained | Knowledge Centre | Petro-Canada Lubricants». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://petrocanadalubricants.com/en-es/knowledge-centre/expertqa/heat-transfer-fluids-explained>
- [3] «Historia de los Intercambiadores de Calor», [En línea]. Disponible en: <https://lahistoria.info/historia-de-los-intercambiadores-de-calor-2/>
- [4] Transfer Multisort Elektronik, «Formas de enfriar dispositivos electrónicos.», [En línea]. Disponible en: <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/53507/formas-de-enfriar-dispositivos-electronicos/>
- [5] «Guía completa: sistemas de refrigeración para electrónica», 20 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://architecnologia.es/guia-sistemas-refrigeracion-electronica>
- [6] «Western Digital SSD WD Black SN850X 2TB - Con disipador de calor - Disco SSD - LDLC». Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ldlc.com/es-es/ficha/PB00512209.html>
- [7] D. B. TUCKERMAN AND R. F. W. PEASE, «High-Performance Heat Sinking for VLSI», may 1981.
- [8] «Adrian Bejan(auth.)-Convection Heat Transfer, Fourth Edition (2013).pdf».
- [9] C. Cmy, «Kakaç • Liu • HEAT EXCHANGERS Pramuanjaroenkij».
- [10] R. K. Shah y D. P. Sekulić, *Fundamentals of heat exchanger design*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.
- [11] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, Fifth edition. New York, NY: McGraw Hill Education, 2015.
- [12] «La transferencia de calor se produce: vector de stock (libre de regalías) 2374763101», Shutterstock. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.shutterstock.com/es/image-vector/heat-transfer-occurs-through-conduction-convection-2374763101>
- [13] I. A. CALORYFRIO, «¿Qué es una torre de refrigeración o enfriamiento? Funcionamiento y seguridad - caloryfrio.com». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/que-es-torre-de-refrigeracion-enfriamiento-funcionamiento-seguridad.html>

- [14] G. Wang *et al.*, «Coaxial Pipes Used as Ground Buried Heat Exchangers—A Review of Research in Recent Years», *Buildings*, vol. 15, n.º 2, Art. n.º 2, ene. 2025, doi: 10.3390/buildings15020243.
- [15] A. Pérez Sánchez, E. J. Pérez Sánchez, A. Heredia Sánchez, y L. Pazos Amayuela, «Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona», *Nexo Rev. Científica*, vol. 32, n.º 01, pp. 61-74, jul. 2019, doi: 10.5377/nexo.v32i01.7988.
- [16] Z. Zhang y H. Liu, «Research on the Thermal Performance of a Helical Coil Heat Exchanger», en *Proceedings of the International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering (ICFPMCE 2022)*, L. Yan y J. Na, Eds., Dordrecht: Atlantis Press International BV, 2023, pp. 115-130. doi: 10.2991/978-94-6463-022-0_11.
- [17] «Intercambiador de calor - Definición, funcionamiento, tipos, aplicaciones y mucho más». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.alfalaval.es/que-es-intercambiador-de-calor/>
- [18] S. D. MacKenzie, «The history of quenching: this article describes the early history of quenching from the dawn of civilization to the early industrial age. The focus will be primarily on the contributions of European, Indian, Chinese, and Japanese peoples», *Adv. Mater. Amp Process.*, vol. 164, n.º 9, pp. 39-41, sep. 2006.
- [19] N. I. Kobasko y E. C. de Souza, «Vegetable Oil Quenchants: Calculation and Comparison of The Cooling Properties of a Series of Vegetable Oils», *J. Mech. Eng.*, 2010.
- [20] E. C. de Souza, C. Bronzini, A. Gastón, G. S. Sarmiento, L. C. F. Canale, y G. E. Totten, «HEAT TRANSFER COEFFICIENT CHARACTERIZATION OF VEGETABLE OILS».
- [21] «Skydrol History-Aircraft Hydraulics | Aviation Week Network». Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aviationweek.com/skydrol-history-aircraft-hydraulics>
- [22] «5286687.pdf».
- [23] L. Ugolini *et al.*, «Technical Performance and Chemical–Physical Property Assessment of Safflower Oil Tested in an Experimental Hydraulic Test Rig», *Lubricants*, vol. 11, n.º 2, p. 39, ene. 2023, doi: 10.3390/lubricants11020039.
- [24] K. Wing, «Soy Biobased Fluid Powers Olympic Village», North Carolina Soybeans. Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ncsoy.org/article/soy-biobased-fluid-powers-olympic-village/>
- [25] X. Liu, J. Zhao, Y. She, y Y. Liu, «Development history, current situation and prospect of international vegetable oil-based hydraulic oil», *E3S Web Conf.*, vol. 385, p. 04019, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202338504019.
- [26] «Wilec - ENVIROTEMP™ FR3™ FLUID». Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.wilec.co.za/products/envirotemp-tm-fr3-tm-fluid>
- [27] O. O. Fasina y Z. Colley, «Viscosity and Specific Heat of Vegetable Oils as a Function of Temperature: 35°C to 180°C», *Int. J. Food Prop.*, vol. 11, n.º 4, pp. 738-746, nov. 2008, doi: 10.1080/10942910701586273.
- [28] M.-T. Golmakani, A. Soltani, S. M. H. Hosseini, y M. Keramat, «Improving the oxidation kinetics of linseed oil using the blending approach», *J. Food Process. Preserv.*, vol. 44, n.º 12, p. e14964, 2020, doi: 10.1111/jfpp.14964.
- [29] «06_vr_cooper.pdf#_~_text=Archive archive,additives.pdf».
- [30] «Environmentally Acceptable Transformer Fluids: An Update».

- [31] J.-F. Hoffmann *et al.*, «Temperature dependence of thermal conductivity of vegetable oils for use in concentrated solar power plants, measured by 3omega hot wire method», *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 107, pp. 105-110, sep. 2016, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.002.
- [32] A. M. Bagabir, J. A. Khamaj, y A. S. Hassan, «Numerical Study of Turbulent Periodic Flow and Heat Transfer in a Square Channel with Different Ribs», *J. Appl. Math. Phys.*, vol. 01, n.º 06, pp. 65-73, 2013, doi: 10.4236/jamp.2013.16014.
- [33] «Factor de fricción de Darcy», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 14 de enero de 2025. Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Factor_de_fricci%C3%B3n_de_Darcy&oldid=164767098
- [34] N. Connor, «¿Qué es la ecuación de Dittus-Boelter? Definición», *Thermal Engineering*. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-dittus-boelter-definicion/>
- [35] J. Cámara Colmenero, J. I. (advisor) Iglesias Prado, y J. (advisor) Pérez Vallejo, «Estudio de la refrigeración líquida de dispositivos electrónicos mediante un banco de ensayos», abr. 2024, Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/777>
- [36] J. P. Vallejo, L. Febrero-Garrido, A. Cacabelos, A. González-Gil, y L. Lugo, «Influence of crystal structure on the thermophysical properties and figures-of-merit of propylene glycol: water-based SiC nanofluids», *Powder Technol.*, vol. 433, p. 119299, ene. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2023.119299.
- [37] M. R. Ceballos, V. Brailovsky, K. L. Bierbrauer, S. L. Cuffini, D. M. Beltramo, y I. D. Bianco, «Effect of ethylcellulose on the structure and stability of non-aqueous oil based propylene glycol emulsions», *Food Res. Int.*, vol. 62, pp. 416-423, ago. 2014, doi: 10.1016/j.foodres.2014.03.040.

ANEXO I: IMPLICACIONES AMBIENTALES

El desarrollo de este estudio tiene importantes implicaciones medioambientales debido a la selección de fluidos térmicos utilizados en el sistema. Tradicionalmente, los intercambiadores de calor emplean fluidos sintéticos, aceites minerales o refrigerantes industriales, algunos de los cuales presentan problemas ambientales significativos debido a su toxicidad, baja biodegradabilidad y potencial impacto en el calentamiento global al tener componentes volátiles que pueden escapar a la atmósfera y comportarse como gases de efecto invernadero una vez liberados. En este contexto, la introducción de aceites vegetales como alternativa representa una solución viable desde una perspectiva ecológica y sostenible.

Los aceites vegetales presentan ventajas clave en términos medioambientales en comparación con los aceites minerales y otros fluidos de intercambio térmico. En primer lugar, son biodegradables y menos contaminantes en caso de fugas o vertidos accidentales. Según estudios previos, los aceites vegetales pueden descomponerse en entornos naturales con un impacto ecológico reducido en comparación con los fluidos convencionales utilizados en sistemas térmicos.

Además, su origen renovable les confiere una ventaja sobre los aceites sintéticos derivados del petróleo, ya que pueden obtenerse de fuentes agrícolas sostenibles, reduciendo la huella de carbono asociada a su producción y uso. No obstante, es fundamental considerar el ciclo de vida completo del fluido, desde su extracción y producción hasta su eventual reciclaje o disposición, para garantizar que su impacto medioambiental sea efectivamente menor que el de otros fluidos térmicos.

En estudios previos sobre intercambiadores de tubo y coraza, se ha señalado la necesidad de optimizar el diseño desde una perspectiva ecológica, reduciendo el consumo energético y minimizando la cantidad de fluido utilizad. Los intercambiadores de calor de microcanales (MCHE) han demostrado que esta tecnología mejora la eficiencia térmica y puede reducir hasta un 50% el uso de refrigerante, lo que disminuye significativamente el impacto ambiental del sistema. Si bien los MCHE han sido aplicados principalmente con fluidos convencionales, el presente estudio busca evaluar si el empleo de aceites vegetales podría potenciar aún más su sostenibilidad, proporcionando una alternativa ecológica sin comprometer el rendimiento térmico del sistema.

Uno de los principales retos ambientales en sistemas de intercambio térmico es el consumo de energía y recursos. Si bien los aceites vegetales presentan menores coeficientes de transferencia de calor en comparación con el agua y otros fluidos industriales, su capacidad para operar a temperaturas más elevadas sin degradarse puede contribuir a mejorar la eficiencia global del sistema. En este sentido, optimizar el diseño del intercambiador de calor y ajustar las condiciones operativas permitirá compensar sus limitaciones térmicas, maximizando el aprovechamiento de la energía transferida y reduciendo la demanda de potencia para el bombeo del fluido.

Como conclusión podemos afirmar que, los resultados obtenidos en este estudio han permitido evaluar si los aceites vegetales pueden representar una alternativa viable a los fluidos térmicos convencionales, considerando tanto su validez térmica como sus beneficios ambientales.

- Si bien la eficacia térmica de los aceites vegetales es menor en comparación con fluidos tradicionales, su uso en intercambiadores de microcanales, que presentan una alta densidad de transferencia térmica, podría compensar esta desventaja.

- Su impacto ambiental es significativamente menor, con beneficios en términos de biodegradabilidad, reducción de toxicidad y sostenibilidad de recursos.

Por otro lado, considerando las regulaciones ambientales cada vez más estrictas y la creciente necesidad de tecnologías sostenibles, este TFG proporciona una base sólida para futuras investigaciones sobre el empleo de aceites vegetales en aplicaciones térmicas avanzadas, optimizando su rendimiento y maximizando sus beneficios ambientales.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La mejora de los intercambiadores de calor de microcanales puede aumentar la eficiencia de los sistemas energéticos, reduciendo el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que impacta directamente en la reducción de la huella de carbono y la sostenibilidad de los procesos industriales. Además, la implementación de tecnologías más eficientes en la transferencia de calor puede contribuir al desarrollo de procesos industriales más sostenibles, alineándose con los objetivos de responsabilidad social y ambiental. Estudios han demostrado que la optimización en el diseño de intercambiadores de calor puede reducir costos operativos y mejorar la eficiencia térmica en diversas aplicaciones, incluyendo la industria alimentaria, química y energética.

Asimismo, la accesibilidad a tecnologías térmicamente eficientes representa un factor clave en la democratización de la energía y la sostenibilidad en economías emergentes. La posibilidad de integrar intercambiadores de calor de microcanales en sistemas de bajo consumo permite que pequeñas y medianas empresas adopten soluciones sostenibles sin comprometer su rentabilidad ni aumentar su impacto ambiental. Estos avances fomentan la cooperación científica y tecnológica, facilitando el acceso a investigaciones y promoviendo la innovación en el campo de la ingeniería térmica.

La investigación en la optimización de intercambiadores de calor de microcanales debe llevarse a cabo con rigor científico y transparencia, garantizando la reproducibilidad de los resultados y la integridad en la presentación de los datos. La validación de los modelos termodinámicos utilizados y la documentación precisa de las condiciones experimentales son aspectos fundamentales para asegurar la fiabilidad de las investigaciones en transferencia de calor.

Además, es esencial que los investigadores consideren las implicaciones éticas de sus trabajos, asegurando que las innovaciones tecnológicas resultantes beneficien a la sociedad en su conjunto y no solo a sectores específicos. La responsabilidad en la elección de los fluidos utilizados en los intercambiadores de calor debe incluir consideraciones sobre su impacto ambiental, seguridad y viabilidad económica. Se han reportado casos en los que la falta de análisis adecuado en la selección de fluidos ha generado efectos adversos en la salud y el medio ambiente, lo que resalta la importancia de una investigación ética y fundamentada en datos verificables.

Finalmente, la publicación y difusión de estudios en plataformas de acceso abierto permiten que más investigadores y profesionales puedan beneficiarse de los avances en el campo de la transferencia de calor, fomentando la colaboración interdisciplinaria y la innovación tecnológica. La ingeniería térmica se beneficia de la integración de conocimientos provenientes de la ingeniería mecánica, química y ambiental, promoviendo un enfoque de trabajo basado en la cooperación científica y el desarrollo sostenible.