



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

CARACTERIZACIÓN TERMOFÍSICA DE NANOFLUIDOS FORMADOS POR Al_2O_3 y Bi_2O_3

Autor: Lisandro ECHEVERRI DEL SARTO

Directora: Dra. Alejandra MARIANO

Carrera: Ingeniería Química

Lugar de Trabajo: Laboratorio de Fisicoquímica. Departamento de Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue

Neuquén 2017

RESUMEN

En el presente trabajo se obtuvieron experimentalmente las propiedades termofísicas, densidad y conductividad térmica, de dos sistemas de nanofluidos. Uno de ellos formado por nanopartículas de óxido de aluminio y el otro por óxido de bismuto (III), utilizando en ambos casos etilenglicol como fluido base. Se estudió además la estabilidad y morfología de dichos sistemas. Adicionalmente, para el sistema que se mostró más estable en su suspensión y presentó mejores propiedades térmicas, se evaluó su aplicabilidad como refrigerante a un problema industrial de intercambio térmico utilizando todas las propiedades medidas y calculadas de dicho nanofluido. La determinación experimental de las propiedades termofísicas se efectuó utilizando las técnicas de densimetría de oscilación mecánica para la densidad y el método del hilo caliente para la conductividad térmica.

Las densidades del fluido base y los nanofluidos preparados fueron medidas con un densímetro Anton Paar, DMA HP. El DMA HP se conectó a un equipo Anton Paar, DSA 5000 para reproducir la adquisición de datos medidos. La conductividad térmica fue medida con un dispositivo analizador de propiedades térmicas, KD2-Pro de la firma Decagon Devices. Las muestras se termostataron mediante un criostato de la firma LAUDA, a distintas temperaturas.

Las mediciones se realizaron a presión atmosférica en un rango de temperaturas entre 20 y 50 °C, y un rango de concentraciones entre 1 y 15% wt.

Para la densidad y conductividad térmica se utilizaron ecuaciones de ajuste y modelos teóricos para comparar con los datos experimentales. Los valores experimentales de densidad se correlacionaron a través de la ecuación polinomial de Redlich-Kister. Para la conductividad térmica se aplicaron dos modelos para estimarla: el modelo clásico de Maxwell, para suspensiones líquido/sólidas homogéneas; y el modelo semi-experimental propuesto por Turian.

Se diseñaron intercambiadores de calor utilizando como refrigerante, el fluido base puro y los nanofluidos formados por óxido de aluminio en etilenglicol al 5, 10 y 15% wt, con el objetivo de comparar los coeficientes globales de transferencia de calor, las áreas calculadas, y la caída de presión obtenida en los distintos diseños.

ABSTRACT

In the present work, thermophysical properties, density and thermal conductivity, of two nanofluids systems were experimentally obtained. One of them was formed by aluminum oxide nanoparticles and the other by bismuth oxide (III), using in both cases ethylene glycol as base fluid. Stability and morphology of these systems was also studied. Additionally, for the system that was more stable in suspension and showed better thermal properties, its applicability as refrigerant to an industrial heat exchange problem was evaluated using all measured and calculated properties of the nanofluid. The experimental determination of thermophysical properties was performed using mechanical oscillation densitometry techniques to measure the density and the hot wire method for thermal conductivity.

The densities of the base fluid and the prepared nanofluids were measured with a densimeter Anton Paar, DMA HP. The DMA HP was connected to a computer Anton Paar, DSA 5000 to reproduce the measured data acquisition. The thermal conductivity was measured with a thermal properties analyzer device, KD2-Pro from Decagon Devices. The samples were thermostated by a Lauda cryostat, at different temperatures.

Measurements were performed at atmospheric pressure in a temperature range between 20 to 50 °C; and a range of concentrations between 1 and 15% wt.

Adjustment equations and theoretical models were used to compare with experimental data of density and thermal conductivity. The experimental density values were correlated through the polynomial Redlich-Kister equation. For the thermal conductivity two models were applied to estimate it: the classic model of Maxwell, for liquid/solid homogeneous suspensions; and the semi-experimental model proposed by Turian.

Heat exchangers were designed using pure base fluid and nanofluids formed by aluminum oxide in ethylene glycol at 5, 10 and 15% wt as refrigerant, in order to compare overall heat transfer coefficients, calculated areas and pressure drop obtained in the different designs.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres y toda mi familia, por el cariño y amor incondicional que me brindaron en todos mis años de vida y el sacrificio que hicieron para que esto sea posible. Sin ellos hubiera sido imposible llegar hasta donde hoy llegué.

A mis amigos, que me bancaron y estuvieron siempre conmigo, siendo fundamentales en todo momento, en especial en aquellos más difíciles, donde me ayudaron a seguir adelante y a no bajar nunca los brazos.

A mi novia Julieta, que estuvo conmigo durante gran parte de esta carrera, ayudándome tanto emocional como académicamente. Fue ella quien me acompañó de más cerca durante estos últimos años, recorriendo este largo y difícil camino conmigo, brindándome siempre su amor y creyendo en mí en todo momento.

Y por último pero no menos importante, a todos los profesores que tuve durante esta hermosa etapa de mi vida, que me mostraron y enseñaron el extraordinario mundo de la ingeniería, el cual desconocía totalmente antes de ingresar a esta institución. En especial a mi profesora y directora de tesis Alejandra Mariano, que estuvo cada vez que necesité de ella sin importar las circunstancias en las que se encontraba.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivos	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 Antecedentes	8
2.2 Aplicaciones	11
2.2.1 Aplicaciones en refrigeración	11
2.2.1.1 Refrigeración de espejos de silicio cristalino	11
2.2.1.2 Refrigeración de dispositivos electrónicos	12
2.2.1.3 Refrigeración de vehículos	13
2.2.1.4 Refrigeración de transformadores	14
2.2.1.5 Refrigeración de sistemas espaciales y nucleares	14
2.2.1.6 Aplicaciones de defensa	14
2.2.2 Aplicaciones tribológicas	15
2.2.3 Aplicaciones biomédicas	15
2.3 Modelos empleados	16
2.3.1 Ecuación de ajuste de Redlich-Kister	16
2.3.2 Modelos para la conductividad térmica	16
2.3.3 Intercambiador de calor	18
2.3.3.1 Descripción del equipo	18
2.3.3.2 Coeficiente global de transmisión de calor	20
2.3.3.3 Cálculo de parámetros en los tubos	22
2.3.3.4 Cálculo de parámetros en la carcasa	24
2.3.4 Ecuaciones para la viscosidad y calor específico	26
CAPÍTULO 3: PARTE EXPERIMENTAL	27
3.1 Sustancias utilizadas	28
3.2 Técnicas y dispositivos experimentales	28
3.2.1 Preparación por pesada de las mezclas	28

3.2.2 Caracterización de las nanopartículas	30
3.2.3 Homogeneización de las mezclas	30
3.2.4 Determinación de la estabilidad de los nanofluidos	31
3.2.5 Determinación experimental de la densidad	32
3.2.6 Determinación experimental de la conductividad térmica	34
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1 Caracterización de las nanopartículas	40
4.1.1 Morfología	40
4.1.2 Estabilidad	42
4.2 Propiedades de las sustancias puras	45
4.3 Propiedades de los nanofluidos	45
4.3.1 Densidad	45
4.3.2 Conductividad térmica	50
4.4 Aplicabilidad en sistema de intercambio térmico	57
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	63
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA	66
CAPÍTULO 7: ANEXOS	74
7.1 Presentaciones en Congresos	75

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

1.2 Objetivos

1.1- INTRODUCCIÓN

La suspensión de partículas de escala nanométrica en un fluido es un sistema coloidal denominado “*nanofluido*”. En los últimos años se ha demostrado que el agregado de una muy pequeña cantidad de nanopartículas, cuando se dispersan uniformemente y se las suspende de forma estable en un fluido base, puede afectar notablemente sus propiedades físicas, térmicas y de transporte, produciendo variaciones que, sobre todo en sus propiedades de transporte, no se condicen con las estimaciones obtenidas por las teorías de suspensiones clásicas, tales como las de Maxwell [1]. Este aumento anómalo de propiedades como la conductividad térmica o la viscosidad se asocia principalmente al tamaño de las partículas en suspensión, y no a su naturaleza, ya que se ha reportado este fenómeno para nanopartículas metálicas, de óxidos metálicos, cerámicas, o nanotubos de carbono.

Los resultados experimentales obtenidos para la conductividad térmica de un nanofluido muestran que dicha propiedad excede de forma muy marcada los valores de su fluido base (Akilu y col. [2]; Wei y col. [3]; Satti y col. [4]), lo que ha llamado mucho la atención a investigadores e ingenieros por su potencial aplicación como sustitutos de los fluidos usuales de intercambio de calor o incluso de lubricantes.

Además, se descubrió que el incremento en las propiedades de transporte de calor de un determinado fluido con el agregado de nanopartículas se produce incluso a bajas concentraciones de estas, lo que ha motivado a plantear un único objetivo para la aplicación de los nanofluidos como refrigerante: obtener las mayores propiedades térmicas agregando las menores concentraciones posibles de nanopartículas (preferentemente concentraciones menores al 1% en volumen) en un fluido base determinado. Esto significaría mejorar el rendimiento de los fluidos de trabajo convencionales de la mejor manera posible con el fin de poder reducir su carga en aplicaciones industriales. Esta es una de las principales razones que ha convertido la investigación de los nanofluidos en un campo emergente con numerosas aplicaciones prácticas presentes y futuras en el ámbito industrial.

El estudio de los nanofluidos es un área multidisciplinar, donde confluyen químicos orgánicos e inorgánicos, que analizan las técnicas de síntesis y producción de las

estructuras nanométricas; físicos y físico-químicos, que se ocupan de estudiar las condiciones óptimas de dispersión y estabilidad de los mismos para la posterior caracterización termofísica; e ingenieros, encargados de mejorar los procesos de microfluidización, refrigeración, lubricación, etc.

La combinación del pequeño tamaño de las nanopartículas (el cual favorece la estabilidad a largo plazo de las suspensiones que las contienen y minimiza los efectos de taponamiento y erosión de las superficies de contacto) y la conductividad térmica mejorada de los nanofluidos, atrajeron un interés extraordinario en estos sistemas por parte de la comunidad científica, principalmente en la determinación experimental y descripción teórica de la conductividad térmica. Un análisis crítico de algunas revisiones recientes que resumen los aportes más relevantes de esta caracterización termofísica (Murshed y Nieto de Castro [5]; Devendiran y Amirtham [6]; Solangi y col. [7]; Sundar y col. [8]) muestra que las primeras previsiones de mejora de la conductividad térmica de nanofluidos eran bastante optimistas. Por otra parte, las particularidades asociadas a estos sistemas producen una notable dispersión de datos y discrepancias inusuales entre los distintos autores.

La discusión de este tema es de gran relevancia debido a que no existe una teoría que pueda dar cuenta de las variaciones de conductividad térmica en nanofluidos, por lo que un análisis exhaustivo de cada una de las variables que intervienen en la determinación exacta de esta propiedad podría ser útil para arrojar luz sobre el transporte de calor que subyace en estos fenómenos. Una de las variables que debe ser considerada en este contexto es la polidispersidad de las muestras, ya que aunque los valores medios del tamaño de las partículas se dan en la literatura, un cambio en la distribución del tamaño puede conducir a modificaciones en el comportamiento térmico del sistema (Hee y col. [9]). Por otro lado, la geometría de las nanopartículas también debe tenerse en cuenta, ya que muy a menudo se las considera esféricas, y sin embargo, la diferente simetría en su estructura podría dar lugar a variadas teorías sobre su comportamiento (Zhang y col. [10]).

La estabilidad de las suspensiones también debe ser un tema de gran preocupación, ya que, por lo general, se obtiene la suspensión de las nanopartículas en el fluido de base utilizando técnicas como la agitación mecánica, sondas de ultrasonido, o la

combinación de ambas. Sin embargo, una revisión de la literatura muestra que no existen directrices claras sobre el método más fiable para lograr la estabilidad de la suspensión requerida y evitar así la sedimentación. Los tiempos recomendados para aplicaciones de ultrasonido varían mucho para un mismo nanofluido de acuerdo a diferentes autores, y además, el efecto de la implementación de esta técnica en el tamaño y la distribución de los agregados rara vez es discutido. Por otra parte, usualmente, una simple inspección visual de las muestras luego de un cierto período de tiempo es considerado como una prueba suficiente de estabilidad, sin ningún otro tipo de control posterior.

Este efecto de la agregación en el comportamiento de nanofluidos se ha discutido recientemente por Yang y Du [11], Babita y col. [12] y Leong y col. [13]. Por otro lado, otros autores, como por ejemplo Wang y Zhang [14] y Pryazhnikov y col. [15], han discutido el efecto del tamaño de la partícula en distintos nanofluidos. Además, Hwang y col. [16] han desarrollado nuevos métodos de dispersión de nanopartículas, tales como el uso de homogeneizadores de alta presión o sistemas de pulverización catódica modificados, con muy buenos resultados prácticos aunque no tanto en cuanto a la difusión de su aplicación. Con respecto a la conductividad térmica de los nanofluidos, a pesar de tratarse de la propiedad más interesante para fines prácticos, se le ha prestado menor atención que a otras, tales como la densidad o viscosidad, también necesarias para conocer los efectos sobre las características de transferencia de calor y el flujo de nanofluidos (Cheng y col. [17]).

Otro gran error observado frecuentemente en la bibliografía es que, generalmente, se asume al nanofluido como un sistema coloidal ideal donde la interacción entre las nanopartículas puede ser dejada de lado, y por lo tanto, la densidad de los mismos es determinada utilizando aproximaciones simples de líquidos, que solo contemplan las fracciones en volumen y densidades de los compuestos por separado. Sin embargo, estos tipos de sistemas suelen mostrar comportamientos bastante alejados de la idealidad, sumado a que la densidad de las nanopartículas no puede determinarse con la misma precisión que la de un fluido, por ejemplo debido a la dificultad de evaluar en la composición relativa de las diferentes posibilidades cristalográficas de un determinado material. Por otra parte, las nanopartículas muestran mejores propiedades que los

materiales con estructura de grano grueso convencionales, entre ellas las térmicas, mecánicas y eléctricas [18].

En la actualidad, los datos experimentales sobre densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica para distintos nanofluidos son muy escasos en la literatura científica, sumado a que pueden apreciarse importantes discrepancias entre distintos autores en el estudio de sistemas supuestamente idénticos. Esto hace que resulte imposible lograr una caracterización sistemática para este tipo de suspensiones. Las razones de estas remarcadas diferencias entre los distintos autores son múltiples, ya que existen un gran número de variables, tales como la forma de las nanopartículas, su tamaño medio y polidispersión, estado de agregación, pH, etc., que tienen una importante influencia sobre la suspensión obtenida, y que a menudo no son controladas o monitorizadas en el proceso de medida. En este sentido, muchos autores coinciden en que es de suma importancia realizar un esfuerzo colectivo para establecer criterios rigurosos de preparación y caracterización de muestras, con el fin de contribuir a la determinación de procesos de laboratorio estandarizados que disipen las dudas actuales en cuanto a su reproducibilidad.

Teniendo en cuenta las dificultades mencionadas en relación a la preparación y caracterización termofísica de los nanofluidos en estudios actuales, en el presente trabajo se ha trabajado con el fin de realizar una contribución a la estandarización de métodos de caracterización de este tipo de sistemas y determinar experimentalmente la densidad y conductividad térmica de diversas muestras de nanofluidos conformadas a partir de la suspensión de nanopartículas de óxidos metálicos obtenidas a partir de distribuidores comerciales (Al_2O_3 y Bi_2O_3) en un fluido base (etilenglicol), en el rango de temperatura más amplio posible. Además, se evaluará el comportamiento de estas propiedades con la concentración, y el orden de las desviaciones anómalas que aparezcan. Este comportamiento anómalo, será utilizado para evaluar la capacidad estimativa de diversos modelos publicados por distintos autores para este tipo de sistemas heterogéneos, examinando la validez de sus principios físicos por medio de la comparación de resultados. Por otra parte, también se evaluará la capacidad de transferencia de calor de los distintos nanofluidos con los que se trabajó con respecto a su fluido base por medio del diseño y posterior simulación de un sistema de intercambio

de calor para una aplicación real particular.

Para finalizar, resulta importante mencionar que la mejora en la eficiencia del consumo y la producción de energía de estos últimos años acarrearán serios problemas a nivel mundial que deberán ser estudiados las próximas décadas. Algunos de estos inconvenientes incluyen el continuo y creciente cambio climático debido a las altas emisiones de los gases de efecto invernadero, o el esperado declive en la producción global de petróleo [19]. Considerando el rápido incremento de la demanda energética a nivel mundial, se han intensificado los procesos de transferencia de calor, buscando reducir lo más posible las pérdidas de energía debido a su uso ineficiente. Se prevé que la Nanociencia y la Nanotecnología jueguen un rol fundamental en la revitalización de industrias tradicionales de energía y la estimulación de industrias emergentes de energía renovable ([20]; [21]).

1.2- OBJETIVOS

El principal objetivo del presente trabajo es la caracterización experimental y teórica de nanofluidos formados por alúmina u óxido de aluminio y óxido de bismuto (III) utilizando como fluido base etilenglicol para una amplia gama de concentraciones de nanopartículas y temperaturas. El estudio experimental tendrá en cuenta aspectos tanto del tipo morfológico, de estabilidad, así como de sus propiedades termofísicas, las que incluyen su densidad y conductividad térmica. Por otro lado, el estudio teórico de estos, que se llevará a cabo utilizando predicciones realizadas por diversos autores, nos brindará información acerca del comportamiento de los sistemas en estudio respecto del los de su fluido base.

Otro de los objetivos es evaluar la aplicabilidad de los nanofluidos en procesos de intercambio de calor, considerando las propiedades medidas y analizadas en este trabajo.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.2 Aplicaciones

2.3 Modelos empleados

2.1- ANTECEDENTES

En 1959, en la junta anual de la Sociedad Física Americana (American Physical Society), el célebre físico Richard P. Feynman presentó la idea de las micromáquinas, es decir, máquinas de tamaño microscópico que fueran capaces de reemplazar a las grandes máquinas de aquel entonces. Si bien en aquella época este concepto parecía algo utópico, hoy podemos ver que no lo fue, siendo este el puntapié inicial para la creación de dispositivos electrónicos e informáticos cada vez más pequeños. Sin embargo, actualmente, los diseñadores de dichos dispositivos han llegado a un cuello de botella, y sorpresivamente este no es electrónico, sino que es térmico. La evolución hacia dispositivos cada vez más pequeños sumado a sus velocidades de operación cada vez mayores hizo que el flujo de calor en tales dispositivos aumente continuamente, llegando al límite en el cual se hizo totalmente imposible poder disipar todo el calor generado. Curiosamente, el desafío de disipar el calor no sólo reside en dispositivos pequeños, sino también en equipos de gran tamaño, tales como vehículos de transporte grandes, celdas de combustible de alta y media temperatura y algunos biorreactores.

Todos los esfuerzos del pasado para mejorar la tecnología de refrigeración han sido poco significativos. Esto se debe a que para ello, se prestó principal atención a la búsqueda de mejoras en los procesos de transporte, dejando en un segundo plano la baja conductividad térmica de los fluidos refrigerantes, siendo este último el factor limitante a la hora de transferir calor.

No fue hasta la década de 1990 que los investigadores pusieron en un primer plano la baja conductividad térmica de los fluidos refrigerantes y se percataron que los niveles de remoción de calor podrían ser aumentados significativamente diseñando fluidos más conductores.

Es bien sabido que a temperatura ambiente, los metales sólidos presentan una conductividad térmica de un orden mayor a la de los líquidos utilizados normalmente como fluidos de intercambio de calor en industrias, tales como agua, aceites y etilenglicol (Touloukian y col. [22]). Por ejemplo, la conductividad térmica del cobre a temperatura ambiente es unas 700 veces mayor a la del agua y unas 3000 veces mayor a las de aceites para motores. A su vez, la conductividad térmica de metales líquidos es mucho mayor a la de líquidos no metálicos. Por lo tanto, puede esperarse que la

conductividad térmica de aquellos fluidos que contengan partículas sólidas suspendidas pueda ser considerablemente mayor a la del fluido en cuestión a esa temperatura.

Teniendo en cuenta este concepto, en 1993, el investigador Stephen U. S. Choi trajo al mundo la novedosa idea de suspender pequeñas cantidades de nanopartículas de diversos materiales, típicamente menores a los 100 nanómetros, en fluidos convencionales de transferencia de calor denominados “*fluidos base*” (normalmente agua, etilenglicol y algunos aceites) con el fin de aumentar sus propiedades térmicas. Dos años más tarde, Choi [23] denominó a dichas suspensiones como “*Nanofluidos*”.

Sin embargo, la idea de las suspender partículas sólidas en líquidos para mejorar sus propiedades térmicas no es reciente, sino que surgió hace más de un siglo atrás, en 1873, por Maxwell [24], quien elaboró una teoría para la conductividad térmica efectiva de suspensiones. Desde aquella época, científicos e ingenieros han llevado a cabo numerosos estudios experimentales y teóricos para mejorar la pobre conductividad térmica de los líquidos de transferencia de calor añadiéndoles partículas sólidas. Sin embargo, todos estos estudios de suspensiones se limitaron al agregado de partículas de tamaño micrométrico (o mayores), ya que con la tecnología de aquel entonces no resultaba posible obtener partículas de menores dimensiones. Estos tamaños de partícula trajeron consigo dos principales problemas técnicos: el primero fue la rápida sedimentación de las partículas; y el segundo fue que la conductividad térmica de aquellas suspensiones seguía siendo muy pequeña a bajas concentraciones de sólido suspendido. Por lo tanto, para poder mejorar significativamente las propiedades térmicas de los fluidos base se requería de suspensiones más concentradas (usualmente, concentraciones mayores al 10% en volumen), significando esto una mayor cantidad de partículas que posteriormente sedimentarían. Para evitar este inconveniente y mantener a las partículas suspendidas, se recurría a mayores velocidades de circulación, lo que daba lugar una gran erosión de las tuberías y equipos por los cuales se hacía circular al fluido en cuestión. Además, el uso estas suspensiones implicaba un mayor gasto energético, ya que las potencias de bombeo requeridas para hacerlas fluir eran considerablemente altas debido a la gran caída de presión dentro de los ductos por los que estas circulaban. Por otro lado, tampoco resultaban aptas para ser utilizadas en dispositivos miniaturizados (Tuckerman y Peace [25]) que estaban emergiendo ya que se corría el riesgo de tapar los pequeños canales de tales dispositivos. Todos estos

problemas hicieron que el uso de microsuspensiones para los procesos de transferencia de calor no fuera práctico.

Los nanofluidos, por otra parte, resultaron ser muy estables, evitando así el problema de la sedimentación. Además, la relación superficie/volumen de las nanopartículas es aproximadamente 1000 veces superior a la de las partículas microscópicas; y como la transferencia de calor ocurre en la superficie de las mismas, es posible transmitir una gran cantidad de calor aun en presencia de bajas concentraciones de sólido suspendido. Como consecuencia, el uso de nanofluidos no representa ningún problema significativo de erosión, taponamiento o caída de presión en los equipos.

Sorpresivamente, las primeras experiencias realizadas con nanofluidos revelaron que, además de los beneficios ya mencionados, las conductividades térmicas de los mismos resultaron inimaginablemente elevadas, aun por encima de cualquier predicción realizada por diversas teorías de suspensión. Esto hizo que la comunidad de científicos e ingenieros interesados en el tema creciera rápidamente, viéndose reflejado en el aumento de publicaciones sobre nanofluidos con el transcurso de los años. De este modo, no solo se descubrieron propiedades térmicas inusuales, sino también se propusieron nuevos mecanismos detrás del aumento de las mismas, desarrollando así modelos no convencionales de nanofluidos e identificando inmensas oportunidades para el desarrollo de una nueva generación de refrigerantes.

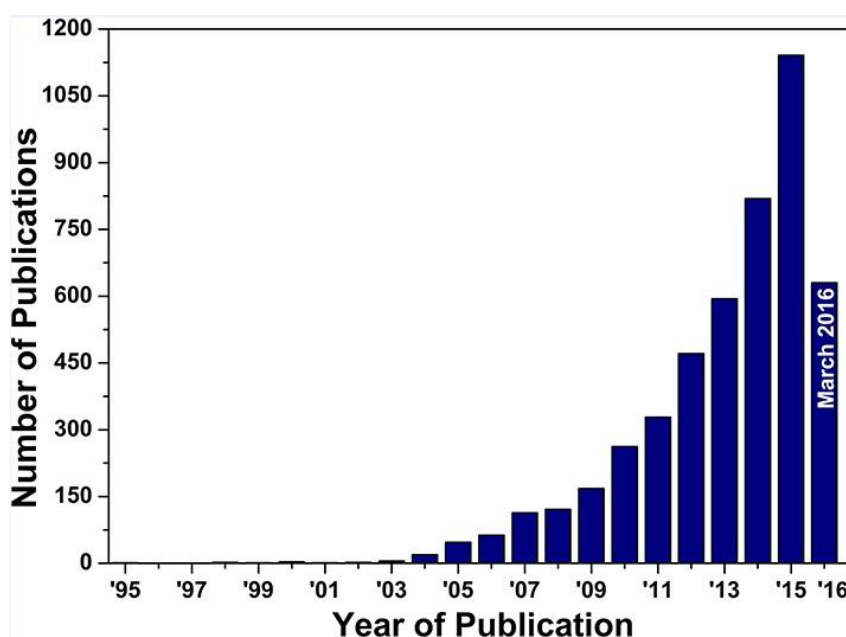


Figura 2.1 Número de publicaciones relacionadas con nanofluidos a través de los años [26].

2.2- APLICACIONES

Tal como se mencionó anteriormente, los nanofluidos ofrecen una gran variedad de beneficios. Entre ellos se pueden mencionar mayores velocidades de enfriamiento, la posibilidad de utilizar menores cantidades de fluidos de transferencia de calor y sistemas de refrigeración más pequeños y livianos, pequeñas potencias de bombeo, bajos coeficiente de fricción, y una mínima erosión de los equipos y tuberías por los cuales se los hará circular. Debido a estos beneficios, muchas industrias notaron el gran potencial de los nanofluidos y realizaron importantes inversiones con el fin de profundizar la investigación de los mismos. De este modo surgieron un gran número de posibles aplicaciones de los nanofluidos, entre las cuales se destacan las siguientes:

2.2.1- Aplicaciones en refrigeración

En muchos casos, la refrigeración de dispositivos se realiza con aire. Esta consiste en un disipador de calor y un ventilador, siendo el método más común en la refrigeración de componentes electrónicos. Sin embargo, con la creciente miniaturización de los equipos de trabajo, los flujos de calor a disipar han crecido significativamente. Para flujos menores a los 100 W/cm^2 , la refrigeración con aire puede resultar la mejor opción (aunque a veces suele presentar niveles de ruido inaceptables). Sin embargo, a pesar de los grandes esfuerzos realizados para mejorar la eficiencia de los equipos de remoción de calor por medio de aire (Acikalin y col. [27]; Glezer y Mahalingam [28]), para flujos por encima de los 100 W/cm^2 , resulta imposible eliminarlos mediante este método. Aquí es donde la refrigeración líquida cobra importancia, ya que la misma permite disipar flujos de calor por encima de los 100 W/cm^2 y eliminar puntos calientes presentes en ciertas regiones de algunos dispositivos. Los nanofluidos, por su parte, permitirían aumentar aún más la eficiencia de remoción de calor de los refrigerantes líquidos.

A continuación se detallarán algunas de las posibles aplicaciones de los nanofluidos en cuanto a la refrigeración:

2.2.1.1- Refrigeración de espejos de silicio cristalino

Los espejos de silicio cristalino son utilizados comúnmente en microscopios y telescopios de rayos x, los cuales manipulan este tipo de radiación en lugar de la perteneciente al espectro visible (como lo hacen los microscopios y telescopios convencionales) para poder obtener una imagen más clara del objeto a visualizar. Por

este motivo, estos equipos están provistos de fuentes de alta intensidad de rayos x. Para obtener una imagen nítida, se hace reflejar estos rayos en los espejos en cuestión, aumentando significativamente la temperatura de los mismos y llegando a necesitar disipar flujos de calor de hasta 3000 W/cm^2 .

Lee y Choi [29] llevaron a cabo diversos estudios con un intercambiador de calor compuesto por microcanales utilizando como fluido de trabajo agua, nitrógeno líquido y nanofluidos con base de dichas sustancias, para luego poder comparar el desempeño del equipo bajo el uso de los distintos fluidos refrigerantes. Los resultados mostraron que los nanofluidos redujeron notablemente la resistencia térmica con respecto a sus fluidos base, logrando así flujos de calor del orden de los 3000 W/cm^2 . Gracias a estos resultados, se demostró la posibilidad de refrigerar los espejos de silicio cristalino de microscopios y telescopios avanzados utilizando nanofluidos en un sistema de intercambio de calor por microcanales.

2.2.1.2- Refrigeración de dispositivos electrónicos

En 1990, Akachi [30] inventó una tubería de transferencia de calor oscilante (OHP por sus siglas en inglés), la cual superó con creces la eficiencia de transmisión del calor con respecto a las tuberías de transferencia de calor convencionales. Este tipo de tubería enseguida se volvió muy popular en la refrigeración de dispositivos electrónicos debido a su gran eficiencia a la hora de transferir calor y a que no contaba con partes móviles. Sin embargo, la baja conductividad térmica de los fluidos refrigerante sumado a otros problemas técnicos del sistema no permitieron disipar flujos mayores a los 1000 W/cm^2 . Por esto, Ma y col. [31; 32] decidieron realizar una serie de pruebas utilizando distintos nanofluidos en una OHP dentro de un sistema térmico con el fin de comparar los resultados obtenidos con y sin el uso de los nanofluidos. Los resultados evidenciaron la gran superioridad de los nanofluidos por sobre los de sus fluidos base, abriendo de esta forma el camino a un nuevo tipo de sistema de refrigeración electrónica.

Otros estudios, llevados a cabo por Chien y col. [33], Tsai y col. [34], Kang y col. [35], Wei y col. [36], Chein y Huang [37], Chein y Chuang [38], Palm y col. [39] y Zhou [40] muestran el gran potencial de los nanofluidos con respecto a sus fluidos base a la hora de disipar calor en otros tipos de tuberías y sistemas de transferencia de calor comúnmente utilizados en dispositivos electrónicos, observándose un descenso importante de la resistencia térmica del sistema (variando desde un 10 hasta un 80% con

respecto a su fluido base) y una pérdida de carga prácticamente constante para ambas situaciones.

Por otro lado, Koo y Kleinstreuer [41], a partir de sus experiencias realizadas con diversos nanofluidos en microcanales disipadores de calor, llegaron a la conclusión de que para poder optimizar el rendimiento de dichos sistemas es conveniente la utilización de fluidos base con altos números de Prandtl, nanopartículas con alta conductividad térmica y constante dieléctrica similar a la del fluido base. También es conveniente que los microcanales tengan la mayor área de transferencia posible y paredes tratadas para evitar la acumulación de nanopartículas.

2.2.1.3- Refrigeración de vehículos

Las nanopartículas pueden ser dispersadas no solo en refrigerantes y aceites para motor, sino también en fluidos de transmisión, aceites para engranajes, así como en otros fluidos y lubricantes. Estos nanofluidos pueden proveer mejores coeficientes globales de transmisión de calor y una mejor lubricación respecto a los de su fluido base.

Tzeng y col. [42] realizaron una serie de experiencias en un sistema de transmisión de potencia de un automóvil real dispersando nanopartículas de CuO y Al₂O₃ en el fluido de transmisión a utilizar. Estas experiencias se basaron en la medición de temperaturas en distintos puntos del sistema de transmisión de potencia para distintas velocidades de rotación del motor, simulando así las condiciones de un automóvil en funcionamiento. Como es esperable, a medida que el sistema gira a mayores velocidades, la temperatura del mismo irá aumentando, hasta llegar al punto en el que se generará un estrés térmico excesivo que dañará a sus componentes dejándolos totalmente inservibles. Los resultados obtenidos muestran que las mayores temperaturas fueron alcanzadas al utilizar el fluido de transmisión sin partículas suspendidas en el. Por otra parte, al utilizar el nanofluido de CuO como fluido de transmisión, se observaron las menores distribuciones de temperatura tanto a bajas como a altas velocidades de rotación del motor. Esto significa, que la implementación de este tipo de nanofluidos como fluido de transmisión generará un estrés térmico considerablemente menor en los componentes del sistema en cuestión con respecto al fluido de transmisión convencional, prolongando así la vida útil del mismo.

2.2.1.4- Refrigeración de transformadores

La creciente demanda de una mayor producción de electricidad requerirá de avances de la mayoría de los transformadores en algún punto del futuro cercano, representando un costo de millones de dólares en modernizaciones de los equipos. Sin embargo, si se aumentara la capacidad de transferencia de calor de los transformadores existentes, muchas de estas mejoras podrían no ser necesarias. Por ello, Xuan y Li [43] y Yu y col. [44] realizaron múltiples experimentos suspendiendo pequeñas cantidades de nanopartículas en los aceites utilizados por estos equipos, obteniendo aumentos significativos de las propiedades de transferencia de calor con respecto a las de dichos aceites sin partículas suspendidas. Este hallazgo no solo permite un aumento en el rendimiento de los transformadores existentes, sino también la posibilidad de disminuir las dimensiones de los próximos a fabricar.

2.2.1.5- Refrigeración de sistemas espaciales y nucleares

You y col. [45] y Vassallo y col. [46] descubrieron que los nanofluidos pueden duplicar o hasta triplicar el flujo crítico de calor (CHF por sus siglas en inglés) en procesos de ebullición en estanque. Como muchos dispositivos generadores de flujos de calor ultra altos tales como láseres de alta energía (muy utilizados en la industria espacial) y algunos componentes de reactores nucleares son refrigerados mediante este método, el hallazgo proveyó inmensas posibilidades para simplificar los requerimientos de refrigeración tanto en prácticas espaciales como nucleares. Por este motivo, muchos investigadores nucleares destacados, al enterarse del gran aumento del CHF mediante el uso de nanofluidos, se mostraron muy interesados en la utilización de los mismos en reactores nucleares comerciales y militares ya que dicho aumento permitiría una operación mucho más segura de los mismos.

2.2.1.6- Aplicaciones de defensa

Un gran número de sistemas y dispositivos militares tales como componentes de vehículos, radares y láseres requieren de la eliminación de altos flujos de calor, a niveles de los miles de W/cm^2 , resultando muy dificultoso su enfriamiento con fluidos convencionales de transferencia de calor. Por este motivo, los nanofluidos resultan una opción más que viable para poder suplir dichos requerimientos energéticos.

2.2.2- Aplicaciones tribológicas

Se ha demostrado que el agregado de nanopartículas a aceites y lubricantes (Que y col. [47], Li y col. [48]) no solo aumenta sus propiedades térmicas, sino también su poder lubricante, reduciendo la fricción y el desgaste de los componentes mecánicos del sistema en el que se utilicen.

2.2.3- Aplicaciones biomédicas

Los nanofluidos están siendo desarrollados para aplicaciones médicas, entre las cuales se destaca su uso en terapias oncológicas. Como es sabido, los métodos tradicionales de tratamiento para el cáncer presentan efectos adversos significativos. Con el fin de minimizarlos, surgió la idea de utilizar nanopartículas de hierro como vehículo de transporte de drogas o radiación, las cuales se las transportaría a través del torrente sanguíneo hacia la zona afectada mediante el uso de imanes sin dañar el tejido sano cercano. Además, los nanofluidos también podrían ser utilizados para producir altas temperaturas alrededor de tumores y matar células cancerígenas sin dañar las sanas cercanas (Jordan y col. [49]).

Por otra parte, los nanofluidos también podrían ser utilizados para aumentar la seguridad de cirugías. Esta aplicación consiste en enfriar alrededor de la región a operar reduciendo el riesgo de dañar algún órgano, y por lo tanto aumentando la posibilidad de supervivencia del paciente.

Anteriormente se mencionaron algunas de las miles posibles aplicaciones de los nanofluidos, que hasta el día siguen aumentando gracias a la constante investigación realizada sobre ellos en laboratorios de todas partes del mundo. Sin embargo, el desafío de hoy es desarrollar nuevas técnicas que permitan una producción rentable y en gran escala de nanofluidos, ya que su bajo nivel de producción actual es principal limitante para que los mismos puedan ser utilizados en aplicaciones comerciales. Por eso, se espera que en el futuro esto pueda lograrse mediante la mutua colaboración de industrias e investigadores.

2.3- MODELOS EMPLEADOS

2.3.1- Ecuación de ajuste de Redlich-Kister

Para ajustar los valores experimentales de densidad (ρ), se recurrió a la siguiente ecuación polinomial propuesta por Redlich y Kister [50]:

$$\rho = \rho_1\phi_1 + \rho_2\phi_2 + [\phi_1(1 - \phi_1)\sum_{i=1}^p A_i (2\phi_1 - 1)^i] \quad (2.1)$$

Donde ρ es la densidad de los nanofluidos estudiados, ϕ_1 es la fracción volumétrica de las nanopartículas utilizadas y ϕ_2 corresponde a la fracción volumétrica del fluido base. Por otro lado, A_i corresponde a los coeficientes de ajuste obtenidos por el método de mínimos cuadrados, siendo p la cantidad de dichos coeficientes.

La desviación estándar se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$DS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_{(exp)i} - M_{(calc)i})^2}{n-p} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

Donde n es el número de datos experimentales y p es el número de coeficientes obtenidos por análisis de desviación estándar.

2.3.2- Modelos para la conductividad térmica

El aumento anómalo de la conductividad térmica de los nanofluidos con respecto a su fluido base ha sido un tema de intenso debate desde el inicio de las investigaciones de este tipo de sistemas. Esto se debe principalmente a que dicho aumento es la característica más prometedora para las aplicaciones industriales prácticas. Sin embargo, a pesar de todo el dinero y esfuerzo que se ha destinado a la investigación de los nanofluidos, todavía se desconocen las causas que dan lugar a estos grandes incrementos de la conductividad. Gracias a esto, la controversia aun continúa, y periódicamente se publican nuevos modelos de base empírica tratando de describir la transmisión de calor a escala nanométrica en determinados sistemas heterogéneos. Sin embargo, el problema con estos modelos es que carecen de generalidad.

Entre todos los modelos que han sido publicados, 2 de los más destacados son los propuestos por Maxwell [1] y Turian y col. [51].

En el campo del modelado de la conductividad térmica, Maxwell fue el primero en proponer una ecuación para estimar la conductividad térmica de coloides compuestos por partículas esféricas sólidas suspendidas en un fluido, en las cual solo tiene en cuenta

las concentraciones en volumen de las partículas y las conductividades térmicas de las partículas y del fluido base. Otros modelos clásicos incluyen efectos de forma de partícula (Hamilton y Crosser [52; 53]), distribución de partículas (Cheng y Vachon [54]), e interacción partícula/partícula (Jeffrey [55]). Sin embargo, la mayoría de todos estos modelos predicen mejoras idénticas a bajas concentraciones de nanopartículas (menores al 1% en volumen) para los nanofluidos empleados en este trabajo. Además, en este estudio, se pretende emplear el modelo de Maxwell como uno representativo de todos los modelos clásicos.

Según Maxwell, la conductividad térmica de una suspensión homogénea puede ser predicha como:

$$\kappa_{Maxwell} = \frac{\kappa_p + 2\kappa_l + 2(\kappa_p - \kappa_l)\phi}{\kappa_p + 2\kappa_l - (\kappa_p - \kappa_l)\phi} \kappa_l \quad (2.3)$$

Donde κ_p es la conductividad térmica de las partículas dispersadas, κ_l es la conductividad térmica del fluido base y ϕ es la fracción en volumen de las nanopartículas en la suspensión.

Como se puede observar, la ecuación 2.3, al igual que todas aquellas obtenidas a partir de modelos clásicos para la determinación de la conductividad térmica de suspensiones, no tiene en cuenta el tamaño de las partículas suspendidas, lo que conduciría a resultados distintos a los experimentales.

Por otro lado, Turian y col. [51], trabajando con suspensiones de alúmina, sílica, carbono y otras partículas, observaron que cuando la relación $\kappa_p/\kappa_l \sim 1$, el modelo de Maxwell daba muy buenas predicciones de mejora en la conductividad térmica de estos sistemas con respecto a sus fluidos base, pero, a medida que esta relación aumentaba, las predicciones se iban tornando cada vez más pobres. Debido a esta gran discrepancia de los valores experimentales con respecto a los propuestos por Maxwell, Turian y col. propusieron una nueva expresión, la cual permite obtener mejores estimaciones de la conductividad térmica para dispersiones sólido/líquido en las cuales $\kappa_p/\kappa_l > 4$:

$$\kappa_{eff} = \kappa_p^\phi \kappa_l^{1-\phi} \quad (2.4)$$

Donde, a su vez κ_p puede ser determinada del siguiente modo:

$$\kappa_p = \kappa_0(1 - e^{-Ad}) \quad (2.5)$$

En la ecuación 2.5, d es el diámetro de las partículas, κ_0 es la conductividad del sólido a la temperatura de interés y A es una constante empírica del orden de los $0,01 \text{ nm}^{-1}$. Como puede observarse, esta expresión, a diferencia de la de Maxwell, contempla el tamaño de las partículas suspendidas, por lo que es de esperarse obtener mejores resultados que los dados por la ecuación 2.3.

Las reglas de mezclado logarítmicas como las dadas por la ecuación 2.4, han sido utilizadas en reiteradas ocasiones para describir de forma satisfactoria muchas de las propiedades de los materiales compuestos reforzados con partículas. Tales reglas tratan las propiedades de las inclusiones y las matrices separadamente con el fin de obtener la propiedad efectiva del compuesto, κ_{eff} .

2.3.3- Intercambiador de calor

Existen distintos tipos de intercambiadores de calor, entre los cuales se destacan los de doble tubo, de casco y tubos y de placas. Sin embargo, en la industria química de procesos, el intercambiador de calor más empleado es el de casco y tubos. Por este motivo, en el presente trabajo nos limitaremos únicamente a la explicación y posterior aplicación de este tipo de intercambiador de calor sin cambio de fase.

2.3.3.1- Descripción del equipo

La idea básica de un intercambiador de calor de casco y tubos es la de colocar un gran número de pequeños tubos con una determinada disposición espacial (llamada arreglo, que es generalmente en forma de cuadro o triángulo) dentro de otro de mucho mayor diámetro llamado coraza, carcasa o envolvente. La carcasa está cerrada en sus extremos por placas llamadas placas portatubos. Las mismas suelen ser de considerable espesor, y están atravesadas por los tubos internos de intercambio. Es importante que la unión entre los tubos y estas placas sea hermética, para de este modo poder impedir que el fluido que se encuentra en uno de los lados de la placa pueda pasar al otro. Por otro lado, la placa portatubos se encuentra abulonada a los cabezales (los cuales pueden ser de variados diseños según los requerimientos del caso), que actúan como colectores y distribuidores del fluido que circula por los tubos.

Para poder mejorar los coeficientes de transferencia de calor en estos equipos, se suele recurrir al uso de baffles o deflectores de flujo en la carcasa (Figura 2.2), que aumentan la velocidad y turbulencia del fluido que circula por allí y orientan su

movimiento en dirección perpendicular al eje de los tubos. Existen distintos tipos de baffles o deflectores de flujo, pero los más utilizados son los segmentados. Estos consisten en placas circulares, de casi el mismo diámetro que la carcasa, a los cuales se les efectúa un corte horizontal o vertical (generalmente corresponde a una segmentación del 25%).

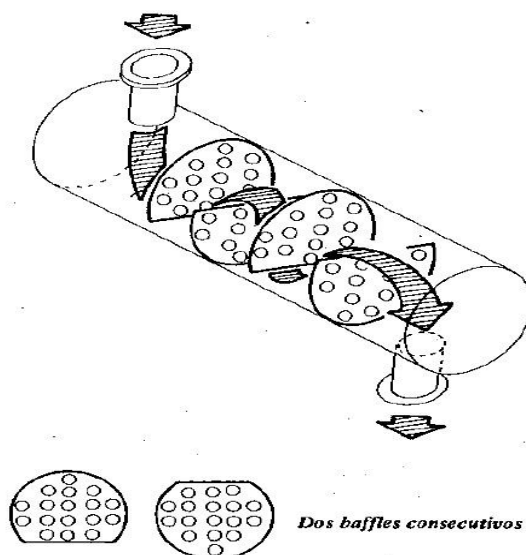


Figura 2.2 Disposición de baffles segmentados en la carcasa de un equipo [56].

Por otro lado, otra forma de mejorar los coeficientes de transferencia de calor en este tipo de intercambiador es colocando una placa de partición de pasos en el cabezal de entrada (Figura 2.3). De este modo, el fluido que circula por los tubos recorrerá dos veces la longitud del equipo, y el área de flujo del mismo será la mitad que en el caso de que no tuviera la placa de partición de pasos, aumentando así la velocidad y turbulencia de dicho fluido. Por este motivo, a estos equipos se los conoce como intercambiadores de calor de 2 pasos por los tubos. Siguiendo la misma metodología, también se pueden aumentar aún más los pasos por los tubos colocando más placas de partición, obteniendo equipos de 4, 6, 8, etc. pasos por los tubos.

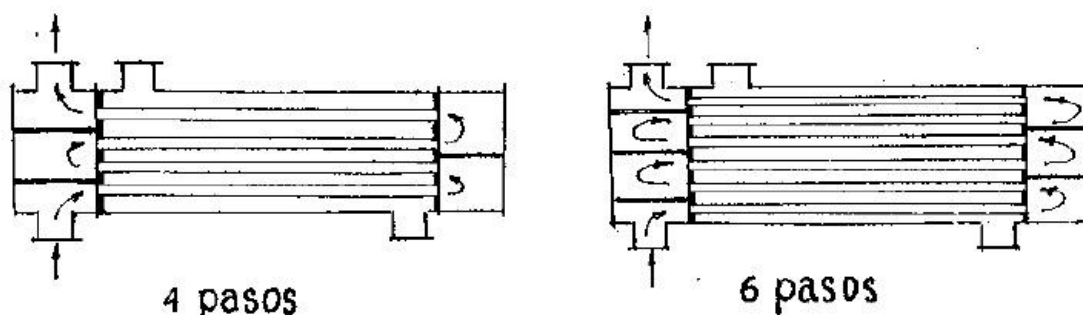


Figura 2.3 Equipos de 4 y 6 pasos por los tubos [56].

Así como se puede aumentar el número de pasos por los tubos, también es posible aumentar el número de pasos por carcasa. Para ello, es necesario la colocación de baffles o deflectores de flujo longitudinales (Figura 2.4). Estas placas cuyo ancho coincide con el diámetro de la carcasa y cuya longitud es algo menor a la de los tubos, permiten que el fluido que circula por carcasa recorra dos veces (o más en caso de colocar más de un baffle) el largo de los tubos, aumentando así su velocidad y turbulencia, y por lo tanto mejorando la transferencia de calor.

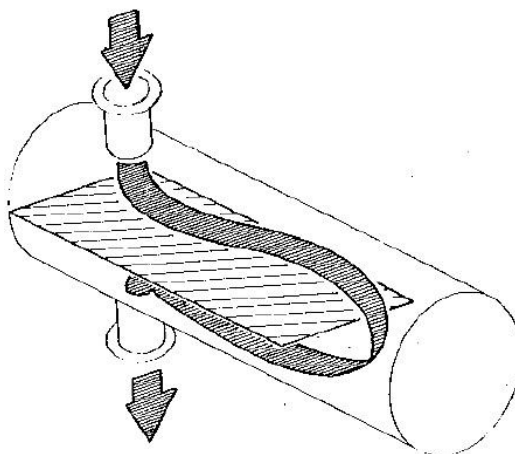


Figura 2.4 Baffle longitudinal en intercambiador con 2 pasos por carcasa [56].

Para finalizar la descripción de los intercambiadores de calor de casco y tubos, resulta importante resaltar que el aumento de los coeficientes de transferencia de calor colocando baffles o placas de partición de pasos en los equipos, implica un aumento en la pérdida de carga, ya sea del fluido que circula por los tubos como del que lo hace por la carcasa. Por lo tanto, a la hora de diseñar uno de estos intercambiadores de calor, es necesario tener en cuenta estos dos aspectos fundamentales, para luego poder combinarlos de la forma más eficiente posible.

2.3.3.2- Coeficiente global de transmisión de calor

La ecuación básica de todo intercambiador de calor es la siguiente:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

Donde Q es el calor transferido, U el coeficiente global de transmisión de calor, A es el área de transferencia y ΔT la diferencia de temperaturas entre los dos fluidos de intercambio (fuerza impulsora de la transferencia de calor). Por lo tanto, el objetivo

básico del diseño de un equipo será maximizar U de modo de reducir A para un valor fijado de Q . Esto permitiría un ahorro tanto económico como espacial.

Por su parte, el coeficiente global de transmisión de calor, U , está definida por la siguiente expresión:

$$U = \left(\frac{1}{h_{i0}} + \frac{1}{h_o} + R_f \right)^{-1} \quad (2.7)$$

Siendo h_{i0} y h_o los coeficientes peliculares del fluido interno y externo respectivamente, y R_f la resistencia o factor de ensuciamiento total del equipo producida por incrustaciones o basura depositada sobre el interior y exterior de los tubos. Además, es importante mencionar que para la obtención de dicha ecuación se despreció la resistencia térmica por parte de los tubos, ya que por lo general estos son metálicos y presentan un alto valor de conductividad térmica.

Por otro lado, como se puede intuir, el valor de ΔT irá variando a lo largo del equipo, por lo que para poder diseñar o simular el funcionamiento de uno, deberíamos tener que resolver la expresión diferenciada de la ecuación 2.6. Sin embargo, para simplificar los cálculos, se utiliza una diferencia de temperaturas media logarítmica (ΔT_{ML}), obtenidas mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}} \quad (2.8)$$

Para una configuración de flujos en contracorriente, y:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}} \quad (2.9)$$

Para una configuración de flujo en paralelo.

En ambos casos, T_1 y t_1 son las temperaturas de entrada al equipo del fluido a enfriar (fluido caliente) y del fluido a calentar (fluido frío) respectivamente, y T_2 y t_2 sus temperaturas de salida del equipo. Es importante resaltar que estas expresiones sólo serán válidas para valores de U constantes, lo que implica que las propiedades físicas de los fluidos no varíen con la temperatura.

Por otro lado, es importante mencionar que, al tratarse de transferencia de calor sensible, también es válida la siguiente igualdad, permitiendo obtener así el calor transferido y el caudal másico o temperatura de salida de alguno de los fluidos:

$$Q = W_h \cdot c_h \cdot (T_1 - T_2) = W_c \cdot c_c \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.10)$$

Donde los subíndices h y c hacen referencia al fluido caliente y frío respectivamente, los W son los caudales másicos y los c sus calores específicos.

A pesar de que dentro de la carcasa el fluido no circula en una única dirección (debido a los baffles), es válido suponer una de las configuraciones de flujo anteriormente mencionadas si consideramos como hipótesis de diseño que en cada sección del equipo la temperatura es única para cada fluido. Esto se cumpliría si los coeficientes peliculares son iguales para todos los tubos y el fluido de la carcasa se encuentra uniformemente mezclado.

Sin embargo, para intercambiadores con más de un paso por los tubos, ya no se puede hablar de una única temperatura para cada fluido a lo largo de una sección transversal, por lo que las expresiones mencionadas previamente para las diferencias de temperaturas no serían válidas. Por lo tanto, para resolver este inconveniente, aparece un factor F_t , llamado factor de corrección de la diferencia de temperaturas, de modo tal que:

$$\Delta T = \Delta T_{ML_{cc}} \cdot F_t \quad (2.11)$$

Donde el subíndice cc hace referencia a una configuración de flujo en contracorriente.

Este factor de corrección es siempre menor a la unidad, depende de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos y del número de pasos por los tubos y carcasa y generalmente se lo obtiene gráficamente.

Habiendo mencionado esto, sólo resta el cálculo de los coeficientes peliculares y la pérdida de carga, tanto en los tubos como en carcasa.

2.3.3.3- Cálculo de parámetros en los tubos

El coeficiente pelicular interno, h_{io} , se podrá obtener a partir de un proceso iterativo utilizando la siguiente correlación válida sólo para régimen turbulento ($Re > 10000$):

$$Nu = \frac{h_{i0} \cdot D_i}{\kappa} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (2.12)$$

O la siguiente para régimen laminar ($Re > 2100$):

$$Nu = \frac{h_{i0} \cdot D_i}{\kappa} = 1,86 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D_i}{L} \right)^{0,33} \cdot (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (2.13)$$

Donde Nu es el número de Nusselt, L es la longitud de los tubos, D_i su diámetro interno y η/η_w la relación de viscosidades del fluido a la temperatura media en el tubo y a la temperatura media en la pared (esta última obtenida a partir de un balance energético conociendo los valores de h_o y h_{i0}). A su vez, el número de Prandtl (Pr) y el de Reynolds (Re) se definen del siguiente modo:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\kappa} \quad (2.14)$$

$$Re = \frac{D_i \cdot G_t}{\eta} \quad (2.15)$$

Siendo G_t la densidad de flujo másico en los tubos, definida como:

$$G_t = \frac{W}{a_t} = \frac{W \cdot 4 \cdot n}{N \cdot \pi \cdot D_i^2} \quad (2.16)$$

Donde a_t es el área de flujo en los tubos, n es el número de pasos por los tubos y N el número total de tubos.

Es importante aclarar que no es conveniente la operación en régimen transitorio ($2100 < Re < 10000$), ya que las correlaciones existentes para dicha situación resultan muy poco exactas.

En cuanto al cálculo de la pérdida de carga, no sólo habrá que tener en cuenta la pérdida de carga en los tubos, sino también dentro de los cabezales del equipo, por lo que la caída de presión total será la suma de estas últimas.

Una expresión válida para la pérdida de carga de un fluido que circula en régimen turbulento por los tubos podría ser la siguiente:

$$\Delta P_t = 4 \cdot f \cdot n \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \frac{G_t^2}{2 \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{-a} \quad (2.17)$$

Donde f el factor de fricción (generalmente obtenido gráficamente) y a es una constante que tomará un valor de -0,14 para régimen turbulento y de -0,25 para laminar.

Por otra parte, la pérdida de carga en los cabezales podrá ser determinada a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_r = 4 \cdot n \cdot \frac{G_t^2}{2 \cdot \rho} \quad (2.18)$$

Es importante mencionar que no es recomendable que la pérdida de carga total sea mayor a 1 bar, ya que el costo de bombeo requerido sería considerablemente alto.

2.3.3.4- Cálculo de parámetros en la carcasa

Dentro de la carcasa, la velocidad del fluido está sometida a continuas fluctuaciones debido a la reducción de área cuando el fluido atraviesa una hilera de tubos con respecto a cuando este se encuentra en el espacio entre 2 hileras sucesivas. Por otra parte, el ancho de la sección de flujo transversal varía continuamente desde cero en la parte superior y en el fondo hasta un máximo en el centro de la carcasa, por lo que no se le puede atribuir un área de flujo única.

Con el fin de poder obtener una estimación preliminar del diseño de un intercambiador de calor de casco y tubos, Kern [57] propuso considerar un área de flujo en correspondencia con la hilera hipotética de tubos que pasa por el centro de la carcasa.

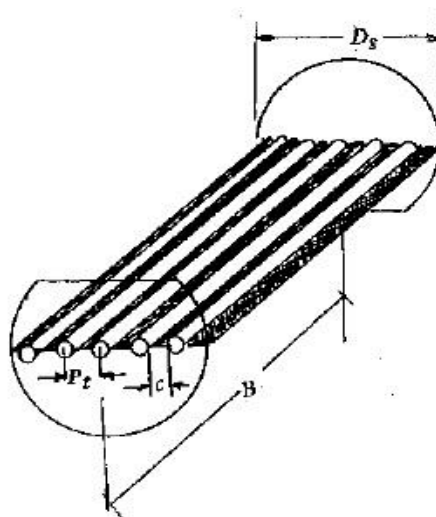


Figura 2.5 Dimensiones de interés para el modelo de Kern [56].

Teniendo en cuenta el modelo propuesto por Kern, si llamamos P_t a la separación entre los ejes de los tubos y c al claro de distancia entre 2 tubos (Figura 2.5), tendremos que el número de claros estará dado por la relación del diámetro de la carcasa (D_s) y el

Pt. Por otro lado, puesto que el producto entre c y la separación entre baffles (B) es el área de cada uno de estos claros, el área de flujo para la carcasa estará dada por:

$$a_s = \frac{D_s \cdot c \cdot B}{Pt} \quad (2.19)$$

Esta expresión, nos permitirá definir la densidad de flujo másico para el fluido de la carcasa como:

$$G_s = W/a_s \quad (2.20)$$

Por otro lado, Kern [57] también propone el uso de un diámetro equivalente para la carcasa definido como:

$$D_e = \frac{4 \cdot \left(Pt^2 - \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \right)}{\pi \cdot D_s} \quad (2.21)$$

Para el caso de un arreglo en forma de cuadro y:

$$D_e = \frac{4 \cdot \left(\frac{1}{2} Pt \cdot 0,86 \cdot Pt - \frac{\frac{1}{2} \pi \cdot D_s^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \pi \cdot D_s} \quad (2.22)$$

Para un arreglo triangular.

Finalmente, el cálculo del coeficiente pelicular h_o puede ser obtenido a partir de la siguiente correlación:

$$Nu = \frac{h_o \cdot D_e}{\kappa} = 0,36 \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{0,33} \cdot (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (2.23)$$

Cabe aclarar que ésta expresión resulta válida sólo para carcasas con baffles segmentados un 25% y que el cálculo del Re es análogo al de la ecuación 2.5, sustituyendo a D_i y G_t por D_e y G_s respectivamente.

Con respecto a la pérdida de carga, Kern [57] sugiere que es proporcional al diámetro de la carcasa (D_s) y al número de veces que el fluido cruza el haz de tubos entre los baffles. Por lo tanto, si N_B es el número de baffles, entonces, este número es N_B+1 .

Finalmente, la expresión para obtener la pérdida de carga en la coraza estará dada por:

$$\Delta P_s = f \cdot \frac{(N_B+1) \cdot D_s}{D_e} \cdot \frac{G_s^2}{2 \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} \quad (2.24)$$

En este caso, al igual que para el lado de los tubos, no es recomendable una caída de presión mayor a 1 bar.

2.3.4- Ecuaciones para la viscosidad y calor específico

Previamente, se explicó el método de cálculo para el diseño de un intercambiador de calor de casco y tubos. Sin embargo, resulta muy difícil obtener las propiedades físicas de los nanofluidos en caso de no haberlas medido con anterioridad. Por lo tanto, para poder aproximarlas se debe recurrir a correlaciones de tipo empíricas.

Para el caso de la conductividad térmica (κ), se podría recurrir a las ecuaciones propuestas por Maxwell o Turían (ecuaciones 2.3 y 2.4 respectivamente), y para la densidad (ρ) a algún ajuste tal como el de Redlich-Kister (ecuación 2.1).

Por otra parte, la viscosidad (η) y el calor específico (c_p) de un nanofluido podrían obtenerse a partir de las siguientes ecuaciones [58]:

$$\eta_{nf} = \frac{1}{(1-\phi)^{2,5}} \cdot \eta_f \quad (2.25)$$

Y

$$c_{p_{nf}} = \frac{\phi \cdot (\rho \cdot c_p)_n + (1-\phi) \cdot (\rho \cdot c_p)_f}{\phi \cdot \rho_n + (1-\phi) \cdot \rho_f} \quad (2.26)$$

Donde, el subíndice n hace referencia a las nanopartículas, el f al fluido base y en nf al nanofluido correspondiente.

CAPÍTULO 3

PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Sustancias utilizadas

3.2 Técnicas y dispositivos experimentales

3.1- SUSTANCIAS UTILIZADAS

En la tabla 3.1 se indican las sustancias utilizadas en el presente trabajo, la firma comercial que las suministró y la pureza con las que fueron adquiridas y utilizadas.

Tabla 3.1 Características de las sustancias utilizadas.

Componente	Casa comercial	Especificación
Etilenglicol	Dorwil	98 % pureza
Al ₂ O ₃	Sigma-Aldrich	< 50 nm. Fase γ
Bi ₂ O ₃	Sigma-Aldrich	Entre 90 y 210 nm. Fase β

3.2- TÉCNICAS Y DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

3.2.1- Preparación por pesada de las mezclas

Las pesadas se realizaron en una probeta de 25 ml, utilizando una balanza electrónica AND modelo HR-200 (figura 3.1). Las características de la balanza se detallan a continuación:

- Capacidad: 210 g.
- Resolución: 0,0001 g.
- Tamaño de plato: 85 mm de diámetro.
- Dimensiones físicas: 21,3 cm de ancho, 31,9 cm ancho, y 30,1 cm de alto.
- Otras características: Cabina antiviento, con dos puertas laterales y una superior; ajustador de nivel; pantalla fluorescente; intercambiador de unidades.

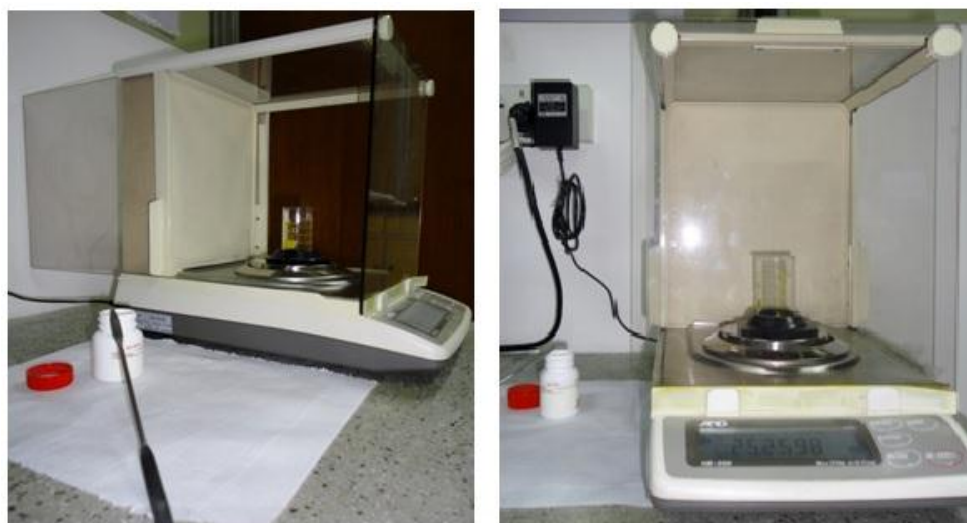


Figura 3.1 Balanza electrónica AND modelo HR-200.

Para la preparación de las muestras, primero se realizó un cálculo para determinar la masa necesaria de nanopartículas a pesar para lograr una concentración de nanofluido determinada, para un volumen de muestra de aproximadamente 6 cm³ para la medición de la densidad y de 14 cm³ para la de la conductividad térmica. El volumen de etilenglicol se midió utilizando micropipetas (*Automatic Pipette, ISO: 13485:2003*). Las concentraciones de nanofluidos a preparar variaron desde el 1% hasta el 15% wt de nanopartículas.

Cabe aclarar que la pesada de las nanopartículas debía ser efectuada de forma muy cuidadosa con el fin de obtener la masa exacta de partículas requerida.

En la Tabla 3.2 se muestra las masas y volúmenes de sustancias utilizadas para la obtención de las muestras.

Tabla 3.2 Masas y volúmenes de sustancias utilizadas en este trabajo.

Propiedad a determinar	Nanofluido	% wt	Masa nanopartículas / g	Volumen EG / cm ³
ρ	Al ₂ O ₃ /EG	1,00	0,0673	6,00
		1,75	0,1188	6,00
		2,50	0,1566	5,50
		3,00	0,1889	5,50
		3,50	0,2219	5,50
	Bi ₂ O ₃ /EG	1,00	0,0674	6,00
		1,75	0,1189	6,00
		2,50	0,1711	6,00
		3,50	0,2422	6,00
		5,00	0,3515	6,00
κ	Al ₂ O ₃ /EG	5,00	0,8200	14,00
		10,00	1,7302	14,00
		15,00	2,5451	13,00
	Bi ₂ O ₃ /EG	1,00	0,1574	14,00
		3,00	0,4816	14,00
		5,00	0,8185	14,00

Nótese que en algunas ocasiones la cantidad de nanopartículas pesada para las mismas concentraciones varía levemente. Esto se debe al cambio de la densidad del EG con la temperatura del ambiente (temperatura de trabajo).

3.2.2- Caracterización de las nanopartículas

La morfología de las nanopartículas utilizadas fue caracterizada mediante microscopía electrónica de transmisión (Transmission Electronic Microscope, TEM), utilizando un microscopio *JEOL JEM-101 FEG* (100 kV), ubicado en el Laboratorio de Microscopía del Centro Científico Tecnológico de Bahía Blanca.



Figura 3.2 Microscopio de transmisión electrónica, TEM.

A partir de la información obtenida mediante esta técnica, también se analizó la distribución de tamaño de las nanopartículas utilizando el programa *Image Tools 3*, un programa de edición de imágenes.

3.2.3- Homogeneización de las mezclas

Una vez preparadas las muestras de las nanopartículas y el etilenglicol, se procedió a homogeneizarlas. Para ello, se utilizó un sonicador *Bandelin Sonoplus HD 2200*, con punta de *Titanio MS 72*, con capacidad para realizar ultrasonificación de volúmenes de 2 a 30 ml mediante un generador de altas frecuencias *GM 2200*, con una potencia de salida de 200 W (Figura 3.3). Como se mencionó previamente, la estabilidad de las suspensiones es muy importante, y dado que en la literatura no existen directrices claras sobre el método más fiable para lograr esta estabilidad, ni los tiempos recomendados para aplicaciones de ultrasonido, se realizaron varias pruebas con el fin de obtener una mezcla estable en el tiempo.

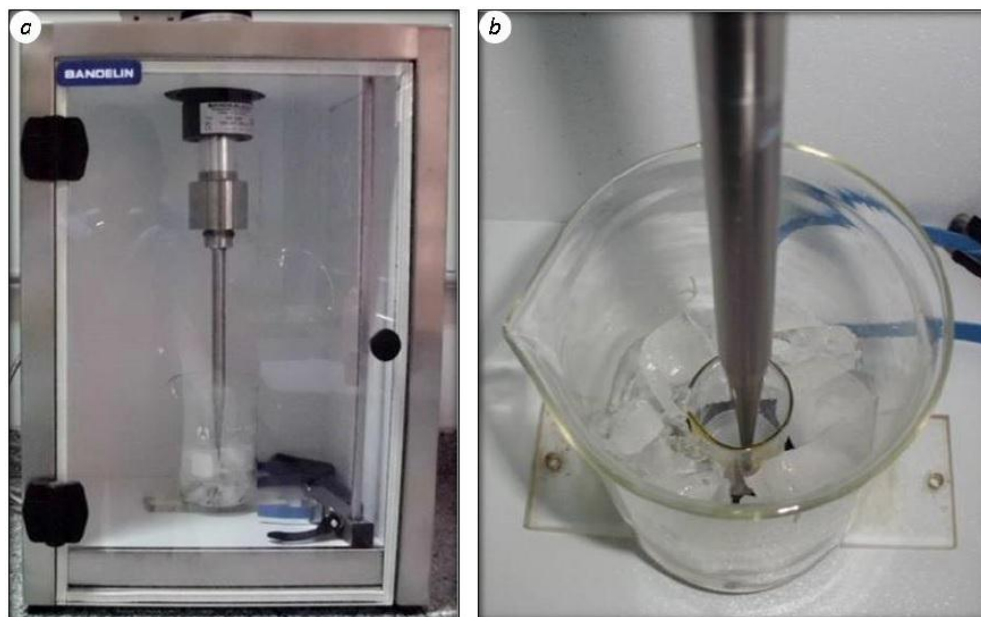


Figura 3.3 (a) Sonicador Bandelin Sonoplus. (b) Punta de titanio y muestra de nanofluido.

Considerando los distintos volúmenes y concentraciones de nanofluidos requeridos para la medición de sus propiedades y los distintos tamaños de las nanopartículas utilizadas, se emplearon las siguientes metodologías de sonicación:

- Nanofluidos de Al_2O_3 y Bi_2O_3 destinados a la medición de su densidad: 4 períodos de 2 minutos cada uno.
- Nanofluidos de Al_2O_3 destinados a la medición de su conductividad: 4 períodos de 4 minutos cada uno.
- Nanofluidos de Bi_2O_3 destinados a la medición de su conductividad: 6 períodos de 4 minutos cada uno.

Cabe destacar que en todos los casos se empleó un 20% de la potencia del equipo, dejando reposar a la mezcla 1 minuto entre cada período de sonicación.

3.2.4- Determinación de la estabilidad de los nanofluidos

La técnica empleada para determinar la estabilidad de las muestras es la Espectrofotometría Ultravioleta – Visible (UV-Vis), específicamente utilizando un espectrofotómetro *Perkin Elmer Lambda 25*, equipado con dos portacubetas (Figura 3.4).

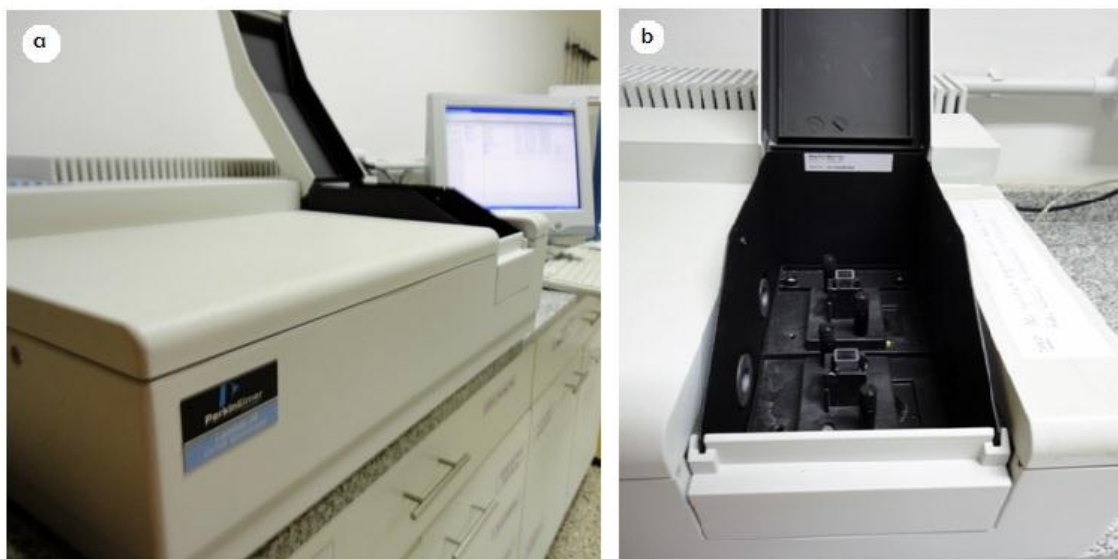


Figura 3.4 (a) Espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 25. (b) Portacubetas múltiple.

La técnica de análisis empleada para la determinación de la estabilidad de los nanofluidos consta de dos etapas. La primera consiste en realizar un barrido de todo el rango de longitudes de onda posibles, para luego determinar el valor con el cual el nanofluido presenta una mayor absorbancia. Una vez determinada esta de longitud de onda, se procede a la segunda etapa, la cual consiste en medir la absorbancia de la muestra, a la longitud de onda previamente determinada, durante un largo período de tiempo. De este modo, si el valor de la absorbancia se mantiene constante con el tiempo, podremos asegurar la estabilidad del nanofluido en cuestión; y si esta disminuye, significa que hubo sedimentación de nanopartículas.

El uso de esta técnica aporta rigor a la caracterización de la estabilidad y permite asegurar la reproducibilidad de las muestras empleadas.

3.2.5- Determinación experimental de la densidad

La densidad es una propiedad física que puede ser determinada a partir de diversos métodos (Handa y Benson [59]), entre los cuales podemos mencionar los *picnométricos* y los de *oscilación mecánica*, destacándose estos últimos por su alta precisión.

Un *picnómetro* es un dispositivo de medición de volumen conocido que permite determinar la densidad de una sustancia a una determinada temperatura mediante gravimetría. Para poder obtener resultados precisos empleando este tipo de instrumentos es necesario ser muy meticuloso y contar con balanzas de alta precisión.

Por otro lado, entre los instrumentos de oscilación mecánica más conocidos y de mayor precisión se encuentran los densímetros de *tubo vibrante*. Estos dispositivos constan de un tubo hueco, ya sea metálico o de vidrio, que vibra a una determinada frecuencia. Cuando se lo llena con una muestra, su frecuencia de vibración se ve alterada, vibrando a frecuencias menores a medida que el fluido dentro del tubo sea más pesado. Dicha frecuencia se mide, se la compara con la de dos fluidos de densidad conocida (usualmente aire y agua), y finalmente se la transforma en densidad. Por lo tanto, para poder obtener resultados satisfactorios, previamente se deberá calibrar al dispositivo con los ya mencionados fluidos de densidad conocida.

El equipo utilizado para la determinación de la densidad fue un densímetro de tubo vibrante *Anton Paar DMA-HP*, el cual cuenta con una celda de acero inoxidable en forma de U, que junto a un oscilador de referencia, permiten determinar la densidad y la velocidad del sonido en un amplio rango de viscosidades y temperaturas. Al no contar con pantalla propia, para poder visualizar los resultados obtenidos, se tuvo que conectar este equipo a otro que si tuviera, un densímetro *Anton Paar DSA-5000* (Figura 3.5), seleccionando en este último un método de medición denominado “*HP Extern*” de entre otros 9 posibles.



Figura 3.5 Analizador de densidad y período de oscilación DMA-HP, conectado a un analizador Anton Paar DSA-5000.

El equipo permite medir la densidad de muestras en un rango de 0 a 3 g/cm³, con una precisión de 1x10⁻⁶ g/cm³; y cuenta con un sistema de control de la temperatura de

la celda de medición consistente de un termostato interno y dos termómetros de platino Pt-100 que proveen una alta precisión en la medición de la misma.

Una vez seleccionado el método de medición, se introduce la muestra en la celda de medición mediante una jeringa, verificando previamente que no se hayan formado burbujas en su interior. Una vez que la medición finaliza, el equipo produce una señal acústica y muestra los resultados en la pantalla previamente mencionada. Cabe destacar que también existe la posibilidad de conectar el densímetro a una computadora, pudiendo así ver, imprimir, y almacenar los resultados en ella.

La limpieza del equipo se realizó con agua destilada y acetona, secando el interior del tubo con una bomba de aire que disponía el mismo equipo.

Además, previo a la medición de la densidad de las muestras se calibró al densímetro. Para ello, se necesitaba de dos fluidos de densidad conocida a las temperaturas de interés (20, 25, 30, 40 y 50 °C), que en este caso se trataron de aire seco y agua bidestilada y desgasificada.

El densímetro utilizado determina la densidad (ρ) a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = KA(Q^2) - KB \quad (3.1)$$

Donde KA y KB son constantes del equipo, y Q es el cociente entre el período de oscilación del tubo en U y el del oscilador de referencia.

3.2.6- Determinación experimental de la conductividad térmica

La determinación de la conductividad térmica de una sustancia es una operación compleja, y a pesar de que existen diversas técnicas evaluadas en la literatura, las elevadas incertidumbres asociadas a todas ellas suponen una limitación muy importante a su correcta determinación.

Existen 2 formas de medir de la conductividad térmica de los líquidos: en estado estacionario y en estado transitorio. La medición en estado estacionario presentan varias desventajas, entre las cuales podemos destacar la imposibilidad de cuantificar las pérdidas de calor y la posible existencia de convección natural, lo que se traduce en la medición de valores de conductividad mayores a los que realmente son. Por esta razón,

para medir conductividad térmica con mayor precisión resulta conveniente hacerlo en estado transitorio.

Entre los diversos métodos para la determinación de la conductividad térmica, dos de los más empleados son el de la *temperatura oscilante* y el del *hilo caliente*, explicados brevemente a continuación.

En el método de la temperatura oscilante el principio de medición de la conductividad térmica se basa en la propagación de una temperatura oscilante dentro de un volumen líquido de forma cilíndrica. Este método no solo se utiliza para determinar la conductividad térmica de un líquido, sino también su difusividad térmica. La determinación de estos valores se lleva a cabo mediante la utilización de la ecuación de la energía para la convección:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T \quad (3.2)$$

Por otra parte, el método del hilo caliente transitorio se trata de un método en el cual se emplea un delgado alambre metálico tanto como fuente de calor lineal como de sensor de temperatura. Una vez que el alambre se encuentra rodeado por el líquido al cual se desea medirle su conductividad, se lo calienta bruscamente mediante una corriente de calor que se hace circular a través de él. El experimento tiene una duración máxima de 2 a 8 segundos, y a medida que los mismos transcurren, el alambre irá aumentando su temperatura (razón por la cual el método se denomina transitorio). Por ello, cuanto mayor sea la conductividad térmica del líquido circundante, menor será el aumento de temperatura del alambre.

Este método fue sugerido por primera vez en 1931 para medir la conductividad térmica absoluta de los fluidos, y desde entonces muchos autores han contribuido para mejorarlo, haciéndolo más preciso. Con el desarrollo de instrumentación electrónica moderna y el uso de bases teóricas apropiadas, este método ha evolucionado enormemente en los últimos tiempos, transformándose en una de las técnicas más utilizadas en la determinación de la conductividad térmica de fluidos, incluyendo a los nanofluidos (Murshed y col. [60], y Nagasaka y Nagashima [61]). Esto se debe, principalmente a su sencillo diseño conceptual y a la corta duración del experimento, lo que evita el fenómeno de convección natural, y por lo tanto permite obtener resultados más precisos que mediante otros métodos.

La determinación de la conductividad se determina mediante la resolución de la Ley de Fourier para conducción de calor transitoria radial (en una dimensión) con una fuente de calor lineal, axial al dominio cilíndrico del recipiente en el cual se lleva a cabo la medición.

La ecuación diferencial de conducción de calor en coordenadas cartesianas es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

Carslaw y Jaeger [62] presentaron una solución para esta ecuación diferencial, de la cual es posible obtener la expresión de la distribución de temperaturas para una fuente lineal de calor. Para ello, se debe integrar la Ley de Fourier a lo largo de toda la longitud del alambre (considerada infinita), dando como resultado la siguiente ecuación:

$$T = \frac{q}{4\pi\kappa} \ln \frac{4\kappa t}{r^2 \rho c_p} - \frac{\gamma q}{4\pi\kappa} \quad (3.4)$$

Donde q es el calor liberado por unidad de tiempo y por unidad de longitud de la fuente lineal en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ y κ es la conductividad térmica del líquido en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Si las temperaturas de la fuente de calor a los tiempos t_1 y t_2 son T_1 y T_2 respectivamente, luego, colocándolas en la ecuación 3.4, finalmente podremos obtener la expresión de la conductividad térmica del líquido en cuestión:

$$\kappa = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (3.5)$$

En el presente trabajo, los datos de la conductividad térmica fueron obtenidos utilizando el analizador de propiedades térmicas *Decagon devices KD2 Pro* (Figura 3.6). Este dispositivo cumple las normas de la *ASTM D5334* y las regulaciones *IEEE 442-1981*, y su principio de funcionamiento está basado en el método del hilo caliente, utilizado con éxito por varios autores (Timofeeva y col. [63]; Mintsá y col. [64]; Wen y Ding [65]; Nieto de Castro y col. [66]). En particular, este equipo emplea una variante de dicho método, una versión corregida por Carslaw y Jaeger [67] para una fuente de calor infinita con una salida de calor constante y masa cero en medio infinito.

El dispositivo de medición básicamente está comprendido por una unidad de lectura y un sensor de aguja simple (*KS-I*) que se introduce en la muestra del fluido a medir su conductividad. Es importante que la sonda térmica (de 1,3 mm de diámetro y 60 mm de

largo), compuesta por un elemento de calentamiento y una termorresistencia, sea insertada verticalmente en la muestra y lo más alejada posible de las paredes del recipiente que la contiene, de modo tal de minimizar la posibilidad de inducir convección. Una vez dada la orden de medición, el dispositivo tarda 90 segundos en brindar un valor de conductividad. Los primeros 30 son empleados para asegurar la estabilidad de la temperatura, mientras que en los 60 restantes la sonda es calentada utilizando una intensidad de corriente controlada. Durante todo este proceso, la temperatura es medida por la termorresistencia a medida que un microprocesador almacena los datos obtenidos. Al final de la lectura, la conductividad térmica de la muestra es computada, utilizando para su determinación, la diferencia de temperatura de la sonda y el tiempo de medición de la misma (el cual no incluye los primeros 30 segundos).

El *KD2 Pro* es capaz de brindar la conductividad térmica de distintas sustancias en un rango de temperaturas de 0 a 50 °C, mientras que el sensor utilizado (*KS-1*), permite su medición en un rango que va desde los -50 hasta los 150 °C. Por otro lado, dicho sensor permite determinar valores tanto de conductividad como de resistividad térmica, en un rango de 0,02 a 2,00 W.m⁻¹.K⁻¹, con una precisión de 0,01 W.m⁻¹.K⁻¹ y un error no mayor al 5% para el caso de la conductividad.



Figura 3.6 Conductímetro KD2 Pro.

En el presente trabajo la muestra se colocó en un tubo de plástico, se lo selló y sumergió en un baño de agua con temperatura controlada mediante un termostato LAUDA (Figura 3.7). Una vez que alcanzada la temperatura deseada, se esperaron 15 minutos adicionales con el fin de garantizar el equilibrio térmico completo.



Figura 3.7 Sistema de medición de conductividad térmica.

Cabe mencionar que en repetidas ocasiones se aseguró el correcto funcionamiento del equipo midiendo la conductividad térmica de una muestra de glicerina brindada por el proveedor. En todos los casos, los valores obtenidos coincidieron con el otorgado por el fabricante.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- 4.1 Caracterización de las nanopartículas**
- 4.2 Propiedades de las sustancias puras**
- 4.3 Propiedades de los nanofluidos**
- 4.4 Aplicabilidad en sistema de intercambio térmico**

En este trabajo se midieron las densidades y conductividades térmicas de sustancias puras y nanofluidos en amplio rango de composiciones a las temperaturas de 20, 25, 30, 40 y 50 °C a presión atmosférica. Las propiedades medidas se utilizaron en el cálculo de un intercambiador de calor de casco y tubos, necesario para una aplicación industrial específica. Previamente, se analizaron en seco las nanopartículas utilizadas, para obtener información acerca de la forma y el tamaño de las mismas y se realizó un análisis de estabilidad de las suspensiones a emplear. La sustancia pura, etilenglicol, constituye el fluido base para la preparación de las distintas muestras de nanofluidos. Los nanofluidos se prepararon a partir de nanopartículas comerciales de óxido de aluminio y óxido de bismuto (III), Al_2O_3 Y Bi_2O_3 , respectivamente.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS

El proceso de caracterización de las nanopartículas a utilizar constó de dos etapas.

La primera fue el análisis de su forma y tamaño en seco. Para ello, se utilizó la técnica de microscopia electrónica de transmisión, TEM, utilizando un equipo JEOL JEM-101 FEG, operando con un voltaje de aceleración de 100 kV.

Por otro lado, la segunda etapa constó de un análisis de estabilidad de las mismas suspendidas en etilenglicol, empleando la técnica de espectrofotometría Ultravioleta – Visible (UV-Vis), específicamente utilizando un espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 25.

4.1.1- Morfología

La Figura 4.1 se trata de una micrografía de las nanopartículas de Al_2O_3 magnificada. A partir de la misma se puede observar material particulado fino, con aglomeraciones de partículas en algunas zonas y buena dispersión en otras. Mayoritariamente se hallaron partículas de morfología irregular y tamaños que van desde los 8 hasta los 15 nm, con un promedio de tamaño de partícula de aproximadamente 10 nm.

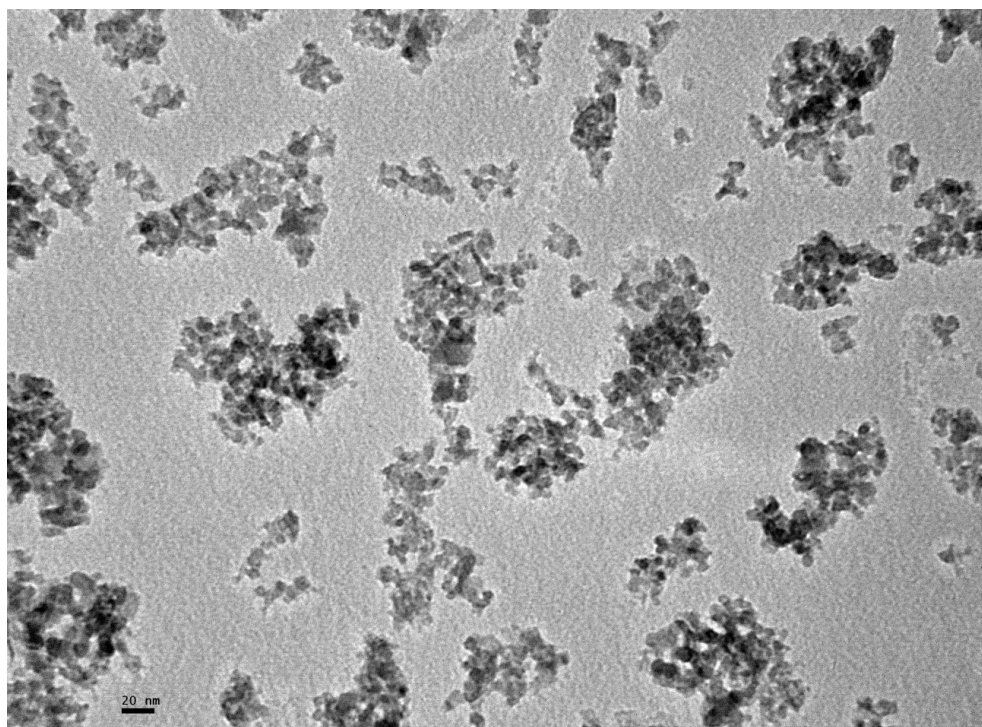


Figura 4.1 Micrografía de nanopartículas de Al₂O₃.

Al tratarse de partículas tan pequeñas y aglomeradas en algunas regiones, resultó imposible realizar una distribución de tamaños de las nanopartículas en cuestión.

Por otro lado, la Figura 4.2 es una micrografía de las nanopartículas de Bi₂O₃ magnificada. Para este caso se encontraron partículas redondeadas, de apariencia lisa y tamaños mayores a 100 nm. Se observa el material particulado con un contraste alto y homogéneo. Esta característica podría sugerir un alto espesor, alta cristalinidad y/o baja porosidad.

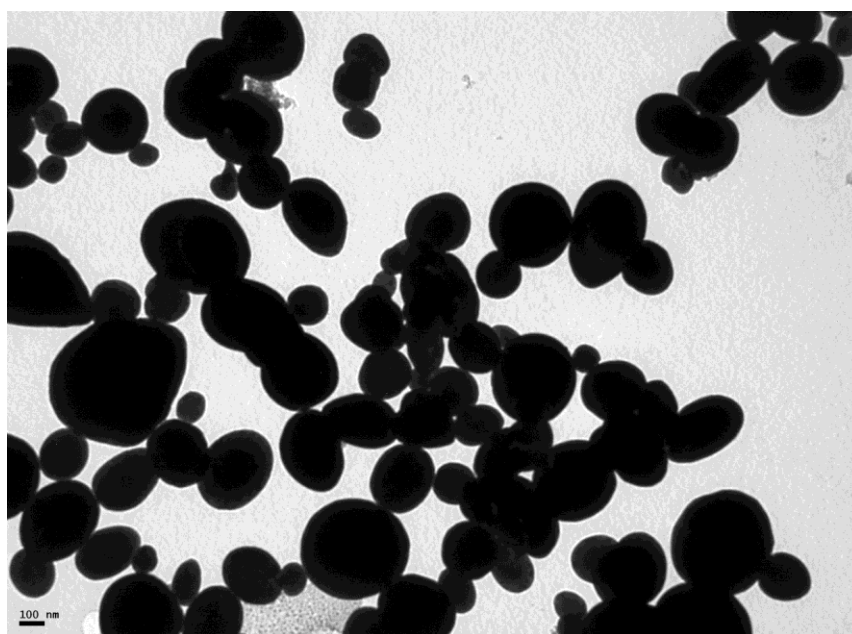


Figura 4.2 Micrografía de nanopartículas de Bi₂O₃.

En este caso, al tratarse de partículas de mayor tamaño y al tener una imagen con un mayor contraste que en el caso de las partículas de Al_2O_3 , se analizó la distribución de tamaños de partícula utilizando el programa Image Tools 3, un programa de edición de imágenes. En la Figura 4.3 se muestra el histograma obtenido, mostrando una mayor proporción de partículas de alrededor de 300 nm de diámetro. Por otro lado, se realizó un promedio aritmético de los distintos tamaños de partícula dando como resultado un diámetro medio de $d=240$ nm.

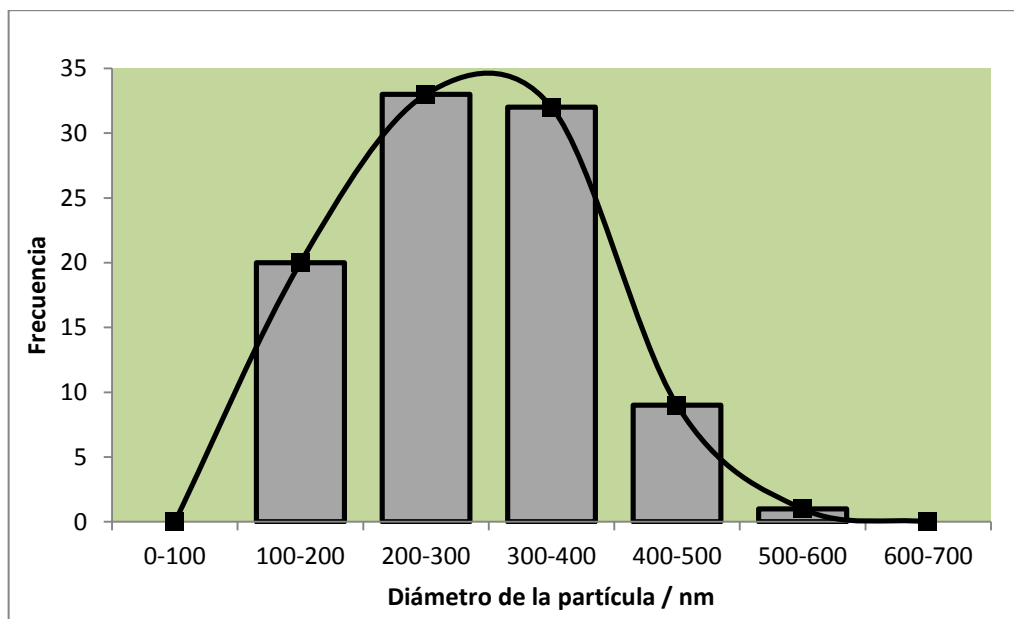


Figura 4.3 Distribución de tamaños de nanopartículas de Bi_2O_3 .

4.1.2- Estabilidad

Tanto para el caso de los nanofluidos de Al_2O_3 como de Bi_2O_3 , se trabajó con concentraciones de 0,01% v/v.

En una primera instancia, se midió la absorbancia de las muestras para longitudes de onda entre los 190 a los 780 nm para luego poder determinar el valor de la misma en la cual la absorbancia es máxima. La Figura 4.4 indica que para el caso del nanofluido constituido por Al_2O_3 , este valor resultó ser 203 nm; mientras que en la Figura 4.5, se puede observar que el valor máximo de absorbancia para el nanofluido de Bi_2O_3 es de 248 nm.

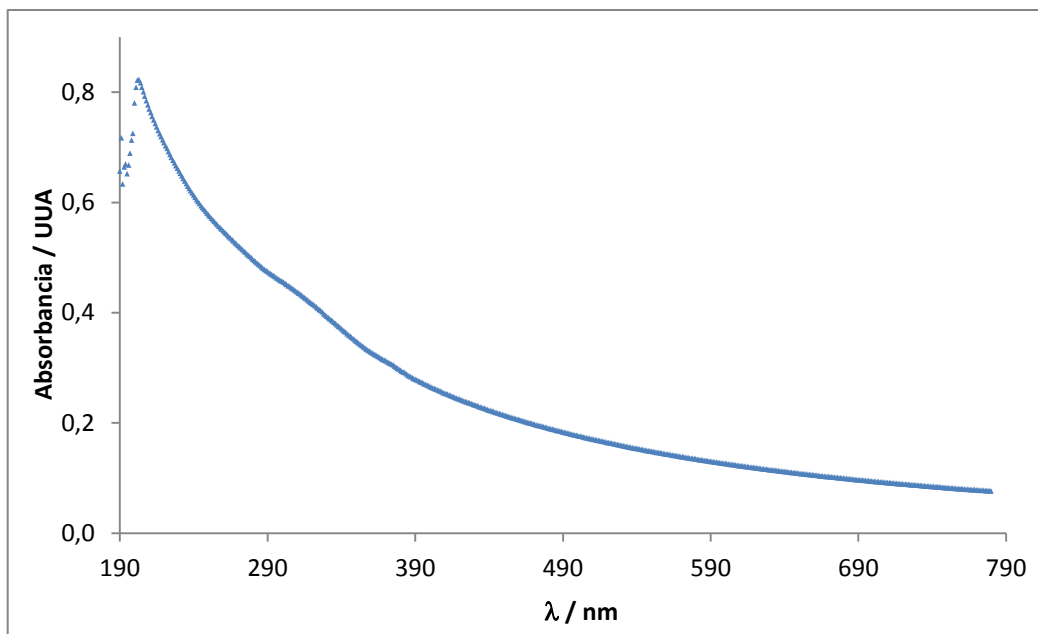


Figura 4.4 Absorbancia de Al₂O₃/EG 0,01% v/v a distintas longitudes de onda.

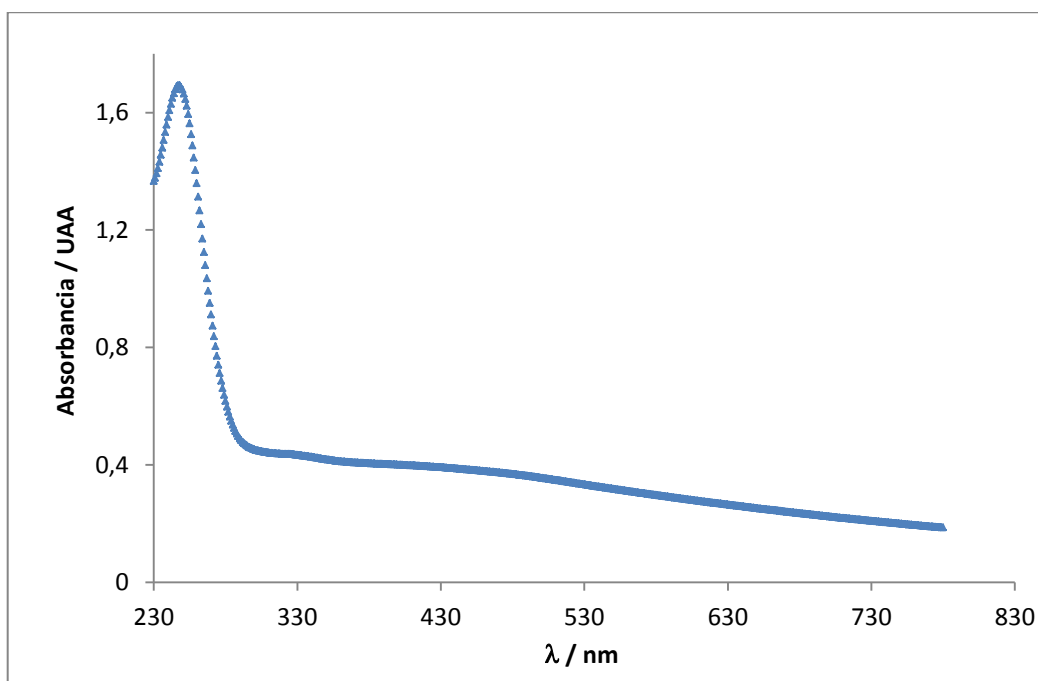


Figura 4.5 Absorbancia de Bi₂O₃/EG 0,01% v/v a distintas longitudes de onda.

Finalmente, se procedió a medir la absorción de las muestras utilizando una luz monocromática con longitud de onda igual a la obtenida en la primera instancia para cada muestra.

En el caso del nanofluido de Al₂O₃, esta medición se realizó cada intervalos de 1 minuto durante 21 horas (Figura 4.6); mientras que para el caso del nanofluido de

Bi_2O_3 , la medición se llevó a cabo durante 23 horas, también cada intervalos de 1 minuto (Figura 4.7).

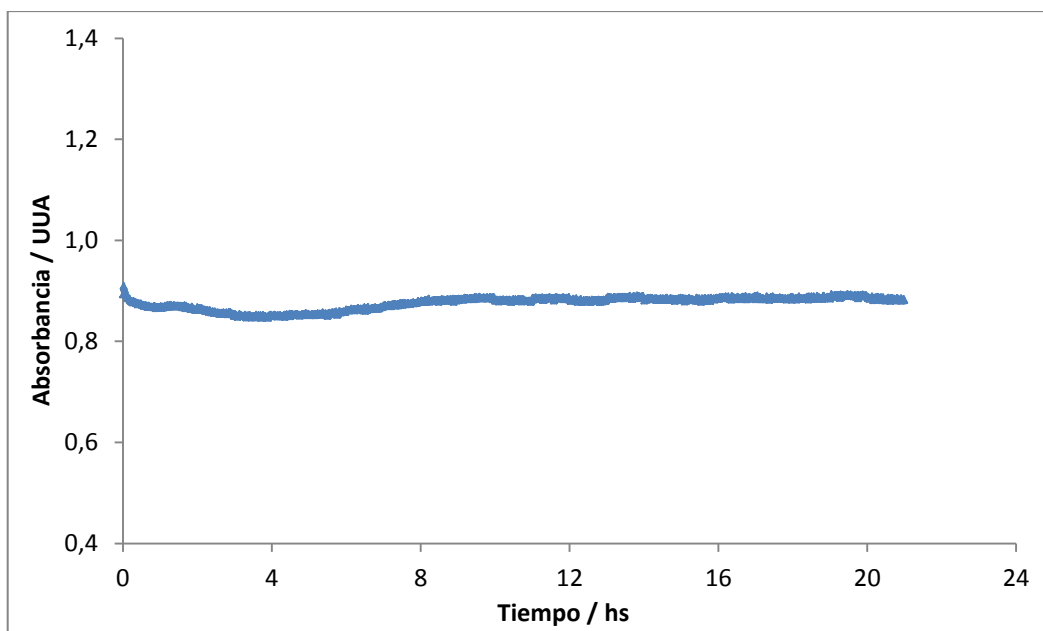


Figura 4.6 Absorbancia de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ 0,01% v/v a 203 nm a lo largo del tiempo.

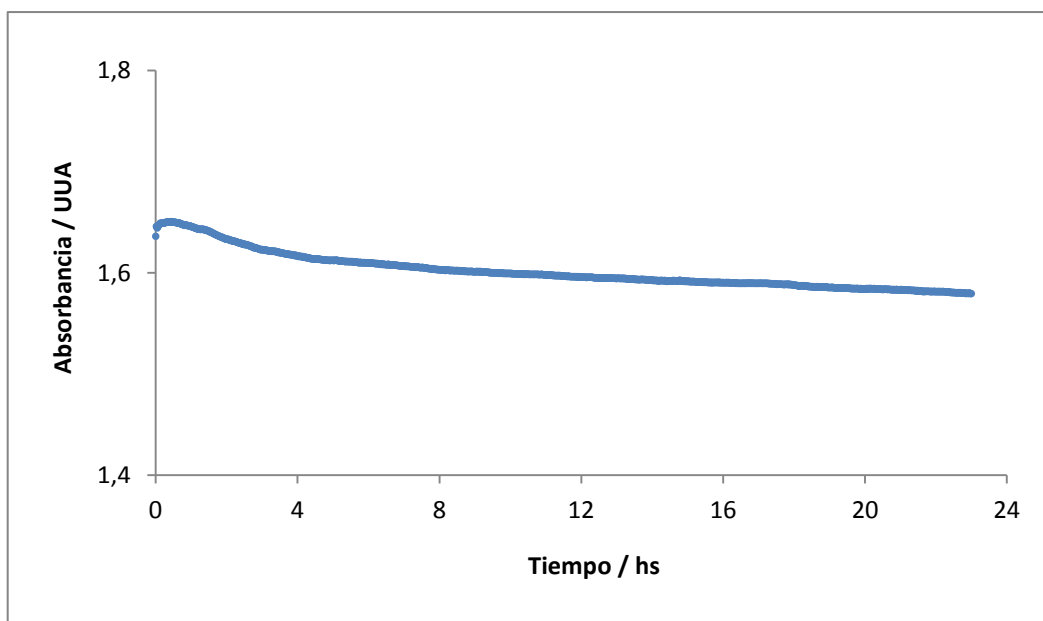


Figura 4.7 Absorbancia de $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ 0,01% v/v a 248 nm a lo largo del tiempo.

Como la absorbancia está directamente relacionada con la estabilidad de las suspensiones, el decrecimiento de la misma a lo largo de tiempo indicaría sedimentación de nanopartículas.

Los resultados obtenidos indican que la disminución de la absorbancia es de 1,26% en para el nanofluido de alúmina y de 3,46% para el de óxido de bismuto, por lo que si

bien la deposición de nanopartículas de Bi_2O_3 es mayor que en el caso de las de Al_2O_3 , las muestras son estables para el tipo de mediciones realizadas en este trabajo.

4.2- PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS

Previo al análisis de las propiedades de los distintos nanofluidos en estudio, en la presente sección se detallarán una serie de propiedades físicas de las sustancias utilizadas para su preparación, las cuales utilizaremos para el diseño del intercambiador de calor.

A continuación, la Tabla 4.1 nos muestra todas las propiedades de interés para el etilenglicol.

Tabla 4.1 Propiedades de interés para el etilenglicol.

$M / \text{g.mol}^{-1}$	$c_p / \text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	$\eta / \text{Pa.s}$	$R_f / \text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$
62,07	2432,78 ^[68]	0,014 ^[68]	0,000352 ^[69]

Donde tanto el valor de c_p , como el de η corresponden a una temperatura de 30 °C.

Por otro lado, en la tabla 4.2 se puede observar las propiedades de interés para las nanopartículas utilizadas.

Tabla 4.2 Propiedades de interés de las nanopartículas de Al_2O_3 y Bi_2O_3 .

Nanopartícula	$M / \text{g.mol}^{-1}$	$\rho / \text{g.cm}^{-3}$	$\kappa / \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$c_p / \text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	d / nm
Al_2O_3	101,96	3,96 ^[70]	25,08 ^[71]	880 ^[72]	10
Bi_2O_3	465,96	8,9 ^[73]	3,53 ^[74]	-	240

Los valores de masa molar (M) fueron suministrados por los fabricantes de las distintas sustancias, mientras los diámetros medios de las nanopartículas (d), se determinaron en este trabajo, Sección 4.1.1. El resto de los valores informados se obtuvieron de la bibliografía correspondiente. Los valores de ρ , κ y c_p de ambas nanopartículas corresponden a una temperatura de 30 °C.

4.3- PROPIEDADES DE LOS NANOFLUIDOS

4.3.1- Densidad

Utilizando el instrumental mencionado en la Sección 3.2.5 del presente trabajo, se determinó la densidad de sistemas nanofluidos constituidos por $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ y $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ a

distintas concentraciones y temperaturas. Cabe resaltar que las fracciones volumétricas fueron calculadas en todos los casos para una temperatura de 20 °C.

Para el sistema Al₂O₃/EG, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.3 Densidades experimentales para el sistema Al₂O₃/EG.

% wt	ϕ	20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C
		ρ / g.cm ⁻³				
0,00	0,0000	1,113113	1,109913	1,106600	1,099461	1,092240
1,00	0,0028	1,117587	1,114729	1,111748	1,104733	1,097780
1,75	0,0050	1,120787	1,117950	1,114994	1,108014	1,101114
2,50	0,0071	1,125951	1,122991	1,119885	1,112920	1,106120
3,00	0,0086	1,133062	1,131232	1,128893	1,122509	1,116408
3,50	0,0101	1,139649	1,137599	1,135172	1,128937	1,123223

Por otra parte, las mediciones obtenidas para el sistema Bi₂O₃/EG fueron las siguientes:

Tabla 4.4 Densidades experimentales para el sistema Bi₂O₃/EG.

% wt	ϕ	20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C
		ρ / g.cm ⁻³				
0,00	0,0000	1,113777	1,110826	1,107315	1,100369	1,092969
1,00	0,0013	1,121785	1,118843	1,115811	1,109157	1,103060
1,75	0,0022	1,129104	1,126370	1,123864	1,117768	1,114034
2,50	0,0032	1,137517	1,134730	1,132973	1,125186	1,120631
3,50	0,0045	1,146193	1,143633	1,142316	1,141409	1,131983
5,00	0,0065	1,158548	1,158089	1,157797	1,156542	1,142325

Como se puede observar en las Tablas 4.3 y 4.4, los valores de densidad del EG son levemente distintos para los distintos casos. Esto se debe a que se trabajó con distintos frascos de etilenglicol para cada uno de los sistemas, por lo que se determinó su densidad en ambas ocasiones.

Por otro lado, el equipo de medición presentó inconvenientes a la hora de determinar el comportamiento del sistema Al₂O₃/EG para la mayor concentración, la de 5% wt, lo que no permitió su correcta medición. Por este motivo, se decidió incorporar una muestra adicional, de concentración 3% wt.

Con respecto a los resultados obtenidos, se puede ver que en todos los casos los valores de densidad aumentaron con el incremento de ϕ y disminuyeron a medida que se aumentaba la temperatura, siendo esta disminución levemente superior para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ con respecto al de $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ para valores de ϕ similares.

Una vez determinados los valores de densidad de ambos sistemas se procedió a realizar dos gráficos para cada uno; uno de la densidad (ρ) en función de la temperatura (T), Figuras 4.8 y 4.9, y el otro de la densidad (ρ) en función de la fracción volumétrica (ϕ), Figuras 4.10 y 4.11.

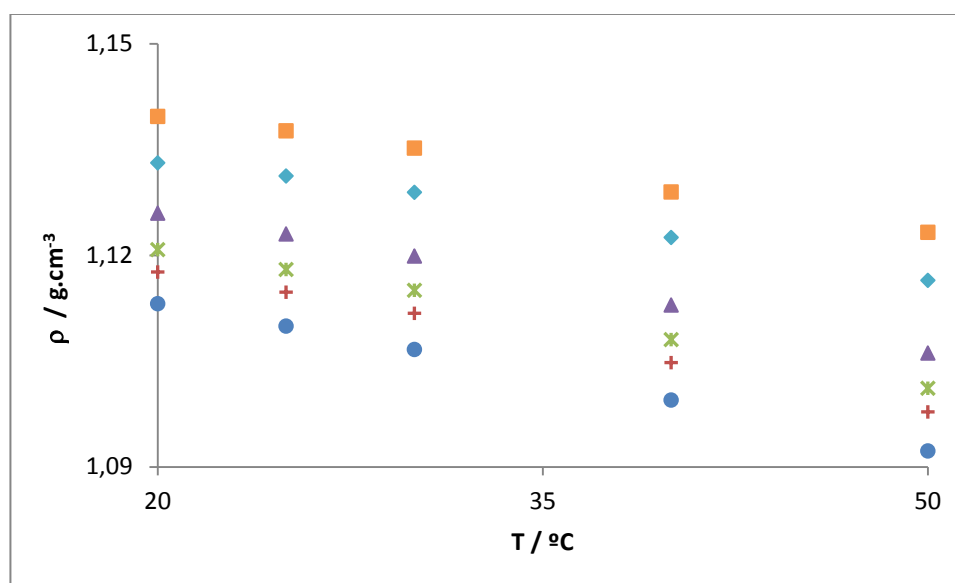


Figura 4.8 Densidad del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la temperatura a distintas fracciones en volumen de Al_2O_3 . (●) 0,0000; (+) 0,0028; (x) 0,0050; (▲) 0,0071; (◆) 0,0086; (■) 0,0101.

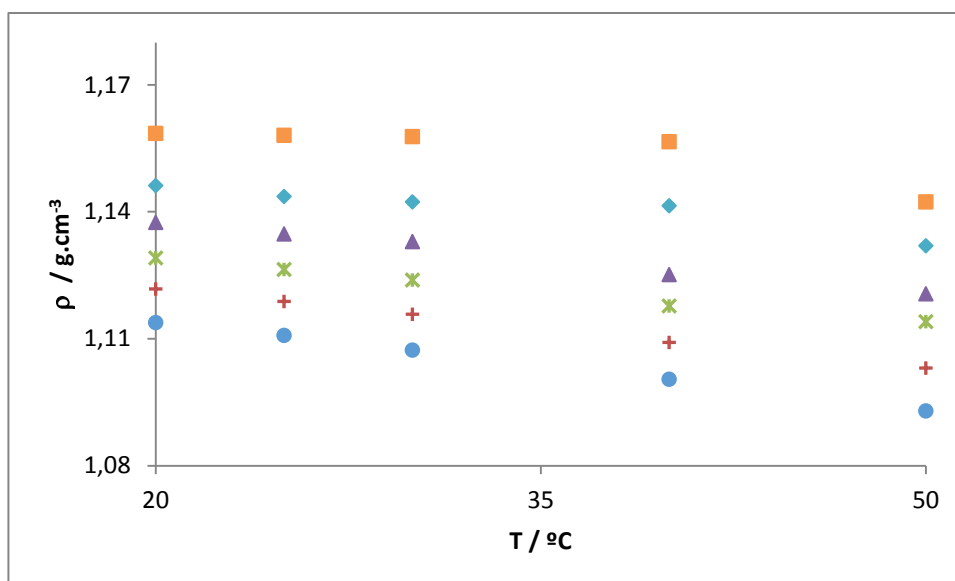


Figura 4.9 Densidad del sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la temperatura a distintas fracciones en volumen de Bi_2O_3 . (●) 0,0000; (+) 0,0013; (x) 0,0022; (▲) 0,0032; (◆) 0,0045; (■) 0,0065.

Además, la densidad de ambos sistemas se ajustó con la ecuación polinomial de Redlich-Kister [50], ecuación 2.1, utilizando el programa Ternaction para una cantidad de coeficientes $p=2$. En las Tablas 4.5 y 4.6 se muestran los coeficientes de ajuste para los sistemas $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ y $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ respectivamente para cada temperatura de trabajo. Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran el ajuste realizado con dicha ecuación junto a los datos experimentales.

Tabla 4.5 Coeficientes de ajuste de Redlich-Kister para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$.

Parámetros	20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C
A1	99,10302	104,11758	106,493043	112,524143	120,772274
A2	101,40093	106,393494	108,727462	114,797014	123,073002
DS	0,00079	0,000998	0,001172	0,001282	0,001422

Tabla 4.6 Coeficientes de ajuste de Redlich-Kister para el sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$.

Parámetros	20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C
A1	-33,92896	11,754127	13,393105	88,02009	-174,672577
A2	-33,507404	12,415626	13,573099	88,18022	-176,827542
DS	0,000716	0,000576	0,000672	0,001507	0,00103

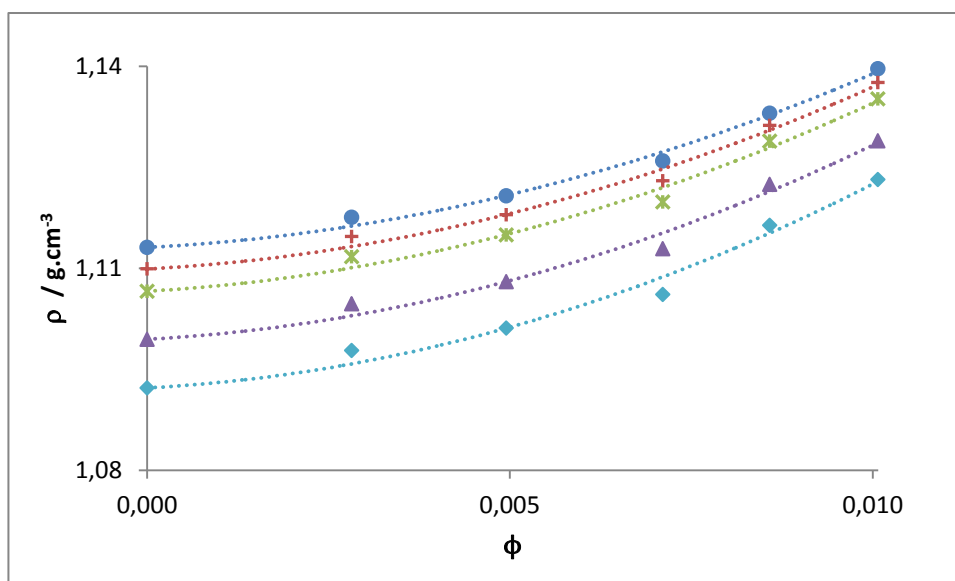


Figura 4.10 Densidad del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la fracción en volumen de Al_2O_3 a distintas temperaturas y curvas de ajuste de Redlich-Kister (...).

(●) 20 °C; (+) 25 °C; (✕) 30 °C; (▲) 40 °C; (◆) 50 °C.

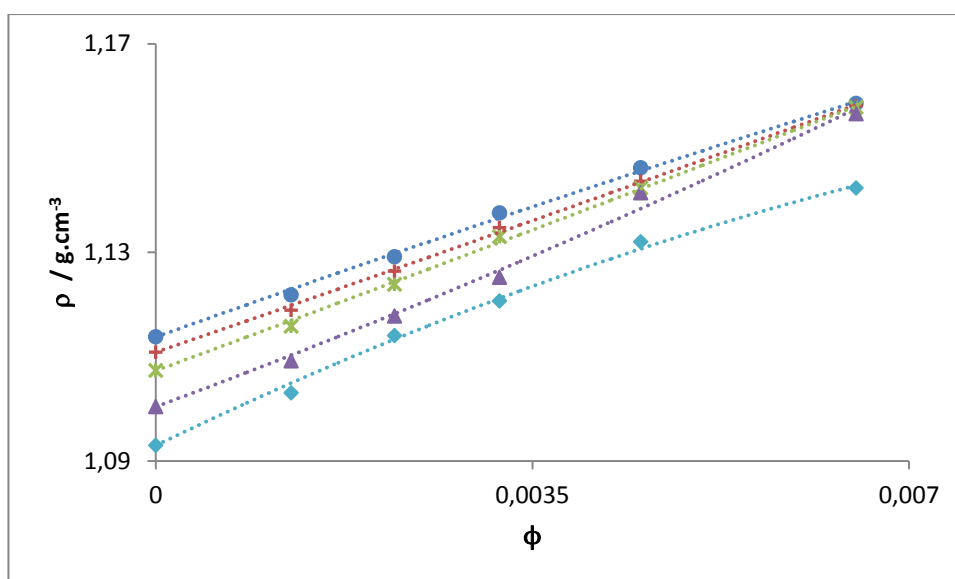


Figura 4.11 Densidad del sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la fracción en volumen de Bi_2O_3 a distintas temperaturas y curvas de ajuste de Redlich-Kister (...).

(●) 20 °C; (+) 25 °C; (✕) 30 °C; (▲) 40 °C; (◆) 50 °C.

Como se puede observar, la ecuación de Redlich-Kister se ajusta satisfactoriamente a los valores experimentales para las distintas concentraciones y temperaturas.

4.3.2- Conductividad térmica

Una vez determinados los valores de densidad correspondientes a ambos sistemas, se procedió a determinar su conductividad térmica, κ , para las mismas temperaturas que en el caso anterior. Cabe resaltar que las fracciones volumétricas en este caso también fueron calculadas para una temperatura de 20 °C y que los resultados de κ informados corresponden a un promedio aritmético de entre al menos 3 mediciones efectuadas para cada una de las concentraciones y temperaturas.

Para el sistema Al₂O₃/EG, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.7 Conductividades térmicas experimentales para el sistema Al₂O₃/EG.

		20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C
% wt	ϕ	$\kappa / \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$				
0,00	0,0000	0,2470	0,2475	0,2480	0,2490	0,2500
5,00	0,0145	0,2567	0,2562	0,2567	0,2570	0,2575
10,00	0,0302	0,2665	0,2665	0,2665	0,2650	0,2670
15,00	0,0471	0,2750	0,2750	0,2750	0,2740	0,2760

Por otra parte, las mediciones obtenidas para el sistema Bi₂O₃/EG fueron las siguientes:

Tabla 4.8 Conductividades térmicas experimentales para el sistema Bi₂O₃/EG.

		20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C
% wt	ϕ	$\kappa / \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$				
0,00	0,0000	0,2460	0,2470	0,2460	0,2440	0,2410
1,00	0,0013	0,2460	0,2470	0,2470	0,2440	0,2470
3,00	0,0039	0,2490	0,2490	0,2490	0,2470	0,2460
5,00	0,0065	0,2500	0,2490	0,2480	0,2470	0,2470

Como puede observarse en las Tablas 4.7 y 4.8, al igual que para el caso de la densidad, el etilenglicol utilizado para las muestras de Al₂O₃/EG correspondía a un frasco distinto que el utilizado para las de Bi₂O₃/EG. Por este motivo, la medición de la conductividad se realizó para cada uno de estos fluidos.

Por otra parte, el sistema Bi₂O₃/EG presentó sedimentación de nanopartículas para concentraciones superiores a los 5% wt. Por este motivo, se decidió realizar el análisis

de su comportamiento con concentraciones de hasta dicha concentración, incluyendo los valores de 1 y 3% wt de modo tal de tener igual cantidad de lecturas para ambos sistemas.

Con respecto a los valores de κ para las distintas muestras de EG, ambos resultados son muy similares, aunque los comportamientos resultaron opuestos. En el caso de la muestra de EG utilizado para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, se puede ver que κ aumenta con T, mientras que para el EG del sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ sucede lo contrario (a partir de los 25 °C en adelante).

Una vez determinados los valores de conductividad térmica de ambos sistemas se procedió a realizar dos gráficos para cada uno; uno de la conductividad térmica (κ) en función de la temperatura (T) (Figuras 4.12 y 4.13), y el otro de la conductividad térmica (κ) en función de la fracción volumétrica (ϕ) (Figuras 4.14 y 4.15).

En cuanto al comportamiento de κ con T para los distintos nanofluidos, se observó que κ prácticamente se mantuvo constante con el cambio de T para un mismo valor de ϕ . Esto nos habla de una independencia de κ con respecto a T para el rango de temperaturas en el cual se llevó a cabo este trabajo.

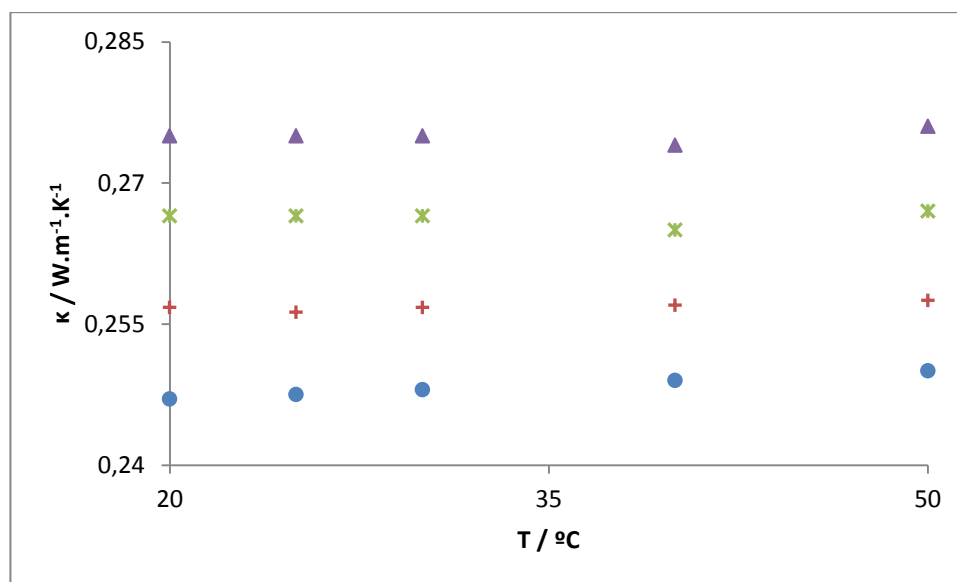


Figura 4.12 Conductividad térmica del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la temperatura a distintas fracciones en volumen de Al_2O_3 . (●) 0,0000; (+) 0,0145; (x) 0,0302; (▲) 0,0471.

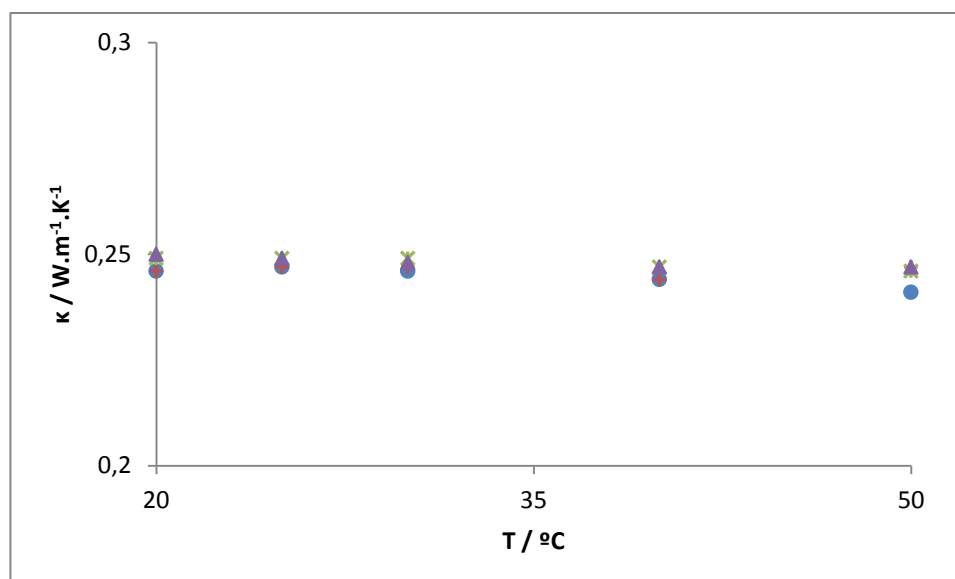


Figura 4.13 Conductividad térmica del sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la temperatura a distintas fracciones en volumen de Bi_2O_3 . (●) 0,0000; (+) 0,0013; (✱) 0,0039; (▲) 0,0065.

Por otro lado, en todos los casos se observó que el valor de κ aumentó con ϕ . Sin embargo, este aumento resultó muy poco significativo para el sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$, ya que para el mejor de los casos (para una concentración de 5% wt a 50 °C), este incremento resultó menor al 2,5% con respecto al EG puro (Figuras 4.13 y 4.15). Por otro lado, para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, se lograron aumentos de κ mayores al 3% para una concentración de 5% wt, al 6,5% para una concentración de 10% wt, y al 10% para una concentración de 15% wt con respecto su fluido base, llegando a obtener un incremento máximo del 10,4% para una concentración del 15% wt a 50 °C (Figuras 4.12 y 4.14).

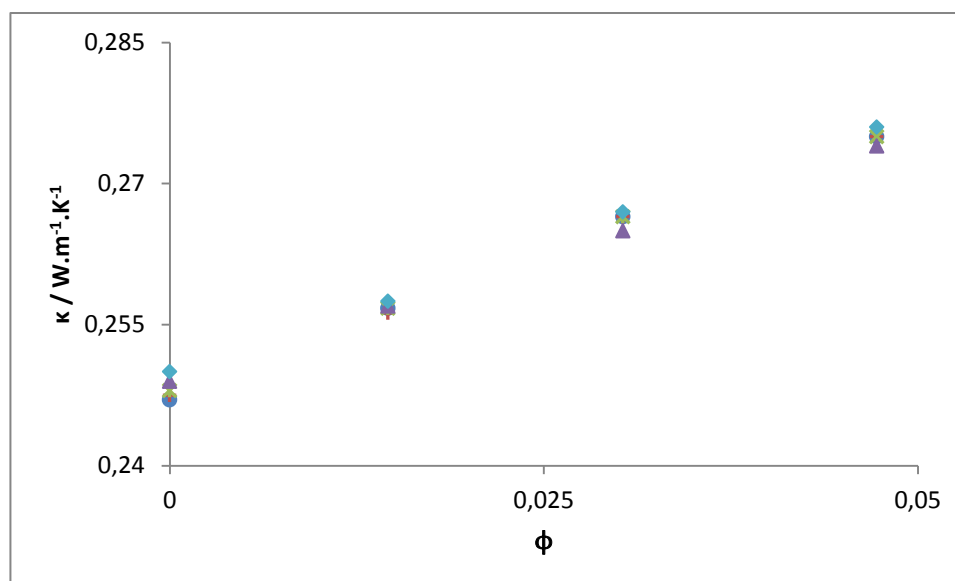


Figura 4.14 Conductividad térmica del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la fracción en volumen de Al_2O_3 a distintas temperaturas. (●) 20 °C; (+) 25 °C; (✕) 30 °C; (▲) 40 °C; (◆) 50 °C.

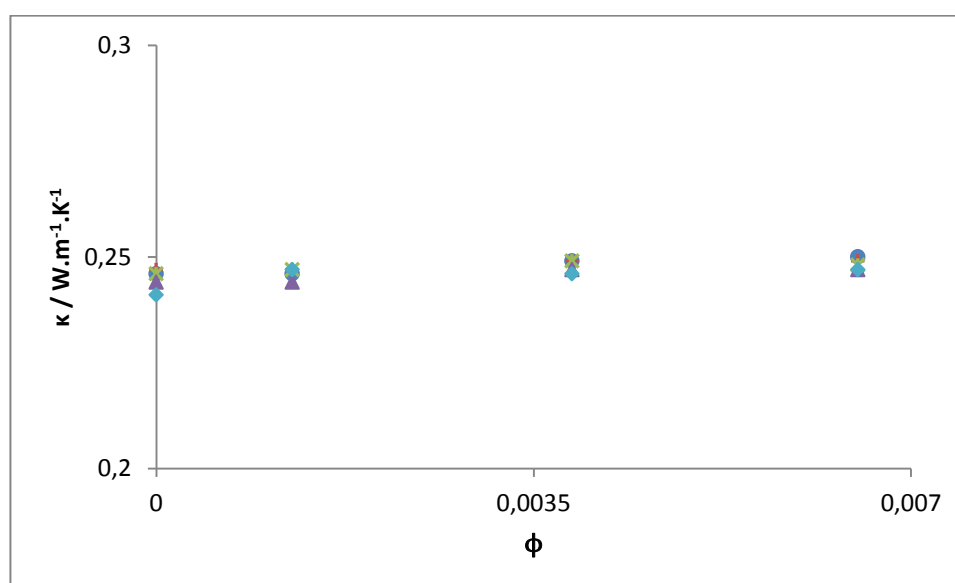


Figura 4.15 Conductividad térmica del sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la fracción en volumen de Bi_2O_3 a distintas temperaturas. (●) 20 °C; (+) 25 °C; (✕) 30 °C; (▲) 40 °C; (◆) 50 °C.

Finalmente, como último paso del análisis de la conductividad térmica de los nanofluidos de trabajo, se procedió a comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante la ecuación de Maxwell (ecuación 2.3) y la de Turian (ecuación 2.4), utilizando los datos informados en la presente sección, en la 4.2 y asumiendo un valor de $A=0,01 \text{ nm}^{-1}$ para el caso de la ecuación de Turian en

ambos sistemas. También se calcularon los errores porcentuales de cada modelo con respecto a los obtenidos de forma experimental.

Para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.9 Conductividades térmicas calculadas por modelos de Maxwell y Turian para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ y errores asociados a ellas.

Temperatura / °C	ϕ	$\kappa / \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$		Error / %	
		Maxwell	Turian	Maxwell	Turian
20	0,0145	0,2614	0,2553	1,8083	0,5633
	0,0302	0,2779	0,2646	4,2667	0,7264
	0,0471	0,2969	0,2749	7,9711	0,0187
25	0,0145	0,2619	0,2558	2,2131	0,1705
	0,0302	0,2784	0,2651	4,4770	0,5315
	0,0471	0,2975	0,2755	8,1885	0,1741
30	0,0145	0,2624	0,2563	2,2197	0,1666
	0,0302	0,2790	0,2656	4,6874	0,3367
	0,0471	0,2981	0,2760	8,4059	0,3669
40	0,0145	0,2635	0,2573	2,5314	0,1326
	0,0302	0,2801	0,2666	5,7030	0,6193
	0,0471	0,2993	0,2771	9,2378	1,1202
50	0,0145	0,2646	0,2584	2,7426	0,3336
	0,0302	0,2812	0,2677	5,3310	0,2545
	0,0471	0,3005	0,2781	8,8794	0,7715

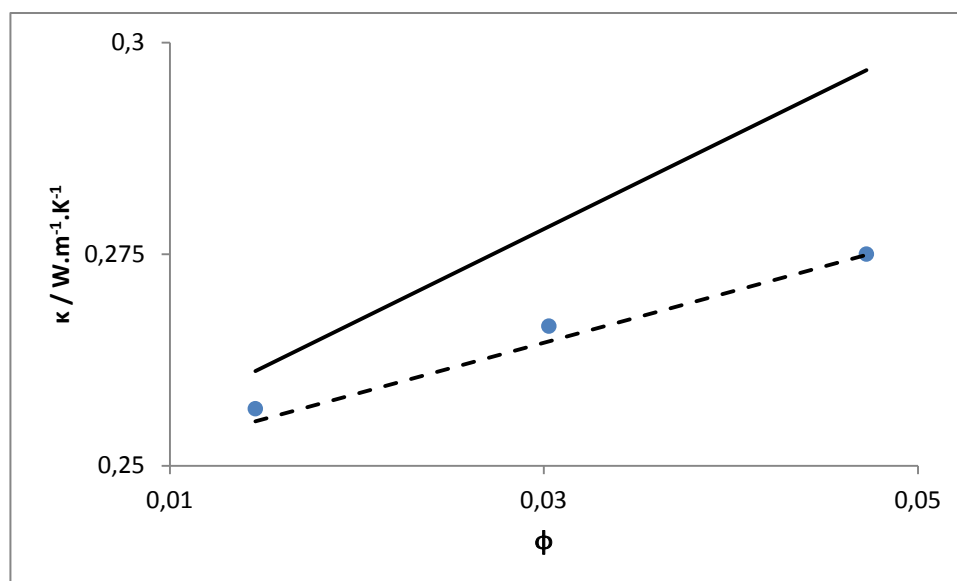


Figura 4.16 Conductividad térmica experimental del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la fracción en volumen de Al_2O_3 a $20\text{ }^\circ\text{C}$ (●), y estimaciones de Maxwell (—) y Turian (- - -).

Como puede observarse tanto en la Figura 4.16 como en la Tabla 4.9, los valores de κ obtenidos con el modelo de Turian resultaron considerablemente más cercanos a los obtenidos experimentalmente que los obtenidos mediante el modelo de Maxwell. El error obtenido en la aplicación del modelo de Turian resultó en casi todos los casos inferior al 1%, mientras que para el modelo de Maxwell llegó a superar el 9%. Esto podría deberse al hecho de que el modelo de Turian contempla el diámetro de la partícula, mientras que el de Maxwell no lo hace.

Además, puede notarse que en todos los casos el modelo de Maxwell sobreestima el valor de κ , alejándose cada vez más del valor experimental a medida que aumenta el valor de ϕ .

Por otra parte, los resultados obtenidos para el sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ fueron los siguientes:

Tabla 4.10 Conductividades térmicas calculadas por modelos de Maxwell y Turian para el sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ y errores asociados a ellas.

Temperatura / °C	ϕ	$\kappa / \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		Error / %	
		Maxwell	Turian	Maxwell	Turian
20	0,0013	0,2470	0,2468	0,4108	0,3232
	0,0039	0,2491	0,2484	0,0470	0,2221
	0,0065	0,2513	0,2501	0,5116	0,0589
25	0,0013	0,2480	0,2478	0,4104	0,3227
	0,0039	0,2501	0,2495	0,4507	0,1821
	0,0065	0,2523	0,2512	1,3090	0,8590
30	0,0013	0,2470	0,2468	0,0059	0,0820
	0,0039	0,2491	0,2484	0,0470	0,2221
	0,0065	0,2513	0,2501	1,3075	0,8584
40	0,0013	0,2450	0,2448	0,4114	0,3242
	0,0039	0,2471	0,2464	0,0392	0,2288
	0,0065	0,2493	0,2481	0,9031	0,4541
50	0,0013	0,2420	0,2418	2,0669	2,1557
	0,0039	0,2441	0,2434	0,7923	1,0608
	0,0065	0,2462	0,2451	0,3252	0,7769

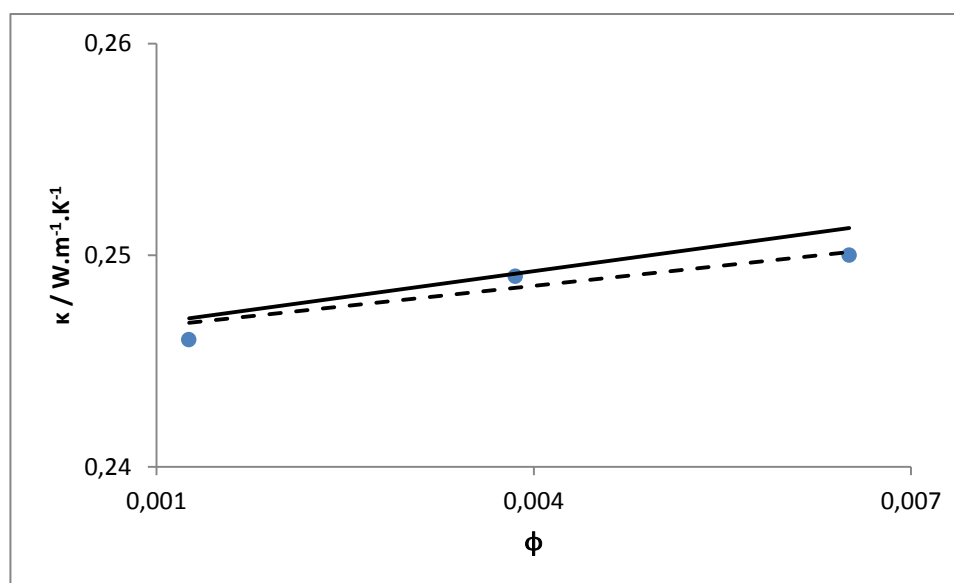


Figura 4.17 Conductividad térmica experimental del sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$ en función de la fracción en volumen de Bi_2O_3 a 20 °C (●), y estimaciones de Maxwell (—) y Turian (- - -).

En este caso, tanto la Figuras 4.17 como la Tabla 4.10 nos muestran que tanto los valores obtenidos por el modelo de Maxwell como por el de Turian presentaron errores pequeños con respecto a los obtenidos experimentalmente, con un error máximo del 2,16%.

Por otro lado, si bien la diferencia en este caso no es tan amplia como para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, en general se observa una mejor aproximación a los valores experimentales con el modelo de Turian que con el propuesto por Maxwell; y tal como se mencionó anteriormente, también podría deberse a la consideración del diámetro de la partícula por parte de Turian para su determinación.

En general se observa una sobreestimación de los valores de κ por ambos modelos, siendo levemente más notoria para el caso del de Maxwell.

4.4- APLICABILIDAD EN SISTEMA DE INTERCAMBIO TÉRMICO

Analizando los resultados obtenidos en relación a las propiedades de los nanofluidos estudiados, se decidió realizar el diseño de un intercambiador de calor de casco y tubos utilizando únicamente nanofluidos de alúmina en etilenglicol, ya que se puede prever que se obtendrán mejores resultados para este caso que utilizando los constituidos por Bi_2O_3 . Estos últimos presentan considerables desventajas respecto al sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, entre las cuales podemos destacar el gran tamaño de las nanopartículas (el cual colabora a su rápida sedimentación) y el bajo incremento en la conductividad térmica del sistema nanofluido en relación al fluido base.

A continuación se describe el problema de transferencia de calor a resolver:

Se requiere enfriar 15 kg/s de metanol desde 65 °C hasta 45 °C. Para ello, se utilizará etilenglicol a 18 °C como fluido refrigerante, el cual no deberá calentarse por encima de los 40 °C por requerimientos del sistema de refrigeración de la planta. Se acepta una pérdida de carga no mayor a 1 bar tanto para el metanol como para el fluido refrigerante.

Una vez diseñado el equipo, se procederá a simular este mismo, pero sustituyendo al etilenglicol por el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, a concentraciones de 5, 10 y 15% wt.

Las propiedades de interés para el metanol son las siguientes:

Tabla 4.11 Propiedades del metanol a 55 °C.

$\rho / \text{g.cm}^{-3}$	$\kappa / \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$c_p / \text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	$\eta / \text{Pa.s}$	$R_f / \text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$
0,80 ^[56]	0,21 ^[56]	2508 ^[56]	0,00038 ^[56]	0,000352 ^[69]

Mientras que las propiedades de los distintos fluidos refrigerantes son:

Tabla 4.12 Propiedades de los fluidos refrigerantes.

Sistema	$\rho / \text{g.cm}^{-3}$	$\kappa / \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$c_p / \text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	$\eta / \text{Pa.s}$
EG	1,1066	0,248	2432,78	0,0140
Al ₂ O ₃ /EG (5% wt)	1,1482	0,257	2354,71	0,0145
Al ₂ O ₃ /EG (10% wt)	1,1931	0,266	2276,68	0,0150
Al ₂ O ₃ /EG (15% wt)	1,2418	0,275	2198,70	0,0160

El factor de ensuciamiento de los distintos fluidos refrigerantes, se lo consideró en todos los casos igual al del etilenglicol, es decir, $R_f=0,000352 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ (Tabla 4.1), ya que se trabajó a muy bajas concentraciones de nanopartículas. Además, no se encontró información acerca de dicho parámetro para este tipo de sistemas.

Por otro lado, los valores de ρ y κ para el EG fueron extraídos de la Sección 4.3 para una temperatura de 30 °C, mientras que los de c_p y η de la Sección 4.2 (Tabla 4.2). En cuanto a los nanofluidos, los valores de ρ fueron calculados con la ecuación de Redlich-Kister (ecuación 2.1) teniendo en cuenta los parámetros A1 y A2 obtenidos de la Sección 4.3.1 (tabla 4.5); los de κ se extrajeron directamente de la Tabla 4.7, y los de c_p y η mediante las ecuaciones 2.25 y 2.26.

En el diseño del equipo, en primer lugar, se decidió hacer pasar al etilenglicol por los tubos y al metanol por carcasa, ya que la limpieza de los tubos se puede llevar a cabo de forma más sencilla que la de la carcasa. Esta decisión se tomó teniendo en cuenta que posteriormente se hará circular a los nanofluidos por los tubos, los cuales podrían llegar a depositar sólidos que habría que remover.

Por otro lado, a la hora de elegir el arreglo de los tubos dentro de la carcasa, hay que tener en cuenta que el triangular presenta la gran ventaja de ser más eficiente con respecto al arreglo en cuadro. Sin embargo, los equipos con arreglo en cuadro pueden ser limpiados tanto mecánica como químicamente, mientras que los equipos con arreglo en triángulo sólo pueden ser limpiados de forma química, lo que implica un costo de mantenimiento más elevado. Como el metanol no es un tipo de fluido muy sucio, la

limpieza de la carcasa se deberá realizar cada largos períodos de tiempo, por lo que se decidió hacer un arreglo en triángulo, el cual es más eficiente que uno en cuadro.

Además, se eligieron tubos BWG 14 de $\frac{3}{4}$ "', los cuales presentan un diámetro externo $D_o=0,019$ m, y uno interno $D_i=0,0148$ m; un pitch $Pt=1$ ''; y un espaciado entre baffles $B=0,14$ m.

Finalmente, se diseñó el equipo utilizando el Programa INTERCAMB (facilitado por la cátedra de Operaciones Unitarias I de FAIN-UNCo), el cual utiliza todas las ecuaciones mencionadas en la Sección 2.3.3 del presente trabajo.

El intercambiador de calor capaz de cumplir con todos los requisitos mencionados fue el siguiente:

$n_s= 1$, número de pasos por carcasa.

$D_s= 0,889$ m, diámetro de carcasa.

$n= 8$, número de pasos por los tubos.

$N= 798$, número de tubos.

$L= 5$ m, largo de los tubos.

$A= 238,16$ m², área de transferencia del equipo

Y los resultados obtenidos para los distintos sistemas fueron:

Tabla 4.13 Características del intercambiador de calor diseñado.

% wt	ϕ	$U / W.m^{-2}.K^{-1}$	A_{calc} / m^2	$\Delta P_t / bar$	$\Delta P_s / bar$
0,00	0,0000	140,42	234,34	0,7	0,64
5,00	0,0145	143,17	229,83	0,72	0,64
10,00	0,0302	145,87	225,58	0,75	0,64
15,00	0,0471	148,52	221,56	0,79	0,64

Como era de esperarse, el coeficiente global de transferencia de calor U aumenta con la concentración del nanofluido, y por lo tanto, disminuye el área de intercambio necesaria para poder lograr el objetivo planteado, A_{calc} . Además, el aumento de ϕ , trae

consigo un incremento en la pérdida de carga en los tubos, ΔP_t , debido al aumento en la viscosidad del fluido refrigerante.

Una vez hecho esto, comparando los distintos valores obtenidos de U con aquellos típicos propuestos por bibliografía (entre 120 y 350 $W.m^{-2}.K^{-1}$) [56], se observó que si bien los valores obtenidos de U entran dentro de este rango, se encuentran muy cerca del límite inferior del mismo. Por esto, se decidió realizar un nuevo diseño, pero haciendo pasar al fluido refrigerante por la carcasa.

Por este motivo, por cuestiones de limpieza del equipo a diseñar, en este caso se decidió emplear un arreglo de los tubos en forma de cuadro, el cual permite realizar una limpieza de carcasa de tipo mecánica (más económica que la química). Esto se debe a la posibilidad de formación de depósitos de partículas en el interior de la misma.

De este modo, el equipo obtenido fue el siguiente:

$n_s = 1$, número de pasos por carcasa.

$D_s = 0,53975$ m, diámetro de carcasa.

$n = 4$, número de pasos por los tubos.

$N = 242$, número de tubos.

$L = 5$ m, largo de los tubos.

$A = 72,23$ m², área de transferencia del equipo

Y los resultados obtenidos para los distintos sistemas fueron:

Tabla 4.14 Características del segundo intercambiador de calor diseñado.

% wt	ϕ	$U / W.m^{-2}.K^{-1}$	A_{calc} / m^2	$\Delta P_t / bar$	$\Delta P_s / bar$
0,00	0,0000	469,66	70,06	0,57	0,86
5,00	0,0145	475,05	69,27	0,57	0,89
10,00	0,0302	480,35	68,50	0,57	0,92
15,00	0,0471	483,99	67,99	0,57	0,95

Como se puede observar en la Tabla 4.14, el sistema se comporta de forma análoga al primer equipo diseñado, con la diferencia en que como ahora el fluido refrigerante

circula por la carcasa, el aumento de la pérdida de carga con el incremento de ϕ se da allí.

Sin embargo, este equipo presenta valores de U mucho mayores a los obtenidos en el primer caso, incluso superando el intervalo de valores típicos del mismo. Por este motivo, el área de intercambio requerida es considerablemente menor, dando lugar a un equipo mucho más compacto.

Antes de continuar con el análisis de los resultados, por cuestiones prácticas, llamaremos al primer y segundo equipos diseñados como “equipo 1” y “equipo 2” respectivamente.

Habiendo mencionado esto, en cuanto al aumento de U con ϕ , a continuación se muestra una tabla comparativa teniendo en cuenta los dos equipos diseñados.

Tabla 4.15 Comparación del incremento de U en ambos equipos.

% wt	ϕ	$\Delta U_{\text{ABS}} / \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$		$\Delta U_{\text{REL}} \%$	
		Equipo 1	Equipo 2	Equipo 1	Equipo 2
5,00	0,0145	2,75	5,39	1,96	1,15
10,00	0,0302	5,45	10,69	3,88	2,28
15,00	0,0471	8,10	14,33	5,77	3,05

Lo que se observa es que si bien el aumento absoluto de U es mayor para el equipo 2 en todos los casos, el aumento relativo no lo es, por lo que la mejora del sistema gracias a los nanofluidos es más significativa en el equipo 1.

Este comportamiento se ve reflejado claramente en la siguiente tabla:

Tabla 4.16 Comparación de la disminución de A_{calc} en ambos equipos.

% wt	ϕ	$\Delta A_{\text{ABS}} / \text{m}^2$		$\Delta A_{\text{REL}} \%$	
		Equipo 1	Equipo 2	Equipo 1	Equipo 2
5,00	0,0145	4,51	0,79	1,92	1,13
10,00	0,0302	8,76	1,56	3,74	2,23
15,00	0,0471	12,78	2,07	5,45	2,95

En la misma podemos ver que la disminución del área de intercambio requerida resulta mayor para el equipo 1, tanto en términos absolutos como relativos. Este

comportamiento se debe a que si bien la resistencia controlante la tenemos en ambos casos relacionada al fluido refrigerante, en el equipo 1, esta resulta alrededor de 10 veces mayor que la ofrecida por el metanol, mientras que en el equipo 2, esta relación resulta menor a 3. Adicionalmente, se listan en la Tabla 4.17 las velocidades de circulación del fluido refrigerante.

Tabla 4.17 Resistencias (en $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) y velocidades en los equipos diseñados.

% wt	ϕ	Equipo 1			Equipo 2		
		h_o^{-1}	h_{io}^{-1}	$v_t / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	h_o^{-1}	h_{io}^{-1}	$v_s / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
0,00	0,0000	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$5,83 \cdot 10^{-3}$	0,74	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,67
5,00	0,0145	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$5,70 \cdot 10^{-3}$	0,74	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,66
10,00	0,0302	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$5,57 \cdot 10^{-3}$	0,73	$9,99 \cdot 10^{-4}$	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,66
15,00	0,0471	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-3}$	0,73	$9,83 \cdot 10^{-4}$	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,66

Finalmente, utilizando nuevamente el Programa INTERCAMB, se analizó cuanto podría acortarse cada equipo si se utilizaran nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ al 15% wt en vez del fluido base correspondiente. Los resultados se muestran a continuación:

Equipo 1: $L=4,55$. El equipo podría acortarse 45 cm.

Equipo 2: $L=4,75$. El equipo podría acortarse 25 cm.

Por lo tanto, como comentario final podemos concluir que la capacidad de reducción de área provista por el uso de nanofluidos será mayor mientras más grande sea la relación de resistencias del fluido frío respecto a la del caliente. Sin embargo, si utilizáramos al nanofluido como fluido calefactor, esta relación deberá ser lo más pequeña posible para que los resultados sean significativos.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

El objeto del presente trabajo fue estudiar las propiedades termofísicas de nanofluidos y la aplicabilidad de estos sistemas a un proceso de transferencia de calor particular. Para ello fue necesario optimizar técnicas experimentales para la obtención de dichas propiedades, permitiendo obtener datos experimentales de densidad y conductividad térmica, en un amplio rango de concentraciones y temperaturas. El trabajo se llevó a cabo dentro del marco del Grupo de Investigación del Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería.

Los sistemas estudiados fueron Al_2O_3 y Bi_2O_3 en etilenglicol. Se formaron suspensiones de dichos compuestos y se estudiaron a varias concentraciones y temperaturas.

De los resultados obtenidos a partir de la espectrofotometría UV-Vis, se observa en ambos sistemas un valor de absorbancia prácticamente constante a lo largo del tiempo, lo que indica una buena estabilidad de los mismos. Sin embargo, el nanofluido de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ forma una suspensión más estable.

Para ambos sistemas se observó un comportamiento similar en cuanto a la densidad, la cual disminuye al aumentar la temperatura para una concentración de nanopartículas constante, e incrementa al aumentar la concentración de nanopartículas para un valor fijo de temperatura. La ecuación de Redlich-Kister (ecuación 2.1) ajustó satisfactoriamente a los valores experimentales a las distintas concentraciones y temperaturas.

En cuanto a la conductividad térmica de ambos nanofluidos también se observó un comportamiento semejante entre ellos. Se puede ver que esta se mantiene prácticamente constante al aumentar la temperatura para una concentración de nanopartículas fija, lo que indica una independencia de la conductividad térmica con la temperatura. Además, la conductividad térmica aumenta con el incremento de la concentración de nanopartículas para un valor fijo de temperatura, siendo el aumento más significativo en el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$.

Por otro lado, se estimaron los valores de conductividad térmica por medio de los modelos propuestos por Maxwell (ecuación 2.3) y Turian (ecuación 2.4). Para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, el modelo de Turian presenta valores muy similares a los experimentales, mientras que el de Maxwell los sobreestima notoriamente. En cuanto al

sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{EG}$, ambos modelos lanzan resultados muy similares a los experimentales, sobreestimándolos levemente (más aún el de Maxwell).

Por último, en base a los mejores resultados provistos por el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$, se lo aplicó a un proceso de transferencia de calor para evaluar su desempeño. Se diseñaron dos equipos: uno donde se hizo circular al nanofluido por los tubos (equipo 1) y otro por donde se lo hizo circular por la carcasa (equipo 2). Este último intercambiador resultó considerablemente más compacto que el primero, presentando valores de coeficiente globales de transmisión de calor aún por encima de los valores esperados para estos sistemas. En ambos casos, al aumentar la concentración de nanopartículas, se obtuvieron mayores coeficientes globales de transferencia de calor y por lo tanto menores áreas necesarias para cumplir con el requerimiento térmico en cuestión, siendo más notoria esta disminución para el equipo 1. En ningún caso la pérdida de carga fue mayor a la admisible.

Se concluye que el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ presenta una mejora respecto al fluido base en cuanto a sus propiedades térmicas, beneficiando el transporte térmico. Sin embargo, el alto costo de las nanopartículas hace que su aplicabilidad no resulte conveniente para el proceso de intercambio analizado, dado que el incremento en el coeficiente global de transferencia de calor es poco significativo.

Sin embargo, el uso de nanofluidos tanto como fluidos de transferencia de calor como para cualquier otra potencial aplicación, es un área en la que todavía falta mucho por investigar y profundizar. Por este motivo, es fundamental que se siga experimentando con otros fluidos base y/o nanopartículas. Además, el uso de agentes dispersantes podría ser una muy buena opción a la hora de preparar este tipo de suspensiones, ya que estos aumentarían en gran medida el área interfacial sólido-fluido, permitiendo quizás, mejores propiedades térmicas que las obtenidas en el presente trabajo.

CAPÍTULO 6
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Maxwell J. C. A treatise on Electricity and Magnetism, Oxford University Press London, 1892.
- [2] Suleiman Akilu, K.V.Sharma, Aklilu Tesfamichael Baheta, Rizalman Mamat. A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 654–678, 2016.
- [3] Baojie Wei, Changjun Zou, Xiaoke Li. Experimental investigation on stability and thermal conductivity of diathermic oil based TiO₂ nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 537–543, 2017.
- [4] Jagannadha R. Satti, Debendra K. Das, Dustin Ray. Investigation of the thermal conductivity of propylene glycol nanofluids and comparison with correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 871–881, 2017.
- [5] S.M. Sohel Murshed, C.A. Nieto de Castro. Conduction and convection heat transfer characteristics of ethylene glycol based nanofluids – A review. *Applied Energy*, 184, 681–695, 2016.
- [6] Dhinesh Kumar Devendiran, Valan Arasu Amirtham. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 21–40, 2016
- [7] K.H. Solangi, S.N. Kazi, M.R. Luhur, A. Badarudin, A. Amiri, Rad Sadri, M.N.M. Zubir, Samira Gharehkhani, K.H. Teng. A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids. *Energy*, 89, 1065-1086, 2015.
- [8] L. Syam Sundar, K.V. Sharma, Manoj K. Singh, A.C.M. Sousa. Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 185–198, 2017.
- [9] Hee C., Kihm K. D., Lee S. P., Choi S. U. S. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluido (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*. 87, 153107-1, 2005.
- [10] Zhang X., Gu H., Fujii M. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. *Journal Applied Physic*. 100, 044325-1, 2006.

- [11] Liu Yang, Kai Du. A comprehensive review on heat transfer characteristics of TiO₂ nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 11–31, 2017.
- [12] Babita, S.K. Sharma, Shipra Mital Gupta. Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79, 202–212, 2016.
- [13] K.Y. Leong, K.Z. Ku Ahmad, Hwai Chyuan Ong, M.J. Ghazali, Azizah Baharum. Synthesis and thermal conductivity characteristic of hybrid nanofluids – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.
- [14] Genchen Wang, Junfeng Zhang. Thermal and power performance analysis for heat transfer applications of nanofluids in flows around cylinder. *Applied Thermal Engineering*, 112, 61–72, 2017.
- [15] M.I. Pryazhnikov, A.V. Minakov, V.Ya. Rudyak, D.V. Guzei. Thermal conductivity measurements of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 1275–1282, 2017.
- [16] Hwang Y., Lee J. K., Jeong Y. M., Cheong S., Ahn Y. C., Kim S. H. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. *Powder Technology*. 186, 145, 2008.
- [17] Cheng L. X., Bandarra E. P., Thome J. R. Nanofluid two-phase flow and thermal physics: a new research frontier of nanotechnology and its challenges. *Nanosci. Nanotech.* 8 (7), 3315, 2008.
- [18] Schmid G. *Nanoparticles from Theory to Application*, J. Wiley & Sons, Hoboken, 2004.
- [19] Smalley R. E. Future global energy prosperity: the terawatt challenge. *MRS Bulletin*. 30, 412, 2005.
- [20] Wen D., Lin G., Vafaei S., Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*. 7, 141, 2009.
- [21] Wen D. Nanofuel as a potential secondary energy carrier. *Energy and Environmental Science* 3, 591-600, 2010.

- [22] Touloukian, Y. S., R. W. Powell, C. Y. Ho, P. G. Klemens. Thermophysical Properties of Matter, Vol. 2, Plenum Press, New York, 1970.
- [23] Choi S.U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Development and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-V.231/MD, 66, ASME, New York, 99-105, 1995.
- [24] Maxwell J. C. Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford, 1873.
- [25] Tuckerman, D. B., R. F. W. Peace. High-performance heat sinking for VLSI, IEEE Electron. Devices. Lett., EDL-2: 126-129, 1981.
- [26] Jaime Taha-Tijerina, Laura Peña-Parás, Demófilo Maldonado-Cortés. 2D-Based Nanofluids: Materials Evaluation and Performance. Universidad de Monterrey, Mexico, 2016.
- [27] Acikalin, T., S. M. Wait, S. V. Garimella, A. Raman. Experimental investigation of the thermal performance of piezoelectric fans, Heat Transfer Eng., 25(1): 4-14, 2004.
- [28] Glezer, A., R. Mahalingam. System and method for thermal management by synthetic jet ejector channel cooling techniques, U.S. patent 6588497, 2003.
- [29] Lee S., Choi S. U. S. Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems in Recent Advances in Solid/Structures and Application of Metallic Materials. American Society of Mechanical Engineers, New York, PVP-342/MD-72, 227-234, 1996.
- [30] Akachi, H. Structure of a heat pipe, U.S. patent 4921041, 1990
- [31] Ma H. B., Wilson C., Borgmeyer B., Park K., Yu Q., Choi S. U. S., M. Tirumala M. Effect of nanofluid on the heat transport capability in a oscillating heat pipe. Applied Physic Letters. 88, 143116, 2006.
- [32] Ma H. B., Wilson C., Yu Q., Park K., Choi S. U. S., Tirumala M. An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe, J. Heat Transfer, 128(11): 1213-1216, 2006.

- [33] Chien H. T., Tsai C. I., Chen P. H., Chen P. Y. Improvement on thermal performance of a disk-shaped miniature heat pipe with nanofluido. Proc. International Conference on Electronics Packaging technology, IEEE. 389-391, 2003.
- [34] Tsai, C. Y., H. T. Chien, P. P. Ding, B. Chan, T. Y. Luh, P. H. Chen. Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, Mater. Lett., 58: 1461-1465, 2004.
- [35] Kang, S. W., W. C. Wei, S. H. Tsai, S. Y. Yang. Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance, Appl. Therm. Eng., 26: 2377-2382, 2006.
- [36] Wei, W. C., S. H. Tsai, S. Y. Yang, S. W. Kang. Effect of nano-fluid concentration on heat pipe thermal performance, IASME Trans., 2: 1432-1439, 2005.
- [37] Chein, R., G. Huang. Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids, Appl. Therm. Eng., 25: 3104-3114, 2005.
- [38] Chein, R., J. Chuang. Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids, Int. J. Therm. Sci., 46(1): 57-66, 2007.
- [39] Palm, S. J., G., Roy, C. T., Nguyen. Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties, Appl. Therm. Eng., 26(17- 18): 2209-2218, 2006.
- [40] Zhou, D. W. Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation. Int. J. Heat Mass Transfer, 47: 3109-3117, 2004.
- [41] Koo, J., C. Kleinstreuer. Laminar nanofluid flow in microheat-sinks, Int. J. Heat Mass Transfer, 48: 2652-2661, 2005.
- [42] Tzeng S. C., Lin C. W, Huang K. D. Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade cloupling of four-wheel-drive vehicles. Acta Mech. 179,11-23, 2005.
- [43] Xuan, Y., W. Li. Heat transfer enhancement of nanofluids, Int. J. Heat Fluid Flow, 21(1): 58-64, 2000.
- [44] Yu W., Choi S. U. S., Drobnik J. Temperature and concentration dependence of effective thermal conductivities of alumina-oil based nanofluids, presented at the ECI Conference of nanofluids: Fundamental Applications, Copper Mountain, CO, 16-20, 2007.

- [45] You S. M., Kim J. H., Kim K. M. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling of heat transfer. *Applied Physic Letters*. 83, 3374-3376, 2003.
- [46] Vasallo P., Kumar R., D'Amico S. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nanofluids. *Internatioanl Journal of Heat and Mass Transfer*. 47, 407-411, 2004.
- [47] Que, Q., J. Zhang, Z. Zhang. Synthesis , structure and lubricating properties of dialkyldithiophosphate-modified Mo- S compound nanoclusters, *Wear*, 209(1- 2): 8-12, 1997.
- [48] Li, J. F., H. Liao, X. Y. Wang, B. Normand, V. Ji, C. X. Ding, C. Coddet. Improvement in wear resistance of plasma sprayed yttria stabilized zirconia coating using nanostructured powder, *Tribol. Int.*, 37: 77-84, 2004.
- [49] Jordan, A., R. Scholz, P. Wust, H. Föhling, R. Felix. Magnetic fluid hyperthermia (MFH): cancer treatment with ac magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles, *J. Magn. Magn. Mater.*, 201 (1-3): 413-419, 1999.
- [50] Redlich O., Kister A. T. Algebraic representation of thermodynamic properties and the classification of solutions. *Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 345-348, 1948.
- [51] Turian R. M., Sung D. J., Hsu F. L. Thermal Conductivity of granular colas, coal-water mixtures and multi- solid/liquid suspensions. *Fuel*. 70, 1157-1172, 1991.
- [52] Hamilton R. L., Crosser O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1962 a.
- [53] Hamilton R. L., Crosser O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*. 1(3), 187, 1962 b.
- [54] Cheng S. C., Vachon R. I. The prediction of the thermal conductivity of two and three phase solid heterogeneous mixtures. *Int. J. Heat Mass Transfer* 12, 249-264, 1969.
- [55] Jeffrey D. J. Conduction through a random suspension of spheres. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 335 (1602), 355, 1973.
- [56] Eduardo Cao. "Intercambiadores de Calor". Buenos Aires, 1983.

- [57] Kern, D. "Process Heat Transfer", Mc Graw Hill, 1954.
- [58] Javadi F.S., Sadeghipour S., Saidur R., BoroumandJazi G., Rahmati B., Elias M.M., Sohel M.R. The effects of nanofluid on thermophysical properties and heat transfer characteristics of a plate heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009.
- [59] Handa Y. P., Benson G. C. Volume changes on mixing two liquids: a review of the experimental techniques and the literature data. *Fluid Phase Equilibria*. 3, 185-249, 1979.
- [60] Murshed S. M. S., Leong K. C., Yang C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – a critical review. *Applied Thermal Engineering*. 28, 2109, 2008.
- [61] Nagasaka Y., Nagashima A. Absolute measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 14, 1435, 1981.
- [62] Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, New York, 54-56, 1967.
- [63] Timofeeva E. V., Routbort J. L., Singh D. Particle agglomeration and properties of nanofluids. *Journal of Applied Physics*. 106, 014304, 2009.
- [64] Mintsu H. A., Roy G., Nguyen C. T., Doucet D. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. *International Journal Thermal Science*. 48, 363, 2009.
- [65] Wen D., Ding Y. Effective thermal conductivity of aqueous suspension of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids). *Journal of Thermophysical Heat Transfer*. 18, 481, 2004.
- [66] Nieto de Castro C. A., Lourenço M. J. V., Ribeiro A. P. C., Langa E., Vieira S. I. C., Goodrich P., Hardacre C. Thermal properties of Ionic Liquids and Ionic Nanofluids of Imidazolium and Pyrrolidinium Liquids. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55, 653-661, 2010.

[67] Carslaw, H. S., Jaeger J. C. Conduction of Heat in Solids, p. 25. Oxford University Press: London, 1959.

[68] “Organic Solvents”, 3rd Ed. Wiley-Interscience, New York, USA, 1970.

[69] Kakaç S., Liu H., “Heat Exchangers, Selection, Rating and Thermal Design”. Department of Mechanical Engineering, University of Miami. CRC Press. 1995.

[70] Randall M. German. “Particulate Composites. Fundamentals and Applications”. Springer International Publishing Switzerland, San Diego State University, USA, 2016.

[71] “CRC Materials Science and Engineering Handbook”, 3er Ed., 2001.

[72] Williams M. C., Narayanan S., Trulove P., Weidner J. W. “Hydrogen Production, Transport, and Storage 3”, vol. 19 no. 10, The Electrochemical Society, USA, 2009.

[73] US Research Nanomaterials, Inc. Houston, USA.

[74] Anisimova N. I., Bordovsky G. A., Bordovsky V. A., Seldayev V. I. Electrical and Thermal Properties of Bi₂O₃, PbO and Mixed Oxides of Bi₂O₃-PbO System. 2004 International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, 2004.

CAPÍTULO 7

ANEXOS

7.1 Presentaciones en congresos

7.1- PRESENTACIONES EN CONGRESOS

- Echeverri Del Sarto, L; Janyistabro, C; Orozco, M; Camacho, A; Mariano, A. *“Propiedades físicas de nanofluidos formados por Al_2O_3 a distintas temperaturas”*. 100° Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina. 22 al 27 de septiembre de 2015, Merlo, San Luis, Argentina.
- Echeverri Del Sarto, L; Janyistabro, C; Canzonieri, S; Mariano, A. *“Propiedades térmicas de nanofluidos formados por nanopartículas de Al_2O_3 en etilenglicol”*. III CADI, IX CAEDI. 7 al 9 de septiembre de 2016, Resistencia, Chaco, Argentina.