



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del perfil termofísico de fluidos térmicos
nano-mejorados mediante nitruros de boro*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jorge Quijano Martínez

DIRECTORES: Javier Pérez Vallejo

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del perfil termofísico de fluidos térmicos
nano-mejorados mediante nitruros de boro*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente trabajo pretende la evaluación experimental del perfil termofísico de fluidos térmicos nano-mejorados mediante nitruros de boro para mejorar el rendimiento de los intercambiadores de calor. Para ello, se han elaborado seis nanofluidos basados en la mezcla etilenglicol:agua 50:50, a la que se le han añadido nanopartículas de tres nitruros de boro distintos: hexagonal de 65-75 nm, cúbico de 90 nm y cúbico <200 nm, a diferentes concentraciones.

Se han determinado experimentalmente las siguientes propiedades termofísicas de cada uno de los nanofluidos: conductividad térmica, viscosidad dinámica, densidad y capacidad calorífica. Posteriormente, se han comparado con las propiedades que presenta el fluido base. Los nanofluidos analizados presentan aumentos de la conductividad térmica de hasta el 7,2%.

Además, en función de las propiedades termofísicas previamente determinadas, se han analizado diferentes figuras de mérito para predecir la eficiencia en procesos de convección en intercambiadores tubulares para régimen laminar y régimen turbulento. Según este análisis, el nanofluido de nitruro de boro cúbico de 200 nm al 2% y el nanofluido de nitruro de boro cúbico de 90 nm al 1% presentan las mejores perspectivas para la convección en régimen laminar y turbulento, respectivamente.

PALABRAS CLAVE

Nanofluidos, Nitruro de boro, Conductividad térmica, Propiedades termofísicas, Etilenglicol

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Javier Pérez Vallejo por su paciencia y su entrega a lo largo de la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado.

A la Universidad de Vigo por abrirme sus puertas para poder realizar los experimentos necesarios para completar el Trabajo de Fin de Grado.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A Cristina, por soportarme cada día durante estos largos años y siendo el primer apoyo en todo momento.

A mis compañeros, por haber compartido, disfrutado y sufrido a mi lado esta bonita etapa.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contextualización.....	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura de la memoria	8
2 Estado del arte	9
2.1 Eficiencia energética	9
2.1.1 Consumo energético	9
2.1.2 Crisis energética.....	10
2.1.3 Acuerdos energéticos.....	10
2.2 Energía térmica	11
2.2.1 Importancia a nivel global	11
2.2.2 Intercambiadores de calor y sus aplicaciones	12
2.2.3 Transferencia de calor.....	12
2.3 Nanofluidos.....	15
2.3.1 Contexto histórico.....	15
2.3.2 Definición de nanofluido	15
2.4 Propiedades con impacto en la transferencia de calor	17
2.4.1 Conductividad térmica.....	17
2.4.2 Viscosidad dinámica	17
2.4.3 Densidad	17
2.4.4 Capacidad calorífica específica	17
2.5 Estudios experimentales sobre propiedades termofísicas de nanofluidos	18
3 Desarrollo del TFG.....	19
3.1 Materiales utilizados	19
3.1.1 Fluido base.....	19
3.1.2 Nanopartículas	20
3.1.2.2 Nitruro de boro cúbico 90-100 nm	20
3.1.2.3 Nitruro de boro cúbico <200 nm	21
3.2 Metodología	21
3.2.1 Caracterización de las nanopartículas.....	21

3.2.2 Preparación del fluido base y los nanofluidos	21
3.2.3.2 Viscosidad.....	24
4 Resultados	27
4.1 Morfología de las nanopartículas	27
4.2 Propiedades termofísicas.....	29
4.2.1 Conductividad térmica.....	29
4.3 Figuras de mérito (FOM)	36
5 Conclusiones y líneas futuras	39
5.1 Conclusiones	39
5.2 Líneas futuras	40
6 Bibliografía.....	42
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	45
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Consumo energético [2].....	9
Figura 2-2 Transferencia de calor [18].....	13
Figura 2-3 Transferencia de calor por conducción [20]	13
Figura 2-4 Transferencia de calor por convección [21]	14
Figura 2-5 Transferencia de calor por radiación [23].....	14
Figura 2-6 Factores a tener en cuenta en la preparación de nanofluidos [28].....	16
Figura 2-7 Método de dos pasos [29]	16
Figura 3-1 Balanza de precisión FV-220C	22
Figura 3-2 Baño de ultrasonidos	22
Figura 3-3 Nanofluidos al 1%	23
Figura 3-4 Nanofluidos al 2%	23
Figura 3-5 Medidor (izquierda) y sensor KS-3 (derecha) del conductivímetro TEMPOS [45].....	24
Figura 3-6 Viscosímetro Viscolead Pro	25
Figura 3-7 Densímetro DMA 501	25
Figura 3-8 Calorímetro DSC Q2000 [49].....	26
Figura 4-1 Imagen TEM de las nanopartículas de BN hexagonal de 65-75 nm	27
Figura 4-2 Imagen TEM de las nanopartículas del BN cúbico de 90 nm	28
Figura 4-3 Imagen TEM de las nanopartículas del BN cúbico <200 nm.....	28
Figura 4-4 Conductividad térmica frente a la temperatura BN hexagonal de 65-75 nm	29
Figura 4-5 Conductividad térmica frente a la temperatura BN cúbico 90 nm	29
Figura 4-6 Conductividad térmica frente a la temperatura BN cúbico 200 nm	30
Figura 4-7 Incremento porcentual de la conductividad térmica de los nanofluidos frente al fluido base a 20 °C.....	30
Figura 4-8 Densidad frente a temperatura BN hexagonal de 65-75 nm.....	31
Figura 4-9 Densidad frente a temperatura BN cúbico 90 nm.....	31
Figura 4-10 Densidad frente a temperatura BN cúbico 200 nm.....	32
Figura 4-11 Incremento en porcentaje de la densidad de los nanofluidos frente al fluido base a 20 °C	32
Figura 4-12 Capacidad calorífica frente a temperatura BN hexagonal de 65-75 nm.....	33
Figura 4-13 Capacidad calorífica frente a temperatura BN cúbico 90 nm.....	33
Figura 4-14 Capacidad calorífica frente a temperatura BN cúbico 200 nm.....	34
Figura 4-15 Variación porcentual de la capacidad calorífica de los nanofluidos respecto al fluido base a 20 °C.....	34

Figura 4-16 Incremento en porcentaje de la viscosidad dinámica de los nanofluidos frente al fluido base a 20 °C	35
Figura 4-17 Viscosidad de los nanofluidos en función de su fracción másica.....	36
Figura 4-18 Ratios de conductividad térmica entre nanofluidos y fluido base para un régimen laminar	37
Figura 4-19 Ratios de número de Mouromtseff entre nanofluidos y fluido base según el método Dittus-Boelter.....	38
Figura 4-20 Ratios de número de Mouromtseff entre nanofluidos y fluido base según el método Vajjha and Das	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Propiedades del agua a 1 atm [35]	19
Tabla 3-2 Propiedades del etilenglicol a 1 atm [38].....	20
Tabla 4-1 Viscosidad de los nanofluidos a 20 °C.....	35

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

La creciente demanda de energía en la sociedad, impulsada por el desarrollo tecnológico y la expansión de las actividades industriales, plantea retos en términos de eficiencia y sostenibilidad. Esta tendencia ha generado un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así al cambio climático, un desafío global que ha suscitado controversias y ha motivado la celebración de diversas cumbres para abordar sus efectos.

La energía térmica es una de las fuentes más utilizadas en la generación eléctrica. Su empleo comprende varios ámbitos industriales y domésticos, como pueden ser los sistemas de refrigeración, aire acondicionado y calefacción. Todos estos sistemas hacen uso de los intercambiadores de calor, equipos cuya función es la transferencia de calor de un fluido a otro. En este contexto, la optimización de estos dispositivos emerge como una prioridad estratégica para mejorar la eficiencia en la conversión y el manejo de la energía térmica. A pesar de que los intercambiadores de calor suelen tener una eficiencia considerable, existen enfoques para mejorarla. Sin embargo, este objetivo se ve obstaculizado por las limitaciones inherentes a los fluidos térmicos convencionales, como puede ser el agua, que, aunque presenta una buena conductividad térmica, se ve limitada por su estrecho rango de temperaturas de trabajo. Es por ello por lo que se recurre a fluidos alternativos, como pueden ser las mezclas de agua y etilenglicol, que presentan menores puntos de fusión a cambio de un empeoramiento de las propiedades termofísicas.

La necesidad de acabar con estas limitaciones ha impulsado la investigación en nanotecnología aplicada a fluidos térmicos, buscando soluciones innovadoras para mejorar la transferencia de calor y, con ello, la eficiencia de los intercambiadores de calor. La introducción de partículas sólidas nanométricas en estos fluidos, conocidos como nanofluidos, se presenta como una estrategia innovadora para modificar sus propiedades y potenciar así la eficiencia de los procesos de convección.

El presente trabajo se enfoca en la evaluación del perfil termofísico de nanofluidos mejorados mediante la incorporación de nitruros de boro. Estos sólidos cristalinos exhiben propiedades térmicas únicas que pueden ser aprovechadas para modificar las características de los fluidos térmicos, abriendo nuevas posibilidades en la mejora de la eficiencia de los intercambiadores de calor.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este estudio es la investigación de nanofluidos que puedan mejorar la eficiencia de los intercambiadores de calor en procesos de convección, con el objetivo adicional de lograr ahorros energéticos y económicos en dichos equipos.

Para lograr esto, se planea desarrollar nanofluidos que mejoren las conductividades térmicas de un fluido base compuesto por agua y etilenglicol al 50% en masa (fluido que proporciona protección frente a la congelación). Se emplearán tres tipos de nanopartículas (mismo material pero diferente estructura cristalina y tamaño). Con cada una de ellas se crearán dos nanofluidos con diferentes concentraciones.

Posteriormente, se llevará a cabo una comparación entre los distintos nanofluidos diseñados a partir de las tres nanopartículas de nitruro de boro mezclados con el fluido a diferentes concentraciones en masa. Para realizar este análisis se medirán propiedades como la conductividad térmica, la densidad, la viscosidad dinámica y la capacidad calorífica, tanto del fluido base como de los nanofluidos, y todo ello se realizará en un rango de temperatura entre 20 °C a 40 °C.

Una vez finalizadas las mediciones de las propiedades termofísicas, se tendrán en cuenta distintas ratios de propiedades y figuras de mérito para prever las variaciones del coeficiente de convección en los intercambiadores de calor tubulares, así como las variaciones de potencia de bombeo de los equipos.

Por último, se analizarán los resultados obtenidos para decretar qué nanofluido presenta un potencial de mayor rendimiento.

1.3 Estructura de la memoria

La presente sección detalla la organización adoptada para la presente memoria. Su propósito es proporcionar una guía clara sobre la disposición de los contenidos abordados en este documento. A continuación, se presenta una breve descripción de los principales puntos que se van a abordar en esta memoria. Se organiza en cinco capítulos:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos: Se presenta una breve contextualización del trabajo, seguida de la exposición de su motivación y los objetivos que guían su desarrollo.
- Capítulo 2: Estado del arte: Se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente relacionada con el tema objeto de estudio.
- Capítulo 3: Desarrollo del Trabajo de Fin de Grado: Se ofrece una descripción detallada del trabajo llevado a cabo en el laboratorio, incluyendo materiales, equipos y técnicas empleadas en el proceso.
- Capítulo 4: Resultados: Se exponen los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo.
- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras: Se sintetizan los resultados y descubrimientos alcanzados en el estudio y se proponen posibles tendencias para futuras investigaciones en el mismo campo.

Finalmente se incluyen las fuentes bibliográficas consultadas para la elaboración del trabajo, así como los anexos que proporcionan un respaldo adicional para el desarrollo del estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Eficiencia energética

2.1.1 Consumo energético

En estos tiempos en los que destacan la crisis económica, energética y medioambiental, una de las alternativas principales aparece en el ahorro y la eficiencia energética, que son pilares fundamentales para afrontar estos desafíos interrelacionados. El ahorro energético es una herramienta crucial, permitiendo no solo preservar nuestros limitados recursos económicos, sino también retardar el agotamiento de los recursos fósiles, que constituyen la base de nuestro suministro energético, y ofrecer una alternativa eficaz para reducir las emisiones de CO₂. Es esencial reconocer que no consumimos energía como tal, sino los servicios energéticos que esta brinda, por lo tanto, es viable mantener el mismo nivel de servicios energéticos con un menor consumo de energía. Aunque el ahorro de energía no pone fin a todos los problemas ambientales, su contribución es especialmente significativa para poner fin a la lucha contra el cambio climático. Para demostrar la veracidad de esta relación podemos observar la Figura 2-1, dónde se relaciona el consumo de energía en España con las emisiones de CO₂ [1].

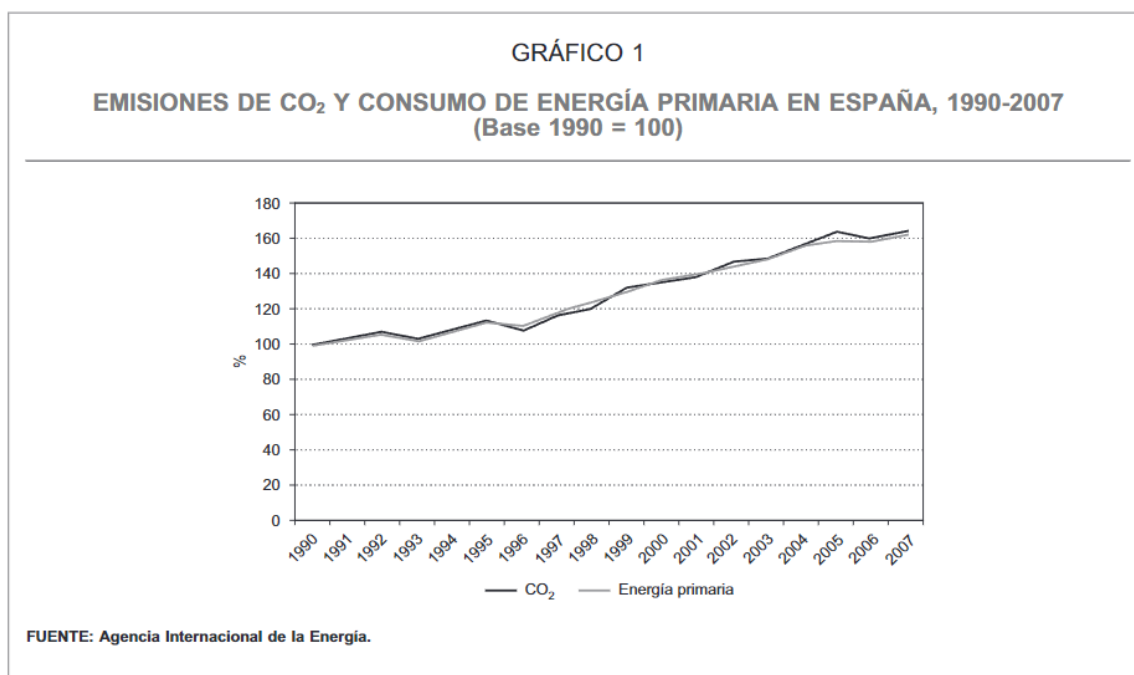


Figura 2-1 Consumo energético [2]

Contamos con el apoyo público; tanto en España, con ejemplos como el Real Decreto-ley 14/2022, de 1 de agosto, donde se recoge un plan de choque de ahorro y gestión energética y medidas de ahorro, eficiencia energética y de reducción de la dependencia energética del gas natural [3].

En la Unión Europea se dispone del Pacto Verde, el cual representa una serie de políticas y medidas dirigidas a encaminar a la Unión Europea hacia una transformación ecológica con el fin de obtener la neutralidad climática [4]. Sin embargo, a pesar de este apoyo el consumo energético en España continúa creciendo [5].

2.1.2 Crisis energética

La generación y aplicación de la energía representan una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que los convierte en principales motivos del cambio climático. En consecuencia, es importante abordar este problema para reducir sus graves impactos ambientales, sociales y económicos, como el aumento de la temperatura global, el incremento del nivel o la reducción de las precipitaciones [6].

La actual dependencia de los combustibles fósiles en el modelo de generación, transporte y consumo de energía es insostenible frente al desafío del cambio climático. Estudios recientes indican que en nuestro país se prevé un aumento del número de olas de calor, con condiciones climáticas cada vez más extremas, así como un progresivo proceso de desertificación [7].

La creciente demanda y consumo energético, combinada con las limitaciones en la disponibilidad de fuentes de energía, están presentando un escenario de crisis energética a nivel global. Es crucial tomar medidas para reducir el consumo energético y diversificar las fuentes de energía, promoviendo así la sostenibilidad y la resiliencia frente a los desafíos futuros.

Durante el año 2021, se observaron tensiones en los mercados energéticos debido a diferentes factores, entre ellos, el repunte económico tras la pandemia. Esta situación fue empeorando hasta convertirse en una crisis energética global tras la invasión de Ucrania por parte de Rusia en febrero de 2022. Los precios del gas natural alcanzaron niveles históricos, lo que también supuso un incremento en los precios de la electricidad en algunos mercados, así como del petróleo, que llegó a su precio más elevado desde 2008 [8].

El incremento de los precios energéticos ha ocasionado una inflación preocupante, empujando a algunas familias al umbral de la pobreza, obligando a fábricas a reducir su producción e incluso a cerrar y desacelerando el crecimiento económico hasta el punto de que algunos países están al borde de una recesión severa. Europa, especialmente vulnerable debido a su histórica dependencia del suministro de gas ruso, podría enfrentar la necesidad de racionar el gas durante el invierno. Además, numerosas economías emergentes están experimentando precios considerablemente más altos por la energía importada y enfrentando escasez de combustibles.

Aunque esta crisis energética pueda recordar a la crisis del petróleo de los años setenta, presenta diferencias notables. Mientras que la crisis anterior se centró especialmente en el petróleo, en un momento en que la economía mundial dependía más de este combustible y menos del gas, la crisis actual está mucho más interconectada, lo que provoca un mayor impacto.

En los países en desarrollo, donde el gasto de energía y alimentos ya es elevado, el aumento de los precios energéticos ha incrementado la pobreza y ha revertido los avances hacia un acceso universal y asequible a la energía. Incluso en las economías avanzadas, el aumento de los precios ha afectado a los hogares vulnerables y ha generado tensiones económicas, sociales y políticas.

2.1.3 Acuerdos energéticos

Durante varios años se han propuesto diferentes medidas para reducir los impactos adversos del cambio climático. La Organización de las Naciones Unidas ha expresado siempre su preocupación por el aumento de las temperaturas a nivel global debido a los gases de efecto invernadero. En respuesta a

esta preocupación, la ONU ha logrado la participación de numerosos países de todo el mundo, alcanzando acuerdos a nivel global con el objetivo de mitigar estas emisiones y frenar los efectos del cambio climático. Con el fin de llegar a dichos acuerdos se crearon las Cumbres del Clima, eventos internacionales que congregan a los líderes de los distintos países para abordar estos desafíos.

Estas cumbres tuvieron su inicio con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, celebrada en Río de Janeiro en 1992, y desde entonces se llevan a cabo anualmente en diversas ubicaciones alrededor del mundo. Sin embargo, fue en la conferencia de París en 2015 cuando casi 200 países llegaron a un acuerdo conjunto sobre un modelo de desarrollo con bajas emisiones [9].

El propósito fundamental de estas reuniones es negociar acuerdos, tomar decisiones y establecer compromisos específicos para la reducción de los gases de efecto invernadero, así como reducir el impacto del cambio climático a nivel global. Las Cumbres representan una plataforma crucial para la cooperación internacional en la lucha contra este problema, ofreciendo esperanza en la búsqueda de un futuro más sostenible para el planeta.

Entre las cumbres más recientes destacan principalmente:

- Protocolo de Kioto: Fue adoptado en la ciudad de Kioto, Japón, en 1997 y entró en vigor en 2005. Su principal objetivo era reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este protocolo establecía compromisos para los países desarrollados para reducir sus emisiones en un cierto porcentaje en comparación con los niveles de emisión de 1990. Además, el protocolo incluía mecanismos para ayudar a cumplir sus objetivos, como podían ser el comercio de emisiones, el mecanismo de desarrollo limpio y la implementación conjunta. A pesar de no haber obtenido la efectividad deseada por la falta de compromiso de algunos países importantes, sentó las bases para futuras negociaciones climáticas internacionales y contribuyó a concienciar a la sociedad sobre la urgencia de abordar el cambio climático a nivel global [10].
- Cumbre de París: Con este acuerdo se pretendía establecer un marco más inclusivo y ambicioso para ver así las emisiones de gases de efecto invernadero reducidas. El acuerdo resultante, conocido como el Acuerdo de París, fue adoptado el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Se instauraba como principal objetivo poner el límite en el aumento de la temperatura global muy por debajo de 2 grados Celsius con respecto a los niveles preindustriales. También establecía compromisos de acción climática voluntaria por parte de cada país, las cuales debían ser revisadas y actualizadas periódicamente. Este acuerdo es considerado un éxito, ya que se logró la participación de 196 países que representan a la mayoría de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [11].

2.2 Energía térmica

Se define como energía térmica aquella asociada con la temperatura de un objeto o sistema y se relaciona con el movimiento molecular dentro del sistema. Se manifiesta a través del movimiento aleatorio de partículas que componen la materia, lo que genera calor y permite que este se transfiera entre objetos debido a una diferencia de temperatura. Esta forma de energía es fundamental en diversos procesos, desde la calefacción de edificios hasta la generación de electricidad en centrales termoeléctricas [12].

2.2.1 Importancia a nivel global

La importancia de la energía térmica a nivel global está en su papel fundamental en un amplio número de procesos y actividades que respaldan la vida moderna y la economía mundial. Algunos de los aspectos en los que se puede destacar su importancia son [13]:

- Generación de electricidad: Gran parte de la electricidad mundial se produce mediante la conversión de energía térmica en eléctrica. Ya sea a través de centrales termoeléctricas que queman combustibles fósiles o haciendo uso de la energía nuclear para calentar agua, producir vapor y así impulsar turbinas generadoras [14].
- Empleo doméstico: La energía térmica se usa para proporcionar calefacción en edificio durante los meses fríos y para la refrigeración en climas cálidos. Esto se logra mediante sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Además, se emplea para la producción de agua caliente sanitaria que se utiliza en los hogares.
- Empleo industrial: En determinados procesos industriales, la energía térmica es esencial para la transformación de materiales y la producción de bienes. Se utiliza, también, para la fabricación de productos químicos o procesamiento de alimentos, entre otros [14].
- Transporte: Los motores de combustión interna en vehículos automotores, aviones y barcos hacen uso de esta energía liberada por la combustión de combustibles para generar movimiento y propulsión.
- Procesos medioambientales: La energía térmica desempeña un papel importante en los procesos naturales de la Tierra, como el ciclo del agua y la regulación del clima.

2.2.2 Intercambiadores de calor y sus aplicaciones

Un intercambiador de calor es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas. Los fluidos pueden encontrarse en proximidad o separados por una barrera física a través de la cual se produce la transferencia de calor. Los intercambiadores de calor tienen una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias, así como en áreas de la vida cotidiana [15]:

- Industria alimentaria: Para el procesamiento de alimentos, la pasteurización, esterilización y enfriamiento de productos alimenticios.
- Calefacción, ventilación, aire acondicionado y agua caliente sanitaria: Los intercambiadores de calor se emplean en sistemas de calefacción central, radiadores y enfriadores de aire para regular la temperatura.
- Industria química: Los intercambiadores se utilizan en la refrigeración de procesos y recuperación de calor residual en diversos procesos químicos, entre otros.
- Generación de energía: Los intercambiadores de calor son empleados en centrales eléctricas para enfriar condensadores en ciclos de vapor, así como en sistemas de cogeneración y plantas de energía renovable.
- Industria farmacéutica: Para la esterilización de equipos y producción de medicamentos y vacunas [16].
- Procesos de fabricación: Utilizados para la refrigeración de equipos, la transferencia de calor en reactores químicos y la regulación de la temperatura en sistemas de fabricación de diferentes productos [17].

2.2.3 Transferencia de calor

Siempre que existe una diferencia de temperatura entre distintos cuerpos se produce una transferencia de calor hasta que ambos alcanzan una temperatura de equilibrio. Como se observa en la Figura 2-2, existen tres mecanismos de transferencia de calor: la radiación, la convección y la conducción.



Figura 2-2 Transferencia de calor [18]

Entrando un poco más en detalle en los tres mecanismos:

- **Conducción:** Es la transferencia de calor que se produce cuando dos cuerpos entran en contacto. El calor se transfiere del punto más caliente al más frío. Un ejemplo de transferencia de calor por conducción es cuando se coloca una olla sobre la vitrocerámica, al encenderse se transfiere el calor desde la superficie caliente de la vitrocerámica a la base de la olla. Las moléculas calientes vibran más rápido debido al calor, transfiriendo esa energía térmica a las moléculas de la base de la olla, que a su vez comienzan a vibrar más rápido, transmitiendo el calor a las moléculas adyacentes dentro de la olla [19]. Se observa gráficamente en la Figura 2-3.

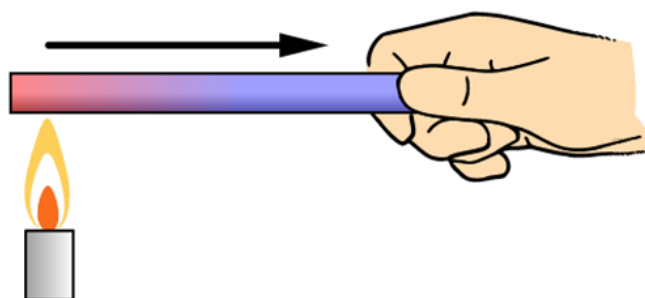


Figura 2-3 Transferencia de calor por conducción [20]

- **Convección:** En este caso el calor se transfiere de un lugar a otro mediante el movimiento de un fluido (líquido o gas). Este movimiento del fluido transporta el calor de una zona a otra, lo que provoca un intercambio de calor entre ellas. La convección puede surgir de manera espontánea, motivada por disparidades de densidad generadas por cambios de temperatura dentro del fluido, o de manera forzada, cuando el movimiento del fluido es provocado por una fuerza externa, como un ventilador o una bomba, lo que acelera el proceso. Un ejemplo es el proceso de calefacción de una habitación mediante un radiador de agua caliente. Al calentarse el radiador también lo hace el aire que está en contacto con él, volviéndose así menos denso. Por tanto, el aire caliente asciende y el frío desciende y este

movimiento ascendente y descendente provoca una corriente de convección que hace que se distribuya el calor de manera uniforme [19].

En la Figura 2-4 se presenta otro ejemplo de transferencia de calor por convección.

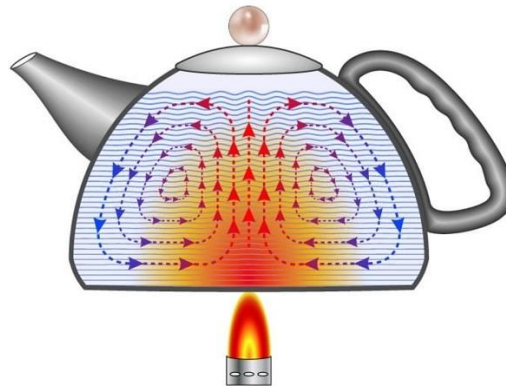


Figura 2-4 Transferencia de calor por convección [21]

- **Radiación:** En este proceso el calor se transfiere a través del espacio, no se necesita ningún medio portador ni que los cuerpos estén en contacto. La transferencia de calor se produce simplemente por la diferencia de temperaturas entre los cuerpos. Para ello es necesario que uno de los cuerpos se encuentre a una temperatura bastante elevada. Un ejemplo simple para este tipo de transferencia es el simple hecho de sentir el calor del sol en un día soleado. Podemos verlo en la siguiente imagen [22]. La Figura 2-5 exhibe un ejemplo de transferencia de calor por radiación.

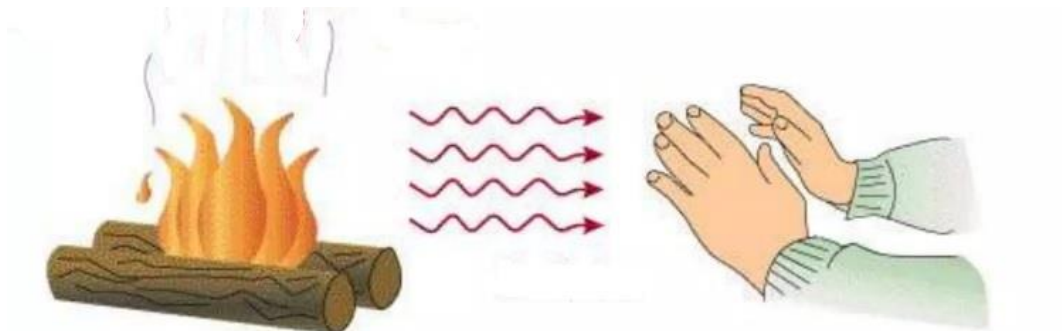


Figura 2-5 Transferencia de calor por radiación [23]

2.3 Nanofluidos

2.3.1 Contexto histórico

Como hemos visto anteriormente la transferencia de calor desempeña un papel indispensable en la sociedad, y especialmente en determinadas aplicaciones de nuestra vida diaria, como el aire acondicionado, la calefacción etc. Es por esto por lo que es indispensable centrar la investigación buscar el incremento de la velocidad de transferencia de calor para poder así reducir el tiempo del proceso y en encontrar una eficiencia mayor en el intercambio de calor.

Los intercambiadores de calor pueden utilizar una variedad de fluidos para facilitar la transferencia de calor entre dos medios. Los principales fluidos utilizados son el agua, aceites térmicos y glicoles. Sin embargo, estos fluidos presentan una baja conductividad térmica, lo que provoca un bajo rendimiento en la transferencia de calor. Una de las principales soluciones a esta problemática son los tratamientos superficiales o la adición de aditivos en los fluidos [24].

En 1873, James Clerk Maxwell, un eminente físico y matemático, en su obra “Tratado sobre electricidad y magnetismo”, propuso una mejora en la conductividad térmica, basándose en el hecho de que los sólidos tienen una conductividad térmica significativamente mayor que la de los líquidos [25].

Su idea se basaba en la teoría cinética de los gases y en la distribución de las velocidades moleculares. Explicaba que al agregar partículas sólidas dispersas en un medio líquido (en aquella época, sólidos de tamaños micrométricos o incluso mayores), proporcionarían caminos adicionales para la transferencia de calor y dado que los sólidos tienen una mayor conductividad térmica que los líquidos, esto haría que se mejorase la eficiencia térmica del sistema. Este desarrollo condujo a finales de la década de 1990 a la idea de nanofluidos y otras tecnologías de mejora de la conductividad térmica en la industria moderna.

2.3.2 Definición de nanofluido

Un nanofluido es una suspensión de nanopartículas sólidas, generalmente de tamaño entre 1-100 nanómetros, dispersas en un líquido base, como agua, aceite u otro fluido. Estas nanopartículas pueden ser de diversos materiales, como metales, óxidos metálicos o carbono, entre otros.

Los nanofluidos se caracterizan por tener mejores propiedades termofísicas en comparación con los fluidos convencionales. Esto incluye una mayor conductividad y estabilidad térmicas. La mejora de estas propiedades se debe a la alta relación superficie-volumen de las nanopartículas, lo que permite una transferencia de calor más eficiente entre las partículas sólidas y el fluido base.

Los nanofluidos han sido objeto de una profunda investigación debido a su potencial para mejorar el rendimiento de los sistemas de transferencia de calor en una amplia gama de aplicaciones, que van desde sistemas de refrigeración hasta procesos industriales. Su uso puede conducir a una mayor eficiencia energética, menor consumo de energía y diseño más eficientes en distintos campos de la ingeniería y la tecnología [26].

La dispersión de estas nanopartículas en el fluido base afecta de manera significativa a las propiedades termofísicas del fluido, incluyendo la conductividad térmica, viscosidad dinámica, densidad y capacidad calorífica. Estas propiedades juegan un papel crucial en el proceso de transferencia de calor. Aunque un aumento en la conductividad térmica es beneficioso para la transferencia de calor, un aumento en la viscosidad dinámica puede empeorarla. Por lo tanto, el desafío radica en encontrar un equilibrio entre estas propiedades para optimizar el rendimiento energético.

La preparación de los nanofluidos debe ser meticulosa debido a la necesidad de lograr una mezcla homogénea y estable, así como evitar alteraciones químicas una vez mezclados con el fluido base. Para garantizar esta estabilidad, es necesario considerar varios factores durante el proceso de síntesis, como vemos en la Figura 2-6 [27].

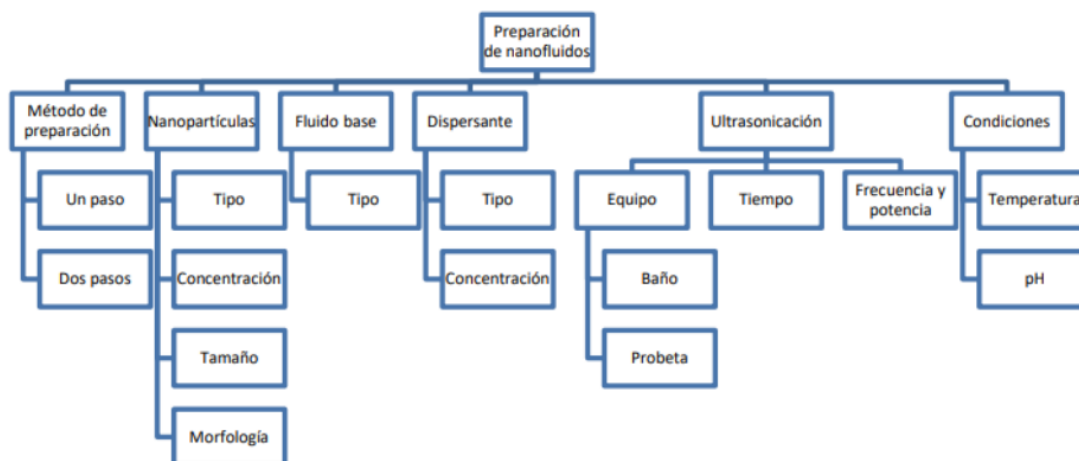


Figura 2-6 Factores a tener en cuenta en la preparación de nanofluidos [28]

Para la preparación de nanofluidos el paso primordial es la dispersión de las nanopartículas en el fluido base, ya que dependiendo de la cantidad de nanopartículas añadidas se puede favorecer o perjudicar en la dispersión y a su vez influye en determinadas propiedades.

Existen además dos métodos para la preparación de los nanofluidos, el método de un paso y el método de dos pasos. En el método de un paso la síntesis de las nanopartículas y la dispersión en el fluido base se efectúan al mismo tiempo. Tiene la ventaja de minimizar la aglomeración de las nanopartículas por lo que se aumenta la estabilidad del nanofluido. Por otro lado, para el método de dos pasos, el más común, primero se preparan las nanopartículas por métodos físicos o químicos y a continuación se dispersan en el fluido base, esto permite un mayor control sobre las propiedades de las nanopartículas y tiene una mejor dispersión en el fluido base, a pesar de ser más complejo y requerir más pasos de procesamiento. Además, al poder obtener las nanopartículas comerciales, se tiene una mejor capacidad de producción y un menor costo [29]. En la Figura 2-7 se muestra una imagen explicativa para el método de dos pasos.

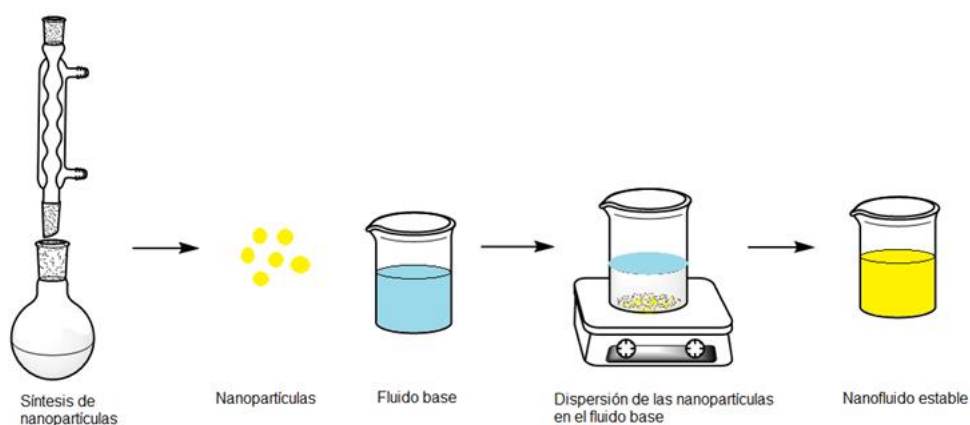


Figura 2-7 Método de dos pasos [29]

Es importante considerar que una de las principales dificultades a la hora de trabajar con nanofluidos radica en mantener su estabilidad. Para lograr este objetivo, se emplean principalmente métodos químicos y físicos. Los métodos químicos implican la adición de surfactantes o agentes químicos para enlazar las nanopartículas al fluido base, evitando así la alteración de la superficie de las nanopartículas, junto con la incorporación de ácidos para regular el pH. Por otro lado, los métodos físicos comprenden la ultrasonificación, la homogeneización y el uso de un molino de bolas [30].

2.4 Propiedades con impacto en la transferencia de calor

Las principales propiedades a tener en cuenta para el rendimiento de los fluidos en los procesos de intercambio de calor son la conductividad térmica, viscosidad dinámica, densidad y capacidad calorífica; propiedades que se van a determinar experimentalmente a lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado.

2.4.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica es la capacidad de un material para conducir el calor. Mide como de rápido el calor puede viajar a través del material. Se expresa como la cantidad de calor que puede transferirse a través de una unidad de área del material en un intervalo de tiempo específico, cuando existe una diferencia de temperatura [31]. Se puede expresar mediante la ley de Fourier:

$$k = \frac{\dot{q}}{|\nabla T|} \quad (2-1)$$

Donde $\dot{q}$ es el flujo de calor y $|\nabla T|$ hace referencia al gradiente de temperatura. Sus unidades en el Sistema Internacional (SI) son W/(m·K).

2.4.2 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica es una propiedad física de los fluidos que describe su resistencia interna al flujo cuando están en movimiento. Se refiere a la fricción interna entre las capas de fluido mientras se desplazan una sobre otra. Cuanto mayor sea la viscosidad del fluido, más difícil será su movimiento y flujo [32].

$$\mu = \frac{\dot{\tau}}{\Delta u / \Delta y} \quad (2-2)$$

Donde $\dot{\tau}$ es el esfuerzo cortante y $\Delta u / \Delta y$ hace referencia a la variación de deformación de cizalla producida debido al esfuerzo cortante. Sus unidades en el SI son Pa·s.

2.4.3 Densidad

La densidad es una propiedad física de la materia que indica la cantidad de masa presente en un determinado volumen. Cuanto mayor sea la densidad, más masa estará contenida en un volumen dado, lo que resulta una sustancia más pesada o compacta. En otras palabras, se define como el cociente entre la masa de un objeto por su volumen.

$$\rho = \frac{dm}{dv} \quad (2-3)$$

Donde dm es el diferencial de masa y dv el diferencial de volumen. Sus unidades en el SI son kg/m³.

2.4.4 Capacidad calorífica específica

La capacidad calorífica es una propiedad física que indica cuanto calor puede absorber o liberar una sustancia por unidad de masa cuando experimenta una variación en su temperatura. En otras palabras, es la cantidad de energía térmica necesaria para subir la temperatura de una unidad de masa. Por tanto, afecta a la cantidad de energía térmica necesaria para calentar o enfriar una sustancia.

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2-4)$$

Donde Q es la cantidad de calor, m es la masa de dicha sustancia y ΔT es la diferencia de temperatura. Sus unidades en el SI son $J/mol \cdot K$.

2.5 Estudios experimentales sobre propiedades termofísicas de nanofluidos

A lo largo del tiempo, la literatura científica se ha dedicado al análisis de las propiedades termofísicas de los nanofluidos, centrándose en la conductividad térmica. Varios de estos estudios se han enfocado en nanofluidos con partículas metálicas, como nanopartículas de oro, plata o cobre, los cuales han demostrado mejorar la conductividad térmica del fluido base.

Del mismo modo, se han estudiado nanofluidos a partir de óxidos metálicos, como pueden ser el de aluminio, el cual fue estudiado por Smith et al. (2017) dispersando nanopartículas de este óxido en etilenglicol, o del titanio, que también muestran mejoras significativas en la conductividad térmica [33].

Sin embargo, la conductividad térmica no es el único aspecto a tener en cuenta para observar la mejora del nanofluido frente al fluido base. Otras propiedades como la viscosidad, la capacidad calorífica y la densidad de los nanofluidos son cruciales para comprender y optimizar el comportamiento de los nanofluidos.

Además, en el presente trabajo se ha prestado especial atención a características como el tamaño y la estructura cristalina de las nanopartículas utilizadas, observándose que su influencia en las propiedades termofísicas de los nanofluidos es significativa, ya que determinan la interacción entre las partículas y el fluido base. En investigaciones, como la de Wang et al. (2018) han destacado la influencia en la forma y tamaño de las nanopartículas en las propiedades termofísicas del nanofluido resultante.

Y, en cuanto a nanomateriales empleados, una de las novedades más prometedoras es el empleo del nitruro de boro. Este compuesto ha despertado un gran interés debido a sus propiedades, incluida su alta conductividad térmica. Por ejemplo, estudios como el realizado por Li et al. (2019) demostraron que la incorporación de nanopartículas de nitruro de boro en agua mejoró significativamente la conductividad térmica del fluido base.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales utilizados

En este apartado se describirán el fluido base y los nanomateriales empleados para la elaboración de los nanofluidos.

3.1.1 Fluido base

El fluido base que ha sido utilizado para todas las muestras de nanofluidos es una mezcla al 50% en masa de agua destilada y etilenglicol con una pureza.

El agua es el fluido caloportador más utilizado en la industria energética. Destaca por su costo relativamente bajo en comparación con otros fluidos y por su alta conductividad térmica en comparación con otras propuestas utilizadas para aplicaciones similares. A pesar de estas ventajas, presenta limitaciones debido a que su temperatura de congelación y evaporación, fijadas en 0 °C y 100 °C a 1 atm, respectivamente, lo que restringe su uso en ciertos ámbitos. Por tanto, es común recurrir a mezclas de agua con otros fluidos que presentan rangos de temperaturas mayores, permitiendo así una mayor flexibilidad de uso, aunque con ello se llegue a una disminución en la conductividad térmica. En este sentido, el objetivo principal es encontrar el equilibrio entre la ampliación del rango de temperaturas y una adecuada conductividad térmica, buscando maximizar la eficiencia del sistema [34]. En la tabla 3-1 se muestran propiedades claves del agua para nuestro estudio.

Propiedad	Valor
Temperatura ebullición	100 °C
Temperatura congelación	0 °C
Conductividad térmica, 20 °C	0,608 W/m·K
Capacidad calorífica, 20 °C	4186 J/kg·K
Densidad, 20 °C	1 g/cm
Viscosidad dinámica, 20 °C	1,002 mPa·s

Tabla 3-1 Propiedades del agua a 1 atm [35]

Por otro lado, el etilenglicol es un líquido incoloro, transparente y viscoso que se emplea como agente anticongelante en sistemas de refrigeración, así como en la fabricación de detergentes, pinturas, lacas, productos farmacéuticos, adhesivos y cosméticos. Este glicol posee unas excelentes propiedades de transferencia de calor.

El etilenglicol en forma pura posee una temperatura de ebullición de 197 °C y una temperatura de congelación de -13 °C, mientras que si se mezcla con agua, la mezcla podría permanecer en estado líquido a temperaturas de hasta -37 °C [36]. Sin embargo, este fluido es tóxico, por lo que se debería evitar su uso si es probable que se ingiera o pueda entrar en contacto con alimentos o agua potable [37]. No debería por tanto ser usado como refrigerante primario en sistemas de calefacción o refrigeración en edificios donde se fabriquen productos destinados al consumo. En la tabla 3-2 vemos propiedades de este fluido de interés para nuestro estudio.

Propiedad	Valor
Temperatura ebullición	197 °C
Temperatura congelación	-13 °C
Conductividad térmica, 20 °C	0,250 W/m·K
Capacidad calorífica, 20 °C	2408 J/kg·K
Densidad, 20 °C	1,112 g/cm
Viscosidad dinámica, 20 °C	17,195 mPa·s

Tabla 3-2 Propiedades del etilenglicol a 1 atm [38]

3.1.2 Nanopartículas

Para este Trabajo de Fin de Grado se han empleado tres nanomateriales: Nitruro de Boro Hexagonal de 65-75 nm y dos variantes de Nitruro de Boro Cúbico, con tamaños diferentes. Uno de ellos oscila entre 90-100 nanómetros mientras que el otro ronda los 200 nanómetros. El objetivo de este estudio es investigar la influencia de la estructura cristalina del material y el tamaño a la hora de transferir el calor, con el fin de encontrar la configuración más eficiente. A continuación, se dará una breve y detallada descripción de cada uno de ellos.

3.1.2.1 Nitruro de boro hexagonal 65-75 nm

Las nanopartículas de nitruro de boro con estructura cristalina hexagonal y tamaño medio de 65-75 nm y una pureza de 99,85% fueron proporcionadas por la empresa Nanochemazone, Canadá.

El nitruro de boro hexagonal es una forma cristalina de boro y nitrógeno que posee una estructura cristalina similar a la del grafito. Se compone de capas hexagonales de átomos de boro y nitrógeno dispuestos alternativamente, lo que le confiere propiedades únicas y diversas aplicaciones.

Este material es conocido por su excelente resistencia térmica y química, así como por su alta conductividad térmica. Aunque es un aislante eléctrico en condiciones normales, puede exhibir propiedades semiconductores o incluso portadoras bajo ciertas condiciones, lo que lo hace valioso en aplicaciones electrónicas.

Es utilizado en una variedad de campos, como lubricante sólido en aplicaciones de alta temperatura, como recubrimiento protector de herramientas y la industria aeroespacial entre otros. Además, este material se ha investigado para su uso en nanotecnología y como material de soporte en aplicaciones de gestión térmica por sus propiedades estructurales y su estabilidad térmica, especialmente a altas temperaturas [39].

3.1.2.2 Nitruro de boro cúbico 90-100 nm

Las nanopartículas de nitruro de boro con estructura cristalina cúbica y tamaño medio de 90-100 nm fueron proporcionados por la empresa Nanochemazone, Canadá.

El nitruro de boro cúbico es una forma cristalina de boro y nitrógeno que se distingue por su estructura de red cristalina cúbica. Es un material de gran importancia tecnológica, con propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas que se aproximan a las del diamante. Cuando se presenta en este tamaño adquiere propiedades únicas y aplicaciones específicas. Las partículas de nitruro de boro cúbico en esta escala de tamaño ofrecen una mayor área superficial en comparación con sus contrapartes de tamaño, lo que puede influir en sus propiedades físicas y químicas [40].

El nitruro de boro cúbico es la forma alotrópica más interesante por sus propiedades, es un material con una elevada dureza y una alta conductividad y estabilidad térmica. Estas propiedades lo convierten en un buen candidato para aplicaciones que requieran una gestión eficiente del calor.

En resumen, el nitruro de boro cúbico en el rango 90-100 nm ofrece un amplio potencial en diversas aplicaciones gracias a sus propiedades mejoradas a nivel nano, que incluyen una mayor resistencia mecánica, una conductividad térmica mejorada y su capacidad para funcionar como refuerzo en materiales compuestos.

3.1.2.3 Nitruro de boro cúbico <200 nm

Las nanopartículas de nitruro de boro con estructura cristalina cúbica y tamaño medio <200 nm y pureza de 99,9% fueron proporcionadas por la empresa Nanochemazone, Canadá.

Son partículas del mismo material y estructura cristalina que las anteriores, pero de tamaño mayores y más dispersos.

Las partículas más pequeñas generalmente tienen un área superficial mayor en relación con su volumen, lo que puede influir en sus propiedades físicas y químicas.

Mientras que ambos tipos de nitruro de boro comparten similitudes en términos de composición y propiedades generales, las diferencias en el tamaño de partícula pueden influir en sus propiedades específicas y en sus aplicaciones potenciales. Es importante considerar estas diferencias al seleccionar el material más adecuado [41].

3.2 Metodología

Para llevar a cabo el estudio se han realizado los siguientes procesos experimentales para el diseño de los nanofluidos.

3.2.1 Caracterización de las nanopartículas

La caracterización de las nanopartículas es un paso crucial para poder comprender y maximizar las propiedades y aplicaciones de los nanofluidos. Además de las especificaciones proporcionadas por el fabricante, se lleva a cabo un análisis microscópico exhaustivo de cada uno de los nanomateriales.

Para esta tarea se utiliza la técnica de microscopía electrónica de transmisión (TEM) con el fin de examinar el tamaño y la morfología nanométrica de las partículas, así como para obtener imágenes detalladas de las estructuras de las nanopartículas. Esta microscopía es un método que emplea haces de electrones para generar imágenes de alta resolución de la estructura interna de un material. Estos haces de electrones se producen a través de un cañón de electrones y se enfocan mediante lentes magnéticas. La muestra, dispuesta en un soporte delgado como una rejilla de cobre o una película de carbono, es atravesada por los haces de electrones, que luego se dispersan y se capturan en una cámara digital para producir la imagen microscópica [42].

Las imágenes TEM utilizadas en este estudio fueron adquiridas en el Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a la Investigación (CACTI) de la Universidad de Vigo, utilizando un microscopio electrónico JEM-2010F de JEOL, con una aceleración de voltaje de 200 kV.

3.2.2 Preparación del fluido base y los nanofluidos

El primer proceso es la preparación del fluido base. Este fluido se consigue mezclando un 50% en masa de agua destilada y otro 50% de etilenglicol. El método empleado para la elaboración de los nanofluidos es el de dos pasos. Así, se preparan distintas muestras dispersando las nanopartículas mencionadas anteriormente en concentraciones del 1% y 2% en masa en el fluido base. Para ello se utilizan 6 viales de 25 ml cada uno. En los anteriores procesos se utiliza una balanza de precisión FV-220C, ver Figura 3-1.

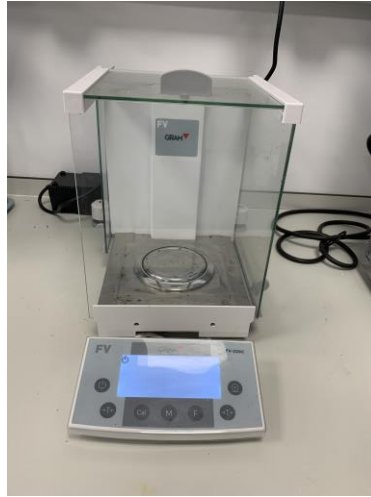


Figura 3-1 Balanza de precisión FV-220C

Para el cálculo de las fracciones másicas se ha empleado la siguiente ecuación:

$$\phi m = \frac{\phi m_s}{\phi m_s + \phi m_f} \quad (3-1)$$

Ecuación 3-2 Fracción másica [43]

Donde m_s y m_f hacen referencia a la masa de la nanopartícula y la masa del fluido base respectivamente.

Una vez preparadas las muestras de los nanofluidos estas se remueven con un agitador Vortex por un pequeño período de tiempo. Posteriormente se coloca la muestra en un aparato de baño de ultrasonidos durante 30 minutos de forma ininterrumpida y sin necesidad de especificar una temperatura determinada. El fin de este baño de ultrasonidos es conseguir una efectiva dispersión de las nanopartículas en el fluido base. En este baño se generan ondas de alta frecuencia, las cuales crean fluctuaciones de presión que resultan en la formación de la cavitación. Así se producen turbulencias y corrientes de flujo intenso, lo que ayuda a dispersar las nanopartículas de manera uniforme en el fluido base.

La Figura 3-2 nos muestra el equipo de baño de ultrasonidos empleado para alcanzar la óptima dispersión de las nanopartículas en el fluido.



Figura 3-2 Baño de ultrasonidos

En la Figura 3-3 y la Figura 3-4 vemos los seis nanofluidos preparados en sus diferentes concentraciones en masa.



Figura 3-3 Nanofluidos al 1%



Figura 3-4 Nanofluidos al 2%

3.2.3 Estudio de las propiedades termofísicas de los nanofluidos

En este apartado se abordará el estudio detallado que se ha llevado de cada una de las propiedades termofísicas medidas.

3.2.3.1 Conductividad térmica

Para obtener los valores de la conductividad térmica se hace uso del conductivímetro TEMPOS de la empresa Labferrer. Este equipo está compuesto por un medidor donde se registran y almacenan las medidas y por un sensor que mide la propiedad deseada. Además de la conductividad térmica es capaz de medir la resistividad, difusividad y el calor específico, todo ello con una incertidumbre de un 3% [44]. En la Figura 3-5 podemos ver gráficamente el conductivímetro empleado para el estudio.

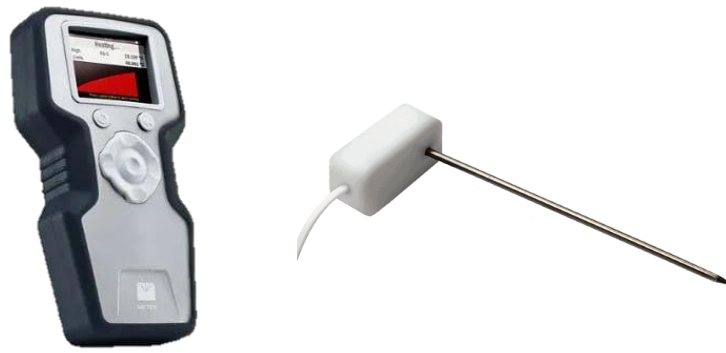


Figura 3-5 Medidor (izquierda) y sensor KS-3 (derecha) del conductivímetro TEMPOS [45]

Para medir la conductividad se emplea la técnica del hilo caliente transitorio, el cual se basa en la transferencia de calor a través de un material cuando se aplica una diferencia de temperatura a lo largo de un hilo delgado y resistivo que está inmerso en el material en estudio [45].

Las mediciones de la conductividad térmica se realizan en un rango de temperaturas entre 20 °C y 40 °C y se configura el equipo de manera que realice 20 mediciones separadas entre sí 30 minutos para cada una de las temperaturas. Para poder obtener estas temperaturas el nanofluido se introduce en una cámara incubadora, la cual permite configurar una temperatura de manera que esta se mantiene constante en el tiempo. Una vez el fluido haya alcanzado la temperatura deseada se comienza a medir y para ello se ha de introducir el sensor KS-3 en el fluido a través de un tapón de goma tipo septum, de manera que la muestra se mantenga hermética durante todo el período de medición.

3.2.3.2 Viscosidad

Para medir la viscosidad dinámica se utiliza un viscosímetro Viscolead Pro de la empresa Fungilab. Es un viscosímetro rotacional que tiene la capacidad de medir la viscosidad tanto en fluidos como en semisólidos con una incertidumbre del 5% a través de un rotor que gira a velocidad constante en el fluido que se quiere medir.

El rotor, que se encuentra conectado a un eje, gira dentro de dicha cámara a una velocidad de giro que se puede ir variando según las características del fluido. El viscosímetro mide la resistencia que el fluido ejerce contra el movimiento rotacional del rotor. A mayor resistencia mayor viscosidad. Este equipo permite medir la temperatura al mismo tiempo que la viscosidad, lo que nos permite obtener unos resultados más precisos y detallados.

La Figura 3-6 muestra el viscosímetro utilizado para estudio de la viscosidad.



Figura 3-6 Viscosímetro Viscolead Pro

3.2.3.3 Densidad

Se utiliza el equipo DMA 501, original de la empresa Anton Paar, para medir la densidad de los nanofluidos. Este aparato es un densímetro básico que realiza mediciones digitales de la densidad y que además es compatible con pastas, materiales no homogéneos, sedimentos y muestras que contienen partículas. Se permite medir en el rango de temperaturas entre 15 °C y 40 °C [46]. La Figura 3-7 muestra el densímetro utilizado.

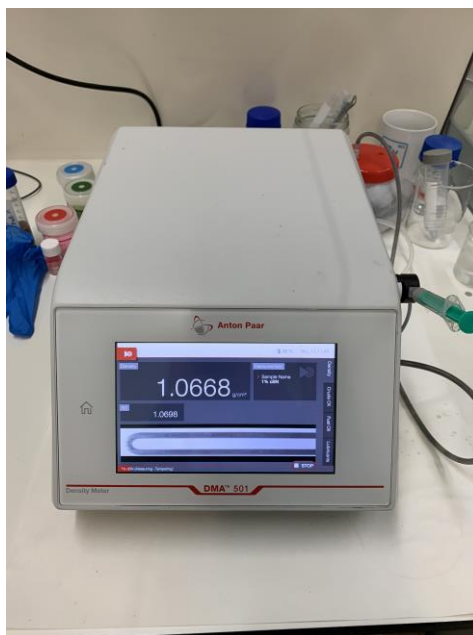


Figura 3-7 Densímetro DMA 501

Para la obtención de la densidad vale con introducir 1 ml de la muestra, lo cual nos permite volver a utilizar la muestra para medir otras propiedades al mismo tiempo. El fluido se introduce a través de un canal en forma de “U”, donde se obtiene el valor de la densidad mediante el método de tubo vibrante, que consiste en hacer vibrar un tubo hueco y medir su frecuencia de resonancia cuando está lleno con el material cuya densidad se quiere conocer. La frecuencia de resonancia se relaciona con la densidad del material a través de una calibración del sistema a partir de materiales de densidad conocida [47]. Cada vez que se vaya a cambiar el fluido para medir es necesario limpiar el interior con agua y con un secado que se configura en el propio equipo.

3.2.3.4 Capacidad calorífica

Para medir esta propiedad se emplea un calorímetro diferencial de barrido, en este caso se ha empleado concretamente el modelo DSC Q2000 de la empresa T.A. Instruments. Es una herramienta de análisis térmico con una gran precisión ya que su error en la determinación de la capacidad calorífica es solo del 3%. La calorimetría de barrido es una técnica analítica que es usada para la medición de la cantidad de calor liberado o absorbido por una muestra mientras que esta es sometida a cambios de temperatura[48].

Estos instrumentos tienen un horno en el que introducen la muestra, encapsulada en una bandeja de metal, y un material de referencia, que suele estar en una bandeja vacía. Para ver como cambian las propiedades del flujo el horno sufre diferentes variaciones de temperatura controladas. De esta manera para obtener la información cuantitativa del flujo de calor se observa la diferencia de temperatura entre muestra y referencia.

En la Figura 3-8 vemos el equipo utilizado para estudio.



Figura 3-8 Calorímetro DSC Q2000 [49]

4 RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación del perfil termofísico de fluidos térmicos nano-mejorados mediante nitruros de boro. El estudio se centró en la medición y análisis de varias propiedades termofísicas con el objetivo de determinar el nanofluido óptimo. A través de experimentos detallados y análisis meticulosos, se examinaron las propiedades clave, como la conductividad térmica, la viscosidad, la densidad y la capacidad calorífica, para identificar la combinación más efectiva entre los distintos nitruros de boro y el fluido base.

4.1 Morfología de las nanopartículas

En el siguiente apartado se muestran las imágenes TEM de las nanopartículas de nitruro de boro empleadas para la elaboración de los distintos nanofluidos.

- Nitruro de boro hexagonal de 65-75 nm, ver Figura 4-1.

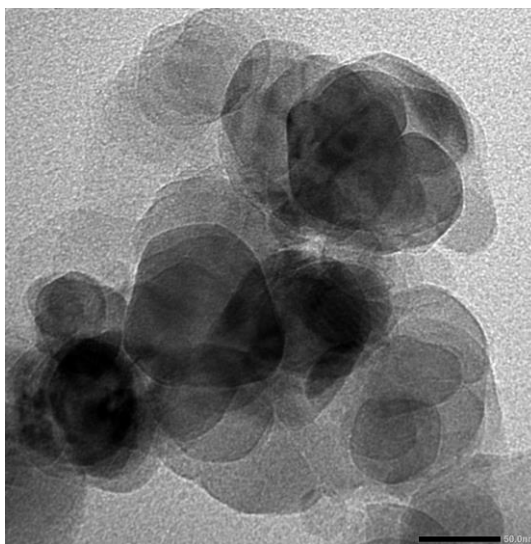


Figura 4-1 Imagen TEM de las nanopartículas de BN hexagonal de 65-75 nm

En la Figura 4-1 se observa la imagen TEM de las nanopartículas del nitruro de boro hexagonal de 65-75 nm y atendiendo a la escala se confirma el tamaño conforme a las características proporcionadas por el proveedor, en torno a los 65-75 nm.

- Nitruro de boro cúbico de 90 nm, ver Figura 4-2.

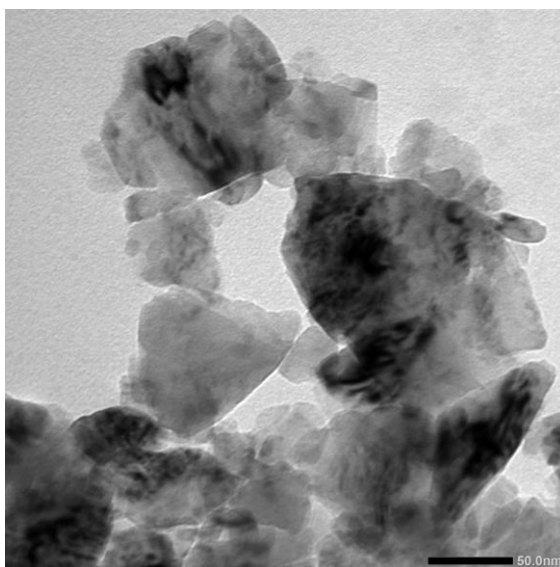


Figura 4-2 Imagen TEM de las nanopartículas del BN cúbico de 90 nm

La Figura 4-2 presenta la imagen TEM de las nanopartículas del nitruro de boro cúbico y observando la escala proporcionada, el tamaño proporcionado por el proveedor coincide con lo observado en la imagen.

- Nitruro de boro cúbico <200 nm, ver Figura 4-3.

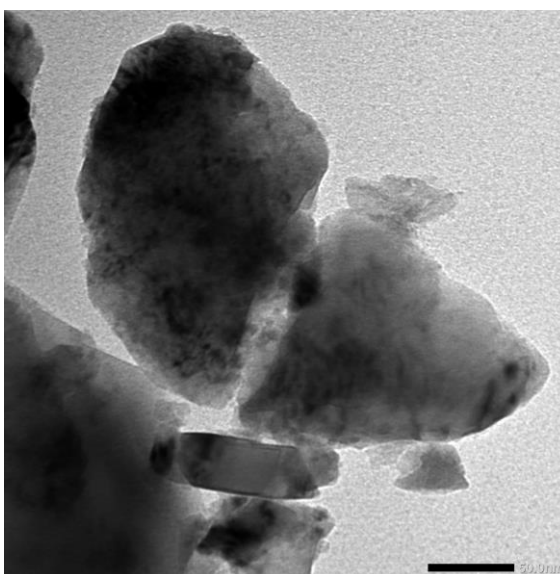


Figura 4-3 Imagen TEM de las nanopartículas del BN cúbico <200 nm

En la Figura 4-3 se observa la imagen TEM de las nanopartículas del nitruro de boro cúbico de aproximadamente 200 nm, lo que concuerda con la información del proveedor.

4.2 Propiedades termofísicas

4.2.1 Conductividad térmica

Las figuras que se presentan a continuación muestran la comparación entre la conductividad térmica del fluido base frente a cada uno de los nanofluidos elaborados a partir de los tres diferentes nitruros de boro. Además, se puede observar la comparativa de los nanofluidos según su tamaño, su estructura cristalina y el porcentaje en masa del tipo de nanopartícula empleado.

En la Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6 podemos ver la conductividad térmica frente a la temperatura de los distintos nanofluidos elaborados en sus dos concentraciones en masa. Se observa como la conductividad térmica aumenta con la temperatura para los tres nanofluidos.

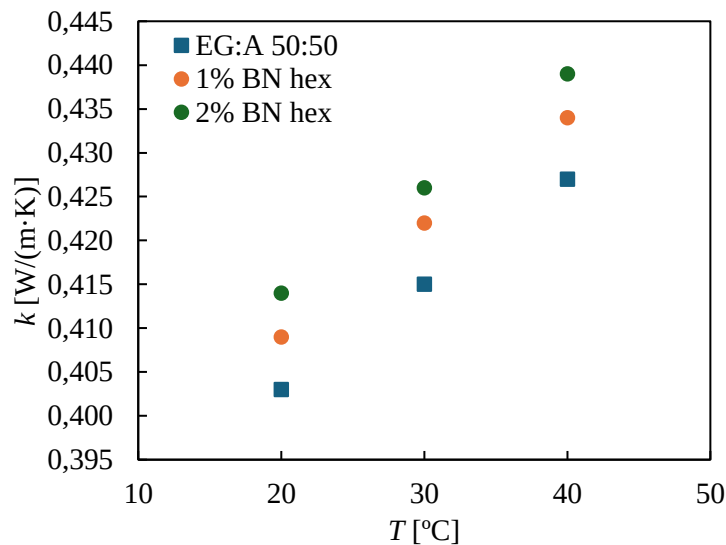


Figura 4-4 Conductividad térmica frente a la temperatura BN hexagonal de 65-75 nm

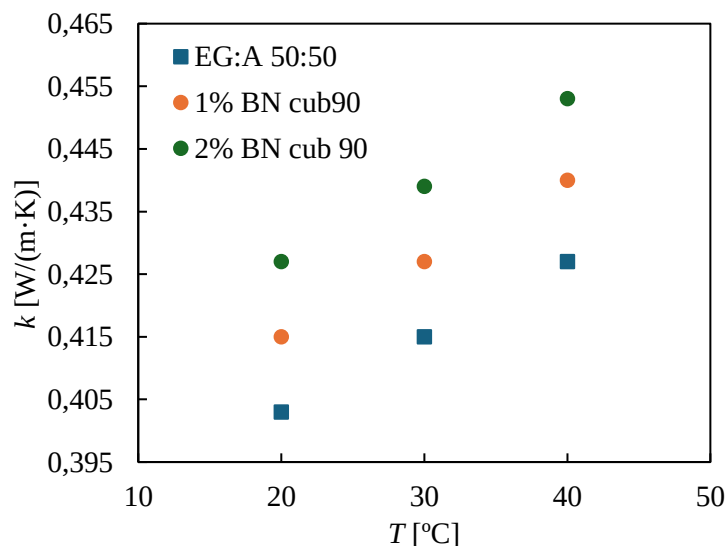


Figura 4-5 Conductividad térmica frente a la temperatura BN cúbico 90 nm

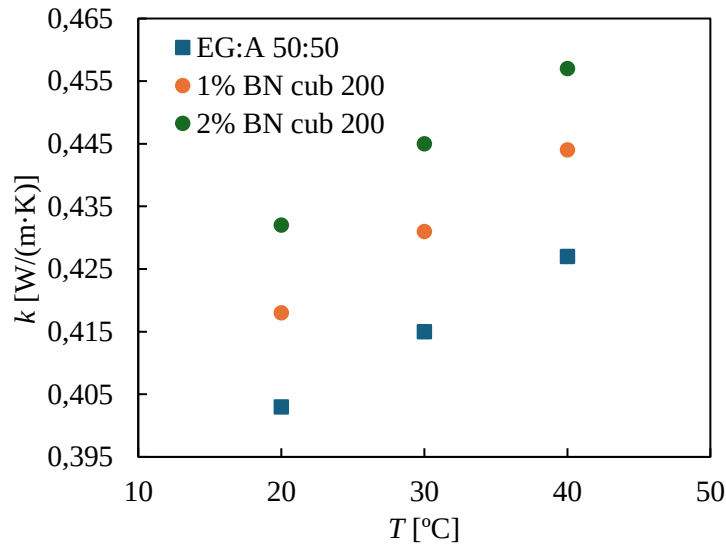


Figura 4-6 Conductividad térmica frente a la temperatura BN cúbico 200 nm

La Figura 4-7 muestra el incremento porcentual de la conductividad térmica de la conductividad térmica de los nanofluidos frente al fluido base. El nitruro de boro cúbico de 200 nm al 2% es el que presenta un mayor porcentaje de incremento, siendo del 7,2%.

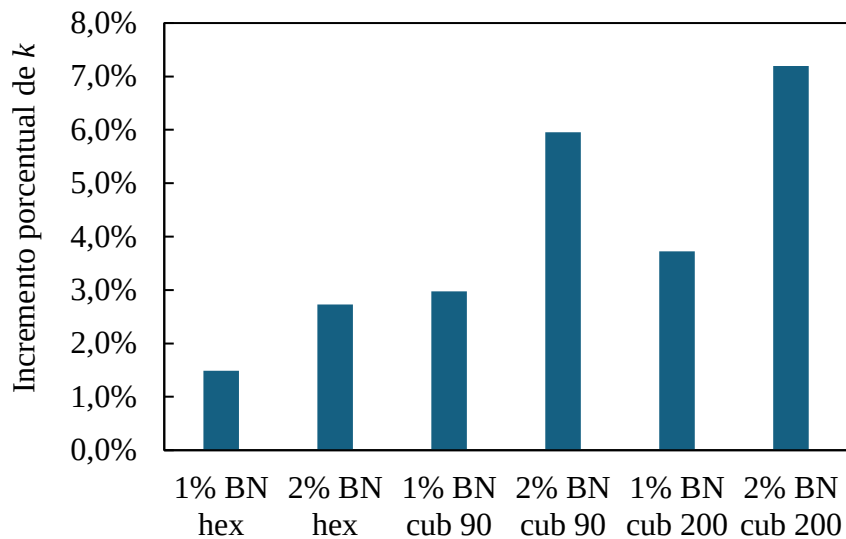


Figura 4-7 Incremento porcentual de la conductividad térmica de los nanofluidos frente al fluido base a 20 °C

Atendiendo a la estructura cristalina de las nanopartículas se observa como los nitruros de boro cúbicos presentan una mejor conductividad térmica que el nitruro de boro hexagonal. Respecto al tamaño de las nanopartículas, se observa que el nitruro de boro cúbico de mayor tamaño presenta una conductividad térmica ligeramente superior.

4.2.2 Densidad

En las figuras que se muestran a continuación se analizará la variación de la densidad para los diferentes nanofluidos para las dos concentraciones en masa de cada uno de ellos. Se estudiará también el efecto que tiene el tamaño de las nanopartículas, así como la estructura cristalina del nitruro de boro.

En la Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10 se observa el efecto que tiene la temperatura en la densidad de cada uno de los nanofluidos que nacen a partir de la mezcla del fluido base y los tres tipos de nanopartículas empleados. Al contrario de lo que ocurre con la conductividad térmica, la densidad disminuye a medida que la temperatura aumenta.

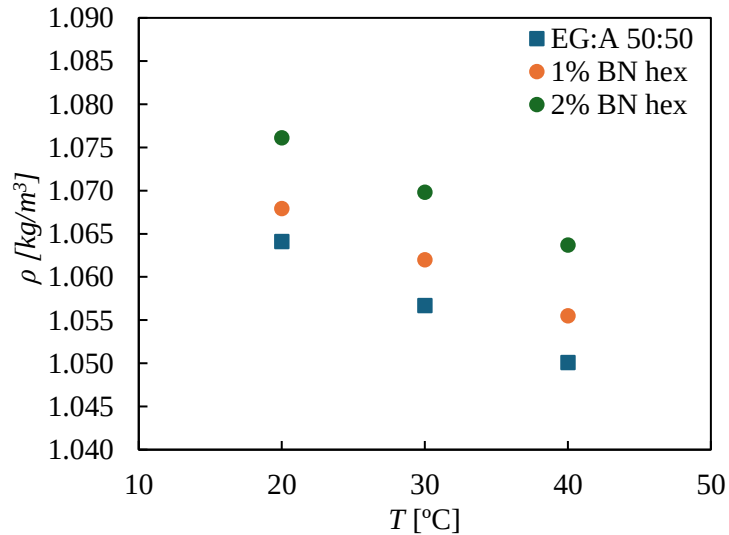


Figura 4-8 Densidad frente a temperatura BN hexagonal de 65-75 nm

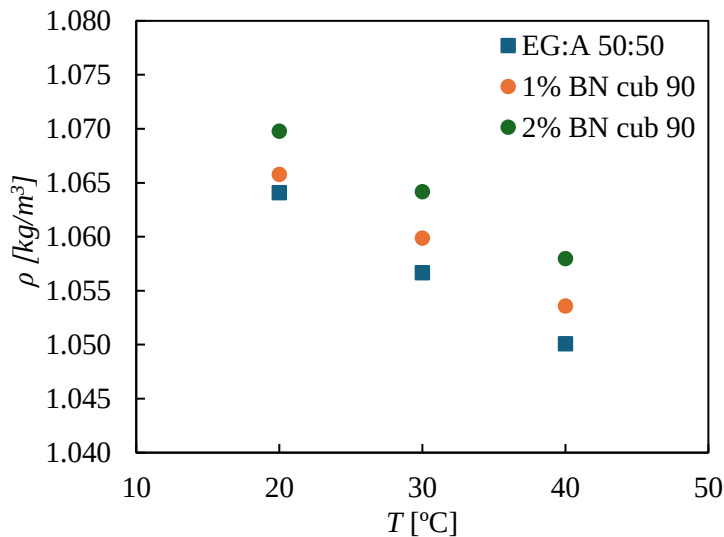


Figura 4-9 Densidad frente a temperatura BN cúbico 90 nm

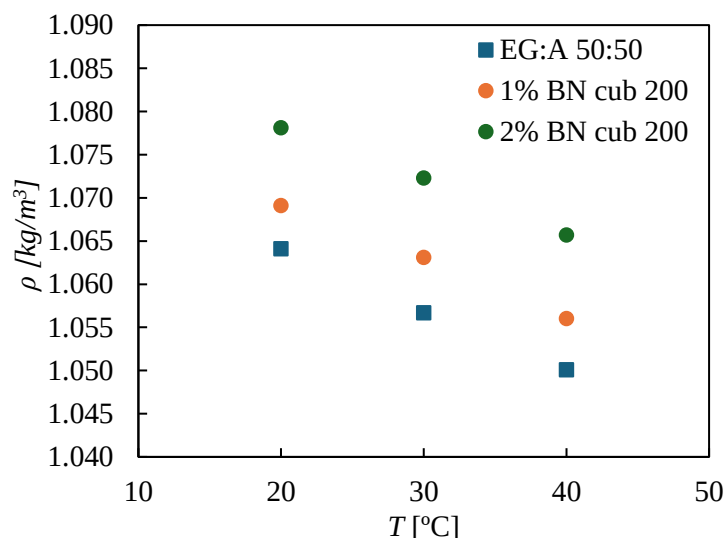


Figura 4-10 Densidad frente a temperatura BN cúbico 200 nm

En las tres figuras se observa como el fluido base es el que presenta una mayor densidad de los 4 fluidos comparados. Esto nos puede hacer creer que los nanofluidos son más convenientes para la transferencia de calor ya que cuanto mayor sea la densidad, más eficiente será la conducción térmica, lo cual puede ser beneficioso en aplicaciones donde se necesite una alta transferencia de calor, como puede ser la refrigeración de sistemas de alta potencia. Sin embargo, la densidad también presenta alguna desventaja, ya que cuanto mayor sea la densidad del fluido más energía será necesaria para transportarlo, es decir, a menor densidad mayor facilidad de bombeo. Con lo cual, habría que hacer un estudio de las necesidades del cliente para ser capaces de decidir solo con esta propiedad.

En la Figura 4-11 se observa el incremento de densidad de los nanofluidos respecto al fluido base. Los valores de variación de esta propiedad son moderados, con un máximo del 1,3%.

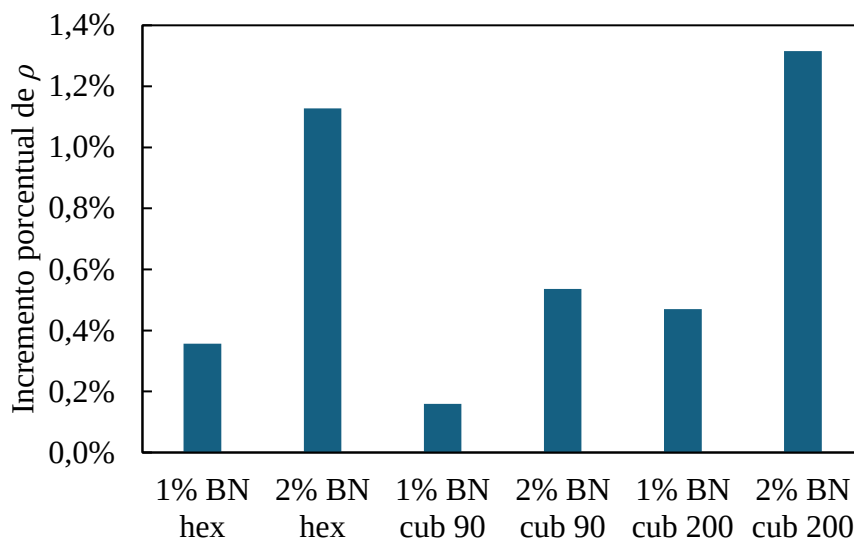


Figura 4-11 Incremento en porcentaje de la densidad de los nanofluidos frente al fluido base a 20 °C

La diferencia en el incremento en porcentaje de la densidad de los distintos nanofluidos es mínima, lo cual nos hace concluir que ni el tamaño de las nanopartículas ni la estructura cristalina son propiedades muy influyentes en este ámbito.

4.2.3 Capacidad calorífica

Tras realizar los experimentos para la obtención de los valores de la capacidad calorífica del fluido base y los nanofluidos y haber analizado los resultados se llega a las siguientes conclusiones.

La Figura 4-12, la Figura 4-13 y la Figura 4-14 muestran que a medida que la temperatura aumenta, también lo hace la capacidad calorífica.

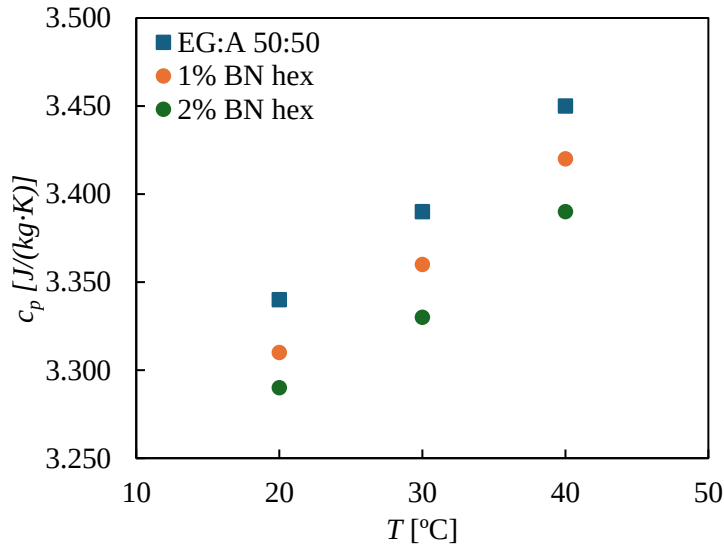


Figura 4-12 Capacidad calorífica frente a temperatura BN hexagonal de 65-75 nm

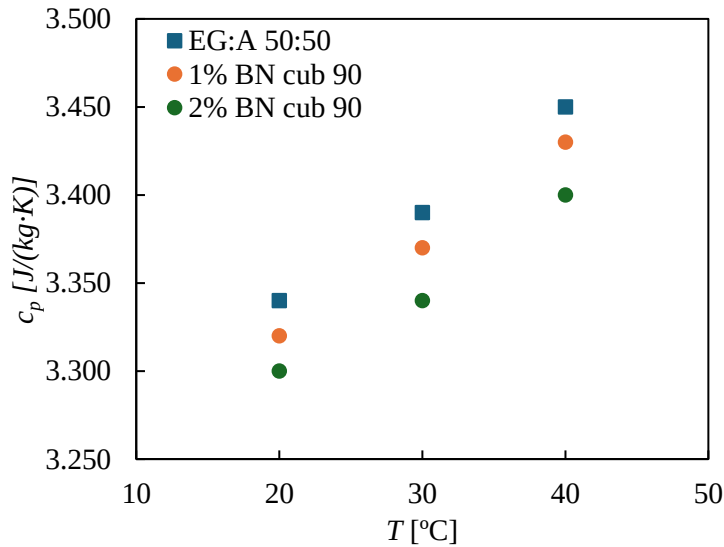


Figura 4-13 Capacidad calorífica frente a temperatura BN cúbico 90 nm

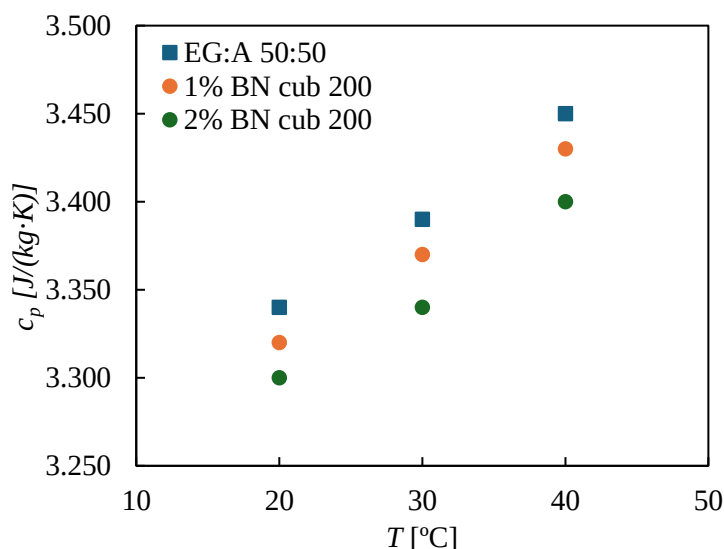


Figura 4-14 Capacidad calorífica frente a temperatura BN cúbico 200 nm

Es el fluido base el que presenta una mayor capacidad calorífica, lo cual quiere decir que tiene mayor capacidad para almacenar grandes cantidades de calor por unidad de masa. Esto puede ser beneficioso ya que pueden absorber o liberar calor sin experimentar grandes cambios en la temperatura. Sin embargo, esta alta capacidad calorífica puede provocar que la respuesta del sistema sea más lenta ya que tardará más en enfriarse o calentarse. Por lo tanto, la elección dependerá de las necesidades específicas del sistema.

En la Figura 4-15 se puede ver la variación relativa de la capacidad calorífica de los nanofluidos respecto al fluido base a 20 °C.

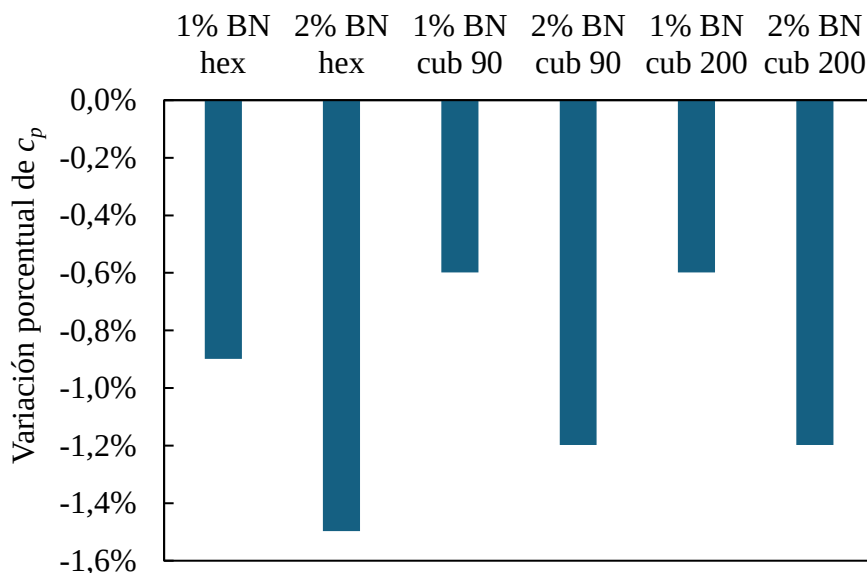


Figura 4-15 Variación porcentual de la capacidad calorífica de los nanofluidos respecto al fluido base a 20 °C

Atendiendo a la Figura 4-15 vemos como los nanofluidos elaborados a partir de los nitruros de boro cúbico al 1% vemos como tienen el mismo incremento negativo, 0,6%, siendo las mejores opciones. Se llega así a la conclusión de que el tamaño de partícula no influye en esta propiedad termofísica.

4.2.4 Viscosidad dinámica

Como se comentó en el apartado 3.2.5.2 la viscosidad dinámica solo se ha podido estudiar a una temperatura de 20 °C, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 4-1.

Nanofluido	μ [mPa·s]
EG:A 50:50	3,9
1% BN hexagonal 65-75 nm	4,2
2% BN hexagonal 65-75 nm	4,6
1% BN cúbico 90 nm	4,3
2% BN cúbico 90 nm	4,7
1% BN cúbico 200 nm	5,0
2% BN cúbico 200 nm	6,2

Tabla 4-1 Viscosidad de los nanofluidos a 20 °C

En la Figura 4-16 se analiza el incremento en porcentaje de la viscosidad dinámica respecto al fluido base a una temperatura de 20 °C.

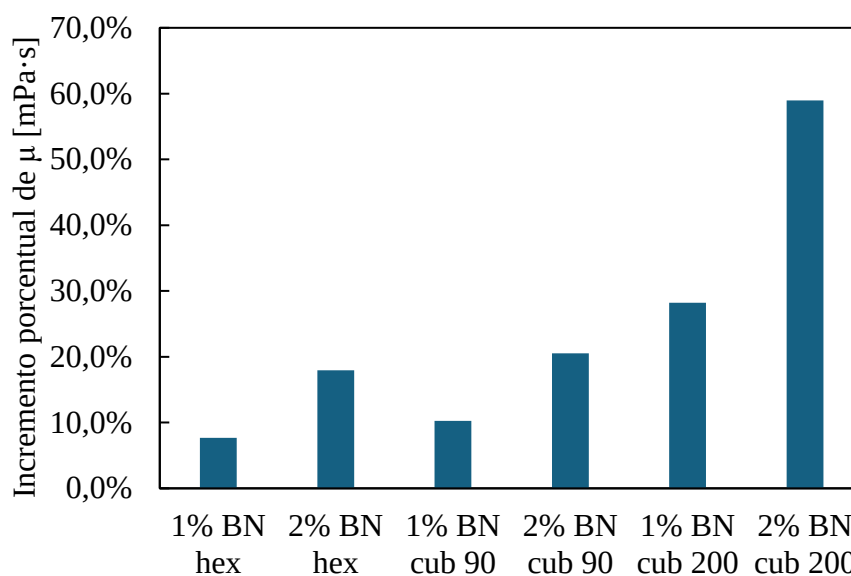


Figura 4-16 Incremento en porcentaje de la viscosidad dinámica de los nanofluidos frente al fluido base a 20 °C

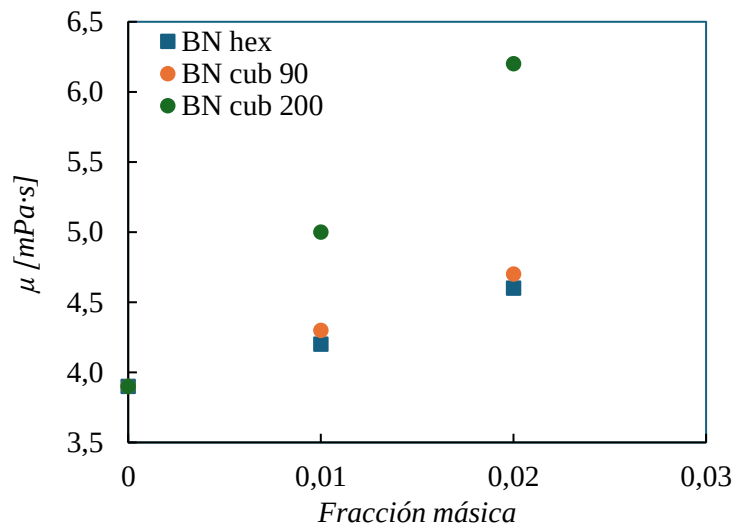


Figura 4-17 Viscosidad de los nanofluidos en función de su fracción másica

El nitrato de boro cúbico de 200 nm al 2% en masa es el que presenta un incremento mayor, del 59%, mientras que el nanofluido que presenta un menor porcentaje de mejora es el nitrato de boro hexagonal al 1% en masa, siendo de 7,7%.

La diferencia en el tamaño de las nanopartículas desempeña un papel fundamental en la viscosidad del nanofluido, a mayor tamaño mayor viscosidad.

Al presentar una elevada viscosidad dinámica tiene mayor resistencia al flujo, lo que genera mayores pérdidas de energía y mayores potencias de bombeo. Sin embargo, puede ayudar a que la distribución de calor sea más uniforme en sistemas donde se requiere una transferencia de calor controlada.

4.3 Figuras de mérito (FOM)

Las figuras de mérito son parámetros utilizados para evaluar el rendimiento o la eficiencia de un sistema o proceso en relación con un objetivo específico [50].

En el desarrollo de nanofluidos, las figuras de mérito se utilizan para comparar el rendimiento de diferentes nanofluidos en aplicaciones concretas, como puede ser la transferencia de calor. Estas figuras de mérito pueden incluir relaciones entre propiedades termofísicas, en este caso conductividad térmica, viscosidad dinámica, densidad y capacidad calorífica. Gracias a las figuras de mérito se permite una selección adecuada del nanofluido óptimo para una aplicación particular.

Es por ello que el propósito de este apartado es proporcionar un estudio más detallado sobre los diversos nanofluidos para ver el rendimiento global de cada uno de ellos frente al fluido base, en procesos de convección forzada, ya que, por su rendimiento, esta es una práctica común en la industria. De esta forma analizamos de manera cuantitativa el rendimiento de cada nanofluido para ver cual ofrece mejores prestaciones.

Todas las figuras de mérito serán calculadas a 20 °C debido a que es la única temperatura en la que disponemos del valor de todas las propiedades termofísicas analizadas.

Para un régimen laminar en intercambiadores de calor tubulares el cociente entre el coeficiente de convección del nanofluido y el del fluido base, $\frac{h_{nf}}{h_{bf}}$, equivale al cociente entre la conductividad térmica del nanofluido y la del fluido base, $\frac{k_{nf}}{k_{bf}}$.

La Figura 4-18 muestra la ratio de las conductividades térmicas de los tres nanofluidos respecto al fluido base para un régimen laminar.

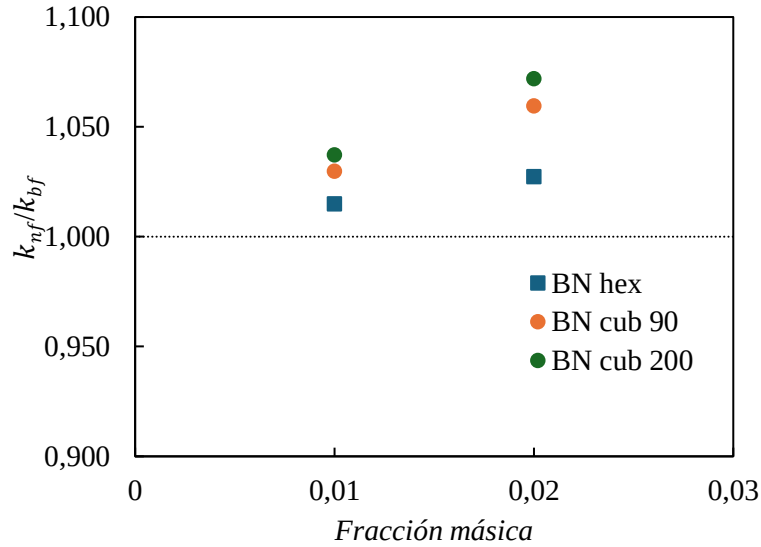


Figura 4-18 Ratios de conductividad térmica entre nanofluidos y fluido base para un régimen laminar

Los tres nanofluidos presentan un aumento en el rendimiento frente al fluido base y, aunque la diferencia entre ellos sea moderada, es el nitruro de boro cúbico de 200 nm al 2% el que presenta una mayor mejora en el proceso de la convección, siendo del 7,2%.

Sin embargo, si nos centramos en el flujo turbulento, se tendrá en cuenta la figura de mérito llamada número de Mouromtseff (Mo). Al igual que se hacía anteriormente para el régimen laminar, se puede establecer la relación directa entre los coeficientes de convección, $\frac{h_{nf}}{h_{bf}}$, y el número de Mouromtseff,

$$\frac{Mo_{nf}}{Mo_{bf}}.$$

Esta figura de mérito relaciona la conductividad térmica, la densidad, la capacidad calorífica y la viscosidad dinámica en la siguiente ecuación.

$$Mo = \frac{\rho^a \cdot cp^c \cdot k^b}{\mu^d} \quad (4-1)$$

Hay que obtener el cociente entre el Mo del nanofluido y el Mo del fluido base. Para ello, existen diferentes opciones, donde varían los exponentes de las propiedades termofísicas. En este caso analizaremos las propuestas de Dittus-Boelter [51] (Ecuación 4-2) y la de Vajjha and Das [52] (Ecuación 4-3).

$$\frac{Mo_{nf}}{Mo_{fb}} = \frac{\frac{\rho^{0,8} \cdot cp^{0,3} \cdot k^{0,7}}{\mu^{0,5}}}{\frac{\rho^{0,8} \cdot cp^{0,3} \cdot k^{0,7}}{\mu^{0,5}}} \quad (4-2)$$

$$\frac{Mo_{nf}}{Mo_{fb}} = \frac{\frac{\rho^{0,8} \cdot cp^{0,5} \cdot k^{0,5}}{\mu^{0,3}}}{\frac{\rho^{0,8} \cdot cp^{0,4} \cdot k^{0,6}}{\mu^{0,4}}} \quad (4-3)$$

La Figura 4-19 muestra las conductividades térmicas de los nanofluidos según el método Dittus-Boelter y la Figura 4-20 según el método Vajjha and Das.

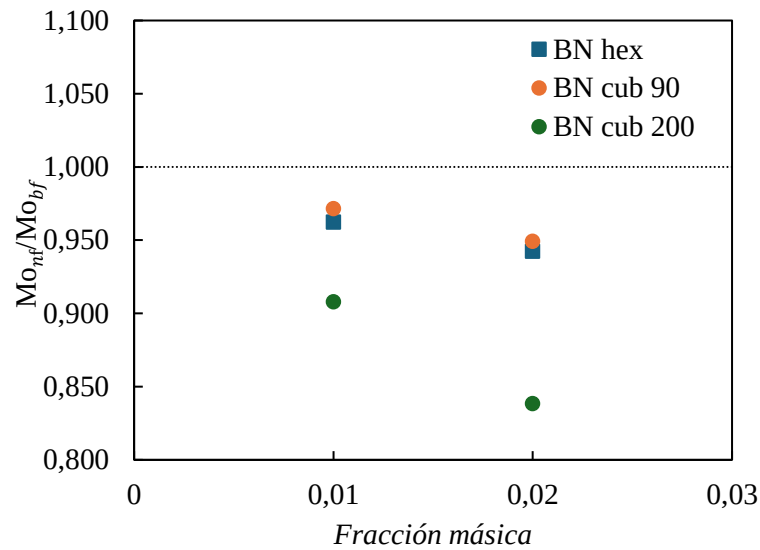


Figura 4-19 Ratios de número de Mouromtseff entre nanofluidos y fluido base según el método Dittus-Boelter

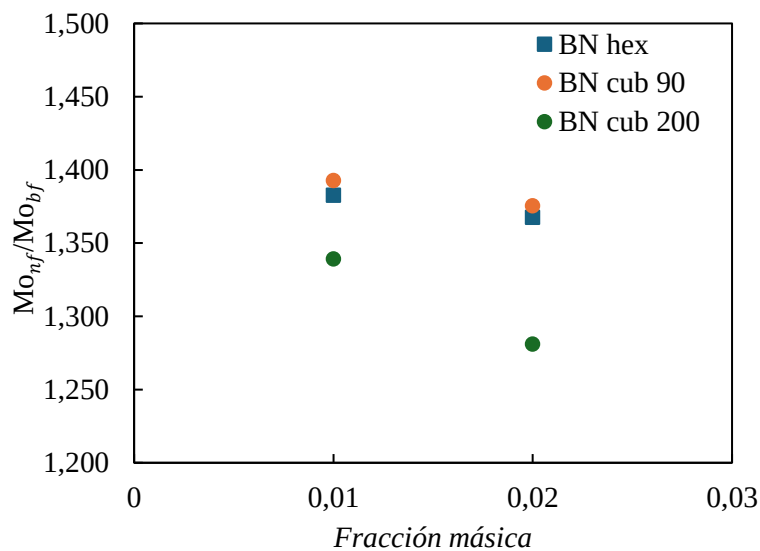


Figura 4-20 Ratios de número de Mouromtseff entre nanofluidos y fluido base según el método Vajjha and Das

Atendiendo al método Dittus-Boelter se observa como los tres nanofluidos empeoran frente al fluido base. El nitrato de boro cúbico de 90 nm es el que presenta un menor empeoramiento, siendo este del 2,8%, mientras que el nitrato de boro cúbico de 200 nm al 1% en masa, presenta un decremento del 9,2%.

Sin embargo, analizando el método Vajjha and Das, los tres nanofluidos mejoran al fluido base. El nitrato de boro cúbico de 90 nm al 1% es de nuevo el que presenta los mejores resultados, con un incremento del 39,3%, mientras que el nitrato de boro de 200 nm al 2% presenta una mejora del 28,1%.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha abordado la evaluación del perfil termofísico de fluidos térmicos nano-mejorados mediante la incorporación de tres nitruros de boro distintos (nitruro de boro hexagonal de 65-75 nm, nitruro de boro cúbico de 90 nm y nitruro de boro cúbico <200 nm) al fluido base elaborado a partir de agua y etilenglicol (EG:A 50:50). A lo largo de esta investigación, se han determinado experimentalmente y analizado las propiedades termofísicas de los nanofluidos, centrándose en la conductividad térmica, la viscosidad dinámica, la capacidad calorífica y la densidad.

Los resultados obtenidos han demostrado que la adición de nitruros de boro al fluido base mejora sus propiedades termofísicas. Específicamente, se ha observado que todos los nanofluidos diseñados con nitruros de boro presentan una conductividad térmica mejorada en comparación al fluido base.

A continuación, se detallan los resultados más relevantes para cada propiedad analizadas:

- Los tres nanofluidos presentan un aumento de la conductividad térmica, siendo el nitruro de boro cúbico de 200 nm al 2% en masa el que presenta un mayor incremento de la conductividad térmica, siendo del 7,2%.
- En cuanto a la densidad, a pesar de que los incrementos son mínimos, es de nuevo el nanofluido elaborado a partir del nitruro de boro cúbico de 200 nm al 2% el que presenta un mayor incremento, siendo este del 1,3%.
- Sin embargo, la capacidad calorífica de los seis nanofluidos se reduce respecto a la del fluido base, siendo el menor incremento el de los dos nanofluidos que contienen los nitruros de boro cúbico de ambos tamaños al 1%, siendo el incremento del 0,6%, lo cual nos hace ver que el tamaño de las nanopartículas no influye en esta propiedad.
- Respecto a la viscosidad el nitruro de boro cúbico al 2% en masa tiene un incremento del 59%, lo cual requeriría de un gasto energético muy elevado. Mientras que el nitruro de boro hexagonal al 1% en masa, es el que presenta un menor incremento, siendo del 7,7%.

Los valores de las propiedades termofísicas permiten el cálculo de figuras de mérito que permiten predecir su eficacia tanto en régimen laminar como turbulento en los intercambiadores de calor tubulares. Atendiendo a estas FOM se observa en régimen laminar que el nanofluido que presenta una mayor mejora es el elaborado con nitruro de boro cúbico de 200 nm al 2%, con un incremento de la eficiencia de la convección de 7,2%.

En régimen turbulento el nitruro de boro cúbico al 1% es el que presenta las mejores condiciones de acuerdo a dos criterios: Dittus-Boelter y Vajjha and Das. De acuerdo con el segundo criterio, se obtendrían mejoras de la eficacia de la convección de hasta el 39%.

5.2 Líneas futuras

A pesar de los avances logrados en este estudio, existen varias direcciones que se pueden tomar para futuras investigaciones en el campo de los nanofluidos mejorados con nitruro de boro:

- Realizar una caracterización exhaustiva de la estabilidad a largo plazo de los nanofluidos usados en este trabajo.
- Estudiar la influencia del tamaño de las nanopartículas en las propiedades termofísicas de los nanofluidos elaborados a partir de nitruro de boro hexagonal.
- Evaluar más concentraciones para encontrar la óptima en el régimen laminar y en el régimen turbulento.
- Comprobar los resultados que predicen las FOMs utilizando los nanofluidos diseñados en este trabajo en intercambiadores de calor tubulares.
- Evaluar los procesos de convección de estos nanofluidos en distintos intercambiadores de calor.
- Otra línea de investigación interesante podría ser el comportamiento de los nanofluidos en condiciones extremas, como temperaturas y presiones elevadas. Esto podría abrir nuevas oportunidades para su aplicación en industrias como la aeroespacial.

6 BIBLIOGRAFÍA

En esta sección figurarán todas las referencias, sean recursos web, libros, artículos, etc., incluyendo la información de autores, título de la obra, nombre de la publicación, año, edición y enlace más fecha de último acceso en el caso de referencias a recursos online.

- [1] «Ahorro y eficiencia energética: ¿cómo contribuyen los hogares, la Administración y el comercio?». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/paginas/2023/201023-medidas-ahorro-y-eficiencia-energetica.aspx>
- [2] P. L. Llamas, «Eficiencia energética y medio ambiente», *ICE Rev. Econ.*, n.º 847, Art. n.º 847, abr. 2009, Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://revistasice.com/index.php/ICE/article/view/1227>
- [3] «Medidas del Gobierno de ahorro y eficiencia energética | Idae». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/ahorra-energia/medidas-del-gobierno-de-ahorro-y-eficiencia-energetica>
- [4] «Pacto Verde Europeo - Consilium». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policias/green-deal/>
- [5] «Ahorro de energía: medidas de la UE para reducir el consumo energético», Temas | Parlamento Europeo. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20221128STO58002/ahorro-de-energia-medidas-de-la-ue-para-reducir-el-consumo-energetico>
- [6] «<https://istas.net/istas/guias-interactivas/ahorro-y-eficiencia-energetica/problema-ambiental-del-consumo-de-energia>». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://istas.net/istas/guias-interactivas/ahorro-y-eficiencia-energetica/problema-ambiental-del-consumo-de-energia>
- [7] «Crisis Energética Mundial – Topics», IEA. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis>
- [8] «Es posible que el aumento de los precios de la energía no se atenúe hasta el año que viene», IMF. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.imf.org/es/Blogs/Articles/2021/10/21/blog-surg-ing-energy-prices-may-not-ease-until-next-year>
- [9] «3.1. El cambio climático, las cumbres del clima y los acuerdos internacionales», Energía y Sociedad. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/3-1-el-cambio-climatico-y-los-acuerdos-internacionales/>
- [10] «El Protocolo de Kioto», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-a-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.html>
- [11] «cumbres del clima». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/clima_y_energia/cambio_climatico/cumbres_del_clima/
- [12] «1.1. Energía y sociedad», Energía y Sociedad. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/1-1-energia-y-sociedad/>
- [13] U. Nations, «El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible | Naciones Unidas», United Nations. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- [14] «Energía Térmica - La Energía es Vida», La vida es energía. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.laenergiaesvida.com/energia-termica/>

- [15] «Intercambiadores de calor. Cómo funcionan». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/intercambiadores-de-calor/>
- [16] «Aplicaciones Farmacéuticas», SACOME. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.sacome.com/aplicaciones-farmaceuticas/>
- [17] «Aplicaciones Industriales», SACOME. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.sacome.com/aplicaciones-industriales/>
- [18] «Transferencia de Calor - Concepto, tipos, aislantes y medidas», <https://concepto.de/>. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://concepto.de/transferencia-de-calor/>
- [19] «Radiación, conducción y convección: tres formas de transferencia de calor». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/>
- [20] lorenzoren S. • hace 3 años, «Transferencia de calor por conducción», Hive. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hive.blog/hive-196387/@lorenzor/transferencia-de-calor-por-conduccion>
- [21] «Transferencia de calor por convección (con ejemplos)», Lifeder. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/transferencia-calor-conveccion/>
- [22] «TRANSFERENCIA DE CALOR - Prodel, S.A.» Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.prodel.es/subareas/transferencia-de-calor/>
- [23] U. de Guanajuato, «Clase digital 1. Fundamentos de la transferencia de calor», Recursos Educativos Abiertos. Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-1-fundamentos-de-la-transferencia-de-calor/>
- [24] A. Hasanpour, M. Farhadi, y K. Sedighi, «A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria», *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 55, pp. 53-62, jul. 2014, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.04.008.
- [25] B. Bode, «150 años de la unificación de las fuerzas eléctrica y magnética», El País. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://elpais.com/ciencia/cafe-y-teoremas/2023-02-09/150-anos-de-la-unificacion-de-las-fuerzas-electrica-y-magnetica.html>
- [26] P. Pedraza, «Análisis de los nanofluidos y su aplicación como fluido HTF», Universidad de Sevilla.
- [27] «Cómo fabricar nanofluidos», Hielscher Ultrasonics. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hielscher.com/es/how-to-make-nanofluids.htm>
- [28] L. M. Baena Pérez, *Manufactura y gestión del ciclo de vida del producto (PLM)*.
- [29] G. O. Bueno García, «Preparación y caracterización de nanofluidos de grafeno y nanotubos de carbono funcionalizados para su uso en procesos de transferencia de calor», Universidad Nacional de Colombia.
- [30] E. Abascal Carral, «Aportaciones para el uso de nanofluidos en un intercambiador de calor de carcasa y tubos», Escuela Técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación. Santander.
- [31] Artedynamico, «CONDUCTIVIDAD TERMICA», Equipos y laboratorio de Colombia. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/conductividad-termica>
- [32] «Viscosidad dinámica». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.flottweg.com/es/wiki/tecnica-de-separacion/viscosidad-dinamica/>
- [33] Y. Cheng *et al.*, «Size- and Surface-Dependent Photoresponses of Solution-Processed Aluminum Nanoparticles», *ACS Photonics*, vol. 7, n.º 3, pp. 637-645, mar. 2020, doi: 10.1021/acsp Photonics.9b01170.
- [34] «El Agua como Fluido Caloportador | ESingeniería.pro». Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://esingenieria.pro/el-agua-como-fluido-caloportador/>
- [35] J. Martínez Malagón, «DISEÑO DE FLUIDOS NANO-MEJORADOS Y DETERMINACIÓN DE SUS CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS», Universidad de Vigo.
- [36] «Etilenglicol». Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Etilenglicol.html>

- [37] «Etilenglicol - propiedades y usos | Grupo PCC», PCC Group Product Portal. Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.products.pcc.eu/es/blog/propiedades-y-usos-del-etilenglicol/>
- [38] «CARACTERÍSTICAS DEL LÍQUIDO DE REFRIGERACIÓN».
- [39] «Nitruro de boro hexagonal, HBN Polvo ultrafino», MarkNature. Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.marknature.com/es/products/hexagonal-boro-nitruro-hbn>
- [40] «Deposición y caracterización de recubrimientos de nitruro producidos por pulverización».
- [41] «Hexagon Boron Nitride Powder | Nanochemazone». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.nanochemazone.ca/product/hexagon-boron-nitride-powder/>
- [42] «Laboratorio de Microscopía Electrónica de Transmisión». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.uam.es/uam/sidi/unidades-de-analisis/unidad-microscopia/microscopia-electronica-transmision>
- [43] L. Atarés Huerta, «Fracción másica y fracción molar. Definiciones y conversión», Universidad Politécnica de Valencia.
- [44] «Medidor de la conductividad y resistividad térmica TEMPOS». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.lab-ferrer.com/medidor-de-la-conductividad-y-resistividad-termica-tempos/>
- [45] «TEMPOS - Analizador de aceite by Meter Group | DirectIndustry». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/meter-group/product-64142-2054525.html>
- [46] «Medidor compacto de densidad digital: DMA», Anton Paar. Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.anton-paar.com/es-es/productos/detalles/c-dma/>
- [47] «Propiedades termofísicas: Densidad. Su medición – Revista e-medida». Accedido: 24 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.e-medida.es/numero18/propiedades-termofisicas-densidad-su-medicion/>
- [48] «¿Qué es la calorimetría diferencial de barrido? - TA Instruments». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.tainstruments.com/what-is-differential-scanning-calorimetry/?lang=es>
- [49] T.A. INSTRUMENTS, «ANÁLISIS TÉRMICO».
- [50] J. Añez, «Figura de Mérito: Definición, Qué es y Ejemplos | 2024». Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.economia360.org/figura-de-merito/>
- [51] J.P. Vallejo, L. Febrero-Garrido, A. Cacabelos, A. González, L. Lugo «Influence of crystal structure on the thermophysical properties and figures-of-merit of propylene glycol: water-based SiC nanofluids», *Powder Technology*, vol. 433, pp. 119299, en. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2023.119299.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

En cuanto a las implicaciones sociales, el estudio y desarrollo de fluidos nano-mejorados incrementa la eficiencia térmica, lo cual lleva a una reducción en el consumo energético en diversos sectores, lo que podría contribuir a la mitigación del cambio climático y a la preservación de los recursos naturales. Además, la implementación de estos nanofluidos en sistemas de refrigeración y climatización podría llevar a un uso más sostenible de la energía en los hogares y espacios públicos, beneficiando a comunidades enteras en términos de reducción de costos.

En cuanto a términos económicos, la implementación de los fluidos nano-mejorados en sectores industriales mejoraría su eficiencia, lo que supondría reducir costos de energía y aumentar la vida útil de los equipos. Además, la producción y comercialización de estos nanofluidos podrían generar ingresos adicionales y fomentar la innovación en la cadena de suministro.

Al reducir el consumo energético, se reducen también las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que serviría como una solución al cambio climático y a preservar el medio ambiente. Podría, además, promover la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables al reducir la dependencia de combustibles fósiles, reduciendo así el uso de recursos de naturales y materias primas.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En la actualidad existe una falta de conciencia generalizada sobre la importancia del ahorro energético y la necesidad de reducir el consumo de recursos naturales. Esta falta de conciencia puede atribuirse en parte a la escasa difusión de información sobre responsabilidad energética.

Los nanofluidos gracias a su gran eficiencia energética y capacidad para mejorar la transferencia de calor en una amplia gama de aplicaciones tanto industriales como domésticas, pueden ayudar a la reducción del consumo de energía y la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, es importante garantizar que los beneficios de los nanofluidos sean accesibles para todas las comunidades, especialmente aquellas que enfrentan dificultades económicas o carecen de recursos.

La incorporación de nanofluidos en la vida cotidiana presenta una oportunidad para fomentar el ahorro energético y la sostenibilidad. Al educar y concienciar sobre a la sociedad sobre la importancia de estas tecnologías y promover su uso, se puede avanzar hacia un futuro más sostenible.