



**UNIVERSIDAD DE SONORA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**Departamento de Ingeniería Química**

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE MICROPARTÍCULAS DE  
COBRE SOBRE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE  
FLUIDOS**

**TESIS**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:**

**Isis Cassandra Ortega Virrueta**

**Miguel Ángel Zepeda Martínez**

**HERMOSILLO, SONORA.**

**MAYO 2014**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos  
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 26 de Mayo de 2014.

**DR. MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO**  
JEFE DEL DEPARTAMENTO  
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional "EFECTO DE LA ADICIÓN DE MICROPARTÍCULAS DE COBRE SOBRE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE FLUIDOS", presentada por:

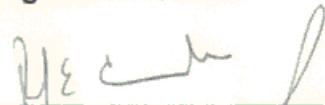
**ISIS CASSANDRA ORTEGA VIRRUETA**  
**MIGUEL ÁNGEL ZEPEDA MARTÍNEZ**

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

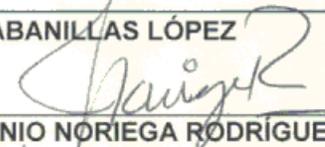
**Ingeniero Químico**

28/05/2014

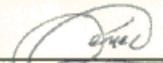
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
DR. RAFAEL CABANILLAS LÓPEZ

28/05/2014

  
\_\_\_\_\_  
DR. JUAN ANTONIO NORIEGA RODRÍGUEZ

28/05/2014

  
\_\_\_\_\_  
DR. MANUEL PÉREZ TELLO

28/05/2014

  
\_\_\_\_\_  
DR. RONALDO HERRERA URBINA

## Tabla de contenido

Índice de Tablas y Figuras .....	3
Resumen .....	8
1 Introducción .....	9
Justificación .....	12
Objetivos.....	13
Metodología.....	14
2 Revisión Bibliográfica.....	15
2.1 Transferencia de Calor.....	15
2.2 Propiedades Térmicas.....	19
2.3 Fluidos Mejorados .....	21
2.4 Predicción de conductividad térmica para fluidos mejorados. ....	25
3 Materiales y Métodos .....	28
3.1 Descripción del método para la medición de conductividad térmica. ....	30
3.2 Equipo utilizado para la medición de conductividad térmica.....	31
3.3 Descripción del método para la preparación de fluidos mejorados.....	37
3.4 Equipo utilizado para la preparación de fluidos mejorados. ....	37
4 Resultados Experimentales .....	40
4.1 Caracterización de Polvo de Cobre. ....	40
4.2 Determinación de conductividad y difusividad térmicas para fluidos mejorados.....	44
5 Conclusiones y Recomendaciones .....	55
Referencias Bibliográficas .....	57
ANEXOS.....	61
Procedimiento para Análisis Coulter.....	62

---

## Índice de Tablas y Figuras

### Tablas

2.1 Conductividad Térmica de diferentes materiales.....	21
3.1 Especificaciones de KD2.....	32
3.2 Especificaciones del sensor de KD2.....	33
3.3 Equipos y materiales de laboratorio utilizados .....	37
4.1 Porcentaje máximo de incremento de conductividad térmica para agua – Cu.....	50
4.2 Porcentaje máximo de incremento de conductividad térmica para etilenglicol – Cu.....	51
4.3 Porcentaje máximo de incremento de conductividad térmica para alcohol 50% - Cu.....	52

## Figuras

2.1 Capa Límite Térmica.....	19
3.1 Diagrama de Metodología experimental.....	28
3.2 Tubo inmovilizado para la medición de propiedades térmicas.....	29
3.3 Vista interior del dispositivo de hilo caliente.....	31
3.4 Elementos del dispositivo KD2.....	32
3.5 a, b Sensor de aguja para medición, c dispositivo de salida de resultados.....	33
3.6 Conductividad térmica calculada contra conductividad térmica teórica.....	35
3.7 Difusividad térmica calculada contra difusividad térmica teórica.....	36
3.8 AM1 Agitador magnético Corning PC-4200.....	38
3.9 Fluido en preparación.....	38
3.10 AS2 Agitado Sónico Branson 2510.....	39
4.1 Imagen de microscopio óptico de las partículas de cobre Porcentaje en volumen acumulativo de tamaño de partícula.....	42
4.2 Detalle de Imagen de microscopio óptico de las partículas de cobre Porcentaje en volumen de partículas de determinado diámetro.....	42
4.3 Razón de Conductividades Térmicas Efectivas de datos experimentales de diversos autores.....	47

## Gráficas

4.1 Porcentaje en volumen acumulativo de tamaño de partícula.....	40
4.2 Porcentaje en volumen de partículas de determinado diámetro.....	41
4.3 Conductividades Térmicas de las 16 posibles bases para fluidos mejorados.....	43
4.4 Conductividades Térmicas de las 16 posibles bases para fluidos mejorados.....	43
4.5 Cambio de la conductividad térmica en Agua – Cobre en el tiempo.....	44
4.6 Cambio de la conductividad térmica en etilenglicol – Cobre en el tiempo.....	45
4.7 Cambio de la conductividad térmica en alcohol al 50% – Cobre en el tiempo.....	46
4.8 Cambio de conductividad térmica y difusividad térmica contra temperatura a una concentración de 0.5g/L para Agua – Cu.....	48
4.9 Cambio de conductividad térmica y difusividad térmica contra temperatura a una concentración de 0.5g/L para Etilenglicol – Cu.....	48
4.10 Cambio de conductividad térmica y difusividad térmica contra temperatura a una concentración de 0.5g/L para Alcohol 50% – Cu.....	49
4.11 Conductividad térmica máxima alcanzada por el fluido agua-Cu a distintas concentraciones.....	50
4.12 Conductividad térmica máxima alcanzada por el fluido etilenglicol-Cu a distintas concentraciones.....	51
4.13 Conductividad térmica máxima alcanzada por el fluido alcohol 50%-Cu a distintas concentraciones.....	52
4.14 Razón entre conductividad térmica de fluido mejorado y de fluido base contra porcentaje de masa de cobre añadido.....	54

---

## Nomenclatura

$A_s$ , área superficial

$D$ , diámetro

$E_i$ , función integral exponencial

$Gr$ , Número de Grashof

$h$ , coeficiente convectivo de transferencia de calor

$k$ , conductividad térmica

$k_f$ , Conductividad Térmica del fluido base

$k_{mf}$ , Conductividad térmica del fluido mejorado

$L$ , longitud característica

$Nu$ , Número de Nusselt

$Pr$ , Número de Prandtl

$Q$ , Calor

$Ra$ , Número de Rayleigh

$T$ , temperatura

$T_{amb}$ , Temperatura ambiente

$T_{inf}$ , Temperatura del medio apartado del cuerpo

$T_s$ , Temperatura de superficie

$t$ , tiempo

$R$ , resistividad térmica

$r$ , radio

---

$\alpha$  difusividad térmica

$\delta$  grosor capa límite térmica

$\Upsilon$  Constante de Euler

---

## Resumen

Hoy en día existen numerosos procesos de la industria en los que se ven afectados su eficiencia y desempeño por un factor limitante el cual es, la baja conductividad térmica de sus fluidos de transferencia de calor. Desde el descubrimiento de las nanopartículas ha habido muchas investigaciones orientadas a diferentes aplicaciones de estas, pero muy pocas se han orientado a la capacidad de dichas partículas para cambiar las propiedades de los fluidos. Recientemente se ha estudiado el desempeño como fluido refrigerante de dichas soluciones. El objetivo de este proyecto es investigar el aumento de la conductividad térmica de un fluido mejorado sintetizado usando partículas de cobre suspendidas en fluidos de transferencia de calor. Se prepararon soluciones con una base líquida de etilenglicol, alcohol y agua con micropartículas de cobre (0.1, 1 y 5g/l), a través de un método de dos pasos. Se utilizó jabón a diferentes concentraciones como surfactante y agitación sónica, para mantener las partículas suspendidas. Se investigaron los valores de la conductividad térmica de dichos fluidos, las mediciones fueron realizadas con un medidor de conductividad térmica de aguja (KD2). La solución de agua con micropartículas de cobre alcanzó un aumento en la conductividad térmica un poco mayor a 3 veces el valor de la del agua. Con el surfactante se logró demostrar que es más eficiente mantener las partículas en suspensión con un agente surfactante. Las partículas de cobre utilizadas en esta investigación no tuvieron efectos tan significativos en las otras bases líquidas Alcohol y Etilenglicol.

## 1 Introducción

Uno de los métodos más efectivos para aumentar la conductividad térmica, consta en aumentar el área superficial disponible para la transferencia de calor, pero esto conlleva a que el sistema de transferencia de calor alcance tamaños imprácticos o inconvenientes [1]. Es por eso que se ha convertido una necesidad actual, mejorar las capacidades térmicas de los fluidos que se utilizan en los sistemas de transferencia de calor como refrigerantes.

Los sólidos cristalinos generalmente tienen una conductividad térmica de 1 a 3 órdenes de magnitud más alta que los fluidos, asimismo se podría esperar que un fluido con partículas sólidas en suspensión aumentara su conductividad térmica en comparación a el mismo fluido puro [3]. Cuando se logran suspender sólidos cristalinos de dimensiones ultra finas en un fluido base para formar una suspensión homogénea estable, y hay un cambio en la conductividad térmica en comparación a la del fluido base, se le llama nanofluido o fluido mejorado [1,4], los sólidos cristalinos pueden ser partículas esféricas o nanotubos de longitudes micrométricas [4]. Los fluidos mejorados se pueden preparar por un métodos de un paso o de dos pasos, cuando es de dos pasos la preparación del fluido es independiente a la síntesis de las partículas, sin embargo al utilizar este método se pueden formar partículas de gran tamaño debido a la aglomeración que ocurre durante el secado, almacenamiento y transportación y re-dispersión de las partículas. Como resultado de esto la conductividad térmica puede verse afectada de manera negativa por consiguiente el objetivo actual es desarrollar métodos de un solo paso donde las partículas se sinteticen directamente en el fluido refrigerante base. Los fluidos mejorados que contienen metales como Cu, Ag y Au han mostrado un incremento en su conductividad térmica en comparación a la de su fluido base [1]. Hasta la fecha, ha habido un pequeño número de estudios basados en las características de dispersión y propiedades reológicas de los fluidos. Es fundamental el estudio de las propiedades reológicas de los fluidos mejorados ya que estos se utilizan como un fluido cabe mencionar que para comprender el mejoramiento del mecanismo de transferencia de calor necesitamos tener conocimiento de las interacciones de las partículas con el fluido y de las partículas entre ellas mismas dentro del fluido [2,4].

La estabilidad de la suspensión es un tema muy importante, tanto para estudios científicos como para aplicaciones prácticas. La acumulación de partículas y la formación de grumos entre

---

las partículas afectan de manera crucial a la estabilidad y puede ser responsable por la diferencia entre los resultados experimentales y las predicciones.

Los fluidos mejorados están diseñados en suspensiones coloidales de partículas en una base de fluido [2]. Las partículas utilizadas en fluidos mejorados están hechas típicamente de metales, óxidos, carburos, o nanotubos de carbono. Algunos fluidos base comunes son agua, etilenglicol y el aceite [1].

En el análisis, tales como dinámica de fluidos computacional, los fluidos mejorados pueden suponerse monofásicos. La teoría clásica de los fluidos monofásicos puede ser aplicada, cuando las propiedades físicas del fluido se toman como una función de las propiedades de ambos componentes y sus concentraciones [3], de tal manera bajo dicha teoría se puede suponer que partículas de orden micrométrico tienen un efecto igual o aproximado a las nanopartículas.

Los fluidos mejorados son creados por dos métodos denominados los métodos de uno y de dos pasos. Las partículas por otro lado son definidas como objetos pequeños que se comportan como una unidad con respecto a sus propiedades de transporte.

El enfriamiento es uno de los desafíos más importantes que enfrentan varios sectores de la industria, a pesar de las muchas investigaciones y avances dirigidos a los requerimientos de la transferencia de calor, aun no se ha visto un aumento considerable de las capacidades de enfriamiento debido a que los fluidos refrigerantes convencionales tienen propiedades muy bajas [2].

## Antecedentes

El estudio de los fluidos mejorados es un campo relativamente nuevo para la ciencia, desde la década pasada han incrementado vertiginosamente las aplicaciones de fluidos para transferir calor y con el progreso de la nanotecnología y la ingeniería térmica, muchos proyectos se están dedicando al mejoramiento de ésta característica.

Las técnicas tradicionales para mejorar la transferencia de calor difícilmente alcanzan a cubrir la demanda de la remoción de calor dentro de un proceso que utilice dispositivos con alto consumo de energía.

No obstante, los fluidos comerciales tienen propiedades bajas de transferencia de calor comparadas con la mayoría de los sólidos, por tal motivo el Argonne National Laboratory, desarrolló un nuevo concepto de fluidos refrigerantes llamados nanofluidos o fluidos mejorados, que son creados introduciendo partículas ultra finas, de metales y no metales, en fluidos tradicionales como agua, aceites de motor y etilenglicol [4].

Algunas investigaciones experimentales han revelado que dichos fluidos tienen conductividades térmicas remarcablemente más altas y propiedades de transferencia de calor mejores que las de los fluidos convencionales puros [4,5]. A la par fue propuesto un modelo teórico y uno experimental que describen el rendimiento de la transferencia de calor de un nanofluido fluyendo dentro de un tubo, los resultados experimentales indican que la conductividad térmica incrementa sustancialmente con la fracción volumétrica de partículas ultra finas [6].

En 2001, un fluido constituido de partículas de cobre dispersas en etilenglicol, demostró tener una conductividad térmica mucho más efectiva que el etilenglicol puro o etilenglicol conteniendo la misma fracción volumétrica de nanopartículas de óxidos [7]. Así mismo Xuan y Li, han estudiado el comportamiento de la transferencia de calor por convección y del flujo del fluido de cobre – agua en un tubo [8], que después fue detalladamente investigado por Sarit et al. Al introducir un experimento con incrementos de temperatura de los nanofluidos hechos a base de agua – cobre presentándolo como CuO y agua – aluminio como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, los resultados indicaron un incremento positivo en las características estudiadas con la temperatura, lo que hace a los fluidos mejorados aún más atractivos para aplicaciones con grandes cantidades de energía que las propuestas a temperatura ambiente previamente [9]. Inclusive, la curva de cambio de fase

---

(ebullición) para los nanofluidos saturados a 60°C ha demostrado que el flux de calor crítico incrementa enormemente comparado con el del agua pura. (~200% de incremento) [10].

Hacia 2004, algunos investigadores estudiaron el comportamiento térmico de un fluido con oro en un intercambiador de calor, con una tubería de 170mm de longitud y un diámetro externo de 6mm. Los rangos de resistencia térmica para el intercambiador eran de 0.17 a 0.215°C/W. Los resultados obtenidos mostraron que la resistencia térmica del dispositivo es más baja con el uso de nanofluidos que con el agua pura [11].

Para dar algún dato reciente, el número de artículos encontrados en SCOPUS, desde 1993 hasta enero de 2012, bajo los motores de búsqueda de “Nanofluidos y sus propiedades de transferencia de calor” fueron incrementados de manera importante y bajo el título de “Investigación de Fluidos Mejorados” se encontraron aproximadamente 87, lo cual es indicador de la importancia e interés de estas nuevas investigaciones.

### **Justificación**

La necesidad de nuevos sistemas refrigerantes para la industria energética ha crecido debido a las cantidades de energía que deben transportarse de una parte del proceso a otra. Por lo cual la investigación de la mejora de los fluidos que actualmente actúan como medios de transporte es preponderante. Es por este motivo que se requiere cimentar la base de una línea de investigación aún más profunda, a través de la generación de datos que permitan conocer el comportamiento de los fluidos mejorados, su eficacia y el establecimiento de un método alternativo para crearlos, así como un estado de arte que permita, en un futuro resolver las limitantes que puedan existir.

---

## **Objetivos**

### Objetivo general

Estudiar experimentalmente la variación de la conductividad térmica en fluidos adicionando partículas metálicas finas.

### Objetivos específicos

Revisión bibliográfica sobre el tema de fluidos mejorados para establecer estado de arte.

Capacitar en medición de propiedades térmicas con técnica de hilo caliente.

Seleccionar tres fluidos a estudiar y determinar diámetro de partículas por medio de la técnica de difracción láser.

Establecer técnicas de preparación y medición de propiedades térmicas en tres fluidos mejorados con partículas de cobre variando concentración de partículas, concentración de surfactante y temperatura.

---

## **Metodología.**

Se realizó una extensa revisión bibliográfica sobre fluidos mejorados térmicamente para establecer el estado de arte del tema. En forma específica, se consultaron artículos relacionados con fluidos mejorados que utilizan cobre o compuestos de cobre.

Se capacitó en la medición experimental de la conductividad térmica en fluidos usando equipo especial de hilo caliente.

Se seleccionaron tres fluidos a estudiar: agua, alcohol y etilenglicol.

Se utilizó partículas de cobre de 20 a 40 micrómetros de diámetro.

La mezcla se preparó como una suspensión, agregando el cobre en micro partículas a la base líquida y por dos medios de agitación continuas fueron suspendidas las partículas para efectuar la medición correspondiente. Variando tiempo de agitación, concentración de partículas y adición de surfactante.

Análisis y presentación de resultados.

## 2 Revisión Bibliográfica

### 2.1 Transferencia de Calor.

De acuerdo con Olmo y Nave, la transferencia de calor se produce normalmente desde un objeto con alta temperatura, a otro objeto con temperatura más baja. La transferencia de calor cambia la energía interna de ambos sistemas implicados, de acuerdo con la primera ley de la Termodinámica.

#### 2.1.1 Mecanismos de Transferencia de Calor por diferencia de temperatura.

##### Convección

El enfriamiento a partir de la circulación de un fluido líquido o gaseoso se llama convección, la convección es una forma de transferencia de calor y se caracteriza porque esta se lleva a cabo a través de un fluido que transporta la energía calórica entre gradientes de temperatura. La convección se produce únicamente por medio de fluidos, es en sí, el transporte de calor a causa del movimiento del fluido.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido e incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido.

En la transferencia de calor libre o natural un fluido es más caliente o más frío y en contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido.

La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del Enfriamiento de Newton

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf}) \quad (2.1)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de convección  $A_s$  es el área del cuerpo en contacto con el fluido,  $T_s$  es la temperatura en la superficie del cuerpo y  $T_{inf}$  es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

El coeficiente de convección depende de múltiples parámetros relacionados con el flujo del fluido a través del cual se da la convección:

- Tipo de convección (forzada o natural)
- Régimen del fluido (laminar o turbulento)

- Velocidad del flujo
- Viscosidad del fluido,
- Densidad del fluido,
- Conductividad térmica del fluido,
- Calor específico del fluido.
- Coeficiente de dilatación del fluido,
- Forma de la superficie de intercambio
- Rugosidad de la superficie de intercambio
- Temperatura,

Las formas más convencionales de estimarlo se basan en el empleo de correlaciones de números adimensionales, de manera que en general se dispone de una igualdad entre el número de Nusselt, que es proporcional al coeficiente de convección, y una cierta expresión que involucra al número de Reynolds y al número de Prandtl en convección forzada, y al de Prandtl y al número de Grashof en convección natural.

El Número de Nusselt (Nu) es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

Así por ejemplo en un intercambiador de calor por convección natural, cuando el número de Rayleigh es inferior a 1000 se considera que la transferencia de calor es únicamente por conducción y el número de Nusselt toma el valor de la unidad. En cambio para números de Rayleigh superiores, la transferencia de calor es una combinación de conducción y convección, y el número de Nusselt toma valores superiores.

Se define como:

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = \frac{\text{Transferencia de Calor por Conveccion}}{\text{Transferencia de Calor por Conduccion}} \quad (2.3)$$

En la anterior ecuación se define:

$L$  como una longitud característica. Para formas complejas se define como el volumen del cuerpo dividido entre su área superficial.

$k_f$  como la conductividad térmica del fluido.

$h$  como el coeficiente de transferencia de calor.

Asimismo como podemos calcular el Número de Nusselt a partir de la convección y conducción, también podemos relacionar el coeficiente de calor de convección con el de conducción por medio de la siguiente correlación:

$$h = \frac{k}{D_h} Nu_D \quad (2.4)$$

Como queda demostrado en la ecuación 2.4, al aumentar la conductividad térmica, se aumenta de manera proporcional el coeficiente de transferencia de calor.

De esta manera al momento de aumentar el valor de la conductividad térmica de un fluido estamos en mejorando su desempeño como fluido térmico.

Un intercambiador de calor es un dispositivo construido para intercambiar eficientemente el calor de un fluido a otro, tanto si los fluidos están separados por una pared sólida para prevenir su mezcla, como si están en contacto directo. Los intercambiadores de calor son muy usados en refrigeración, acondicionamiento de aire, calefacción, producción de energía, y procesamiento químico.

Las disposiciones más comunes de cambiadores de calor son flujo paralelo, contracorriente y flujo cruzado.

Para el eficiente funcionamiento de un intercambiador de calor se trabaja con un fluido sobre el cual se tiene control de su temperatura; este líquido puede ser enfriado o calentado según sea el fin del intercambiador, como se mencionó el líquido puede estar en contacto directo con el material que va a cambiar su temperatura, este material también puede ser un líquido o un sólido.

En caso de que se quiera enfriar un sólido un nanofluido tendría un impacto grandísimo a la hora de realizar la transferencia de calor, debido a los grandes valores del coeficiente de conductividad; es decir si trabajamos con un nanofluido cuya conductividad térmica es de

aproximadamente 1.2, requeriríamos la mitad de líquido, que si se trabajara con agua, o un intercambiador de calor de la mitad del tamaño de uno que trabajara con agua.

Esto se da dado que las partículas aportan un área de contacto muy amplia al fluido y al momento de suspender una cantidad considerable de partículas con un área superficial determinada dentro de un fluido; estamos aumentando la capacitancia del fluido para recibir y retener una cantidad de calor mayor que la que se tendría sin partículas algunas.

Dependiendo del material, la forma y la naturaleza de las partículas que se le agreguen al líquido se pueden tener diferentes valores del coeficiente de conductividad térmica del nanofluido.

Un equipo de investigadores del Centro Indira Gandhi de Investigación Atómica, en Kalpakkam, India, desarrolló una nueva clase de nanofluidos magnéticamente polarizable que se demuestra una mejora la conductividad térmica de hasta 300% en comparación al fluido base. Se utilizaron nanopartículas de magnetita cubiertas de un ácido graso de diferentes tamaños (3-10  $\mu\text{m}$ ). Se ha demostrado que tanto las propiedades térmicas y reológicas de tales nanofluidos magnéticos son ajustables mediante la variación de la intensidad de campo magnético y la orientación con respecto a la dirección del flujo de calor. Además, se ha demostrado que tales estímulos de respuesta son reversibles y tienen aplicaciones en dispositivos muy pequeños tales como micro-y nano-sistemas electromecánicos.

### **Capa Límite Térmica**

Cuando las partículas de un fluido hacen contacto con la superficie en la que se mueven adquieren una velocidad cero, si difieren las temperaturas del flujo libre de fluido y de la superficie, se genera una capa límite térmica. Al fluir por una superficie, el fluido tiene un perfil de temperatura uniforme durante las primeras etapas. Sin embargo las partículas del fluido que hacen contacto con la placa o superficie por donde fluyen, alcanzan el equilibrio térmico a la temperatura de la superficie de la placa. A su vez estas partículas intercambian energía con las de la capa adyacente de fluido y se producen en el fluido gradientes de temperatura, esta región es la Capa Límite Térmica, que tiene un espesor  $\delta$ , definido como el valor de  $y$  para el que la razón  $[(T_s - T)/(T_s - T_{inf})]=0.99$ . Al aumentar la distancia desde el inicio de la placa, los efectos de transferencia de calor penetran más en el flujo libre y crece la capa límite térmica.

Se demuestra fácilmente la relación entre las condiciones en esta capa límite y el coeficiente de transferencia de calor por convección. El flujo de calor local se obtiene a cualquier distancia  $x$  desde la orilla, mediante la aplicación de la Ley de Fourier al fluido en  $y=0$ .

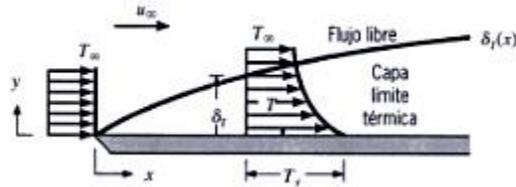


Figura 2.1 Capa Límite Térmica

Por tal motivo las condiciones en la capa límite térmica, que influyen fuertemente en el gradiente de temperatura de la pared, determinan la transferencia de calor a través de la capa límite. Como  $(T_s - T_{inf})$  es una constante, independiente de  $x$ , mientras que  $\delta$  se incrementa al aumentar  $x$ , los gradientes de temperatura en la capa límite deben disminuir al aumentar  $x$ . En consecuencia la magnitud del gradiente de temperatura respecto a  $y$  disminuye al aumentar  $x$ . [16]

### Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas con mayor contenido energético le entregan energía a las de menor contenido. Produciendo un flujo de calor de la mayor temperatura a la menor. Los mejores conductores de calor son los metales. La conducción solo se lleva a cabo si existe un delta de temperatura y se expresa bajo la siguiente ecuación, llamada la Ley de Fourier, donde  $k$  es la conductividad térmica:

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dt} \quad (2.2)$$

### 2.2 Propiedades Térmicas.

Las propiedades térmicas describen el comportamiento de los materiales frente a la acción del calor. Las más importantes son: Calor específico, conductividad térmica, coeficiente de dilatación lineal, índice de fluencia y difusividad térmica.

El concepto de conductividad térmica se define como la propiedad física intensiva de los materiales que mide la capacidad de un material para conducir el calor a través de sus moléculas a otras moléculas adyacentes o sustancias con las que no está en contacto. En el SIU se mide en W/(K .m). Para un material isótropo la conductividad térmica es un escalar k definido como

$$k = \frac{q}{|\Delta T|} \quad (2.5)$$

La conductividad por lo general es elevada en metales, baja en polímeros, y muy baja en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, que se denominan por ello aislantes térmicos.

Hay una serie de factores que influyen en la conductividad térmica, estos factores se mencionan a continuación:

- Temperatura: El efecto de la temperatura es diferente para metales y no metales, en los metales la k es primariamente debido a los electrones libres. En metales puros la resistividad eléctrica frecuentemente se incrementa de manera proporcional a la temperatura, y por tanto la k permanece casi constante. En aleaciones la conductividad se incrementa de manera proporcional a la temperatura
- Cambios de fase: cuando el materiales sufre de cambios de fase la conductividad térmica puede cambiar un ejemplo claro de esto es el del agua, y hielo
- Estructura del material: las sustancias cristalinas puras exhiben diferentes conductividades térmicas en diferentes direcciones del cristal.
- Conductividad eléctrica: en metales la k varía muy a la par con la conductividad eléctrica ya que los electrones de valencia transportan no solo corriente eléctrico sino también energía calórica.

Los fluidos convencionales como agua, etilenglicol o aceite tienen valores de conductividad térmica relativamente bajos a diferencia de la mayoría de los sólidos, los cuales tienen magnitudes de 1 a 3 órdenes mayores que los previamente mencionados, por ejemplo; la conductividad térmica del cobre es 700 veces mayor que la del agua y 3000 veces mayor que la del aceite de motor [7].

<b>Material</b>		<b>Conductividad térmica (W/m-K)</b>
<i>Sólidos metálicos</i>	Plata	429
	Cobre	401
	Aluminio	237
<i>Sólidos no metálicos</i>	Diamante	3300
	Nanotubos de Carbono	3000
	Silicio	148
	Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40
<i>Líquidos metálicos</i>	Sodio a 361°C	72.3
<i>Líquidos no metálicos</i>	Agua	0.613
	Etilenglicol	0.253
	Aceite de motor	0.145

Tabla 2.1. Conductividad térmica de diferentes materiales [34].

La conductividad térmica efectiva es aquella que depende de las características del sólido como conductividad térmica, propiedades radiativas de la superficie así como de la naturaleza y fracción volumétrica del medio vacío.

### 2.3 Fluidos Mejorados

Un fluido mejorado es un fluido que contiene partículas de tamaño de orden nanométrico. Estos líquidos están diseñados en suspensiones coloidales de dichas partículas en una base de fluido. Las partículas utilizadas en fluidos mejorados están hechas típicamente de metales, óxidos, carburos, o nanotubos de carbono. Algunos fluidos base comunes son agua, etilenglicol y el aceite.

En el análisis, tales como dinámica de fluidos computacional, los fluidos mejorados pueden suponerse monofásicos. La teoría clásica de los fluidos monofásicos puede ser aplicada, cuando

las propiedades físicas del fluido se toman como una función de las propiedades de ambos componentes y sus concentraciones.

Los fluidos mejorados son suministrados por dos métodos denominados los métodos de uno y de dos pasos.

Las partículas por otro lado son definidas como objetos pequeños que se comportan como una unidad con respecto a sus propiedades de transporte, las partículas se clasifican de acuerdo a su diámetro. Las partículas gruesas tienen un rango de entre 20,000 y 2,500 nanómetros, mientras que las partículas finas miden de entre 2,500 a 100 nanómetros, las partículas ultra finas o nanopartículas miden entre 1 y 100 nanómetros.

El Argonne National Laboratory en Illinois, Estados Unidos es un pionero en el ámbito de los fluidos mejorados aplicando la nanotecnología a la ingeniería térmica, los fluidos mejorados son una nueva clase de material sólido - líquido compuesto por partículas finas o nanotubos de carbono dispersos en un fluido refrigerante base como etilenglicol, agua o aceite [1,12].

Los fluidos para calentar o enfriar son de gran importancia en muchos campos de la industria, como la electrónica, el calentamiento, sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire. La conductividad térmica de estos fluidos juega el papel más importante en el desarrollo de nuevos equipos intercambiadores de calor más eficientes.

### **2.3.1 Técnicas usadas para la síntesis de fluidos mejorados**

Para realizar los primeros estudios de los fluidos mejorados se usó un método de dos etapas, en el cual las partículas o nanotubos eran producidos como polvo seco y después se dispersaban a un fluido en una segunda etapa de producción, a diferencia del método de una etapa en el cual se lleva a cabo la síntesis de las partículas directamente en el fluido refrigerante. Los métodos se describen más detalle en las siguientes secciones

#### ***Método de dos etapas.***

La preparación del fluido comienza mezclando el mismo con el material, en la primera etapa las partículas o nanotubos se producen y se obtienen como polvos, para ser después introducidos al fluido base en la segunda etapa.

Las partículas pueden ser producidas a partir de varios procesos, los cuales pueden ser categorizados en uno de cinco métodos de obtención, estos cinco métodos son:

Reducción de sal de un metal de transición [18,19]

Método de descomposición térmica y fotoquímica [6]

Reducción de ligando y desplazamiento de organometales

Síntesis de vapor metálico

Síntesis electroquímica [20]

#### ***Método de una etapa.***

Actualmente existen muy pocos métodos para preparar este tipo de fluidos a través de un proceso de una sola etapa. Estos métodos incluyen la descomposición térmica de un precursor organometalico con la presencia de un estabilizador [16], reducción química [8] y síntesis con poliol [17, 18,19]

El método de síntesis con poliol es uno de los más conocidos para obtener nanopartículas de metales nobles. En este proceso un precursor de metal se disuelve en un poliol líquido (usualmente etilenglicol) después se ajustan las condiciones experimentales para lograr la reducción del precursor metálico por el poliol, seguido de una nucleación metálica atómica y un crecimiento de las partículas metálicas.

La técnica de evaporación directa fue desarrollada por Choi. Consiste en un cilindro rotatorio con un fluido dentro. En el medio del cilindro un material es vaporizado. El vapor se condensa al ponerse en contacto con el fluido enfriado [1]. Los inconvenientes de esta técnica sin embargo, son que el uso de líquidos de baja de presión de vapor es esencial y únicamente puede ser producido en cantidades muy limitadas.

Varias técnicas químicas de una sola etapa pueden ser utilizadas para la elaboración de nanofluidos. Como el método para producir nanopartículas en varios solventes a través de la reducción de sales metálicas para producir suspensión coloidal. Se puede controlar el tamaño de una manera muy fácil y estrechar la distribución de partícula a través de estos métodos

El sistema para síntesis de nanopartículas de arco sumergido (SANSS) se desarrolló para preparar nanopartículas de CuO dispersas uniformemente en un líquido dieléctrico (agua desionizada). El método logra producir un nanofluido estable. El principio una barra de cobre puro es sumergida a un líquido dieléctrico en una cámara al vacío. Mientras que una fuente de energía eléctrica le proporciona la energía necesaria para producir un arco eléctrico de entre 6000 a 12000°C el cual derrite y vaporiza la vara de cobre en la región donde se genera el arco. Al mismo tiempo el agua desionizada también es vaporizada por el arco. El metal vaporizado pasa por una nucleación, un crecimiento, y una condensación, este termina siendo dispersado a través del agua desionizada en forma de nanopartículas. Con este método se obtienen nanofluidos con partículas de CuO de entre 49.1 y 38.9

También se han sintetizado nanotubos de carbono mediante descarga directa de plasma de carbón en agua [46].

### **2.3.2 Métodos para estabilizar los fluidos mejorados.**

Para prevenir la agrupación de partículas, se tiene que equilibrar a las fuerzas de atracción entre las partículas, hay dos mecanismos que logran este cometido:

Estabilización electroestática y estabilización estérica

#### ***Estabilización electroestática***

La presencia de una carga eléctrica en las superficies de las partículas es una fuente de estabilidad cinética. La estabilización ocurre por la adsorción de los iones en la superficie electrofílica del metal. La adsorción crea una capa eléctrica doble lo cual genera una fuerza de repulsión entre las aglomeraciones [18, 49,20]. La estabilización eléctrica es sensible al pH y de uso limitado

#### ***Estabilización estérica***

La estabilización estérica se logra cubriendo el metal por capas de material estéricamente voluminoso, como polímeros [11,12] o surfactantes [13, 14, 15]. Estos adsorbatos grandes proporcionan una barrera estérica que evita que las partículas del metal se junten. Las suspensiones de nanotubos de carbono por lo general se estabilizan utilizando este método. [2]

En adición a este método se puede utilizar la agitación sónica para lograr mantener las partículas en suspensión

La agitación sónica es el acto de aplicación de la energía del sonido (generalmente ultrasonidos) para agitar las partículas

Una corriente eléctrica transmite su energía a un sistema mecánico que la convertirá en vibraciones de alta intensidad que generan ondas de ultrasonido. Los ultrasonidos generan, a su vez, vibraciones en el material objetivo. Si contiene líquidos, se generarán millones de burbujas microscópicas, las cuales sufren rapidísimos procesos de expansión y colapso que pueden transmitir su energía a otros materiales. Este fenómeno se llama cavitación y puede ser incrementado añadiendo al medio pequeñas esferas de vidrio.

Cuando el ultrasonido llega a la solución y se generan las burbujas dentro de dicha mezcla, las nanopartículas se dispersan aún más debido a los choques que sufren las burbujas, con la energía cinética proporcionada por los choques, las nanopartículas logran mantenerse en suspensión para prevenir el asentamiento de estas.

#### **2.4 Predicción de conductividad térmica para fluidos mejorados.**

Numerosos estudios han demostrado que los fluidos mejorados tienen propiedades físicas superiores, una de las más estudiadas ha sido la conductividad térmica, sin embargo aún es un tema controversial, ya que a pesar de los métodos propuestos para explicar la conductividad térmica, no se ha logrado encontrar un patrón y los modelos clásicos han quedado insuficientes.[23,24]

Así mismo se ha observado que fluidos de cobre muestran un incremento anormal en la conductividad térmica que es mayor a lo predicho a través de modelos convencionales de la Teoría de Medio Efectivo, aun a concentraciones muy bajas (<1 % vol.). Eastman et al. y Jana et al encontraron que para fluidos de Agua-Cobre existen incrementos de hasta un 74% en conductividad con un porcentaje en volumen de 0.3%. [25]

Más recientemente Garg et al. [26] midieron la conductividad térmica de cobre en etilenglicol y encontraron también un incremento atípico. El valor era el doble al predicho por la TME. Estos estudios demuestran que los fluidos mejorados metálicos son confiables y de alta calidad para aplicaciones.

---

En contraste, incrementos normales y apegados a la predicción de la TME también han sido encontrados por otros grupos, estas discrepancias pueden ser a causa de que no existe una síntesis controlada ni técnica de caracterización y medición de conductividad térmica única. [27]

Choi et al midieron un material basado en nanotubos de carbono y encontraron un comportamiento no lineal de la conductividad térmica a bajas concentraciones [28] este es otro comportamiento anómalo de nanofluidos que la teoría clásica no puede predecir. De la misma manera, Murshed et al y Hong et al demostraron que fluidos que contienen partículas esféricas tienen un comportamiento no lineal.

Das et al fue el primer grupo que demostró que fluidos con partículas esféricas tenían una gran dependencia de la temperatura, en contraste otros grupos que midieron conductividad térmica observaron una independencia de la temperatura.

Kim y colaboradores demostraron que la conductividad térmica incrementa linealmente con la disminución de diámetro de partícula. [29]. En contraste, muchos otros grupos han observado un incremento de conductividad térmica con el incremento del tamaño de partícula. [30,31]

La consideración de varios resultados de caracterización de fluidos mejorados lleva a la conclusión de que muchos parámetros pueden ser responsables del comportamiento de la conductividad térmica de los fluidos mejorados.

Algunos de los parámetros posibles son el tamaño de partícula, la relación longitud radio de la misma, el tiempo de homogenización y de asentamiento de partículas, así como el porcentaje en volumen de la fase dispersa.

También deben considerarse la existencia de aglomerados y la cercanía de las partículas entre ellas, la naturaleza de las mismas así como la presencia de dispersantes que pueden influir en los resultados de conductividad térmica.

---

Otros factores sugeridos como posibles causas de los resultados en el cambio de conductividad térmica pueden ser:

- El orden de la estructura del líquido en la interface sólido-líquido.
- La resistencia interfacial.
- Movimiento Browniano de partículas que habilita la formación de aglomerados.[32]

### 3 Materiales y Métodos

A continuación se presenta un esquema de los pasos generales seguidos para la realización de mediciones.

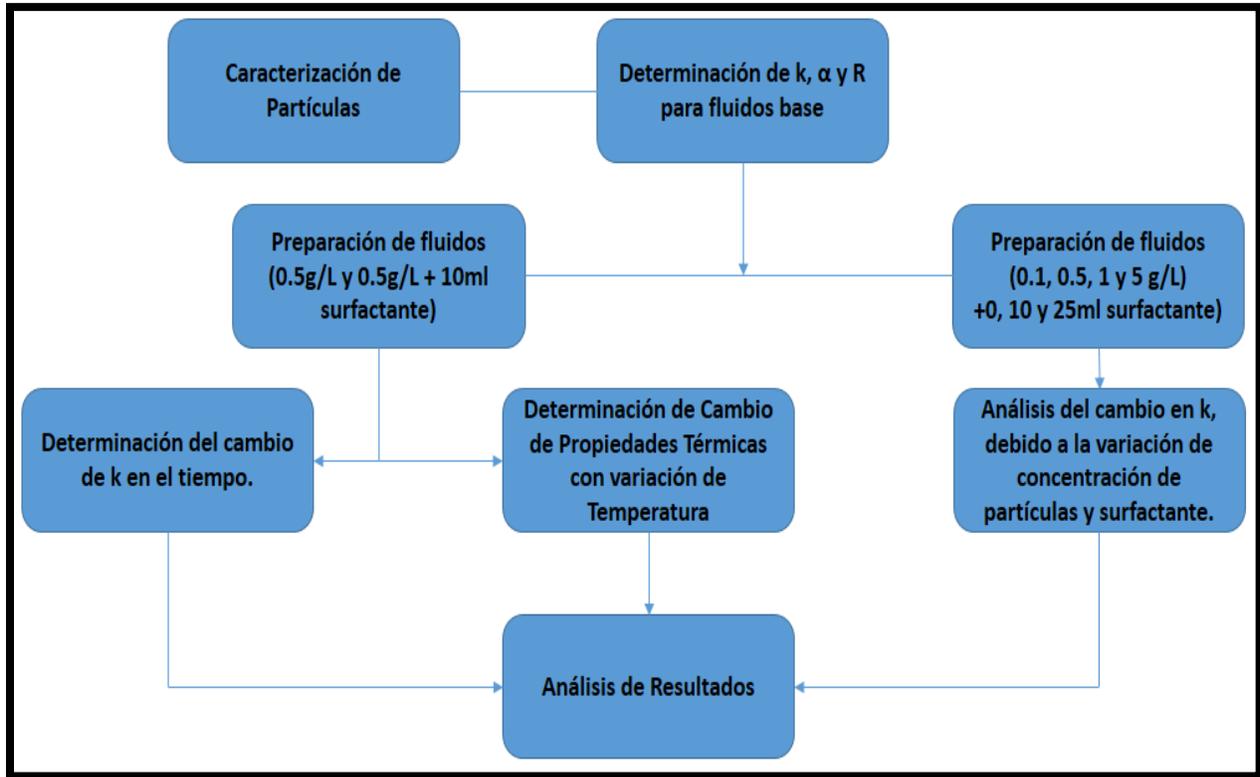


Figura 3.1 Diagrama de la Metodología Experimental.

La experimentación llevada a cabo se basó, en tres objetivos primordiales, el primero fue la capacitación sobre el uso y operación del equipo de medición, para cumplir con esto, se reunieron 16 soluciones diferentes, compuestas de agua, aceite lubricante, glicerina, acetona, etilenglicol, agua y alcohol a concentraciones variables, así como cloruro de potasio y de sodio.

Las soluciones fueron estrictamente preparadas con agua destilada, la concentración se expresó en porcentaje en volumen para líquidos y para las sales g/L.

Cada sustancia se muestreo con una alícuota representativa de 10 ml colocada en un tubo de ensayo, que a su vez se inmovilizó con pinzas de presión para evitar el movimiento del líquido, tal como se puede observar en la Figura 4.1.

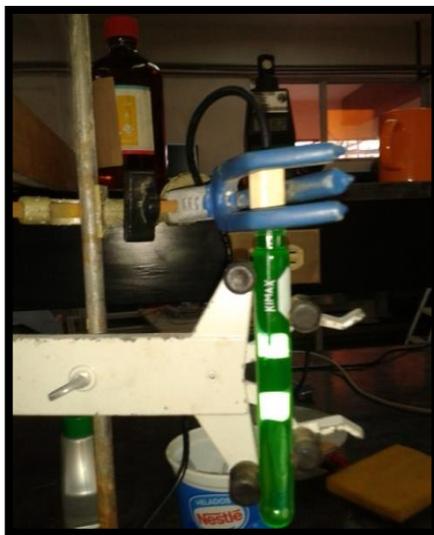


Figura 3.2 Tubo inmovilizado para la medición de propiedades térmicas.

El equipo utilizado para la medición de conductividad térmica, tiene un tiempo de respuesta de 3 minutos, y se estipularon otros 3 minutos para reincidir en las siguientes pruebas de confirmación, de manera que el dispositivo pudiera enfriarse. Una vez que terminada la experimentación con cada solución, se dispuso de ella en contenedores de plástico.

Concluidas las mediciones, se analizaron los datos de forma comparativa y se tomaron solo tres sustancias para ser mejoradas con las partículas de cobre, agua, etilenglicol y alcohol al 50%.

Las tres sustancias utilizadas, se sometieron a la adición de partículas ultra finas de cobre, para otra serie de mediciones.

Las mediciones realizadas después de la determinación de las propiedades térmicas de la fase dispersante, fueron:

1. Determinación de tiempo de asentamiento de partículas de forma indirecta mediante la determinación del cambio de conductividad térmica en el tiempo. (Concentración 0.5g/L)

a) Para fluido en ausencia de surfactante.

b) Para fluido en presencia de surfactante. (10ml)

2. Análisis del cambio en Conductividad Térmica debido a la variación de concentración de partículas y surfactante.

- a) Concentración de cobre a 0.1g/L de solución. (Con 0 ml, 10 ml y 25ml de surfactante.)
- b) Concentración de cobre a 0.5 g/L de solución. (Con 0 ml, 10 ml y 25ml de surfactante.)
- c) Concentración de cobre a 1g /L de solución. (Con 0 ml, 10 ml y 25ml de surfactante.)
- d) 5 Concentración de cobre a 5 g/L de solución. (Con 0 ml, 10 ml y 25ml de surfactante.)

### 3. Determinación de Cambio de Propiedades Térmicas con variación de Temperatura

- a) Se prepara el fluido con una concentración de cobre de 0.5g/L
- b) Se lleva a una temperatura de 60°C con placa de calentamiento.
- c) Se extrae una alícuota cada 3 minutos
- d) Se miden características térmicas hasta temperatura ambiente.

#### **3.1 Descripción del método para la medición de conductividad térmica.**

La exactitud en la medición de propiedades térmicas toma particular importancia en numerosas aplicaciones químicas, físicas o de la medicina. Los métodos estandarizados para la medición de estos parámetros están basados en técnicas de estado estable. Para la conductividad térmica se han utilizado e inventado varios métodos, sin embargo uno de gran importancia es el de hilo caliente, que es relativamente simple y rápido y está basado en la medición del incremento de la temperatura de un hilo calentado uniformemente.

Un sistema de hilo caliente normalmente envuelve un cilindro vertical donde el hilo o cable sirve tanto como termómetro como elemento de calentamiento. Este método es conocido por ser rápido y eficiente para mediciones de conductividad térmica en fluidos. El calor generado se disipa de una línea continua, delgada, que es el cable o hilo, de longitud infinita hasta el medio fluido. En la mayoría de los casos se utiliza aluminio como opción para el cable [23] [24].

En la práctica, el cable es eléctricamente calentado y el cambio en la resistencia del cable, así como su temperatura se miden en función del tiempo usando un puente circuito Wheatstone y los datos se computarizan en el sistema adquirente de datos. Finalmente la conductividad térmica

se determina a partir del calor generado y la pendiente de la gráfica del cambio de temperatura contra el logaritmo del tiempo.

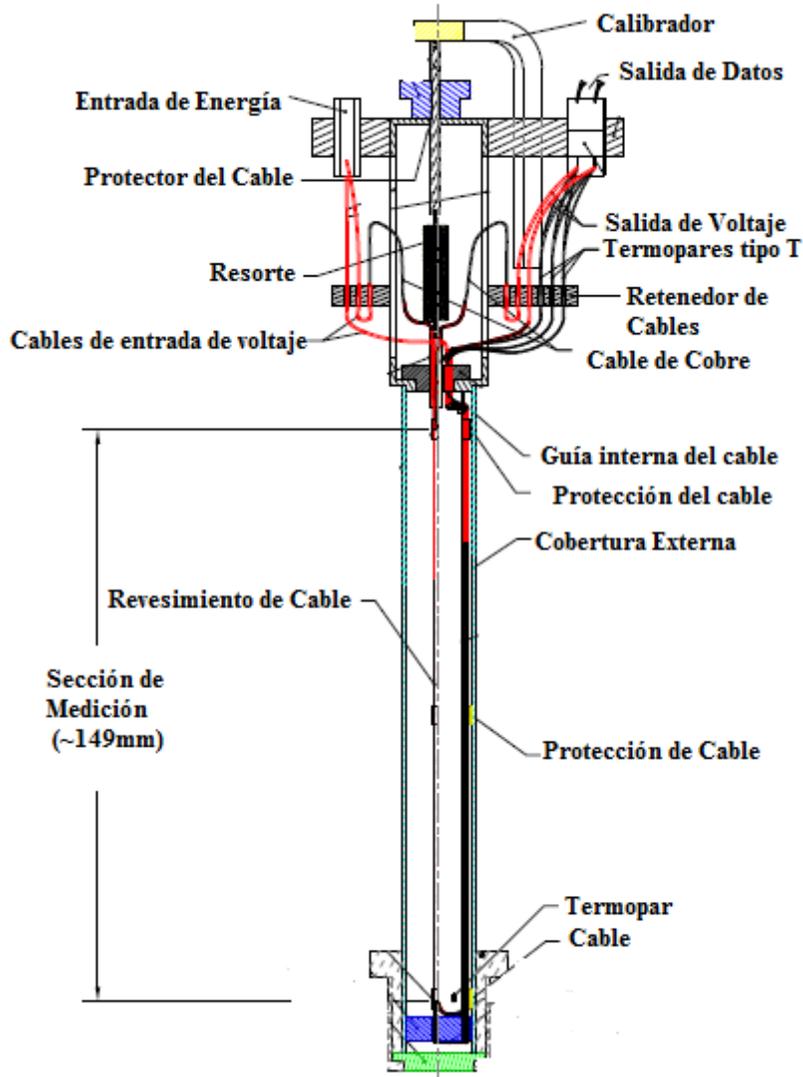


Figura 3.3 Vista interior del dispositivo de hilo caliente [25]

### 3.2 Equipo utilizado para la medición de conductividad térmica

La conductividad térmica fue medida con un dispositivo llamado KD2 que funciona de acuerdo a las suposiciones subsecuentes.

El KD2 calcula los valores de conductividad térmica (k), resistividad (R) y difusividad (D), monitoreando la disipación de calor desde una línea de calor dada a un cierto voltaje.



Figura 3.4 Elementos del Dispositivo KD2

### Dispositivo de análisis

<b>Velocidad de Medición</b>	2 minutos
<b>Exactitud</b>	5% Conductividad térmica – resistividad. 10% Difusividad térmica.
<b>Fuente de poder</b>	Batería de ion litio de 3.0V CR2
<b>Peso</b>	Peso: 148g
<b>Temperatura de operación</b>	5°C – 40°C
<b>Rango de Medición</b>	k (conductividad térmica) 0.02 – 5 W/m°C $\alpha$ (difusividad térmica) 0.1- 1.0 mm <sup>2</sup> /s R (resistividad térmica) .5 – 10 m°C/W

Tabla 3.1 Especificaciones de KD2

### Sensor

El sensor consiste de una aguja conectada a un cable con extremo USB introducido al dispositivo.

<b>Longitud de aguja</b>	60mm
<b>Diámetro de aguja</b>	1.28mm
<b>Longitud de cable</b>	72cm

Tabla 3.2 Especificaciones del sensor de KD2

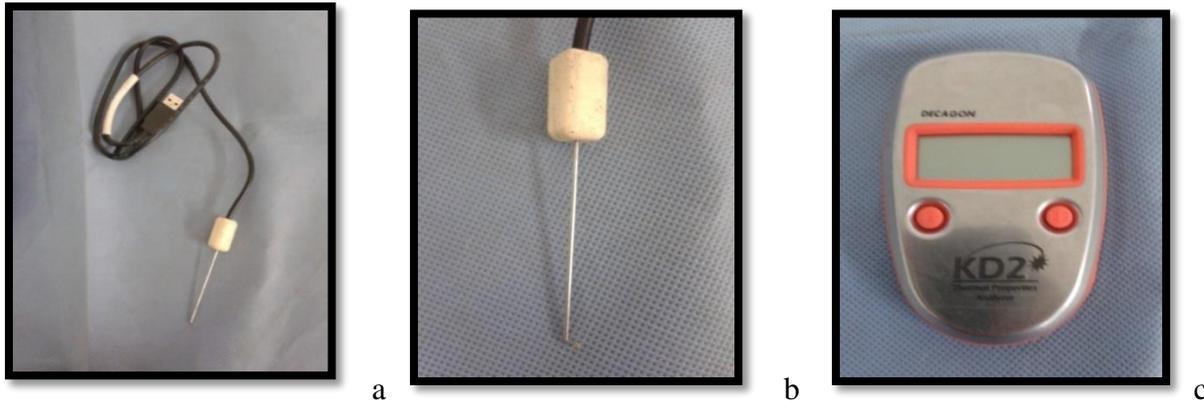


Figura 3.5 a) y b) sensor de aguja para medición, c) dispositivo de salida de resultados.

### ***Ecuaciones de estado.***

Para cálculo de los parámetros de interés, el KD2, requiere de ciertos principios y suposiciones que se basan en la ecuación de conducción de calor radial en un medio homogéneo e isotrópico dada a continuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.1)$$

Donde T es la temperatura (°C), t es el tiempo (s),  $\alpha$  es la difusividad térmica ( $m^2s^{-1}$ ) y r es la distancia radial (m). Cuando la aguja calentada eléctricamente se introduce a un medio, el aumento de la temperatura, de una temperatura inicial  $T_0$ , a cierta distancia, r, de la aguja es dada por la siguiente ecuación

$$T - T_0 = \left( \frac{q}{4\pi k} \right) Ei \left( \frac{-r^2}{4\alpha t} \right) \quad (3.2)$$

Donde q es el calor producido por unidad longitudinal por unidad de tiempo ( $Wm^{-1}$ ), k es la conductividad térmica del medio ( $Wm^{-1} C^{-1}$ ) y Ei es la función integral exponencial.

$$-Ei(-a) = \int_a^{\infty} \frac{1}{u} \exp(-u) du = -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + \frac{r^2}{4\alpha t} - \left(\frac{r^2}{8\alpha t}\right)^2 + \dots \quad (3.3)$$

Con  $a=r^2/4\alpha t$  y  $\gamma$  es la constante de Euler. Cuando  $t$  alcanza valores muy elevados, los términos de orden más altos pueden ser ignorados, de esta manera si combinamos la ecuación (3.3) y la (3.2) obtenemos:

$$T - T_0 \cong \frac{q}{4\pi k} \left( \ln(t) - \gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha}\right) \right) \quad (3.4)$$

Aparentemente la relación entre la conductividad térmica y  $\Delta T = T - T_0$ , muestran que  $\Delta T$  y  $\ln(t)$  están relacionados linealmente por una pendiente  $m = (q/4\pi k)$ . Aplicando una regresión linear de  $\Delta T$  en  $\ln(t)$  da como resultado:

$$k \cong \frac{q}{4\pi m} \quad (3.5)$$

Donde se conoce el valor de  $q$  por la energía suministrada al calentador. La difusividad también se puede obtener de la ecuación (3.6). La intersección de la línea de regresión con el eje  $t$  ( $\Delta T = 0$ ) da como resultado

$$\ln(t_0) = \gamma + \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha}\right) \quad (3.6)$$

La ecuación 3.6 nos proporciona la difusividad a partir de  $t_0$  ya calculado (de la intersección de  $\Delta T$  con  $\ln(t)$ ) y una  $r$  finita.

Ya que los términos de órdenes elevados han sido eliminados, la ecuación 3.4 no es exacta. Sin embargo si la pendiente y la intercepción son calculadas solo para valores de  $\Delta T$  y  $\ln(t)$ , donde  $t$  es utilizado por  $k$  y  $\alpha$ . Para verificar estas relaciones, se utilizaron valores reales de  $k$  y  $\alpha$ , variando tanto  $k$  y la capacidad de calor volumétrica ( $\rho c_p$ ), y la pendiente resultante se tabulan para un tiempo de 1 a 30 segundos. Dichas gráficas se grafican logarímicamente.

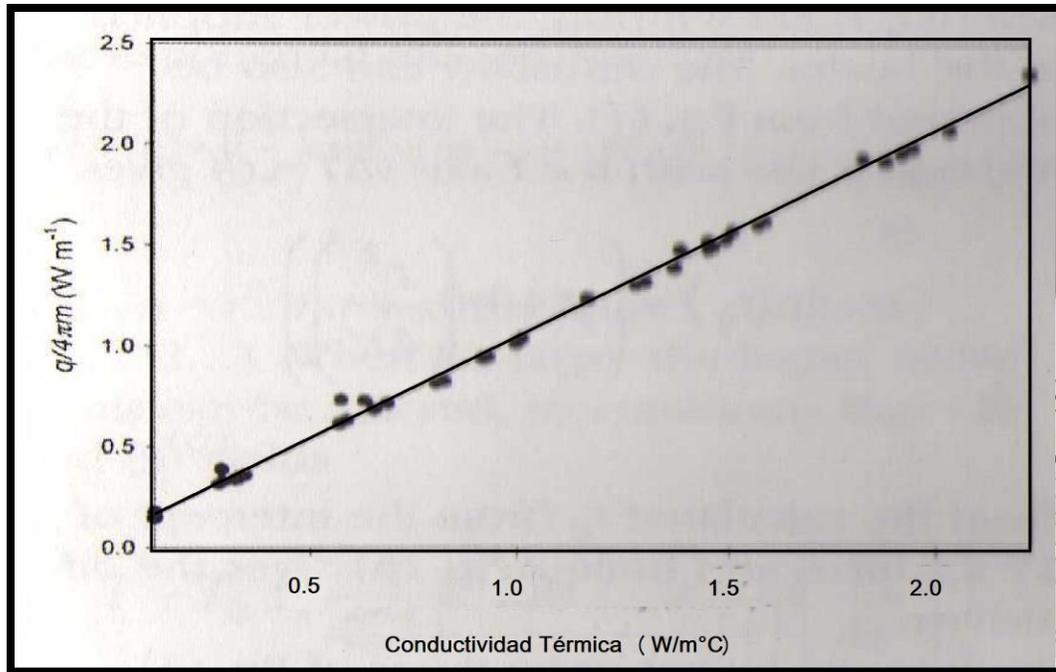


Figura 3.6 Conductividad térmica calculada contra conductividad térmica teórica.

A partir del cálculo de difusividad, se puede interceptar un valor para el logaritmo de  $x$ , que proporciona un valor para  $k$ .

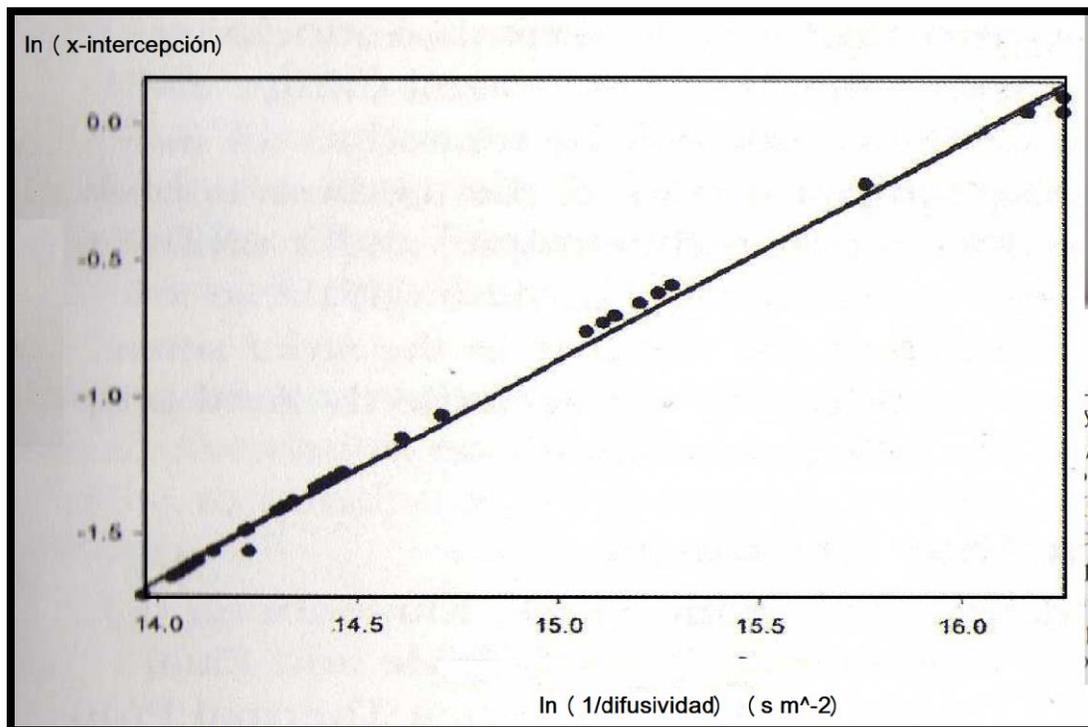


Figura 3.7 Difusividad térmica calculada contra difusividad térmica teórica.

El análisis experimental se basa en que el calentador y el sensor tienen su propia conductividad y difusividad, la cual usualmente difiere de las del material al que se le medirán las propiedades. Se ha demostrado experimentalmente que las relaciones entre las ecuaciones (3.6) y (3.5) nos permiten calcular  $k$  y  $\alpha$ , sin embargo los factores empíricos se deben introducir a las fórmulas.

***Suposiciones teóricas.***

Las fuentes de calor de gran longitud deben ser consideradas como longitudes infinitas. Los medios son considerados isotrópicos y homogéneos y con una temperatura inicial uniforme  $T_0$ .

Estas suposiciones no son estrictamente reales, sino que son adecuadas para las mediciones aproximadas de propiedades térmicas.

### 3.3 Descripción del método para la preparación de fluidos mejorados.

1. Las partículas de cobre se añadieron al medio dispersante a la concentración requerida. Las partículas fueron pesadas en el equipo MB6.

2. La mezcla fue agitada en un agitador magnético, AM1 durante tiempo suficiente para dispersar las partículas (~25min).

3. Se añadió la cantidad de surfactante adecuada, en los casos que así se planeó hacerlo.

4. El fluido se ingresó, en de un vaso de precipitados de 250ml, al equipo de agitación sónica AS2, durante un periodo de 2 horas.

5. Al término de la agitación sónica, se extrae una alícuota representativa y se inmoviliza en el arreglo de las figuras 4.3 y 4.4 para medir sus propiedades a un tiempo tan inmediato a la salida del fluido del agitador sónico, denominado tiempo cero ( $t_0$ ).

\*6. Para la determinación de tiempo de asentamiento de partículas, se extrae una nueva alícuota cada 5 minutos hasta obtener un cambio nulo en la Conductividad Térmica.

Toda muestra se repite en 6 ocasiones, se analizan los datos y se toma un promedio de cada grupo de repeticiones. Se procede al análisis de resultados.

### 3.4 Equipo utilizado para la preparación de fluidos mejorados.

<b>Equipo / Material</b>	<b>Modelo</b>	<b>Características Principales</b>
(AM1) Agitador Magnético	Corning PC-4200	Velocidad: 1250rpm Temperatura (0-600°C)
(AS2) Agitador Sónico	Sonicador Bransonic B2510E-MT	Volumen: 0.75 gal Frecuencia 40kHz Temperaturas (20-69°C)
(AC3) Analizador Coulter	Coulter ls100Q (SVM plus)	Rango de medición: (0.4 – 900)µm

(MPT4) Medidor de Propiedades térmicas	Decagon KD2	Rango Temperatura: (5-42)°C Conductividad térmica: (0.02 – 5) W/m°C
(MD5) Microscopio Digital	Shinyvision 2MP DM	Rango de Ampliación: (10X~230X)
(MB6) Micro balanza	CPA CPA26P	Rango de medición: 5mg-21g
Cristalería de Laboratorio	Diverso	

Tabla 3.3 Equipos y materiales de laboratorio utilizados.



Figura 3.8 AM1 Agitador magnético Corning PC-4200.



Figura 3.9 Fluido en preparación.

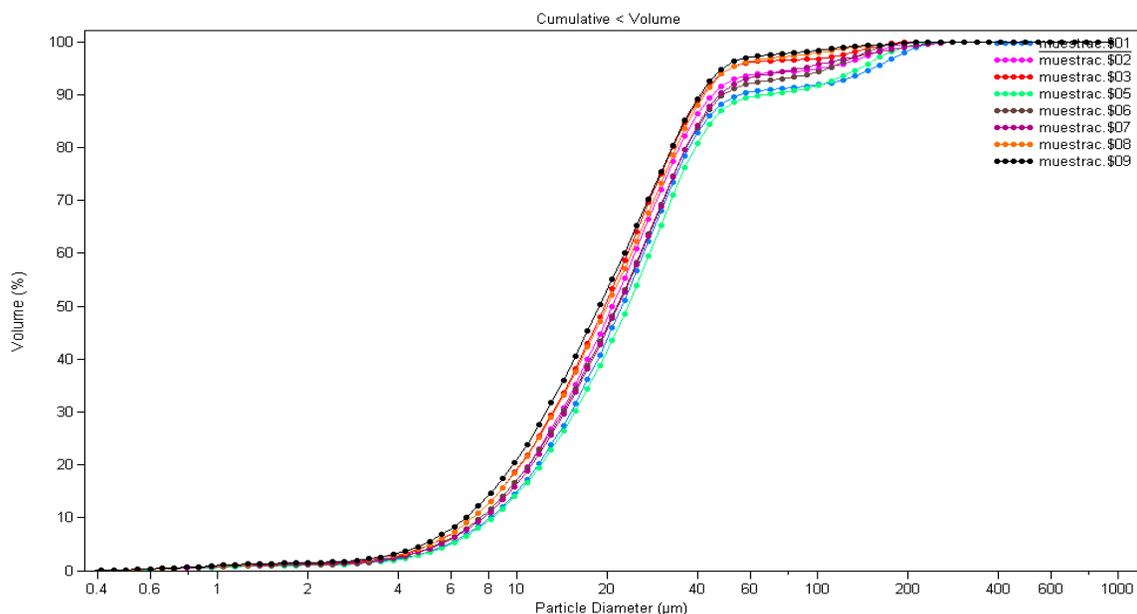


Figura 3.10 AS2 Agitado Sónico Bransonic 2510.

## 4 Resultados Experimentales

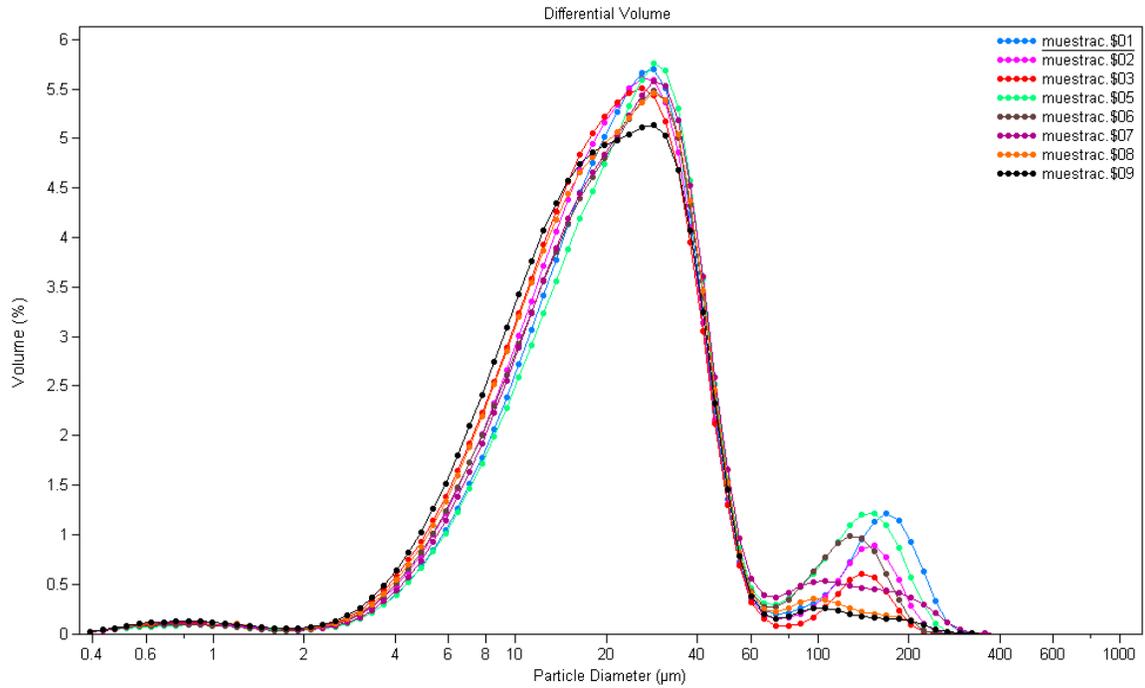
### 4.1 Caracterización de Polvo de Cobre.

Las partículas de Cobre fueron analizadas mediante el Análisis de un Coulter ls100Q (small volume module plus) [13], que es un aparato utilizado para contar y medir el tamaño de partículas en solución. Realizada preparando 100 ml de solución con una concentración de Cobre en agua y tomando una alícuota de 10 ml para ser analizada mediante el Efecto de Coulter en el contador. Los resultados fueron mostrados con una reproducibilidad congruente en las 9 muestras. A continuación se muestra el gráfico de Volumen Acumulativo de tamaños de partículas. Mostrando en el eje de las abscisas el Diámetro de partícula expresado en micro metros y en el eje de las ordenadas el Volumen acumulativo en porcentaje de partículas. Se concluye que la mayoría de las partículas se encuentran en un tamaño menor al rango de 30  $\mu\text{m}$ .



Gráfica 4.1 Porcentaje en volumen acumulativo de tamaño de partícula.

También se muestra la Gráfica de Volumen diferencial, donde se aprecia el diámetro de partícula asociado con el porcentaje en volumen de partículas; de la cual se infiere que para 9 corridas experimentales, la conclusión es que el mayor porcentaje de partículas tienen un diámetro de 30  $\mu\text{m}$ .



Gráfica 4.2 Porcentaje en volumen de partículas de determinado diámetro.

De igual forma las partículas de cobre fueron vistas bajo el microscopio digital Shinyvision, mostrando como resultado las imágenes presentadas a continuación, donde se ofrece como referencia un cúmulo de partículas de 1 mm de diámetro aproximado; se puede observar algunas partículas aglomeradas pero el resto se encuentra en un campo visible para apreciar el tamaño de partícula de manera independiente.



Figura 4.1 Imagen de microscopio óptico de las partículas de cobre.

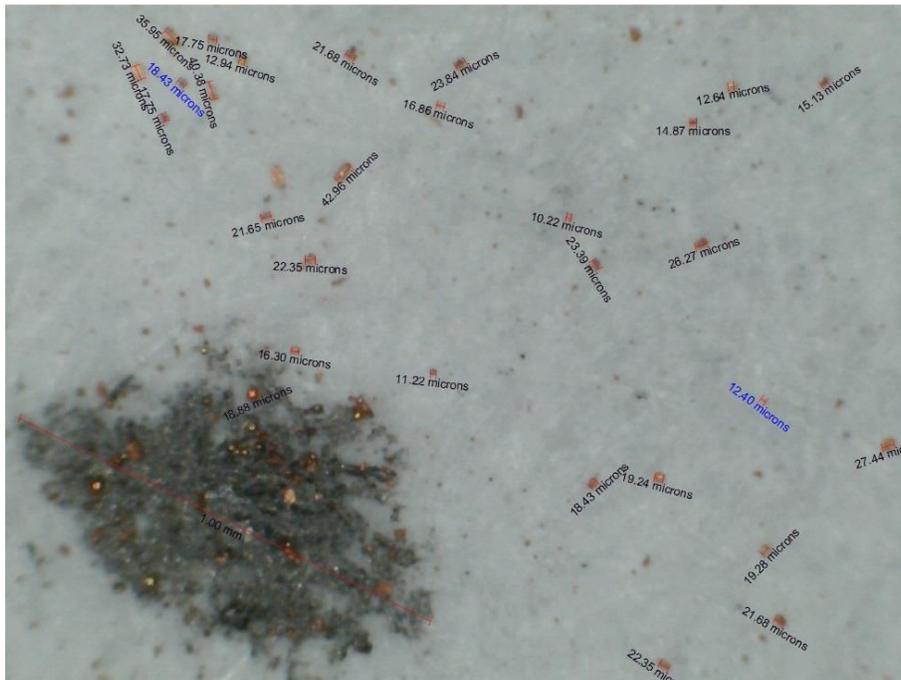
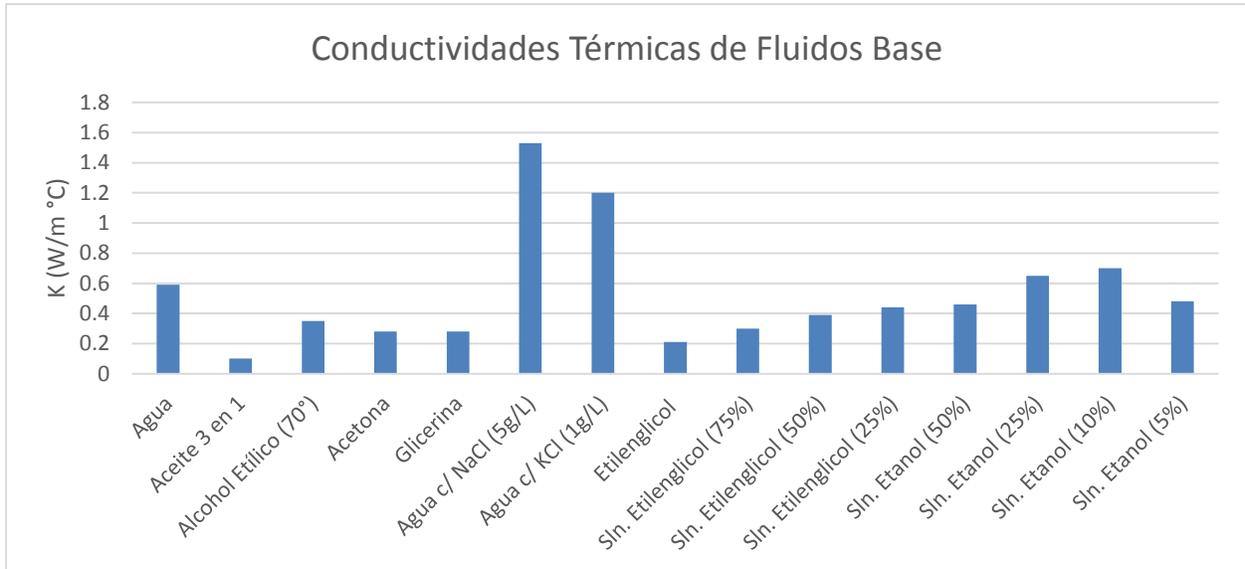
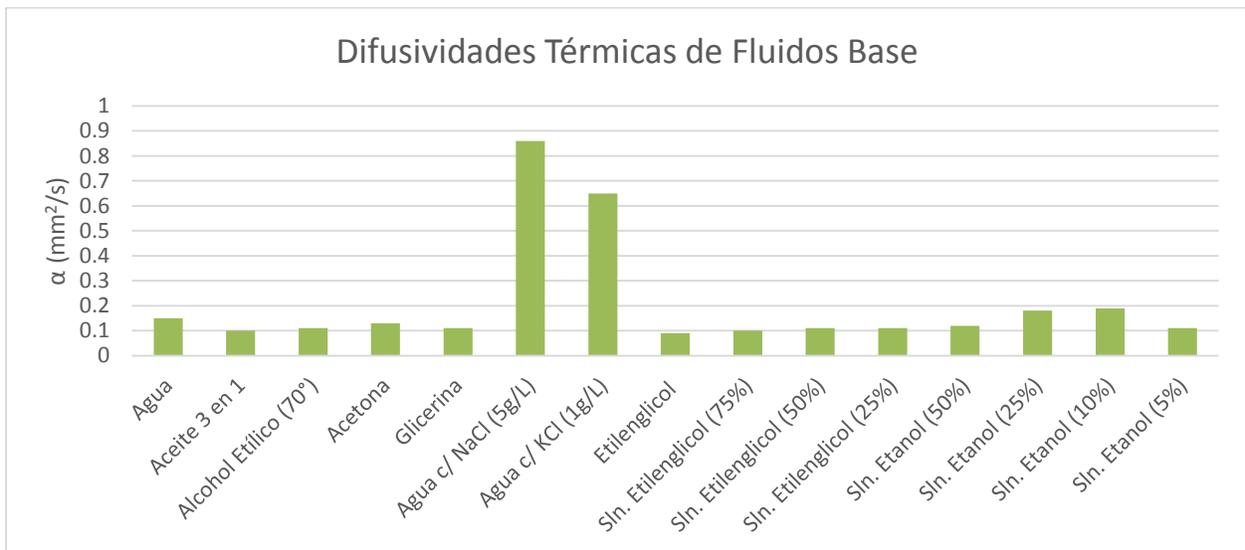


Figura 4.2 Detalle de imagen de microscopio digital de partículas de cobre.

En la Gráfica 4.3 y 4.4 se muestran los promedios de conductividad térmica, y difusividad térmica respectivamente para 16 sustancias diferentes, con potencial de ser bases para fluidos mejorados.



Gráfica 4.3 Conductividades Térmicas de las 16 posibles bases para fluidos mejorados.



Gráfica 4.4 Difusividades térmicas de las 16 posibles bases para fluidos mejorados.

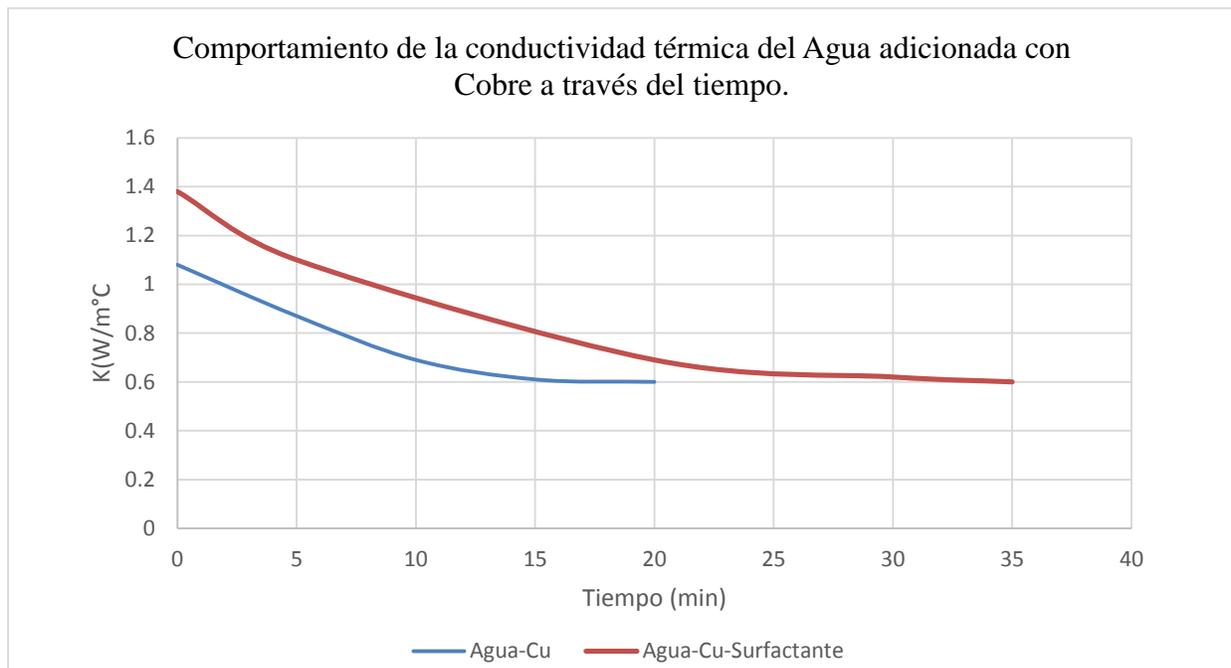
Los datos anteriores fueron tomados a una temperatura ambiente promedio de 19.9 °C. La temperatura registrada como T sustancia, es la alcanzada por el líquido debido al calentamiento de la aguja del dispositivo de medición.

Los resultados de mediciones de Agua, Glicerina, Alcohol y Etilenglicol fueron comparados con las reportadas en el manual de usuario del dispositivo de medición.

A partir de los resultados de la Tabla 4.3, se observa que el Agua es una de las sustancias que presenta mejor conductividad térmica, ya sea en su estado puro o en solución con otros fluidos. Por tal motivo fue utilizada como una de las bases principales en el resto de la experimentación.

#### 4.2 Determinación de conductividad y difusividad térmicas para fluidos mejorados.

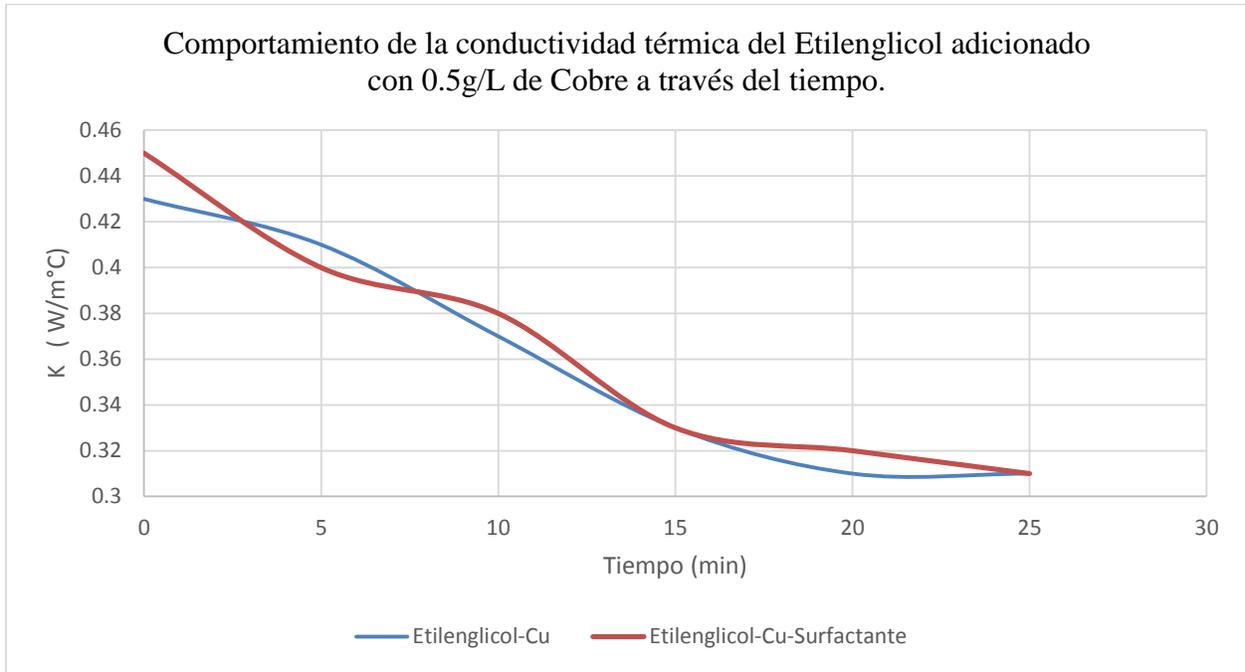
El asentamiento de partículas en un tiempo determinado para cada sustancia, es inevitable sin embargo pudo ser retrasado con el uso de un surfactante bajo el cual se revisaron los efectos, de forma indirecta, en las curvas de Conductividad Térmica contra Tiempo.



Gráfica 4.5 Cambio de la conductividad térmica en agua-cobre en el tiempo.

Si bien existe un incremento notorio en la conductividad térmica a un tiempo cero, éste no se mantiene gracias al asentamiento de las partículas que tienden a depositarse en el fondo del contenedor. También es importante mencionar que el uso de surfactante fue de gran ayuda para alargar el tiempo de suspensión de las partículas en ~20 minutos, de manera que comprobamos el éxito del mismo en éste arreglo.

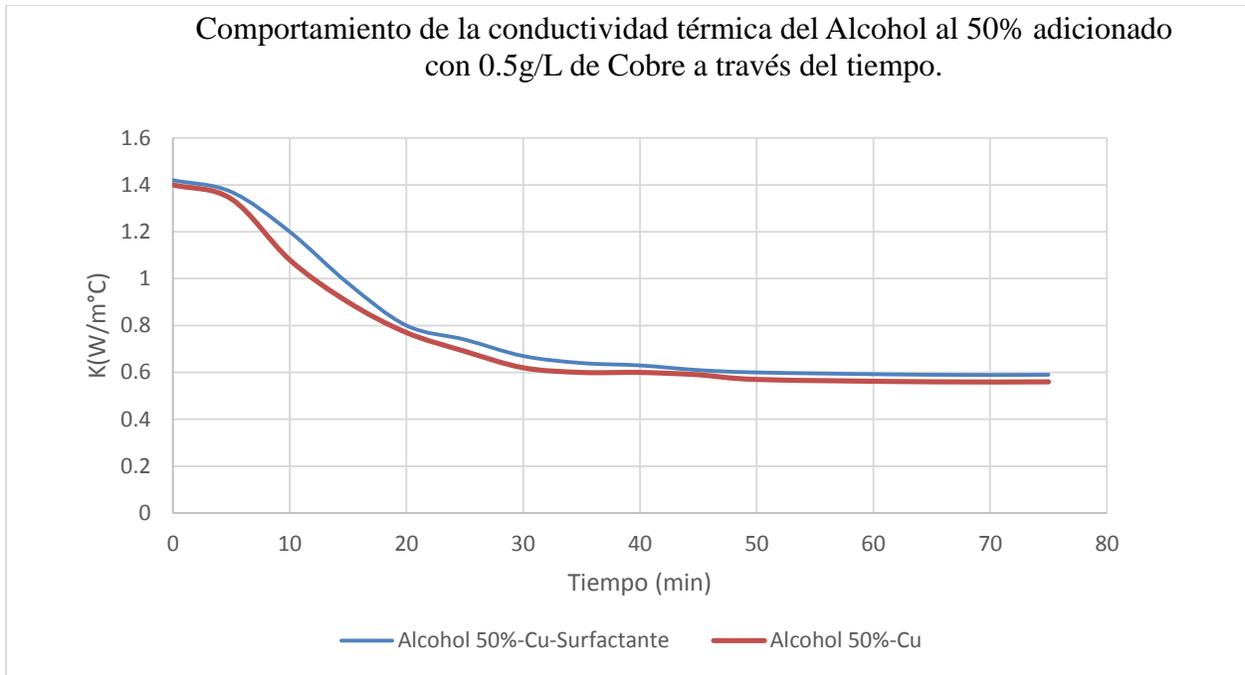
Sin embargo para el caso de etilenglicol y cobre, no se obtuvieron los mismos resultados, de igual manera se obtuvo un incremento importante en la conductividad térmica, pero fue imposible mantener las partículas suspendidas por más tiempo con la adición de surfactante.



Gráfica 4.6 Cambio de la conductividad térmica en etilenglicol-cobre en el tiempo

Al no presentar efectos importantes con la adición de jabón, existe la posibilidad de pensar en un mejor agente surfactante.

Para el caso de la solución de alcohol al 50% en agua, el surfactante si surtió efecto, lo cual pudo ser debido al contenido de agua.



Gráfica 4.7 Cambio de la conductividad térmica en alcohol al 50%-cobre en el tiempo

Aparentemente el surfactante alargo la efectividad de fluido mejorado por un tiempo de 30 a 40 minutos, lo cual es un resultado positivo. Sin embargo, el problema existente con este líquido mejorado es la rapidez con la que cambia la conductividad térmica durante los primeros 20 minutos.

A continuación se presenta la razón de conductividad térmica efectiva para una serie de datos experimentales de nanofluidos de agua – cobre, presentados por algunos autores importantes y se comparan con los de este estudio, arrojando resultados positivos.

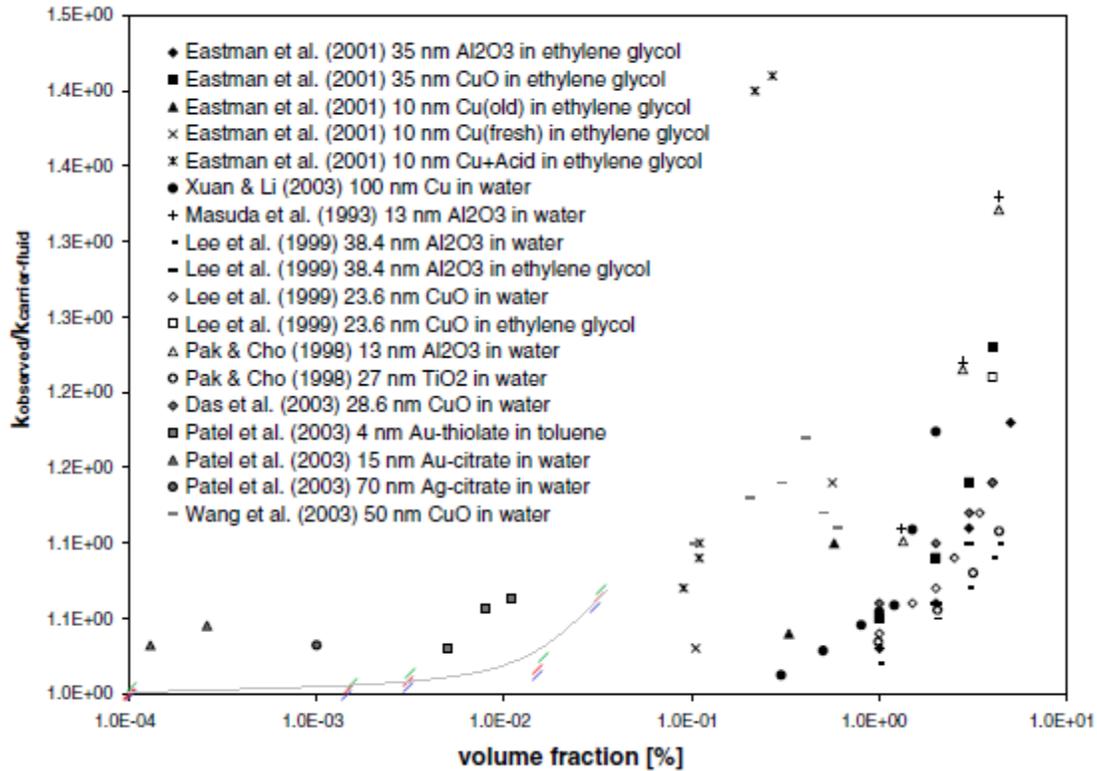
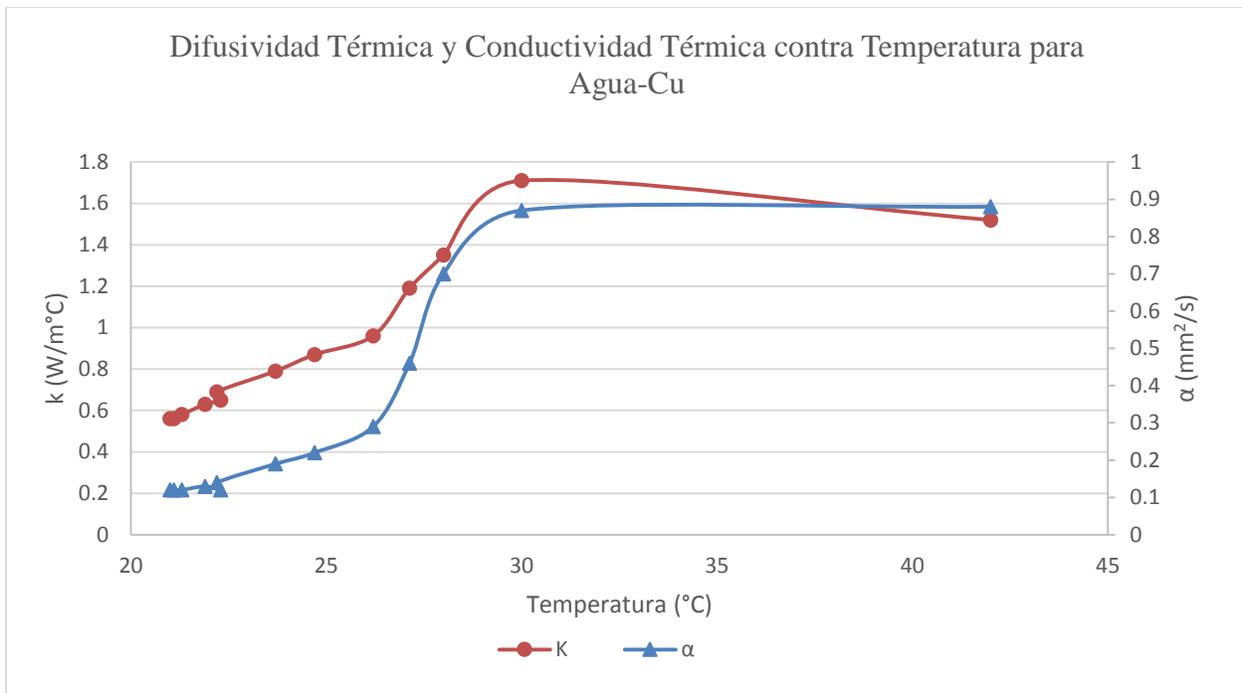
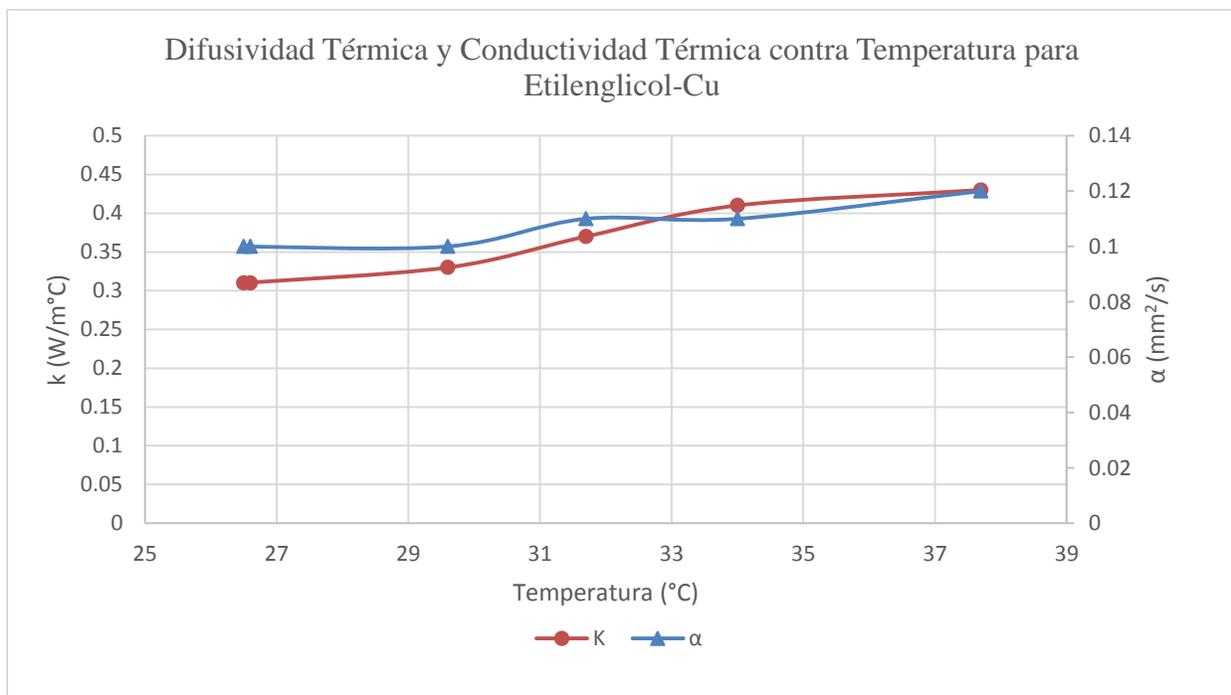


Figura 4.3 Razón de conductividades térmicas efectivas para datos experimentales de diversos autores. Las líneas de color representan este estudio.

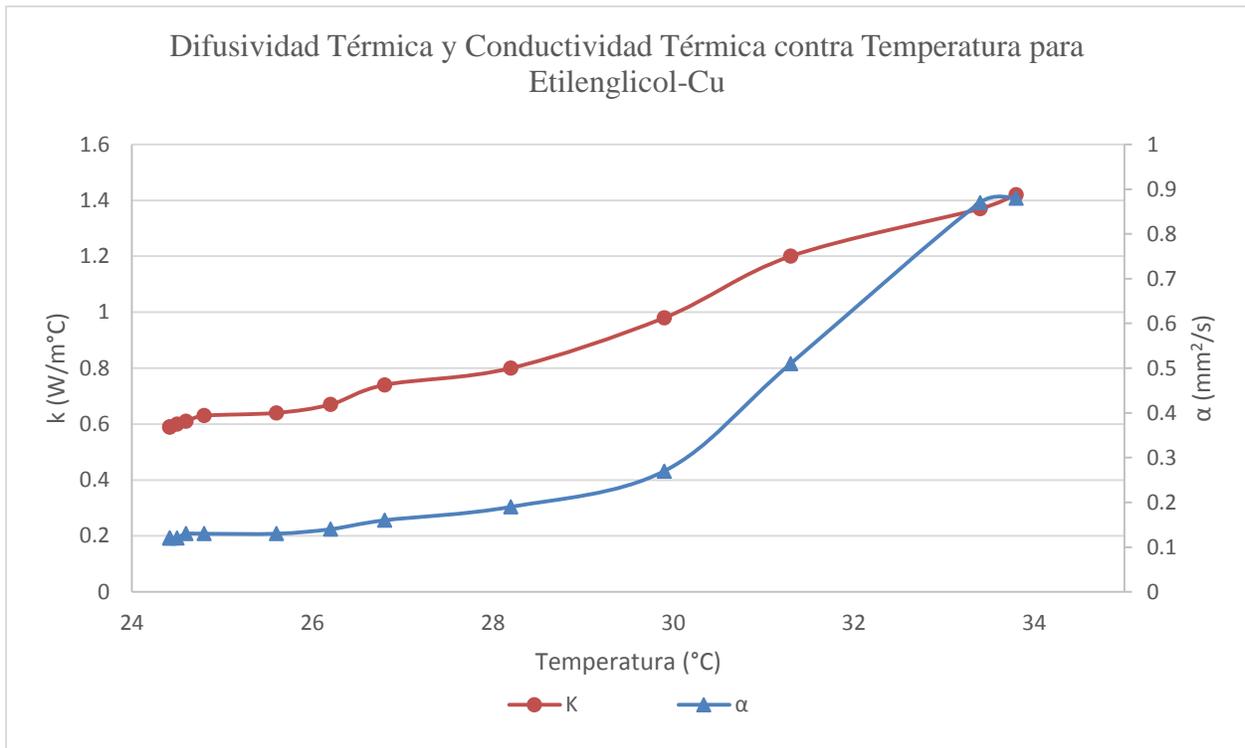
Se realizó un análisis de propiedades térmicas a distintas temperaturas, variando en un rango de 20°C a 60°C, con una concentración de 0.5g/L de Cobre y en ausencia de surfactante, en el cual la conductividad térmica no mostró un comportamiento diferente al de temperatura constante, sin embargo, la difusividad térmica que no había tenido cambios significativos a la adición de partículas de cobre, muestra un incremento importante al aumentar la temperatura para todos los casos.



Gráfica 4.8 Cambio de conductividad térmica y difusividad térmica contra temperatura a una concentración de 0.5g/L para Agua – Cu.

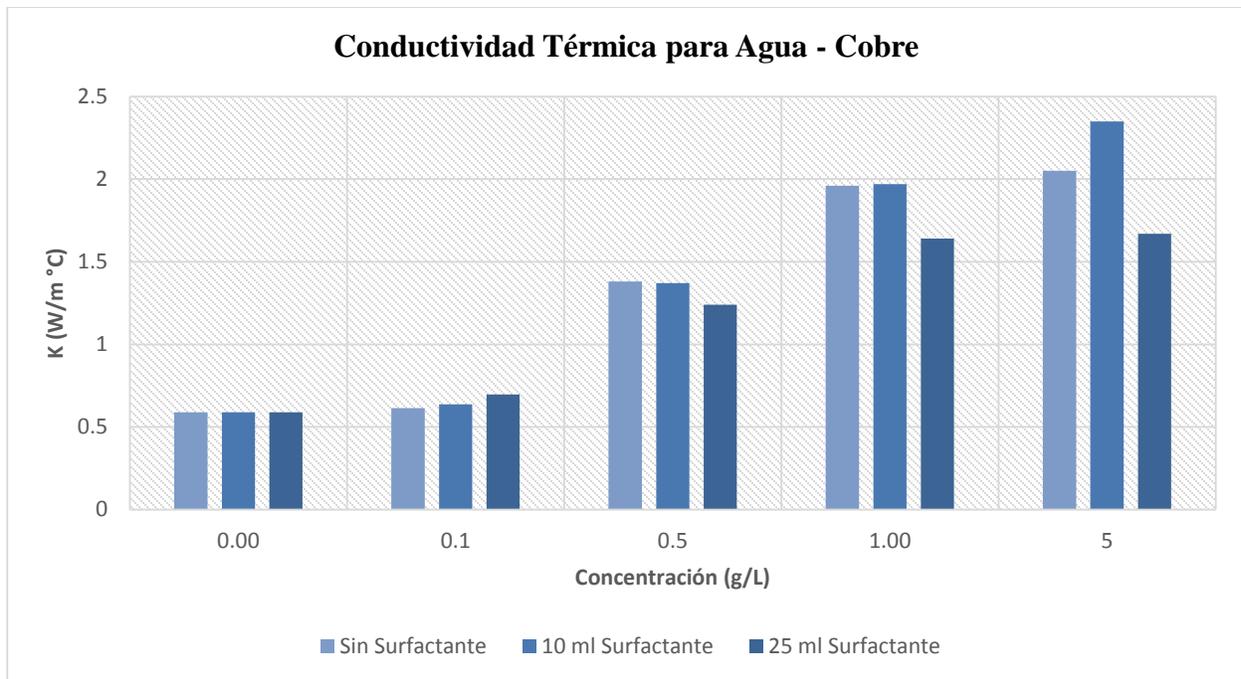


Gráfica 4.9 Cambio de conductividad térmica y difusividad térmica contra temperatura a una concentración de 0.5g/L para Etilenglicol – Cu.



Gráfica 4.10 Cambio de conductividad térmica y difusividad térmica contra temperatura a una concentración de 0.5g/L para Alcohol 50% – Cu.

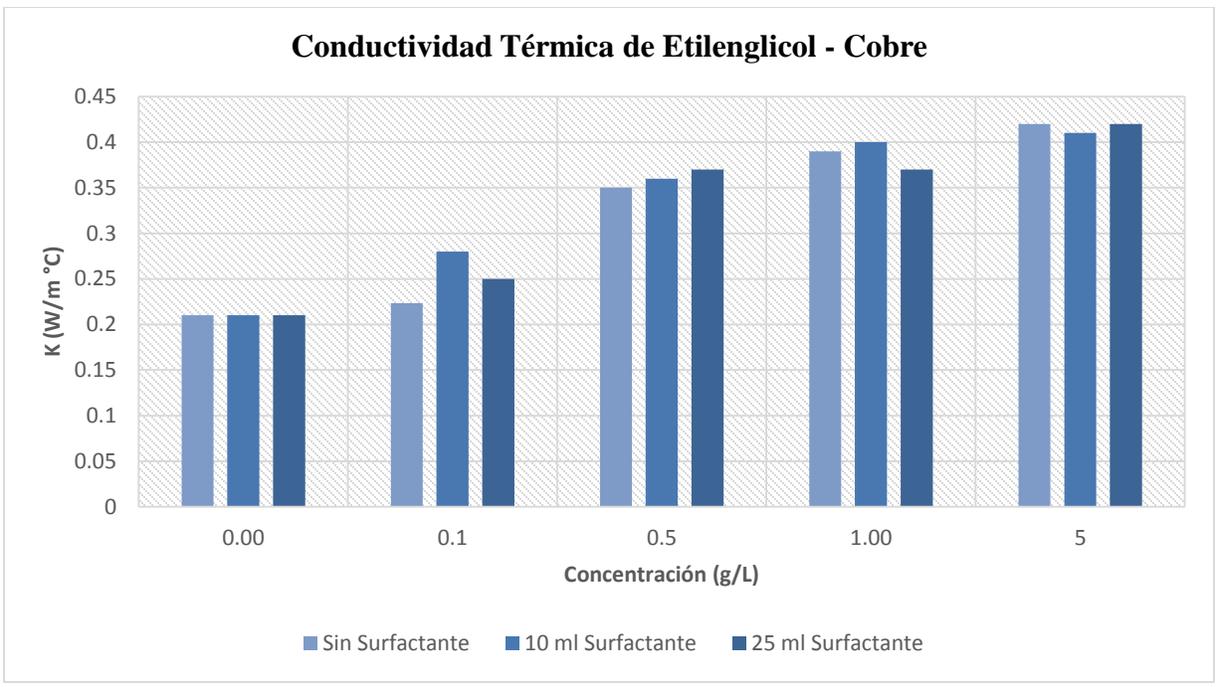
A continuación se presentan las gráficas de Conductividad Máxima Promedio alcanzada por cada fluido preparado así como las tablas de Incremento Máximo de Conductividad Térmica para Agua, Etilenglicol y Alcohol 50%.



Gráfica 4.11 Conductividad térmica máxima alcanzada por el fluido agua-Cu a distintas concentraciones

Fluido Base	Concentración de Cobre (g/L)	Dispersante (ml)	% de Incremento Máximo de K
Agua	0.1	0	3.80
Agua	0.1	10	7.33
Agua	0.1	25	15.31
Agua	0.5	0	57.25
Agua	0.5	10	56.93
Agua	0.5	25	52.42
Agua	1	0	69.90
Agua	1	10	70.05
Agua	1	25	64.02
Agua	5	0	71.22
Agua	5	10	74.89
Agua	5	25	64.67

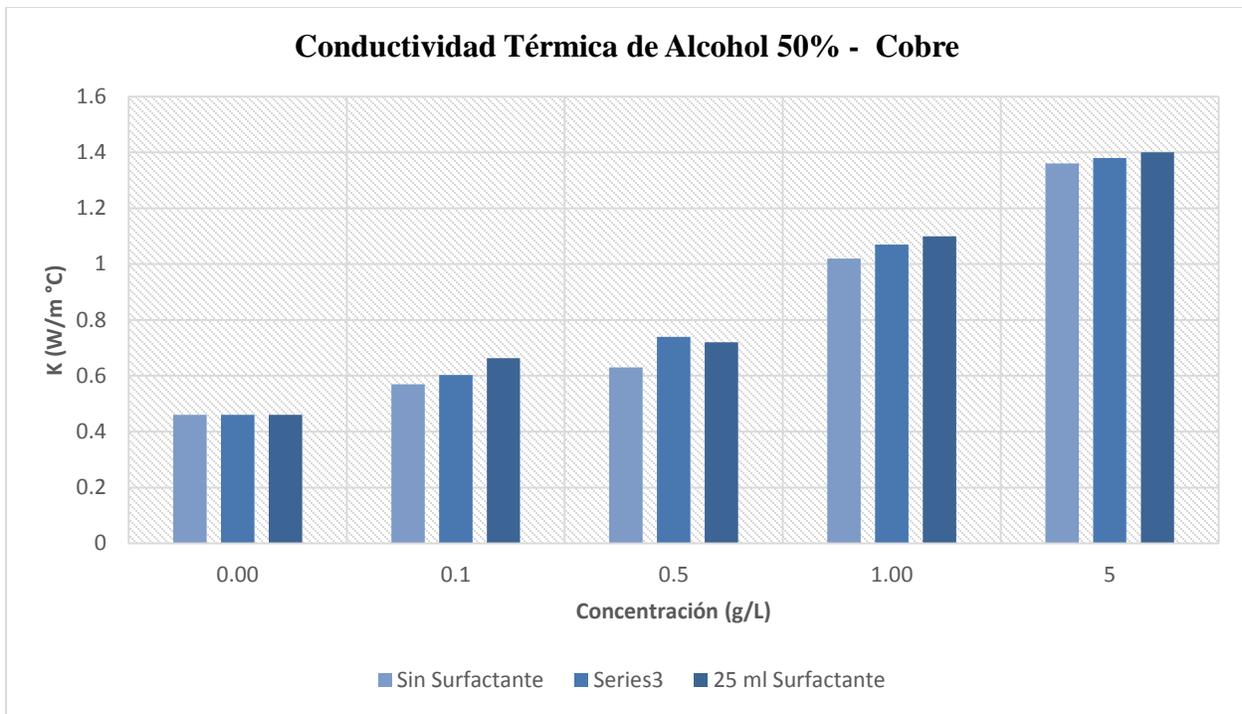
Tabla 4.1 Porcentaje máximo de incremento de conductividad térmica para agua - Cu



Gráfica 4.12 Conductividad térmica máxima alcanzada por el fluido etilenglicol-Cu a distintas concentraciones

Fluido Base	Concentración de Cobre (g/L)	Dispersante (ml)	% de Incremento Máximo de K
Etilenglicol	0.1	0	5.97
Etilenglicol	0.1	10	25.00
Etilenglicol	0.1	25	16.00
Etilenglicol	0.5	0	40.00
Etilenglicol	0.5	10	41.67
Etilenglicol	0.5	25	43.24
Etilenglicol	1	0	46.15
Etilenglicol	1	10	47.50
Etilenglicol	1	25	43.24
Etilenglicol	5	0	50.00
Etilenglicol	5	10	48.78
Etilenglicol	5	25	50.00

Tabla 4.2 Porcentaje máximo de incremento de conductividad térmica para etilenglicol - Cu



Gráfica 5.13 Conductividad térmica máxima alcanzada por el fluido alcohol 50%-Cu a distintas concentraciones

Fluido Base	Concentración de Cobre (g/L)	Dispersante (ml)	% de Incremento Máximo de K
Alcohol (50%)	0.1	0	19.30
Alcohol (50%)	0.1	10	23.76
Alcohol (50%)	0.1	25	30.65
Alcohol (50%)	0.5	0	26.98
Alcohol (50%)	0.5	10	37.84
Alcohol (50%)	0.5	25	36.11
Alcohol (50%)	1	0	54.90
Alcohol (50%)	1	10	57.01
Alcohol (50%)	1	25	58.18
Alcohol (50%)	5	0	66.18
Alcohol (50%)	5	10	66.67
Alcohol (50%)	5	25	67.14

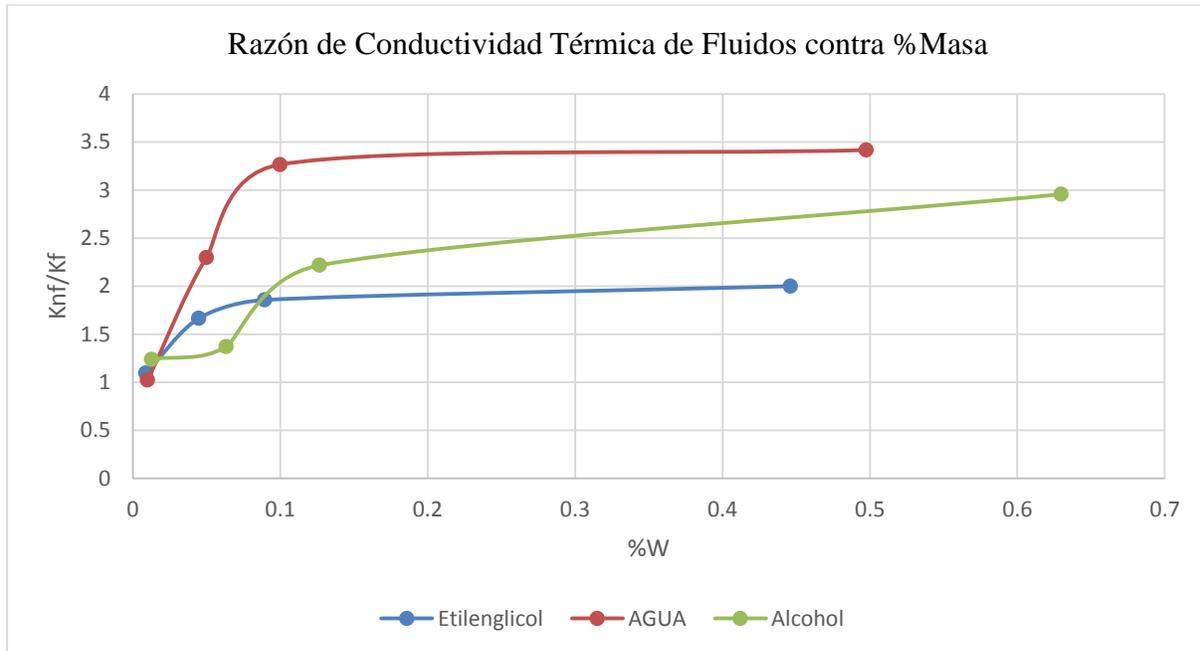
Tabla 4.3 Porcentaje máximo de incremento de conductividad térmica para alcohol 50% - Cu

Los resultados anteriores son comparables a los encontrados en el estudio realizado por M. J. Assael y colaboradores en 2011 para nanofluidos con base agua y etilenglicol, con nanopartículas de cobre y nanopartículas de cobre preparadas con un recubrimiento especial de carbono (C-MWNT) con concentraciones por debajo del 1% en volumen con el surfactante SDS con base de Hidróxido de Sodio y Sulfato de Sodio. [31]

Base Fluid	Dispersed Phase	Dispersant	Maximum % enhancement
Ethylene Glycol	Cu (up to 0.48 vol %)	-	3
Ethylene Glycol	C-MWNT (up to 0.25 vol %)	-	9
Ethylene Glycol	C-MWNT 0.6 vol %	SDS 0.35 mass %	21
Ethylene Glycol	C-MWNT 0.6 vol %	SDS 0.6 mass %	20
Ethylene Glycol	C-MWNT 0.6 vol %	SDS 1.2 mass %	14
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % new	SDS 0.1 mass %	39
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % new	SDS 0.5 mass %	23
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % new	SDS 2 mass %	30
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % new	SDS 3 mass %	28
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % condensed	SDS 1.1 mass %	12
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % condensed	SDS 1.5 mass %	8
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % condensed	SDS 2 mass %	7
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % regenerated	SDS traces	12
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol % regenerated	SDS 0.5 mass %	11
TKO-19 Ultra	C-MWNT 0.6 vol %	SDS 0.1 mass %	9
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol %	CTAB 0.1 mass %	19
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol %	CTAB 1 mass %	34
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 vol %	CTAB 3 mass %	34
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6 % vol.	CTAB 6 mass %	28
H <sub>2</sub> O	C-DWNT 0.75 % vol.	CTAB 1 mass %	3
H <sub>2</sub> O	C-DWNT 0.75 % vol.	CTAB 3 mass %	2
H <sub>2</sub> O	C-DWNT 1 % vol.	CTAB 5.5 mass %	8
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6% vol.	Triton X-100 0.17 mass %	11
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6% vol.	Triton X-100 0.35 mass %	12
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6% vol.	Triton X-100 0.5 mass %	13
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6% vol.	Triton X-100 1 mass %	11
H <sub>2</sub> O	C-MWNT 0.6% vol.	Nanosperse 0.7 mass %	28

Las diferencias entre los estudios realizados por otros autores y el presente, puede ser a causa del tamaño de partícula y de la base del surfactante.

Por último se muestran gráficas de Razón de Conductividad contra porcentaje en masa de partículas.



Gráfica 4.14 Razón entre conductividad térmica de fluido mejorado y de fluido base contra porcentaje de masa de cobre añadido.

Las partículas de cobre, combinan sus propiedades con las de diferentes fluidos, de manera que el cobre aporta sus características metálicas al fluido brindándole un incremento en las propiedades térmicas, especialmente en la conductividad; la base líquida le aporta un flujo que permite la suspensión de las partículas de manera que las propiedades estén uniformes en todo el fluido.

## 5 Conclusiones y Recomendaciones

El efecto de las partículas de cobre sobre los fluidos estudiados, etilenglicol, agua y la solución de alcohol al 50% fue positivo, dejando ver un incremento sustancial en sus propiedades térmicas, respecto a las observadas sin la adición de partículas. Los efectos al variar la temperatura no fueron de gran importancia dentro del rango estudiado, respecto a la experimentación a temperatura constante.

El efecto de las partículas de cobre en etilenglicol, fue más bajo de lo esperado, respecto a los encontrados en las otras sustancias. Al ser adicionado el surfactante al fluido de etilenglicol, se mantiene con un incremento del ~40% en conductividad térmica.

Los resultados obtenidos para una solución de alcohol en agua al 50% en volumen, arrojan que su tiempo de asentamiento más largo que el del resto de las sustancias.

Al estar en conjunto con agua, permite alcanzar un valor más alto en conductividad térmica de lo esperado representando un buen incremento respecto al valor del agua ( $0.59 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ), sin embargo su comportamiento en tiempos grandes, en presencia de surfactante, es muy similar al comportamiento del agua pura.

Para el agua adicionada con partículas de cobre, el incremento en su conductividad térmica fue alto. Sin embargo en concentraciones bajas de surfactante tiene problemas de estabilidad.

La razón de conductividad efectiva entre los fluidos es muy parecida dado que se maneja el mismo sólido a las mismas concentraciones, los valores son bajos debido a que las concentraciones de partículas también lo son y el tamaño de partícula es grande en comparación otros estudios, sin embargo se tuvo un acercamiento considerable a los resultados expresados por otros investigadores.

---

### ***Recomendaciones***

Es importante añadir y seleccionar un surfactante adecuado para la mezcla que se utilice, ya que no todos los medios dispersantes reaccionan de igual manera a la adición de otras sustancias, para los casos reportados donde no se pudo observar un cambio en la conductividad térmica de acuerdo al esperado, como fue el etilenglicol, se recomienda un estudio para determinar si otros tipos de surfactantes podrían ser la solución o bien el agregar partículas de otros sólidos que ayuden al cobre a cumplir su objetivo en la fase dispersa.

También es importante considerar un tamaño de partícula menor, ya que si bien se observan buenos incrementos de conductividad térmica con micropartículas, las nanopartículas pueden ofrecer mayor estabilidad así como otra serie de beneficios para ciertas aplicaciones por sus propiedades ópticas y su tamaño de diámetro.

## Referencias Bibliográficas

- 1** "Argonne Transportation Technology R&D Center". 2010.
- 2** Buongiorno, J. "Convective Transport in Nanofluids". Journal of Heat Transfer (American Society of Mechanical Engineers), vol. 128, pp. 240-250. 2006  
*Doi: 10.1115/1.2150834*
- 3** Maiga, Sidi El Becaye, Palm, SJ; Nguyen, CT, Roy, G; Galanis, N. "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows". International Journal of Heat and Flow Fluid, vol. 26. 530-546. 2005  
*Doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.02.004*
- 4** Choi, S.U.S.; Eastman, J.A. "Heat Transfer Enhancement using nanofluids" International mechanical engineering congress and exhibition. 1995  
*Doi: 10.2298/TSC110201003S*
- 5** Patel H. E., Das S. K, Sundararajan T. "Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous Enhancement and chemical effects" Applied Physics Letters, Vol.83, No.14, 2003.  
*Doi: 10.1063/1.1602578*
- 6** Xuan Y. and Li Q., Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol.125, pp.151-155. 2003  
*Doi:10.1115/1.1532008*
- 7** Choi S. U. S., Eastman J. A, Li W. S., Yu, and Thompson J., "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-based Containing Copper Nanoparticles", Applied Physics Letters, vol.78, no. 6, pp.718-720. 2001  
*Doi: doi:10.1063/1.1341218*
- 9** Das S. K., Putra N., Thiesen P., Roetzel W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids", Journal of Heat Transfer, vol.125, pp.567-574. 2003  
*Doi:10.1115/1.1571080*
- 10.** You S. M, Kim J. H. and Kim K. H., "Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer ", Applied Physics Letters, vol.83, no.16, pp.3374-3376. 2003  
*Doi: 10.1063/1.1619206*
- 11** Tsai C.Y., Chien H. T., Chan B., Chen P. H., Ding P. P., Luh T.Y., "Effect of Structural Character of Gold Nanoparticles in Nanofluid on Heat Pipe Thermal Performance", Materials

**12.** Koblinski, P., Phillpot S. R., Choi S. U. S., and Eastman J. A., "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, No. 4, 855-863, 2002.  
*Doi:10.1016/S0017-9310(01)00175-2*

**13** Hogg W.R., Coulter W.; Apparatus and method for measuring a dividing particle size of a particulate system; United States Patent 3557352.

**14** Cool-X is a registered trademark of Cool-X LLC. Copyright 2013 Cool-X LLC  
<http://coolx.co/Testing/thermal-conductivity-testing/thermal-conductivity-of-rotella-2/>

**15** Khullar V. and Tyagi H., "Application of nanofluids as the working fluid in parabolic solar collectors", Proceedings of the 37th National & 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, Indian Institute of Technology Ropar, India. 2010  
*Doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.006*

**16** Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Fundamentals of the Heat Transfer" 7 edición, Editorial McGrawHill, pg. 3-12.

**17** Philip J., Shima P.D., "Thermal properties of nanofluids", SMARTS, Metallurgy and Materials Group, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India 2008  
*Doi: 10.1038/nano.2008.38*

**18** Jing F., Liqiu, "Heat conduction in nanofluids: Structure–property correlation", Department of Mechanical Engineering Journal, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong 2011.  
*Doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.05.009*

**19** Evans W., b, Prasher R., Fishb J., Meakind P., Phelane P., Koblinskif P., "Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids", a) Lockheed Martin Corporation, b) Mechanical Engineering Department, Rensselaer Polytechnic Institute, c) Intel Corporation, d) Idaho National Laboratory, Center for Advanced Modeling and Simulation, e) Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Arizona State University, f) Materials Science and Engineering Department, Rensselaer Polytechnic Institute, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 51, pp. 5–6, pp. 1431–1438, USA, 2008.  
*Doi: 10.1063/1.2360229*

**20** Zoubida H., b, Hakan F. Oztob, Eiyad Abu-Nadac, Amina Mataouia, "A review on natural convective heat transfer of nanofluids", a) Department of Fluid Mechanics, Faculty of Physics, University of Sciences and Technology-Houari Boumediene, Algiers, Algeria b) Department of

Mechanical Engineering, Technology Faculty, Firat University, Elazig, Turkey c) Department of Mechanical Engineering, King Faisal University, Al-Ahsa, Volume 16, pp. 5363–5378, Turkey, 2007.

*Doi: 0.1016/j.rser.2012.04.003.n*

**21** Taylor, R.A., Phelan, P.E., Otanicar, T.P., Walker, C.A., Nguyen, M., Trimble, S., and Prasher, R., "Applicability of Nanofluids in High Flux Solar Collectors," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Vol. 6 PP.102. 2011

*Doi: 10.1063/1.3571565*

**22** Inzunza J., *Transferencia de Calor, Manual de Física UDEC, Mecanismos de Transferencia de Calor, Cap 14 PP. 408. 1983*

**23** Kostic M., Simham K, "Computerized, Transient Hot-Wire Thermal Conductivity (HWTC) Apparatus for Nanofluids" *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer. USA. 2009*

**24** Hammerschmidt, U., and Sabuga, W., *Transient Hot Wire (THW) Method: Uncertainty assessment, International Journal of Thermophysics, Vol. 21 PP. 1255-1278. 2006*

**25** Simham K. C., *Development of Computerized Transient Hot-Wire Thermal Conductivity (HWTC) Apparatus for Nanofluids, M. S. Thesis, Northern Illinois University, DeKalb, IL, 2008.*

**26** Kostic M., "Critical Issues and Applications Potentials in Nanofluids Research", *ASME-MN2006 Multifunctional Nanocomposites International Conference, Honolulu, Hawaii, ASME Proceedings, MN2006-17036, 2006.*

**27** Ahuja A. S., *J. Appl. Phys. 46, 3408. 1975*

**28** Liu K. V., Choi S. U. S., and Kasza K. E., *Argonne National Laboratory Report No. ANL-88-15 3, (1988)*

**29** Masuda H., Ebata A., Teramae K., and Hishinuma N., Bussei N. "A Proposed Model for Calculating Effective Thermal Conductivity of Nanofluids, Effect of Nanolayer and Non-Uniform Size of Nanoparticles", *Journal of Basic and Applied Scientific Research Vol. 4, pp. 227 Iran 1993.*

*Doi: 2(9)9370-9377*

**30** Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., "A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids", *Journal of Thermal Engineering Vol. 29 pp. 2477-2483. Singapore, 2009. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.12.018*

**31** Assael M. J., Metaxa I. N., Kakosimos K., Konstadinou D. "Thermal conductivity of nanofluids – Experimental and Theoretical", *Thesis of Chemical Engineering Department, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece. 2011 Doi: 10.1007/s10765-006-0078-6*

---

**32** Assael M. J., Chen C. F., Metaxa I. and Wakeham W. A. “Thermal Conductivity of Nanofluids” Int. J. Thermophys. Vol 25 pp. 971, Greece, 2004.

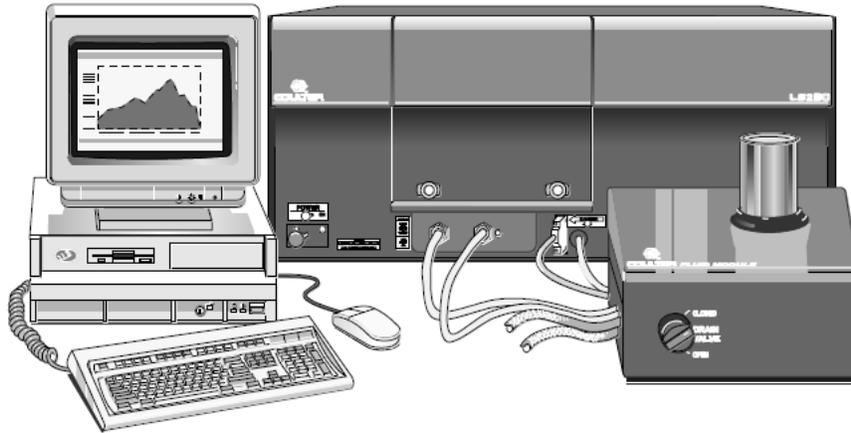
**33** Choi S. U. S., ASME, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-Vol. 231/MD, pp. 66-99, USA, 1995.

**34** Ghadimi A., Saidur R., and Metselaar H. S. C., “A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, no. 17-18, pp. 4051–4068, India, 2011.  
*Doi: 10.1155/2012/972973*

---

## ANEXOS

## Procedimiento para Análisis Coulter



Analizador Coulter conectado a una computadora.

### Requerimientos.

Solo utilice suspensions con puntos de ebullición más altos que 43.3°C y que concuerden con los requerimientos listados.

### Para Proceder con Muestra

Llenar recipiente de muestra a través de la entrada de agua.

1. Seleccione **Control, Fill**.
2. El recipiente se llena automáticamente.
3. Presione **Run, Cycle**.
4. Seleccione **New Sample**. (Fig 1).
5. Cambie las condiciones tanto como se necesite.
6. Sonique antes de empezar.
7. Encienda la bomba
8. Una vez lleno el recipiente inicie, seleccione **Start**.
9. Terminada la última muestra, vacíe el tanque.
10. Presione **Rinse**.
11. Una vez vacío presione **Cancel**.
12. Presione **Done**

**NOTA:** Obtenga una muestra que sea: Representativa, Estable, En solución

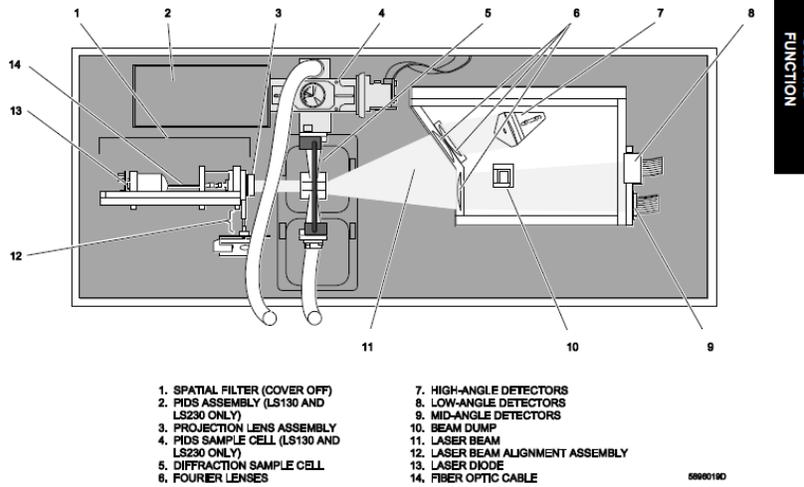


Figure 1.2 Optical Module

## Módulo Óptico

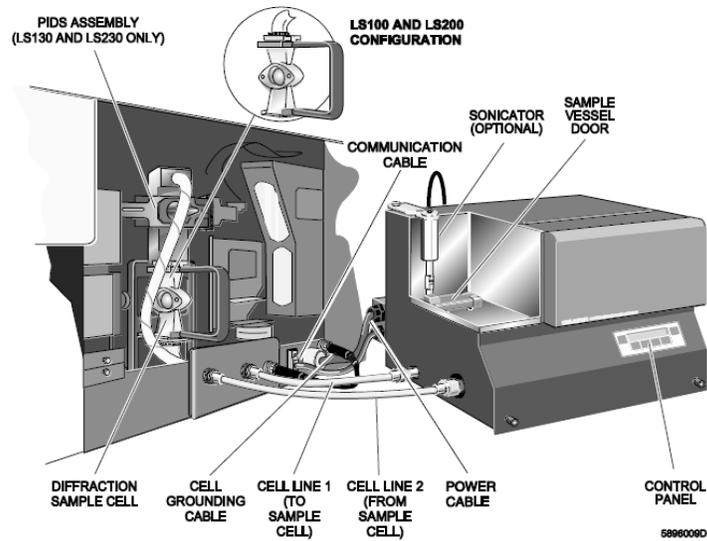


Figure 1.4 Hazardous Fluids Module

## Módulo de Fluidos