

**ESTUDIO DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR  
CONVECTIVO EN NANOFUIDOS**

**LUIS ARMANDO MORALES QUINTANA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DIVISIÓN DE INGENIERIAS  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICA  
BARRAQUILLA  
ABRIL DE 2007**

**ESTUDIO DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR  
CONVECTIVO EN NANOFLUIDOS**

**INVESTIGADOR:**

**Ing. LUIS ARMANDO MORALES QUINTANA**

**DIRECTOR:**

**ANTONIO BULA SILVERA, Ph.D.**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DIVISIÓN DE INGENIERIAS  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICA  
BARRAQUILLA  
ABRIL DE 2007**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Barranquilla, abril de 2007

## **Dedicatoria**

*Muchas veces la vida se nos hace  
Corta para expresar todos los sentimientos  
Que llegamos a experimentar por nuestros seres  
Queridos, le doy gracias Dios por contar con el amor y el apoyo  
De toda mi familia, dedico esta investigación a la memoria  
De mi sobrino Javier Andrés Villalobos Morales, se que  
Siempre vivirás en nuestros corazones, a Lelis por todas  
Las cosas que hemos vivido juntos todo este tiempo,  
Y a mi familia, por ser siempre el núcleo central  
De todos los éxitos que he alcanzado.*

*“El único sitio donde éxito esta primero  
Que trabajo es en el diccionario”*

## **AGRADECIMIENTOS**

De la forma más respetuosa expreso mis sinceros agradecimientos a:

Antonio Bula, profe muchas gracias por la oportunidad, por siempre tenerme en cuenta, por siempre considerarme capaz de hacer bien las cosas.

Marco Sanjuán, director del departamento de ingeniería mecánica de la universidad del norte, por la oportunidad que me brindó para pertenecer a este departamento, por toda la ayuda prestada durante mi curso de maestría y en especial por toda la disposición para el uso de los equipos de laboratorios.

Guillermo Valencia, por su ayuda incondicional, por la insistencia que terminara rápido la tesis y por ser un gran apoyo en los momentos difíciles de la vida.

Ernesto Díaz, del laboratorio de aguas de ingeniería civil, por todas las indicaciones e instrumentos que me facilitó para hacer los ensayos.

Bleydis Blaschke, por toda la ayuda prestada para realizar las observaciones en el microscopio electrónico de barrido.

Roberto del laboratorio de física calor – ondas de la universidad del norte, por la ayuda prestada para los ensayos de calorimetría y la buena disposición para ayudarme.

A los P4, Oscar, Pedro, Miguel, por todos los aporte para llegar al modelo de regresión no lineal y sobretodo por el gran interés de aportar al desarrollo de esta investigación.

A todas aquellas personas que me ayudaron e hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ANEXOS .....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XIII</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>1. FORMULACION DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.3. JUSTIFICACION .....	6
<b>2. OBJETIVOS Y METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....</b>	<b>8</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	8
2.3. METODOLOGIA.....	9
<b>3. MARCO TEORICO .....</b>	<b>12</b>
3.1. COLOIDES Y NANOFUIDOS.....	12
3.2. SURFACTANTES.....	13
3.3. SURFACTANTE IONICOS.....	14
3.3.1. Surfactante aniónicos .....	14
3.3.2. Surfactante catiónicos.....	27
3.4. SURFACTACTES ANFOTEROS .....	28
<b>4. PREPARACIÓN DE LOS NANOFUIDOS .....</b>	<b>31</b>
4.1. SELECCIÓN DE LAS NANOPARTICULAS. ....	31
4.1.1. Atomización .....	31
4.1.2. Métodos químicos.....	31
4.1.3. Deposición electrolítica .....	32

4.1.4. Criterios de selección de las nanopartículas.....	32
4.2. SELECCIÓN DEL SURFACTANTE .....	33
4.2.1. Betaína .....	34
<b>4.3. SELECCIÓN DE EQUIPO PARA TRANSFERENCIA DE CALOR.....</b>	<b>35</b>
4.4. MICROSCOPIA PARA LAS NANOPARTICULAS.....	37
4.5. CANTIDAD REQUERIDA DE NANOPARTICULAS .....	40
4.6. VOLUMEN REQUERIDO DE SURFACTANTE.....	41
4.7. VOLUMEN REQUERIDO DE AGUA.....	41
4.8. PREPARACIÓN DE LAS NANOPARTICULAS.....	42
4.9. PREPARACIÓN DEL SURFACTANTE .....	43
4.10. MEZCLA CON AGUA DESTILADA.....	43
4.11. MUESTRA DEL PRIMER NANOFLUIDO.....	44
<b>5. RESULTADO Y ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
5.1. ANALISIS DE VARIANZA PARA LOS NANOFLUIDOS.....	46
5.2 MODELO EXPERIMENTAL PARA EL NÚMERO DE NUSSELT .....	54
5.3. MONITOREO DE PROPIEDADES.....	60
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Consumo energético de procesadores INTEL .....	5
Figura 2 Comparación del consumo de potencia en función de la velocidad de procesamiento para distintos fabricantes [5].....	6
Figura 3 Esquema de una molécula para un surfactante.....	13
Figura 4 Orientación de las moléculas de un surfactante en el agua.....	13
Figura 5 Estructura general de un aminoácido .....	15
Figura 6 Estructura general del grupo carboxilo .....	19
Figura 7 Estructura general de los ésteres del ácido fosfórico .....	22
Figura 8 Estructura general de los ácidos sulfónicos.....	23
Figura 9 Estructura general de los ésteres del ácido sulfúrico.....	25
Figura 10 Representación de una molécula para surfactante catiónico.....	27
Figura 11 Comportamiento de un surfactante anfótero.....	28
Figura 12 a) banco para pruebas de intercambiadores de calor, intercambiador de calor de b) tubos concéntricos c) placas paralelas d) tubo y coraza.....	35
Figura 13 Banco de prueba para los nanofluidos.....	36
Figura 14 Aislamiento térmico con lana de vidrio del intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	37
Figura 15 A la izquierda aparece muestra de nanopartículas vistas en tamaño normal. A la derecha aparecen vistas en un estereomicroscopio a 100 aumentos. ....	38
Figura 16 Muestra a 100 aumentos de las partículas junto con un elemento de medición. ....	38
Figura 17 Preparación de probeta para observación en el microscopio electrónico de barrido.....	39
Figura 18 A la derecha, microscopio electrónico de barrido. A la izquierda, estereomicroscopio.....	39
Figura 19 Primera muestra tomada en el microscopio con tamaños de 200 $\mu\text{m}$ . A la derecha se observa un conglomerado de partículas con tamaño de 50 $\mu\text{m}$ .....	39
Figura 20 Tomas a 50 y 5 $\mu\text{m}$ . Al lado izquierdo se realizó medición del conglomerado de partículas. ....	40
Figura 21 Adición de las nanopartículas en el recipiente de preparación del nanofluido .....	42

Figura 22 Preparación del surfactante. a) en la grafica de la izquierda se muestra la el instante el cual se diluye la betaina hasta una concentración del 10% vol/vol. b) en la grafica de la izquierda se muestra el instante en el cual se adiciona el surfactante a la mezcla constituyente del nanofluido. ....	43
Figura 23 Montaje del destilador de agua. a) del lado izquierdo, aparece el evaporador y condensador del agua, la cual esta conectada con un tanque de almacenamiento. b) del lado derecho aparece todo el conjunto de destilación y el desionizador el cual se utiliza para retirar los cationes que contenga el agua tales como sodio, calcio, hierro. ....	43
Figura 24 Adición de agua destilada para completar el nivel de la solución a preparar. ....	44
Figura 25 Primer Nanofluido preparado en la Universidad del Norte, del lado derecho aparecen los componentes utilizado para esta solución. ....	44
Figura 26 Variación de la temperatura para flujo en contracorriente .....	45
Figura 27 Gráfica de probabilidad normal de los residuales .....	48
Figura 28 Gráfica de residuales en el tiempo .....	49
Figura 29 Efecto de la fracción volumétrica sobre la temperatura media logarítmica .....	50
Figura 30 Efecto del flujo del fluido caliente sobre la temperatura media logarítmica .....	50
Figura 31 Efecto del flujo de agua fría sobre la temperatura media logarítmica ....	51
Figura 32 Efecto de la temperatura de entrada del fluido caliente sobre la temperatura.....	52
Figura 33 Interacción entre el tipo de fluido y el flujo frío .....	52
Figura 34 Interacción entre la fracción volumétrica y el flujo caliente .....	53
Figura 35 Interacción entre el tipo de fluido y la temperatura de entrada del fluido caliente .....	54
Figura 36 Envejecimiento del nanofluido .....	61
Figura 37 Variación de propiedades del nanofluido con la temperatura .....	61
Figura 38 Variación de propiedades del nanofluido con nanopartículas de 100nm .....	62

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Familia del grupo Acil-aminoácidos .....	16
Tabla 2 Familias del grupo carboxílicos .....	19
Tabla 3 Familias de ácidos sulfónicos y sus sales .....	23
Tabla 4 Familias de ácidos sulfónicos y sus sales .....	26
Tabla 5 Familia de surfactantes anfóteros .....	28
Tabla 6 Especificaciones generales del óxido de aluminio .....	33
Tabla 7 Propiedades de las nanopartículas empleadas para la preparación del primer nanofluido .....	40
Tabla 8 Componentes para la preparación del primer nanofluido .....	42
Tabla 9 Factores evaluados en el análisis de varianza.....	45
Tabla 10 Descripción de la variables empleadas para el cálculo de la temperatura media logarítmica.....	46
Tabla 11 Resultados obtenidos para la temperatura media logarítmica .....	46
Tabla 12 Análisis de varianza para la temperatura media logarítmica .....	47
Tabla 13 Calculo de los residuales estandarizados para detectar posible puntos atípicos .....	49
Tabla 14 Resultados para el número de Nusselt .....	56
Tabla 15 Estimación de parámetros para el modelo de regresión .....	58
Tabla 16 Datos empleados para la regresión .....	59
Tabla 17 Valores de las constantes del modelo de regresión.....	60

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1 Estimación de la conductividad térmica

Anexo 2 Propiedades térmicas del fluido frío

Anexo 3 Especificaciones técnicas del intercambiador de tubos concéntricos

Anexo 4 Datos experimentales obtenido para las temperaturas

Anexo 5 Especificaciones técnicas de las nanopartículas de óxido de aluminio

## RESUMEN

El grupo de investigación UREMA en su preocupación por estar a la vanguardia de los desarrollos de nuevas tecnologías y pionero en la costa Atlántida en investigaciones, ha venido desarrollando desde el año 1999 diversas investigaciones encaminadas a brindar soluciones al enfriamiento de componentes electrónicos y al estudio de fenómenos asociados a la transferencia de calor. En su más reciente investigación “Experimental Study of Heat Transfer in Milli Channels for Cooling of Micro components”, cuyo resultados fueron expuestos en “2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition” se muestra que al hacer circular un fluido a través de unos minicanales es posible retirar más calor de los componentes que al usar los sistemas convencionales, pero también se evidencia que la capacidad de transferir calor es una propiedad del fluido que se este usando y cuando este logre su mayor capacidad no es posible es ese instante retirar más calor [6].

Se busca entonces dar continuidad a la investigaciones del grupo UREMA para desarrollar una alternativa que permita aumentar la capacidad de transferencia de calor de los fluidos empleados para el enfriamiento de componentes electrónicos. Hay que anotar que recientes estudios a nivel mundial han mostrado que al adicionar partículas metálicas de tamaño nanométrico a un fluido se logra incrementar sus propiedades físicas, tal es el caso de la conductividad térmica, a estos nuevos fluidos se les conoce como **NANOFLUIDOS** [4].

Se plantea entonces, como el objetivo principal de esta investigación evaluar de manera experimental cómo la variación de la conductividad térmica debido al uso de nanopartículas en un fluido afecta el proceso de transferencia de calor por convección forzada en un intercambiador de tubos concéntricos. Para lograr el objetivo propuesto se plantea un modelo experimental para número de Nusselt y con base en un diseño factorial se espera establecer los factores significativos dentro del proceso de transferencia de calor.

## INTRODUCCION

Dentro del marco de la nanotecnología se encuentran algunas sustancias en estado líquido que se les ha denominado Nanofluidos. Los nanofluidos son una mezcla coloidal estable de un fluido base y nanopartículas. El fluido base puede ser agua, aceite, anticongelante, entre otros. En forma general las nanopartículas son agregadas al fluido con la finalidad modificar algunas propiedades del fluido base, tales como la viscosidad y la conductividad térmica.

En esta investigación se plantea la preparación del nanofluido usando nanopartículas de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 50nm y 100nm, adicionalmente fue necesario seleccionar un surfactante adecuado para evitar la precipitación de las partículas y la aglomeración de las mismas. La aglomeración de las partículas afecta el proceso de transferencia de calor, ya que al existir mayor concentración de partículas en un punto, estas darán origen a puntos localizados de mayor temperatura, primando entre ellas la conducción de calor. La separación de las nanopartículas se logra alejando al óxido de aluminio de su punto isoeléctrico, y esto se logra al modificar el pH de la solución.

Para validar la hipótesis de este trabajo se realizaron pruebas en un intercambiador de calor de tubos concéntricos con una configuración en contraflujo. En todos los ensayos se usó agua como fluido frío, mientras que el nanofluido se usó como fluido caliente, con los datos obtenidos se determinó la diferencia de temperatura media logarítmica (DTML) y a partir de estos datos se realizó el ANOVA para establecer qué factores eran significativos en el proceso así como las interacciones entre los factores principales. Por último, con todos los datos obtenidos experimentalmente se obtuvo un modelo para el número de Nusselt en función del número de Reynolds, Prandtl y Peclet. El modelo obtenido tiene un  $R^2$  ajustado de 76.9% y un error promedio del 10%.

## **1. FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.1. ANTECEDENTES**

Dos científicos del centro de investigación Almaden de IBM, San José, California en 1989 sorprendieron al mundo científico al utilizar un microscopio de sonda vibrátil para mover átomos de xeón sobre una superficie de níquel, escribiendo una versión microscópica del logotipo de IBM. El experimento demostró que era posible trabajar realmente a nanoescala, aunque el mismo se llevó a cabo en condiciones excepcionales: un microscopio fabricado a propósito, una habitación especial a prueba de vibraciones y una temperatura ambiente de aproximadamente  $-270$  grados centígrados, sólo unos grados sobre el cero absoluto.

A finales del siglo XX el estudio de la multicapas magnéticas nanoestructurales dio lugar al descubrimiento de un nuevo fenómeno cuántico: la magnetorresistencia gigante (GMR). En 1991, un científico japonés, Sumio Iijima, observó e informó la existencia de los nanotubos de carbono, uno de los descubrimientos de mayor importancia para el desarrollo de la nanotecnología. Recientemente algunas investigaciones han tenido como objetivo la evaluación de propiedades físicas y químicas de los nanofluidos, para la mayoría de ensayos se emplearon partículas de aluminio o de hierro. En dichas investigaciones se han evaluado fenómenos como: la convección, fricción, propiedades magnéticas entre otras.

Los nanofluidos se han convertido en tema de mucha importancia porque se ha detectado que el adicionar nanopartículas a los fluidos incrementa fuertemente sus propiedades térmicas. Este incremento en la conductividad térmica hace que los nanofluidos sean altamente deseados en algunos sectores industriales. Algunas aplicaciones están en el área de manufactura, industria química, procesos

farmacéuticos, tratamientos médicos y cosméticos, en el campo de la electrónica también tiene sus aplicaciones. La evolución de los microprocesadores ha traído como consecuencia un incremento significativo en la generación de calor, fenómeno que no es nada deseable para el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos, debido a esto se ha planteado como alternativa usar algún tipo de fluido que permita evacuar rápidamente el calor generado por dichos componentes. El uso de estos fluidos está limitado por la capacidad de retirar y conducir el calor, se piensa entonces, si al adicionar nanopartículas al fluido base se pueden incrementar estas propiedades en el fluido.

El grupo de investigación UREMA en su preocupación por estar a la vanguardia de los desarrollos de nuevas tecnologías y pionero en la costa Atlántida en investigaciones, ha venido desarrollando desde el año 1999 diversas investigaciones encaminadas a brindar soluciones al enfriamiento de componentes electrónicos y al estudio de fenómenos asociados a la transferencia de calor [14], [15], [16], [17], [18].

En el año 2003 se realizó la investigación titulada “Uncoupling the Conjugate Heat Transfer Problem in a Horizontal Plate under the Influence of a Laminar Flow” [15]. Esta investigación fue avalada como tesis para optar el título de Maestría en ingeniería mecánica en la Universidad del Norte y plantea una solución analítica aproximada del problema de transferencia de calor conjugada en una placa horizontal con convección forzada laminar y una fuente de calor constante, para su solución se plantea el uso de polinomios de Chebyshev en la temperatura de interfase.

En el año 2005, la Universidad del Norte a través del grupo de investigación UREMA realizó la investigación “Experimental Study of Heat Transfer in Milli Channels for Cooling of Micro components”, este estudio fue financiado por COLCIENCIAS en la modalidad Jóvenes Investigadores. Los resultados de esta

investigación fueron presentados en “2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition”.

En este congreso también fue presentada la ponencia “Experimental Determination of the Effect of Varying the Base Fluid on Static Thermal Conductivity of Nanofluids” [7], aquí investigadores de la Universidad de Arizona en conjunto con investigadores de INTEL Corporation, buscan implementar fluidos con nanopartículas de aluminio.

A nivel internacional algunos centros de investigación están destinando recursos para evaluar el comportamiento y propiedades de los nanofluidos, tal es caso del centro Tecnológico de nanofluidos del MIT (Instituto Tecnológico de Massachussets). En la investigación “Effective Termal Conductivity of Nanofluids” realizada por Jinbo Wang y Gang Chen, evalúa algunas propiedades termodinámicas del nanofluido, dentro de estas se verifican, efectos electroquímicos, tales como el PH, se realiza una caracterización de los sistemas coloidales y la incidencia que estos tienen sobre la conductividad térmica del fluido en estudio.

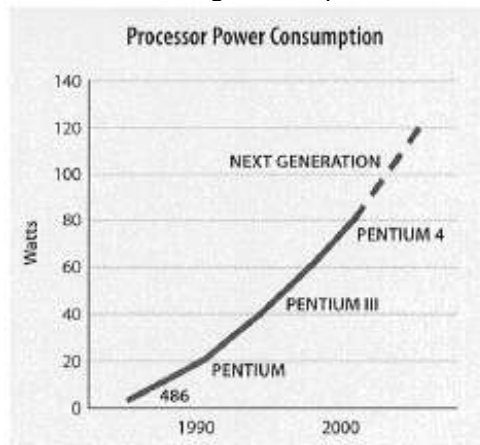
## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La evolución de los computadores esta estrechamente ligada con el aumento en la velocidad de procesamiento de la información que pueden realizar los procesadores, dicho aumento esta determinando por un notable incremento de componentes electrónicos, los cuales se busca que cada vez más ocupen menos espacio, esto trae consigo que se genere más calor. Este calor que se genera por el movimiento de los electrones es necesario retirarlo ya que los componentes electrónicos al igual que otros muchos componentes tienen una temperatura óptima de operación. Mantener esta temperatura bajo los muy notables avances en los procesadores se ha convertido en un dolor de cabeza para muchos investigadores, ahora, el problema se agudiza cuando se habla de sistemas

distribuidos o de procesadores en paralelo tal como los que emplean en los sistemas de navegación de los aviones.

En la electrónica convencional se adicionan una placa metálica, generalmente de aluminio para disipar calor (Transfieren el calor por conducción y convección) pero hoy en día se adiciona uno o mas ventiladores para hacer circular aire sobre los disipadores con el fin de incrementar la transferencia de calor (Heat Sinks). Sin embargo con aire como fluido de trabajo resulta complicado diseñar un sistema como estos que permita remover cantidades de calor superiores a  $100 \text{ W/cm}^2$  [8].

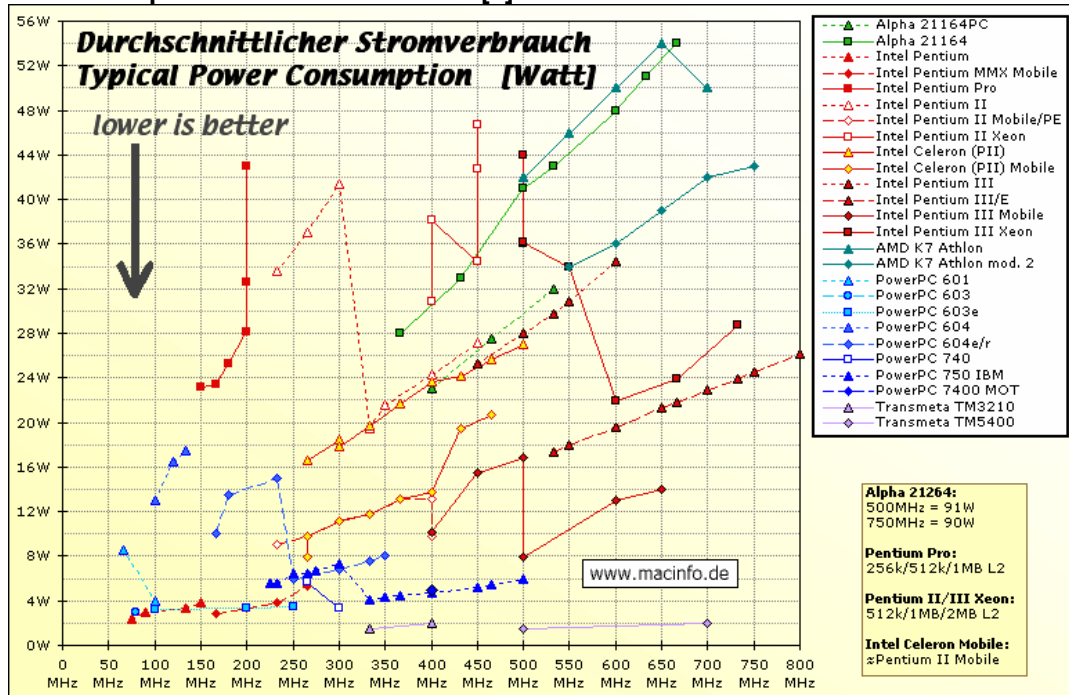
Figura 1 Consumo energético de procesadores INTEL



El grupo de investigación UREMA de la Universidad del Norte realizó recientemente una investigación titulada **“Caracterización y estudio experimental del proceso de intercambio de calor en minicanales para aplicaciones de componentes electrónicos de alto poder”** en la cual se plantea una alternativa para el enfriamiento de componentes electrónicos, en esta investigación a través de unos orificios denominados minicanales se hace circular un fluido que retira el calor concentrado en los disipadores de calor. Dicha investigación muestra que es posible retirar más calor de los componentes que al usar los sistemas convencionales, pero también se evidencia que la capacidad de

transferir calor es una propiedad del fluido que se este usando y cuando este logre su mayor capacidad no es posible es ese instante retirar más [6].

Figura 2 Comparación del consumo de potencia en función de la velocidad de procesamiento para distintos fabricantes [5].



### 1.3. JUSTIFICACION

Se busca entonces dar continuidad a la investigación del grupo UREMA para desarrollar una alternativa que permita aumentar la capacidad de transferencia de calor de los fluidos empleados para el enfriamiento de componentes electrónicos. Hay que anotar que recientes estudios a nivel mundial han mostrado que al adicionar partículas metálicas de tamaño nanométrico a un fluido se logra incrementar sus propiedades físicas, tal es el caso de la conductividad térmica, a estos nuevos fluidos se les conoce como NANOFUIDOS. Desafortunadamente hoy en día existe poca documentación o teorías validas para los nanofluidos debido a que es un tema en cual solo se han desarrollada experimentaciones

tratando de obtener propiedades físicas de los mismos, Estados Unidos y Japón son los países que más han dedicado recursos para estas investigaciones, las cuales han tomado mucha fortaleza en los últimos dos años.

Basado en estos antecedentes, se pretende con esta investigación realizar un estudio del comportamiento de un nanofluido en un proceso de transferencia de calor por convección, donde se resalte las propiedades termodinámicas de mayor importancia. Se espera entonces observar los cambios en la conductividad térmica, aumento de la eficiencia de transferencia de calor, establecer un modelo experimental para el número de Nusselt que permita explicar dicho proceso y evaluar al menos dos tamaños diferentes de nanopartículas y de esta manera a través de un diseño de experimento poder establecer cuales factores son significativos en el proceso de transferencia de calor.

## **2. OBJETIVOS Y METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Establecer de manera experimental la variación en el proceso de transferencia de calor por convección debido al uso de nanopartículas en un fluido.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer criterios para la selección del surfactante adecuado para la preparación de los nanofluidos.
- Evaluar el comportamiento para transferir calor de al menos dos tamaños de nanopartículas de óxido de aluminio.
- Seleccionar un banco de ensayos para realizar prueba de transferencia de calor.
- instrumentar completamente el banco de pruebas (sensores y termocuplas) para la obtención de mediciones de temperatura y caudal de los fluidos analizados.
- Establecer un modelo experimental del número de Nusselt (indicador del calor absorbido para un fluido) para nanofluidos con partículas de óxido de aluminio.
- Determinar si es posible aumentar el transporte calor cuando se hace variar el tamaño o diámetro de las nanopartículas.

### **2.3. METODOLOGIA**

La evaluación de las propiedades de termodinámicas y de conductividad térmica de los Nanofluidos empelados en esta investigación se llevó a cabo por medio de un proceso experimental a través de los siguientes pasos.

#### **1. Recopilación de información de nanopartículas y nanofluidos.**

Se realizó una revisión bibliográfica con la finalidad de generar una caracterización de las nanopartículas de aluminio de geometría esférica, así como las concentraciones de los nanofluidos que se emplearan en los ensayos y pruebas.

#### **2. Identificación de proveedores de nanopartículas**

Después de realizar la revisión de artículos de investigación, fue posible establecer los proveedores para la adquisición de las nanopartículas, gracias a esto se pudo identificar un representante de venta en la ciudad de Bogotá, lo cual facilito la adquisición de dichos productos [12].

#### **3. Selección del surfactante**

Se seleccionó el surfactante adecuado para las nanopartículas de oxido de aluminio con la fin de contrarrestar dos fenómenos importantes presentes en los nanofluidos, uno de ellos es la precipitación de las partículas y el otro es la agregación de las mismas, las cuales afectan el proceso de transferencia de calor.

#### **4. Pruebas en microscopio electrónico de barrido**

Gracias al microscopio electrónico de barrido que posee el departamento de ingeniería mecánica se realizó la primera experiencia relacionada con nanotecnología, donde fue posible visualizar estas partículas de tamaño nanométrico y hacer mediciones sobre estas.

## **5. Elaboración del diseño de experimento factorial**

En esta fase se selecciono de forma aleatoria el orden de las corridas del experimento factorial con dos réplicas, el modelo estadístico con el cual se plantea procesar los datos adquiridos en las corridas.

## **6. Selección del banco de pruebas**

Se seleccionó un intercambiador de calor de tubos concéntricos, el cual fue adecuado para evaluar el fenómeno de convección. Para este banco fue necesario determinar el sistema de calentamiento, el sistema de bombeo del nanofluido, el método de fijación de todos los componentes del banco de prueba, y el aislamiento térmico de aquellos componentes que así lo requería.

## **7. Instrumentación del sistema**

Se instalaron sensores de temperatura sobre el intercambiador de calor, los cuales se conectaron a un equipo de adquisición de datos con la finalidad de obtener un listado de las temperaturas medidas a los largo del sistema de tubos concéntricos. Se ubicaron otros sensores de temperatura a la entrada y salida del fluido empleado como refrigerante

## **8. Calibración de los elementos de medición, pruebas de ensayo**

En esta fase se realizó la puesta a punto de los equipos e instrumento de medición, con el fin de garantizar la calidad de la información obtenida.

## **9. Realización de pruebas, corridas del experimento factorial y toma de datos**

Con base en la planeación realizada anteriormente se procedió a realizar las corridas del experimento

## **10. Procesamiento y análisis de los resultados**

Luego de realizar las pruebas correspondientes al diseño de experimento, se emplearon algunas herramientas computacionales para el análisis de los datos obtenidos. Luego, con base en los efectos significativos obtenidos, se determinó una ecuación de regresión no lineal para el número de Nusselt.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1. COLOIDES Y NANOFLUIDOS

Los coloides son dispersiones de pequeñas partículas de un material en otro “pequeño” significa unos 500 nm de diámetro más o menos (alrededor de la longitud de onda de la luz). En general, son agregados de un gran número de átomos o moléculas, pero normalmente son demasiado pequeños para verlos con un microscopio óptico ordinario. Pasan a través de la mayoría de los filtros de papel, pero son detectables por dispersión de la luz, sedimentación y ósmosis. El nombre dado al coloide depende de la naturaleza de las dos fases implicadas.

Los *soles* son dispersiones de sólidos en líquidos (tales como los nanofluidos), o de sólidos en sólidos (tales como vidrio de rubí, que es un sol de oro en vidrio; toma su color por dispersión).

Los *aerosoles* son dispersiones de líquido en gases (como la niebla y muchos pulverizadores) y de sólidos en gases (tales como el humo). Las partículas son con frecuencia suficientemente grandes como para resultar visibles al microscopio.

Las emulsiones son dispersiones de líquido en líquido (tales como la leche). Algunas veces las espumas, dispersiones de gases en líquidos (como la cerveza) o de gases en sólidos (como la esponja), también se incluyen en esta clasificación, pero su inclusión es caprichosa más que útil [1].

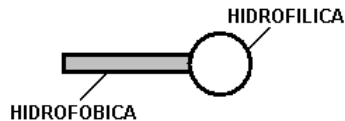
Los nanofluidos son una mezcla coloidal estable de un fluido base y nanopartículas. El fluido base puede ser agua, aceite, anticongelante, entre otros. En forma general las nanopartículas son agregadas al fluido con la finalidad de modificar algunas propiedades del fluido base, tales como la viscosidad y la conductividad térmica.

### 3.2. SURFACTANTES

Los surfactantes son sustancias complejas que se emplean para disminuir la tensión superficial entre la fase dispersa y la continua. Ahora cuanto menor sea la tensión superficial entre las dos fases de una emulsión más fácil es la emulsificación [1].

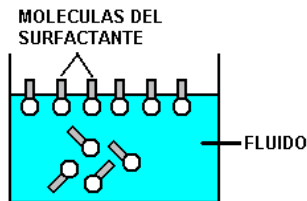
Los surfactantes son sustancias que poseen características *lipofóbicas* (que repelen al solvente) y *lipofílicas* (que atraen al solvente). Cuando el disolvente es agua los términos apropiados son hidrofóbica e hidrofílica, y son representados tal como se muestra en la Figura 3. Desde el punto de vista molecular esto indica que la fase hidrofílica es soluble en agua, mientras que la fase hidrofóbica no lo es, pero a esta última se la atribuye la actividad sobre la tensión superficial.

Figura 3 Esquema de una molécula para un surfactante



La fase hidrofílica es atraída fuertemente por las moléculas de agua, mientras que la fase hidrofóbica o hidrofílica se atrae levemente, en consecuencia las moléculas del surfactante se alinean en la superficie y dentro del mismo, de modo que la parte hidrofílica se orienta hacia el fluido y la parte hidrofóbica tiende a alejarse del agua tal como se muestra en la Figura 4. Al conglomerado de moléculas del surfactante se le denomina ***micela***.

Figura 4 Orientación de las moléculas de un surfactante en el agua



La fase hidrofóbica es comúnmente un hidrocarburo que contiene de 8 a 18 carbonos, estos hidrocarburos pueden ser de tipo alifáticos, aromático o mezclas de estos dos. La fase hidrofílica esta constituida normalmente por grasas y aceites naturales, fracciones del petróleo, polímeros sintéticos relativamente cortos, o alcoholes sintéticos con altos peso molecular. Actualmente los surfactantes son muy utilizados industrialmente debido a que presentan propiedades como:

- a. Detergentes.
- b. Son espumantes.
- c. Tienen capacidad solubilizante.
- d. Son emulsionantes.
- e. Se comportan como humectante.
- f. Actúan como dispersantes.

La parte hidrofílica del surfactante es el directo responsable de la clasificación de estas sustancias, es posible agruparlas en tres grupos

1. Iónicos
2. No iónicos
3. Anfóteros

### **3.3. SURFACTANTE IONICOS**

Un tensoactivo es considerado como iónico si su grupo hidrofílico esta cargado eléctricamente. Esto ocurre por la perdida o ganancia de electrones. Basado en esta consideración los surfactantes iónicos se pueden clasificar como:

1. Aniónicos
2. Catiónicos

#### **3.3.1. Surfactante aniónicos**

Desde el punto de vista químico se dice que los ánodos son moléculas cargadas negativamente, producto de la ganancia de electrones. Ahora un tensoactivo aniónico es aquel en la cual la molécula hidrofílica esta cargada negativamente.

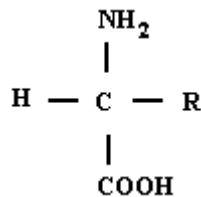
Hay casos de tensoactivos, por ejemplo ácidos carboxílicos, que a bajo pH no presentan carga eléctrica neta, pero que a pH más elevados son aniónicos. Los tensoactivos aniónicos se pueden reunir básicamente en cinco familias y estas a su vez en diversas familias, tal como se muestra a continuación:

- a. Acil-aminoácidos (y sales).
- b. Ácidos carboxílicos y sus sales.
- c. Esteres del ácido fosfórico.
- d. Ácidos sulfónicos (y sales).
- e. Esteres del ácido sulfúrico.

➤ **Acil-aminoácidos**

Un aminoácido es una molécula que contiene un grupo carboxilo (-COOH) y un grupo amino (-NH<sub>2</sub>) libres. Pueden representarse en general por NH<sub>2</sub>-CHR-COOH, siendo R un radical o cadena lateral característico de cada aminoácido, tal como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5 Estructura general de un aminoácido**



Estos grupos R son muy variados químicamente. Muchos aminoácidos forman proteínas (aminoácidos proteicos), mientras otros nunca se encuentran en ellas. Todos los aminoácidos que componen proteínas presentan un carbono asimétrico denominado alfa (por ser el carbono adyacente al grupo carboxilo). La unión entre aminoácidos se produce mediante un enlace peptídico. Los radicales de los aminoácidos pueden ser de tipo:

- a. Polares (hidrófilo)

- b. No polares (hidrófobo)
- c. Ácidos
- d. Básicos

Debido a la naturaleza de esta investigación solo se resaltaran los componentes polares correspondientes a la fase hidrofílica de la sustancia tales como: Serina (Ser o S), Treonina (Thr o T), Cisteína (Cys o C), Tirosina (Thr o Y), Asparagina (Asn o N) y Glutamina (Gln o Q). Ahora es posible diferenciar cuatro tipos de acil-aminoácidos:

**Tabla 1 Familia del grupo Acil-aminoácidos**

<b>Grupo Acil-Aminoácidos</b>	<b>Propiedades físico-químicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Estabilidad</b>
Acil-Glutamatos	<p>Proviene del ácido glutámico. Este es un ácido dicarboxílico que puede formar mono o disales. Las disoluciones acuosas de monosales son levemente ácidas, mientras que las disales son alcalinas. Ambas sales son solubles en agua.</p> <p>Este tipo de tensoactivos son malos espumantes. Los acil-glutamatos son amidas y pueden experimentar reacciones de hidrólisis a determinados pH</p>	<p>Son usados en champús y productos para la limpieza de la piel, por su suavidad. También se encuentran en detergentes de barra sintéticos. Se afirma que proporcionan a la piel sensación de suavidad.</p>	<p>A pesar de ser amidas poseen una adecuada resistencia a la hidrólisis en productos cosméticos</p>
Acil-Péptidos	<p>Los acil-péptidos son preparados por acilación de proteínas hidrolizadas. La</p>	<p>Los acil-péptidos son suaves agentes limpiadores y tienen aplicación en productos</p>	<p>Este grupo de sustancias son amidas y están sometidas a</p>

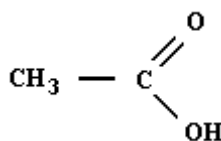
	<p>fuente principal de proteínas es el colágeno animal, que puede ser hidrolizado bien por vía enzimática bien por vía química.</p> <p>La reacción de acilación se lleva a cabo mezclando la proteína hidrolizada con un derivado de ácidos grasos naturales. Después de la reacción se requiere un proceso de neutralización con una base. La purificación del producto final es difícil y puede darse la aparición de jabón.</p> <p>Los acil-péptidos tienen buena estabilidad a rangos de pH neutro. Los derivados de bajo peso molecular son bastante solubles en disolventes orgánicos.</p> <p>La mayoría son sólidos pero se pueden encontrar en disoluciones acuosas y ocasionalmente en disoluciones alcohólicas.</p>	<p>para el cuidado capilar (mascarillas, acondicionadores...).</p> <p>También han sido usados en productos para el cuidado de la piel, especialmente por su habilidad para tolerar las aguas duras</p>	<p>reacciones de hidrólisis. Soportan el crecimiento de especies microbianas. Este grupo exhibe cierta tendencia a inactivar algunos conservantes, lo que obliga a tomar ciertas precauciones en su conservación</p>
Sarcosinatos	<p>Los sarcosinatos son un pequeño grupo de tensoactivos derivados de la acilación de la sarcosina (N-metil glicina).</p>	<p>Debido a la nula agresividad que presentan son usados en champús y varios tipos de productos limpiadores de la piel</p>	<p>Los sarcosinatos son amidas y están sujetos a hidrólisis a</p>

	<p>Los componentes de esta subfamilia son altamente solubles en agua y tienen un comportamiento muy similar al de los jabones ordinarios. Son buenos espumantes y no se ven afectados por la dureza del agua.</p> <p>Son compatibles con varios tipos de tensoactivos y supuestamente se pueden combinar con cuaternarios</p>		<p>rangos de pH extremos. Bajo condiciones normales de uso en cosmética son estables</p>
Tauratos	<p>Los tauratos son un pequeño grupo de surfactantes aniónicos que deriva de la taurina (N-metil taurina). Al igual que el resto de subfamilias de acil-aminoácidos se preparan por acilación de la taurina con un derivado de un ácido graso (generalmente un cloruro de ácido).</p> <p>Estos ácidos sulfónicos son fuertes y muy solubles en agua. Son resistentes a la hidrólisis en un rango de pH bajo. Son buenos espumantes, especialmente en presencia de otros tensoactivos aniónicos.</p>	<p>Tienen un uso limitado en cosmética. Se utilizan en baños de espuma.</p>	<p>Los tauratos son estables en usos cosméticos</p>

➤ **Ácidos Carboxílicos y sus sales**

Desde el punto de vista químico es un compuesto formado por cationes (iones cargados positivamente) enlazados a aniones (iones cargados negativamente). Son el producto típico de una reacción química entre una base y un ácido, la base proporciona el catión y el ácido el anión. Los ácidos carboxílicos se caracterizan por tener un grupo carboxilo –COOH en el extremo de la cadena.

**Figura 6 Estructura general del grupo carboxilo**



Los tensoactivos de esta familia son ácidos débiles y su solubilidad en agua depende de la neutralización con una base. Sus sales alcalinas son los denominados jabones. Este grupo es compatible con tensoactivos aniónicos y no iónicos

**Tabla 2 Familias del grupo carboxílicos**

<b>Grupo Carboxílicos</b>	<b>Propiedades físico-químicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Estabilidad</b>
Ácidos de cadena saturada	los componentes de esta subfamilia son nada más que ácidos carboxílicos saturados. Los ácidos grasos animales y vegetales son la principal fuente de este tipo de tensoactivos, aunque también se pueden preparar sintéticamente.  Los ácidos de cadena	Los jabones solubles en agua son usados en una amplia variedad de productos cosméticos; productos para el afeitado, la limpieza de la piel, desodorantes etc. Según la base con que se preparó el jabón este tendrá distintas propiedades y con ello	Estos compuestos no se ven alterados químicamente por la exposición a ácidos o bases. La principal causa de descomposición es la oxidación

	<p>saturada naturales se obtienen por hidrólisis alcalina, o saponificación, de grasas y aceites. Seguidamente se precipitan por acidificación, se purifican y se aíslan. Si no se lleva a cabo el proceso de separación, la mezcla de ácidos grasos se denomina según la fuente de la cual provengan (por ejemplo, ácidos grasos de coco)</p> <p>Este grupo es una importante fuente de recursos para la obtención de otros tipos de tensoactivos. Rara vez son usados como tensoactivos, sin embargo, sus sales, los jabones, no solo son los más antiguos sino que también los más usados mundialmente.</p> <p>Los compuestos de esta familia son ácidos débiles y relativamente insolubles. Su utilidad en aguas duras es limitada. Precipitan con alquilaminas.</p> <p>Los ácidos grasos saturados pueden ser líquidos o sólidos a temperatura ambiente.</p>	<p>distintas aplicaciones</p>	<p>que causa el enranciamiento en los ácidos poliinsaturados</p>
--	---	-------------------------------	--

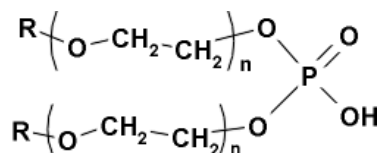
<p>Esteres de ácidos carboxílicos</p>	<p>Esta subfamilia esta formada por un pequeño grupo de monoésteres de ácidos di o tricarboxílicos. El éster puede estar formado por un alcohol y un ácido policarboxílico (citrato de 9-dinonoxinol) o por un ácido que ha reaccionado con el grupo hidroxílico de otro ácido carboxílico (acil lactatos)</p> <p>Los compuestos de este tipo son sólidos céreos. Las sales derivadas del ácido láctico son buenas espumantes y se dice que tienen propiedades humectantes.</p>	<p>Son emulsificantes tanto de tipo O/W como W/O. Además pueden ser usados en champús, dependiendo de su capacidad espumante</p>	<p>Los miembros de este grupo son considerados estables en las condiciones de uso en cosmética</p>
<p>Éteres de ácidos carboxílicos</p>	<p>Los éteres de ácidos carboxílicos son un reducido grupo de ácidos carboxílicos que derivan de alcoholes o fenoles etoxilados, por oxidación.</p> <p>No se ven afectados apreciablemente por las aguas duras y su HLB depende de la cadena de PEG y del grado de formación de la sal. Estos ácidos carboxílicos son compatibles con todo tipo de tensoactivos incluyendo algunos catiónicos.</p>	<p>Se usan como emulsificantes y estabilizadores</p>	<p>Los éteres de ácidos carboxílicos son considerados como estables en las condiciones normales de uso cosméticas</p>

	Las soluciones acuosas de las sales son buenas espumantes.		
--	--	--	--

➤ **Esteres de ácido fosfórico (y sales)**

Este grupo comprende los mono y diésteres del ácido fosfórico y sus sales. Los triésteres son no iónicos y no se emplean muy comúnmente como tensoactivos. Los diésteres son más lipófilos que los monoésteres. En general las propiedades lipofílicas dependen de la naturaleza de la cadena esterificada.

**Figura 7 Estructura general de los esterres del ácido fosfórico**

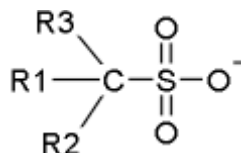


Aunque los ésteres neutralizados sean solubles en agua, frecuentemente pueden presentar algo de solubilidad en disolventes no polares. Algunos ésteres de este grupo, por el contrario se dispersan en agua y principalmente son solubles en soluciones orgánicas (apolares). Los ésteres del ácido fosfórico son fácilmente hidrolizables en medios ácidos, pero presentan buena estabilidad a pHs neutros y ligeramente alcalinos.

➤ **Ácidos sulfónicos y sus sales**

Los tensoactivos del tipo ácido sulfónico se distinguen por presentar un enlace del tipo C-S. En este grupo se pueden diferenciar cuatro subfamilias, según sea el radical R1 (R2 y R3 suelen ser sólo H)

**Figura 8 Estructura general de los ácidos sulfónicos**



**Tabla 3 Familias de ácidos sulfónicos y sus sales**

<b>Grupo Ácidos Sulfónicos</b>	<b>Propiedades físico-químicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Estabilidad</b>
Acil-isotionatos	<p>Los acil-isotionatos son ésteres formados entre ácidos grasos y ácido isotiónico. Los isotionatos son ácidos fuertes, sujetos a auto hidrólisis a menos que el pH sea ajustado alrededor de siete. Es remarcable el hecho de que los acil-isotionatos sean más suaves que los ésteres del ácido sulfúrico además de otros alquil sulfonatos.</p>	<p>Son muy usados en champús y productos para la limpieza de la piel. Tiene importancia en la formulación de detergentes sintéticos</p>	<p>Los acil-isotionatos son ésteres y pueden sufrir reacciones de hidrólisis a condiciones de pH extremas</p>
Alquil Aril Sulfonatos	<p>La mayoría de compuestos de este grupo son derivados del ácido bencenosulfónico. La cadena alquílica puede ser más o menos larga. Antiguamente se obtenían por polimerización de olefinas gaseosas; como resultado se obtenían sustancias con cadenas ramificadas, no muy biodegradables.</p> <p>En contraposición hoy en día, se tiende a fabricar estos compuestos con cadenas lineales que son condensadas con benceno</p>	<p>Tienen tendencia a limpiar excesivamente, dejando una sensación de sequedad y aspereza en la piel y el pelo.</p>	<p>Esta familia de tensoactivos presenta una excelente estabilidad aún en condiciones extremas.</p>

	<p>(mediante una reacción de Friedel-Crafts) El alquilbenceno resultante será sulfonado posteriormente.</p> <p>Los derivados de cadena corta disminuyen la tensión superficial. No espuman bien pero aumentan la solubilidad de otros tensoactivos en presencia de sales inorgánicas.</p>		
Alquil Sulfonatos	<p>Este grupo incluye a una serie de sustancias químicas de diversas estructuras. Algunas son derivadas del propilenglicol, aunque sean nombradas como derivadas de la glicerina. Otras derivan de la sulfonación de alcoholes o ácidos, mientras que también se pueden encontrar derivados de PEG cuyo grupo hidroxilo terminal es sustituido por un SO<sub>3</sub>-.</p> <p>Los alquil sulfonatos más importantes son los a-olefin sulfonatos, que son preparados por sulfonación de olefinas lineales provenientes del craqueo del petróleo o de la polimerización del etileno. La mayoría de los alquil sulfonatos espuman bien y poseen buenas propiedades detergentes.</p>	<p>Muchos de ellos se emplean en pastas dentífricas. Solo los a-olefin sulfonatos juegan un modesto rol en la formulación de productos de higiene oral; estos son usados en champús por sus propiedades espumantes, buena estabilidad y su bajo costo</p>	<p>Son sustancias muy estables</p>
Sulfosuccinatos	<p>Los sulfosuccinatos son derivados del ácido sulfosuccínico. Estos pueden ser considerados como alquil sulfonatos, ácidos carboxílicos, ésteres o amidas.</p>	<p>Son usados en champús y como emulsionantes O/W. Como resultado de su</p>	<p>Su estabilidad en medios acuosos es satisfactoria</p>



sulfatación de alcoholes con cadena alquílica larga; el otro, los alquil éter sulfatos, emplean alcoholes etoxilados (alquil éteres) como cadena hidrofóbica principal.

**Tabla 4 Familias de ácidos sulfónicos y sus sales**

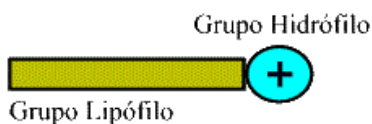
<b>Grupo Ácidos Sulfónicos</b>	<b>Propiedades físico-químicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Estabilidad</b>
Alquil Éter Sulfatos	<p>Estos compuestos raramente son sustancias puras, sino que son mezclas, debido a la impureza de la materia prima (alcohol) y a que el grado de etoxilación es un valor medio.</p> <p>Estas sustancias tienen buena solubilidad en agua y su actuación no se ve afectada por la dureza.</p> <p>Los alquil éter sulfatos están disponibles comercialmente como soluciones acuosas (con alrededor del 25% al 60% de materia activa). Su espuma es buena, pero su densidad de espuma y su volumen son inferiores que las de los alquilsulfatos. Los alquil éter sulfatos presentan un punto de turbidez menor que los alquil sulfatos</p>	<p>El uso principal de los alquil éter sulfatos es como detergente de geles de baño y champú.</p> <p>Los alquil éter sulfatos pueden ser combinados con alquil sulfatos y otros tensoactivos aniónicos y no iónicos, para conseguir los niveles deseados de propiedades espumantes y detergentes</p>	Los alquil éter sulfatos poseen una estabilidad en los rangos de pH usuales
Alquil Sulfatos	<p>Los alcoholes grasos pueden ser obtenidos por vía natural o sintética. Al igual que los alquil éter sulfatos estas sustancias son mezclas de</p>	Normalmente se mezclan con otros tensoactivos no iónicos y aniónicos,	Los alquil sulfatos poseen una estabilidad aceptable.

	<p>alquil sulfatos con cadenas de distinta longitud.</p> <p>La solubilidad de estos compuestos depende del catión que acompañe a la sal.</p> <p>Los alquil sulfatos son buenos agentes de mojado y producen una espuma copiosa, además de ser emulsificantes O/W.</p>	<p>para incrementar la estabilidad de la espuma y la viscosidad y para disminuir el efecto desengrasante de algunos surfactantes.</p> <p>Alquil sulfatos puros son usados en productos de higiene oral.</p>	
--	---	---	--

### 3.3.2. Surfactante catiónicos

Un tensoactivo catiónico se caracteriza por poseer una carga eléctrica neta positiva en su parte hidrófila. Las sustancias que a pH altos no presentan carga neta pero a pH menores son catiónicas también se incluyen en este grupo, como es el caso de las alquil aminas.

Figura 10 Representación de una molécula para surfactante catiónico.



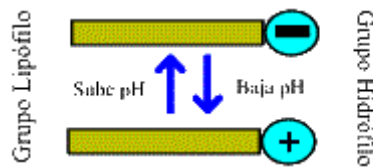
Este tipo se subdivide en las siguientes familias y subfamilias:

1. Alquil aminas
2. Alquil imidazolinias
3. Aminas etoxiladas
4. Cuartanarios
  - a) Sales de alquil bencil dimetil amonio
  - b) Sales de amonio heterocíclicas
  - c) Sales de tetraalquil amonio

### 3.4. SURFACTANTES ANFOTEROS

Las sustancias clasificadas como anfóteras tienen la particularidad de que la carga eléctrica de la parte hidrofílica cambia en función del pH del medio. Los tensoactivos que son anfóteros poseen una carga positiva en ambientes fuertemente ácidos, presentan carga negativa en ambientes fuertemente básicos, y en medios neutros tienen forma intermedia híbrida.

Figura 11 Comportamiento de un surfactante anfótero



Las sustancias anfóteras se dividen en dos familias:

1. Acil-aminoácidos (y derivados)
2. N-alkil-aminoácidos

Tabla 5 Familia de surfactantes anfóteros

Grupo Ácidos Sulfónicos	Propiedades físico-químicas	Aplicaciones	Estabilidad
Acil-aminoácidos	Esta familia también se denomina como familia de las acil/dialquil etilendiaminas y derivados.  Son sustancias que pueden usarse en forma de sales (normalmente sódicas) o como ácidos libres. No son químicamente puras, sino que contienen una serie de compuestos formados durante su síntesis, como jabones de aminas,	Son buenos detergentes pero no son adecuados como emulsificantes.  Son compatibles con todos los tipos de tensoactivos y pueden tolerar las aguas duras.  En combinación con	El grupo amido de los acil-aminoácidos puede hidrolizarse en condiciones de pH extremas.  Sin embargo, esta situación no se da en productos

	<p>productos de la alquilación de la amina inicial y varias aminas secundarias complejas. A pesar de estas impurezas, los acil-aminoácidos se comportan como anfóteros en sus distintos usos. A pH próximos a la neutralidad presentan su forma zwitteriónica.</p> <p>En general, los acil-aminoácidos son solubles en agua, y se comercializan en forma de disoluciones acuosas o pastas.</p>	<p>tensoactivos aniónicos, destaca su capacidad para disminuir la tendencia a producir irritación ocular que poseen dichos compuestos, sin interferir en la formación de espumas. Por esto, se usan mucho en formulaciones de champús.</p>	<p>cosméticos, por lo que se consideran sustancias estables para estas aplicaciones</p>
N-alquil-aminoácidos	<p>Este grupo de tensoactivos derivan de distintos aminoácidos. Carecen del grupo hidroxietil que suele aparecer en los aminoácidos que actúan como surfactantes.</p> <p>Por alquilación del grupo amino primario de un aminoácido se obtienen aminas secundarias y terciarias, lo que dota al compuesto de un mayor carácter básico. Además, algunos de estos sustituyentes alquílicos pueden contener grupos aminos, lo que aumentaría aún más la basicidad de la molécula.</p> <p>La mayoría de los compuestos de este grupo son derivados de la beta-alanina o de la beta-N(2 carboxietil)-alanina. Sólo unos</p>	<p>En medio básico y neutro son buenos espumantes. Sin embargo, a pH bajos se comportan como catiónicos y pierden su capacidad de formar espumas.</p> <p>En su forma zwitteriónica son adecuados para todo tipo de productos para el cabello.</p> <p>También se usan como emulsificantes.</p>	<p>Los N-alquil-aminoácidos no son hidrolizados ni por ácidos ni por bases.</p>

	<p>pocos tienen estructuras similares a las de los alfa-aminoácidos naturales.</p> <p>Los N-alquil-aminoácidos se pueden usar como ácidos libres o formando sales. Cuando se neutralizan totalmente con una base, se comportan como aminas. El carácter zwitteriónico se manifiesta a un pH ligeramente ácido (en torno a 6).</p> <p>Las sales sódicas son bastante solubles en agua, mientras que las formas zwitteriónicas lo son menos.</p>		
--	--	--	--

## 4. PREPARACIÓN DE LOS NANOFLUIDOS

### 4.1. SELECCIÓN DE LAS NANOPARTICULAS.

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a la forma de polvo. Hay tres métodos principales para producir comercialmente polvos metálicos, cada uno de los cuales implica consumo de energía para incrementar el área superficial del metal. Los métodos son: atomización, químicos y electrolíticos. Ocasionalmente se usan métodos mecánicos para producir el tamaño de los polvos.

#### 4.1.1. Atomización

La atomización produce una corriente de metal líquido inyectando un metal fundido en un orificio pequeño. La corriente se desintegra con chorros de gas inerte, aire o agua. El tamaño de las partículas que se forma depende de la temperatura del metal, el caudal, el tamaño de la boquilla y las características de los chorros. En una variante de este método se hace girar un electrodo consumible, rápidamente, en una cámara llena de helio. Las fuerzas centrífugas desintegra la punta fundida del electrodo y forma partículas metálicas.

#### 4.1.2. Métodos químicos

Los métodos que se usan con frecuencia son a) **precipitación** de una solución química, b) producción de esquirlas metálicas finas por **maquinado**, y c) **condensación de vapor**. Entre los nuevos avances se incluyen técnicas basadas en proceso de metalurgia extractiva a alta temperatura. Los polvos metálicos se producen con técnicas de procesamiento a altas temperaturas, basados en la relación de halógenos volátiles (compuestos de un halogeno y un elemento electropositivo) con metales líquidos y la reducción controlada y la reducción-carburización de óxidos sólidos.

#### **4.1.3. Deposición electrolítica**

En este método se usan soluciones acuosas o sales fundidas. Los metales producidos son de lo más puro que se puede conseguir.

#### **4.1.4. Criterios de selección de las nanopartículas**

Para el desarrollo de la presente investigación, inicialmente se planteo el uso de nanopartículas de aluminio, ya que este material junto con el cobre presenta una alta conductividad térmica. Se opto por comprar las de aluminio ya que estas tienen menor densidad y era más fácil mantenerlas en suspensión. Desafortunadamente en Colombia existen algunas restricciones para la importación de nanopartículas de aluminio puro debido que puede ser usadas en explosivos, Indumil (Industria Militar de Colombia) tiene ciertos protocolos que limitaba el uso de estos materiales, además se debía cumplir con un estudio previo que dura alrededor de 180 días sin garantías que se aprobara su importación.

Teniendo en cuenta estas restricciones se decidió adquirir nanopartículas de oxido de aluminio ya que es un materia bastante caracterizado y conocido en el ámbito de los nanofluidos. Dentro de las consultas realizadas, el fabricante ofreció dos tamaños de partículas para el oxido de aluminio, 50nm y 100nm. Las especificaciones técnicas de las nanopartículas seleccionadas se registran en la Tabla 6. Los factores que se tuvieron en cuenta para la adquisición de las nanopartículas fueron:

- Conductividad térmica: Alta
- Tamaño de partículas: 50 y 100nm
- Geometría de las nanopartículas: Esférica, mayor área de transferencia de calor
- Presentación: polvo, para fácil manipulación

- Proveedor: de preferencia con representación en Colombia
- Proceso de obtención: Deposición química de vapor, proceso con bajo costo y buena precisión.

Tabla 6 Especificaciones generales del óxido de aluminio

Composición molecular	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Presentación	Nanopolvos
Tamaños de partículas	50 y 100 nm
Área superficial	35-43 m <sup>2</sup> /gr
Temperatura de fusión	2040°C (lit)
Peso molecular	101.96 gr/mol
Presión de vapor	1mmHg a 2158°C
pH	9.4 a 10.1 a 20°C
Punto de ebullición	2980°C
Densidad	4 gr/cm <sup>3</sup>
Índice de refracción	1.76 a 1.768
Solubilidad en agua	Insoluble
Estabilidad	Estable
Condiciones a evitar	Humedad
Materiales a evitar	Ácidos fuertes, Bases fuertes, Trifluoruro de cloro, Óxido de etileno, halocarbonos, difluoruro de oxígeno, Nitrato sódico., acetato de vinilo
Productos de Descomposición Peligrosos	Óxido de aluminio
Polimerización Peligrosa	No se producirá

#### 4.2. SELECCIÓN DEL SURFACTANTE

Tal como se describe en el capítulo 2, los surfactantes pueden ser de tipo iónico, no iónicos y anfóteros, el óxido de aluminio es una sustancia de tipo anfotérica, esto quiere decir que un momento dado se puede comportar como una sustancia aniónica o cationica. Las sustancias como el oxido de aluminio presentan una características llamada punto isoeléctrico, en este punto la sustancia presenta carga neutra y se alcanza cuando el pH de la sustancia es de 9, tal como lo suministra el fabricante. Los criterios tenidos en cuenta para la selección del surfactante son:

Tipo de surfactante: Anfotero

Solubilidad: Alta solubilidad en agua

Proveedor: local

Presentación: Líquida

Seguridad: sustancia no explosiva, no altere químicamente el óxido de aluminio.

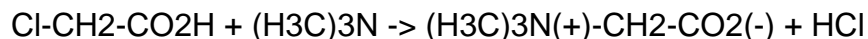
Color: de preferencia incoloro

Riego: bajo riesgo humano para manipulación.

#### 4.2.1. Betaína

El surfactante seleccionado para esta investigación es Betaína. La Betaína es una sustancia incolora, derivada del ácido N,N-dimetilaminoacético con la fórmula  $(\text{H}_3\text{C})_3\text{N}^+(\text{H})-\text{CH}_2-\text{CO}_2^-$ . Debe su nombre a su aparición en el azúcar de la remolacha (*Beta vulgaris*). Cuando los compuestos derivados de aminoácidos toman como patrón su estructura zwitteriónica, se denominan “estructuras betaínicas” [2].

La betaína se puede obtener por reacción de ácido monocloroacético con trimetilamina:



La reacción se lleva al cabo calentando una mezcla de los productos de partida en agua (ver propiedades en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Comercialmente es posible adquirirla en forma de su monohidrato  $(\text{H}_3\text{C})_3\text{N}^+(\text{H})-\text{CH}_2-\text{CO}_2\text{H} \cdot \text{OH}^-$ .

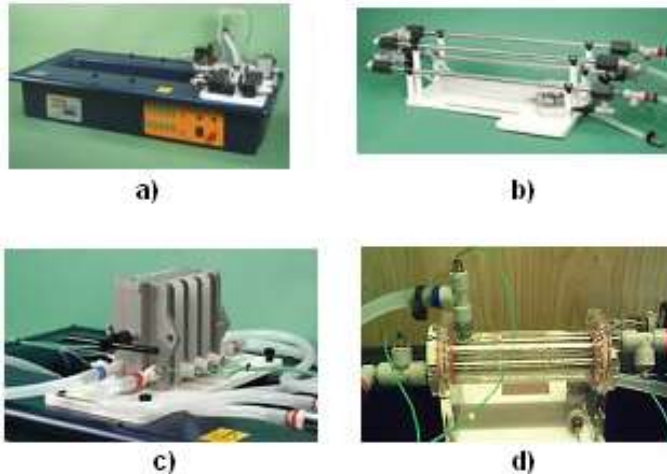
La betaína tiene aplicaciones en la formulación de algunos preparados tensoactivos, en formulaciones de cosméticos o en complementos de alimentación. En la actualidad se está investigando su aplicación en sistemas de transferencia de energía térmica.

### 4.3. SELECCIÓN DE EQUIPO PARA TRANSFERENCIA DE CALOR

Antes de iniciar la fase experimental se verifico los equipos disponibles para realizar las pruebas de transferencia de calor, el laboratorio de máquinas hidráulicas de la universidad del norte, cuenta con tres equipos para dicho propósito (ver), estos son:

1. Intercambiador de placas paralelas
2. Intercambiador de tubos concéntrico.
3. Intercambiador de tubo y coraza.

Figura 12 a) banco para pruebas de intercambiadores de calor, intercambiado de calor de b) tubos concéntricos c) placas paralelas d) tubo y coraza

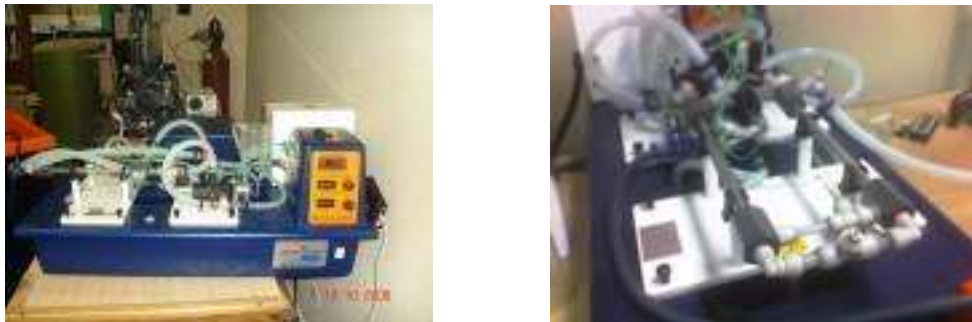


Cada uno de estos intercambiadores presentan ciertas ventajas al compararlos unos contra otros, pero, se busca establecer algunas propiedades de los nanofluidos a partir de las propiedades de un fluido conocido, en este caso del agua. El intercambiador de calor de tubos concéntricos es el más indicado para este fin, ya que debido a su configuración se maximiza la transferencia de calor entre los dos fluido en todas las dirección, adicionalmente si el sistema se encuentra aislado térmicamente, se puede garantizar que el calor que pierde uno es igual al calor que gana el otro fluido. Por otra parte este tipo de

intercambiadores no involucra el factor de forma, cosa que si lo hace el intercambiador de placa, para lo cual, el fabricante lo estima es 95%, esto indica que existen perdidas asociadas durante el proceso, teniendo una incidencia directa sobre las propiedades que se desean estimar. En comparación con el intercambiador de calor de tubo y coraza, el de tubos concéntricos presenta una configuración más sencilla y existe riesgos de pérdidas de calor durante el recorrido de los fluidos, por tanto el intercambiador de calor a usar es el de tubos concéntricos.

El intercambiador de calor tubular es la forma más simple para intercambiar calor y consiste en dos tubos concéntricos (coaxiales), uno para el manejo del fluido frío y el otro para el manejo del fluido caliente, tal como se muestra en la Figura 13.

Figura 13 Banco de prueba para los nanofluidos



El fluido caliente se hace circular a través de un tubo de acero inoxidable de 9.5mm de diámetro externo y 0.6mm de espesor, mientras que el fluido frío se hace circular a través de un tubo de acrílico transparente de 12mm de diámetro interno y 3mm de espesor, con un área de transferencia de calor aproximada de 20.000 mm<sup>2</sup> (ver especificaciones técnicas en el Anexo 3). Adicionalmente toda la tubería externa se aisló térmicamente con lana de vidrio para evitar perdidas de calor al ambiente, tal como se muestra en la Figura 14.

Durante las pruebas se hizo circular el nanofluido por el canal interno (fluido caliente), mientras que por el canal externo se hizo circular agua fría. Gracias a las termocuplas instaladas sobre el banco fue posible establecer las variaciones de temperatura tanto para el fluido frío como para el fluido caliente.

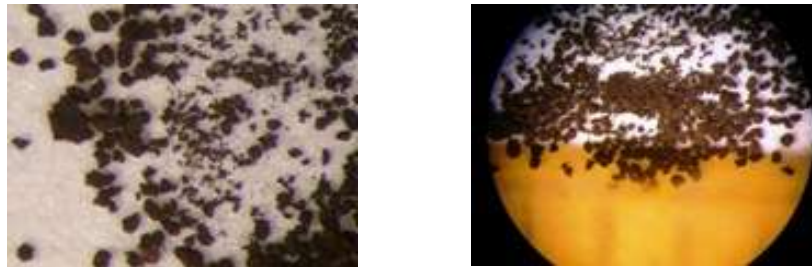
Figura 14 Aislamiento térmico con lana de vidrio del intercambiador de calor de tubos concéntricos



#### **4.4. MICROSCOPIA PARA LAS NANOPARTICULAS**

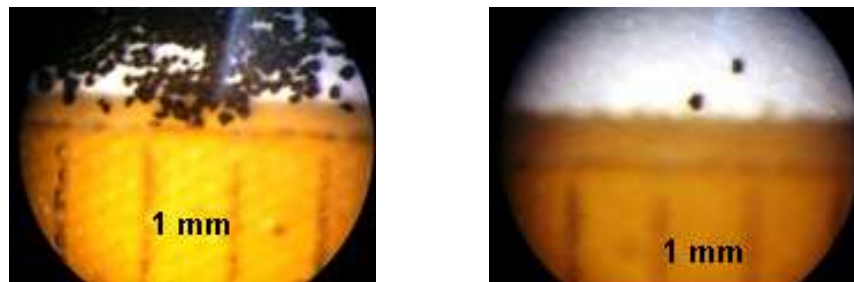
Inicialmente se realizaron observaciones en un estéreo microscopio con capacidad de hasta 100 aumentos, aquí solo se pueden observar aglomerados de partículas tal como se muestra en la Figura 15.

Figura 15 A la izquierda aparece muestra de nanopartículas vistas en tamaño normal. A la derecha aparecen vistas en un estéreo microscopio a 100 aumentos.



Con ayuda del microscopio se intentó realizar algunas mediciones de los aglomerados, y se pudo observar aunque con poco detalle las aglomeraciones de partículas, tal como se muestra en la Figura 16.

Figura 16 Muestra a 100 aumentos de las particular junto con un elemento de medición.



Después de observadas las partículas en este microscopio se decidió emplear el microscopio electrónico de barrido para tener una mejor y mayor resolución del material en estudio, previo a esto fue necesario diseñar y fabricar una probeta especial (porta muestra) para el ensayo, además fue necesario emplear una pintura de plata para facilitar la observación en el microscopio electrónico, tal como se muestra en la Figura 17.

Figura 17 Preparación de probeta para observación en el microscopio electrónico de barrido.



Figura 18 A la derecha, microscopio electrónico de barrido. A la izquierda, estéreo microscopio.



En una primera aproximación se observaron las partículas con tamaño de  $200\ \mu\text{m}$ , tal como se muestra en Figura 19. Con más aumentos se pudo observar un grupo de partículas con tamaño de  $50\ \mu\text{m}$ .

Figura 19 Primera muestra tomada en el microscopio con tamaños de  $200\ \mu\text{m}$ . A la derecha se observa un conglomerado de partículas con tamaño de  $50\ \mu\text{m}$

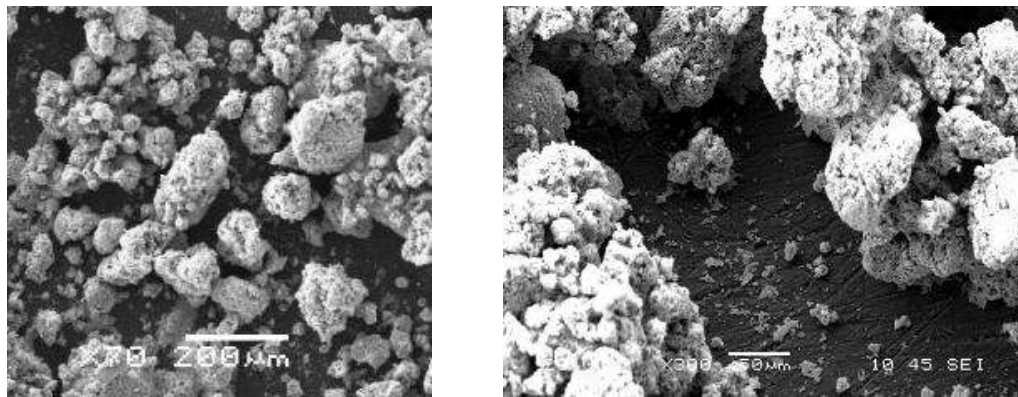
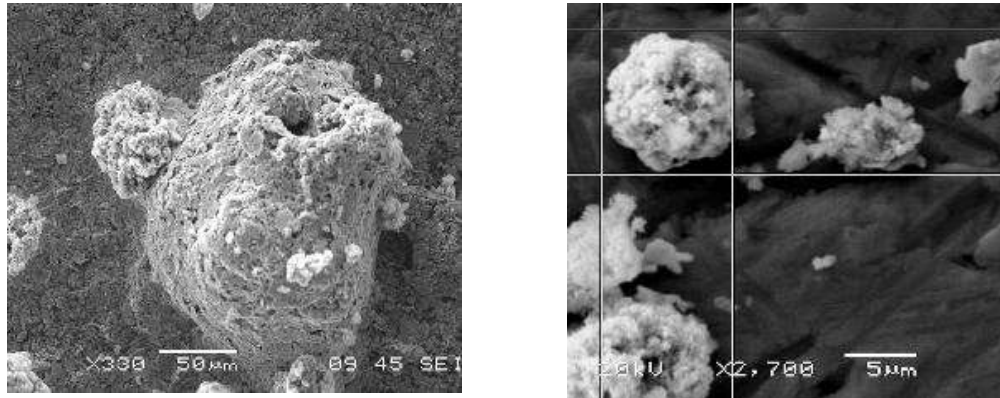


Figura 20 Tomas a 50 y 5 μm. Al lado izquierdo se realizó medición del aglomerado de partículas.



#### 4.5. CANTIDAD REQUERIDA DE NANOPARTICULAS

Con base en la ficha técnica suministrada por el fabricante de las nanopartículas (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), se obtienen datos importantes, tales como la densidad que para el oxido de aluminio ( $AL_2O_3$ ) es  $4gr/cm^3$ , a continuación se describen los cálculos realizados para obtener los componentes necesarios para la preparación del nanofluido.

Tabla 7 Propiedades de las nanopartículas empleadas para la preparación del primer nanofluido

Material	Composición	Densidad	Tamaño de partícula
Alúmina	$AL_2O_3$	$4gr/cm^3$	50 nm

En una primera aproximación se empleó una fracción volumétrica de 0.5% para establecer la cantidad máxima de nanofluido que es posible preparar basado en la cantidad de nanopartículas que se tiene disponible.

$$0.5\% = \frac{V_{Nanopartículas}}{V_{Solución}}$$

Por tanto, el volumen ocupado por las nanopartículas será:

$$V_{Nanopartículas} = 0.005 \times V_{Solución}$$

$$V_{Nanopartículas} = 0.005 \times 1000cm^3$$

$$V_{Nanopartículas} = 5cm^3$$

Con base en este resultado y haciendo uso de la información registrada en la Tabla 7 se determina la masa que tendrá este volumen.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho V = \left( 4 \frac{gr}{cm^3} \right) \cdot 5 cm^3$$

$$m = 20 gr$$

#### 4.6. VOLUMEN REQUERIDO DE SURFACTANTE

Para la preparación del surfactante se uso betaína diluida al 10% vol/vol y se determino usarla en una concentración de 3% vol/vol del total de la solución, esto se realizó con base en otras investigaciones que se habían realizado en esta área [3]. Por tanto:

$$\% Vol = \frac{V_{Soluta}}{V_{Solución}} \times 100\%$$

$$V_{Soluta} = \frac{\left( 3\% \frac{vol}{vol} \right) \times V_{Solución}}{100\%}$$

$$V_{Soluta} = \frac{\left( 3\% \frac{vol}{vol} \right) \times 1000 cm^3}{100\%}$$

$$V_{Surfactante} = 30 cm^3$$

#### 4.7. VOLUMEN REQUERIDO DE AGUA

Para completar el volumen de la solución (para este caso 1000 cm<sup>3</sup>), se establece el volumen de agua restando el volumen de la nanopartículas y del surfactante al total de la solución, es decir:

$$V_{solución} = V_{Nanopartículas} + V_{Surfactante} + V_{H_2O}$$

$$V_{H_2O} = V_{solución} - V_{Nanopartículas} - V_{Surfactante}$$

$$V_{H_2O} = 1000\text{cm}^3 - 5\text{cm}^3 - 30\text{cm}^3$$

$$V_{H_2O} = 965\text{cm}^3$$

En conclusión para preparar el nanofluido se requieren los componentes y las cantidades que se referencian en la Tabla 8

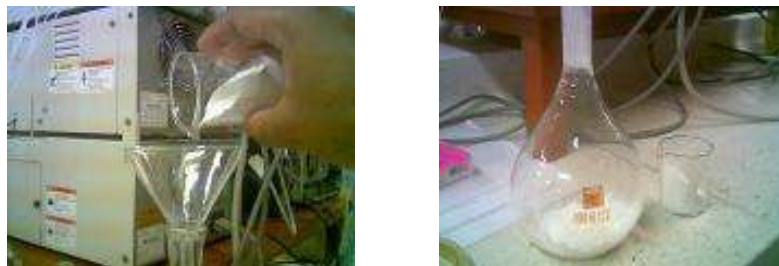
Tabla 8 Componentes para la preparación del primer nanofluido

SUSTANCIA	CANTIDAD
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 gr (5cm <sup>3</sup> )
Betaína al 10% vol/vol	30 cm <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O destilada	965 cm <sup>3</sup>

#### 4.8. PREPARACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS

Basado en cálculos preliminares se determinó, que para preparar un 1 Lt de solución con una fracción de volumen  $\phi=0.5\%$  se requieren 20gr de nanopartículas. Luego de realizar la medición en una báscula electrónica se deposita este contenido en un matraz con capacidad de 1000 ml, tal como se muestra en la Figura 21.

Figura 21 Adición de las nanopartículas en el recipiente de preparación del nanofluido



#### 4.9. PREPARACIÓN DEL SURFACTANTE

Para la preparación del nanofluido se debe adicionar un surfactante, para el caso del óxido de aluminio se usará, betaína. Tal como se mencionó anteriormente la betaína es un sólido incoloro, derivado del ácido N,N-dimetilaminoacético con fórmula  $(\text{H}_3\text{C})_3\text{N}^{(+)}-\text{CH}_2-\text{CO}_2^-$ .

Figura 22 Preparación del surfactante. a) en la gráfica de la izquierda se muestra el instante en el cual se diluye la betaína hasta una concentración del 10% vol/vol. b) en la gráfica de la derecha se muestra el instante en el cual se adiciona el surfactante a la mezcla constituyente del nanofluido.



#### 4.10. MEZCLA CON AGUA DESTILADA

El agua destilada es aquella a la que se le ha eliminado prácticamente la totalidad de impurezas e iones mediante destilación, para esto el agua llega a su punto de ebullición y se recogen sus vapores para luego condensarlos. Para obtener el agua destilada, inicialmente fue necesario realizar mantenimiento al destilador, este equipo cuenta con un dispositivo adicional llamado desionizador tal como se muestra en la Figura 23

Figura 23 Montaje del destilador de agua. a) del lado izquierdo, aparece el evaporador y condensador del agua, la cual está conectada con un tanque de almacenamiento. b) del lado derecho aparece todo el conjunto de destilación y el desionizador el cual se utiliza para retirar los cationes que contenga el agua tales como sodio, calcio, hierro.



Con el surfactante y las nanopartículas mezcladas se debe completar el nivel de 1000 ml para terminar la preparación del nanofluido, esto se logra adicionando agua destilada hasta completar el nivel, tal como se muestra en la Figura 24.

Figura 24 Adición de agua destilada para completar el nivel de la solución a preparar.



#### 4.11. MUESTRA DEL PRIMER NANOFLUIDO

En la Figura 25 se muestra el primer nanofluido preparado en la Universidad del Norte, algunas pruebas preliminares han mostrado ciertas características que resulta muy atractivas tales como pH 5, en comparación con el agua destilada pH 7, el nanofluido tiene una conductividad eléctrica de 126 mV frente a 0.68 mV del agua.

Figura 25 Primer Nanofluido preparado en la Universidad del Norte, del lado derecho aparecen los componentes utilizado para esta solución.



## 5. RESULTADO Y ANALISIS DE RESULTADOS

El proceso de experimentación se llevó a cabo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos tal como se describió anteriormente, para el cual las temperaturas de fluido caliente  $T_C$  y la temperatura del fluido frío  $T_F$ , varían a lo largo del intercambiador, tal como se muestra en la Figura 26

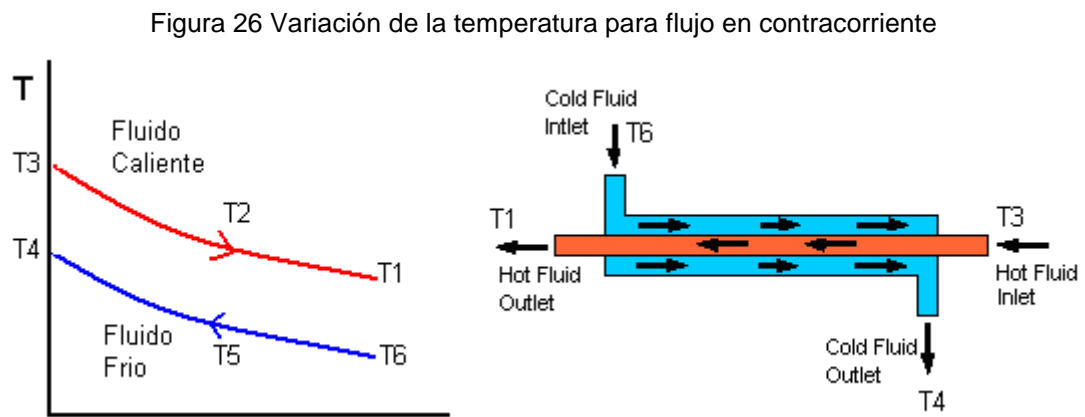


Tabla 9 Factores evaluados en el análisis de varianza.

Factor	Descripción	Lim. Inferior (-1)	Lim. Intermedio (0)	Lim. Superior (+1)
A	Tipo fluido	Agua	Nanofluido 50nm	Nanofluido 100nm
B	Flujo caliente	1.5 lt/min		2.5 lt/min
C	Flujo frío	1.0 lt/min		1.5 lt/min
D	Temp flujo caliente	50°C		70°C

Para el estudio del fenómeno de transferencia de calor usando nanofluidos de alúmina se formuló un experimento factorial de efectos fijos, completamente aleatorios. En la Tabla 9 se muestran los factores empleados, así como los niveles de cada uno de estos factores.

## 5.1. ANALISIS DE VARIANZA PARA LOS NANOFUIDOS

Para el caso del intercambiador de calor, dado que no se conocen las propiedades termodinámicas del nanofluido, se considerara como variable de respuesta la temperatura media logarítmica, ya que esta involucra todos los factores considerados en el diseño de factorial, todas las lecturas de temperaturas se registran en el Anexo 4. Esta temperatura esta definida por:

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_3 - T_4 - T_1 - T_6}{\ln \frac{T_3 - T_4}{T_1 - T_6}} \quad (1)$$

Tabla 10 Descripción de la variables empleadas para el cálculo de la temperatura media logarítmica

Variable	Descripción
T1	Temperatura de salida del fluido caliente
T2	Temperatura intermedia del fluido caliente
T3	Temperatura de entrada del fluido caliente
T4	Temperatura de salida del fluido frío
T5	Temperatura intermedia del fluido frío
T6	Temperatura de entrada del fluido frío

Tabla 11 Resultados obtenidos para la temperatura media logarítmica

	Solución base							
	HW 1,5lt/min				HW 2,5 lt/min			
	CW 1lt/min		CW 1,5lt/min		CW 1lt/min		CW 1,5lt/min	
IHW 50°C	14,6	12,9	19,4	19,8	18,1	13,5	19,2	19,2
IHW 70°C	31,2	32,5	35,6	35,1	32,4	32,2	35,2	35,2

	Nanofluido 50nm							
	HW 1,5lt/min				HW 2,5 lt/min			
	CW 1lt/min		CW 1,5lt/min		CW 1lt/min		CW 1,5lt/min	
IHW 50°C	18,2	17,5	19,6	19,5	18,3	18,0	19,6	19,1
IHW 70°C	33,8	34,2	36,1	32,7	33,3	34,8	35,9	35,4

	Nanofluido 100nm							
	HW 1,5lt/min				HW 2,5 lt/min			
	CW 1lt/min		CW 1,5lt/min		CW 1lt/min		CW 1,5lt/min	
IHW 50°C	15,1	14,2	16,0	16,4	15,2	14,3	16,3	15,8
IHW 70°C	29,7	29,1	31,9	27,7	29,6	28,8	31,8	27,3

Con base en los datos registrados en la Tabla 11, se procede a realizar el análisis del factorial, con el fin de identificar que factores y/o interacciones tiene incidencia sobre la temperatura media logarítmica (variable de respuesta), la experimentación se llevó a cabo con dos réplicas y todos los factores se encuentran codificados por nivel alto (+1), nivel intermedio (0) y nivel bajo (-1). A continuación se procede al estudio del análisis de varianza para la temperatura media logarítmica, para este fin se empleo la herramienta estadística Statgraphics plus 5.0<sup>®</sup>, los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 12.

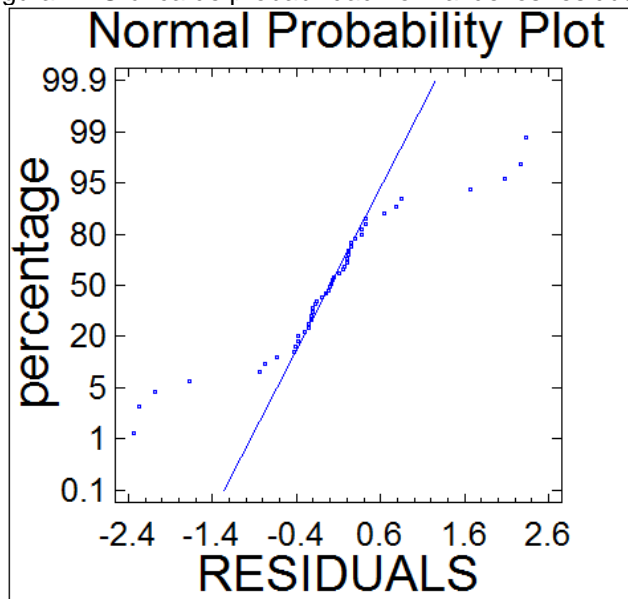
Tabla 12 Análisis de varianza para la temperatura media logarítmica

Analysis of Variance for DTML - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value
<b>MAIN EFFECTS</b>					
A:Tipo de fluido	147,219	2	73,6096	43,01	0,0000
B:Flujo caliente	0,592519	1	0,592519	0,35	0,5618
C:Flujo frío	49,1569	1	49,1569	28,72	0,0000
D:Temp fluido cali	2875,39	1	2875,39	1680,09	0,0000
<b>INTERACTIONS</b>					
AB	0,77879	2	0,389395	0,23	0,7982
AC	22,108	2	11,054	6,46	0,0057
AD	12,9162	2	6,45809	3,77	0,0376
BC	0,713213	1	0,713213	0,42	0,5247
BD	0,0163172	1	0,0163172	0,01	0,9230
CD	2,86505	1	2,86505	1,67	0,2080
ABC	1,95397	2	0,976985	0,57	0,5725
ABD	0,79257	2	0,396285	0,23	0,7951
ACD	0,458577	2	0,229289	0,13	0,8753
BCD	1,11966	1	1,11966	0,65	0,4266
ABCD	0,38318	2	0,19159	0,11	0,8946
<b>RESIDUAL</b>	<b>41,0749</b>	<b>24</b>	<b>1,71145</b>		
<b>TOTAL (CORRECTED)</b>	<b>3157,54</b>	<b>47</b>			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

En estos resultados aparecen sombreados aquellos factores e interacciones que tiene efectos significantes sobre la variable de respuesta, esto se verifica porque tiene un P-value menor que 0.05. Se observa que tres de los cuatro factores

evaluados aparecen como significativos, así como la interacción entre el tipo de fluido y el flujo de agua fría y la interacción entre el tipo de fluido y la temperatura de entrada del fluido caliente. Antes de continuar con el análisis es necesario evaluar los supuestos de normalidad de los errores, una práctica común consiste en construir una gráfica de probabilidad normal de los residuales. Si la distribución fundamental de los errores es normal, la gráfica tendrá la apariencia de una línea recta. Para visualizar la línea recta, deberá prestarse más atención a los valores centrales de la gráfica que a los valores extremos<sup>1</sup>.

Figura 27 Gráfica de probabilidad normal de los residuales



En la gráfica de probabilidad normal se observan que hay unos residuales que presentan mayor valor que un gran porcentaje de la población de datos, con el fin de evitar distorsiones en el análisis de varianza, se verificará si dichos resultados corresponde o no a un valor atípico. Esto se logra calculando los residuales estandarizados y teniendo en cuenta que todos los datos están contenidos en  $\pm 3$  si los residuales son  $N(0, \sigma^2)$ .

$$d_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{MS_E}} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Montgomery, Douglas. Diseño y análisis de experimentos, pág. 77, 2ª edición.

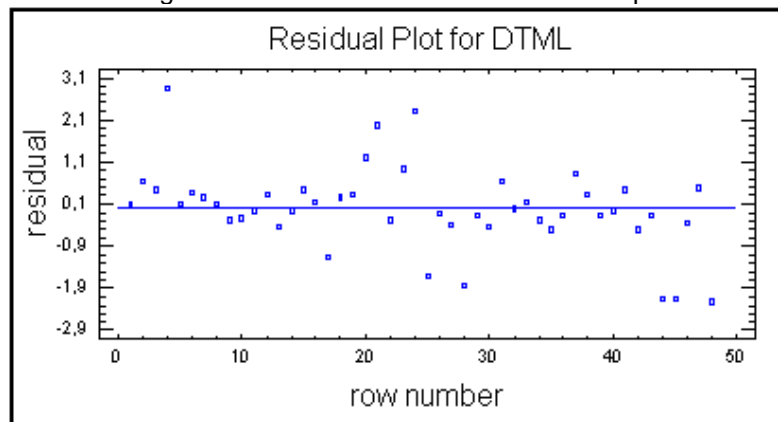
Donde  $d_{ij}$  es el residual estandarizado,  $e_{ij}$  es el residual en estudio y  $MS_E$  es el cuadrado medio del error.

Tabla 13 Calculo de los residuales estandarizados para detectar posible puntos atípicos

Residual	Res. Estandar
-2.3285	-1.779
-2.2725	-1.737
-2.076	-1.586
2.076	1.586
2.2725	1.737
2.3285	1.779

Con base en el cálculo realizado, se determina que no hay puntos atípicos en los datos obtenidos experimentalmente. De esta manera se establece que se cumple con el supuesto de normalidad, de igual manera es necesario comprobar el supuesto de independencia de los datos. Esto se evidencia realizando la gráfica de los residuales en el orden temporal de recolección de los datos. Con base en la Figura 28 se determina que no existe correlación entre los residuales ya que estos no siguen ningún patrón. De esta manera se comprueba el supuesto de independencia de los errores.

Figura 28 Gráfica de residuales en el tiempo

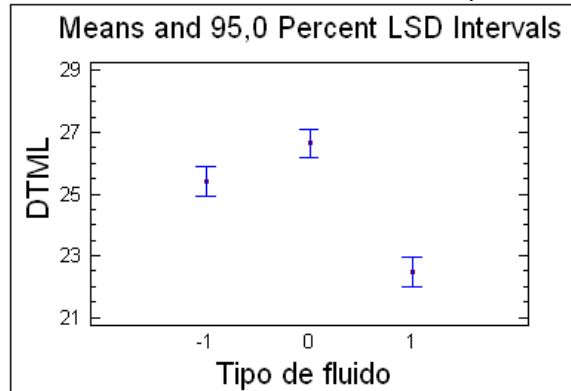


### Análisis e interpretación de los efectos

Las graficas de los efectos permiten identificar la influencia que tienen los factores o efectos principales sobre los cambios en la variable de respuesta, tal como se

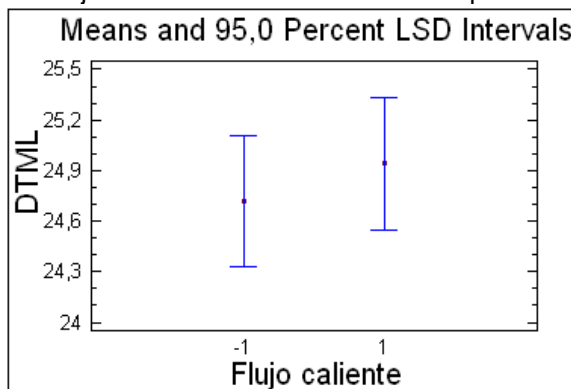
puede observar en la Figura 29, el hecho de usar nanofluido con nanopartículas de oxido de aluminio de 50nm produce mayor diferencia de temperatura media logarítmica frente a los otros dos fluidos ensayados, indicando que es mejor el proceso de transferencia de calor por convección para este fluido.

Figura 29 Efecto de la fracción volumétrica sobre la temperatura media logarítmica



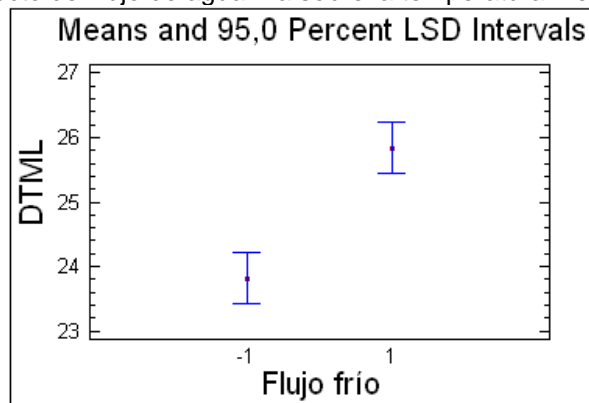
También se observa que el fluido base (agua) tiene un mejor comportamiento que el nanofluido con nanopartículas de 100nm, ya que alcanzar una diferencia de temperatura mas alta que el obtenido con este último. Por otra parte, el delta de temperatura media logarítmica no muestra una variación significativa debido al cambio de nivel del caudal del flujo caliente (ver Figura 30).

Figura 30 Efecto del flujo del fluido caliente sobre la temperatura media logarítmica



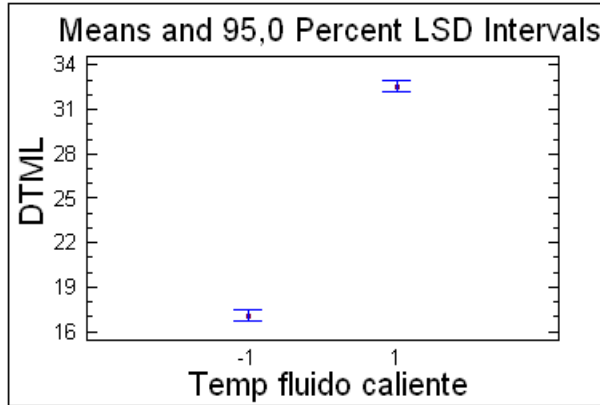
Tal como se indica en el ANOVA, el flujo caliente no tiene efecto significativo sobre la variable de respuesta a pesar que en el nivel alto la temperatura tiene un incremento aproximado de 0.4°C. En la Figura 31 se muestra la grafica del efecto del flujo de agua fría sobre la temperatura media logarítmica, en dicha gráfica se observa claramente que en el nivel alto (+1) se obtiene un delta de temperatura mayor, esto indica que el proceso de transferencia de calor del fluido caliente hacia el fluido frío será mayor en la medida que el flujo de agua fría pase del nivel bajo al alto.

Figura 31 Efecto del flujo de agua fría sobre la temperatura media logarítmica



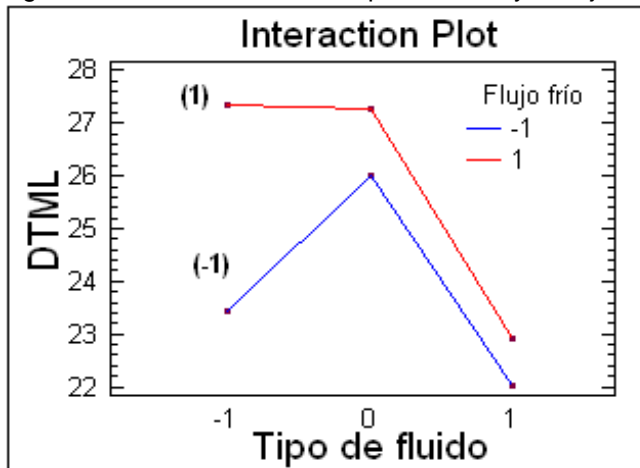
Para finalizar el análisis de los efectos principales, se observa en la Figura 32 el efecto de la temperatura de entrada del fluido caliente al intercambiador de calor, claramente se observa que al pasar del estado bajo al estado alto este factor produce un cambio ascendente en la variable de respuesta. El cambio en el delta de temperatura media logarítmica es mucho más marcado en este factor que en los anteriores, lo cual cumple con la teoría de transferencia de calor, ya que al entrar el fluido caliente a mayor temperatura tiene mayor posibilidad de entregar mas energía al fluido frío. Este factor también se resalto como importante en el análisis de varianza y en la gráfica de probabilidad normal de los efectos.

Figura 32 Efecto de la temperatura de entrada del fluido caliente sobre la temperatura



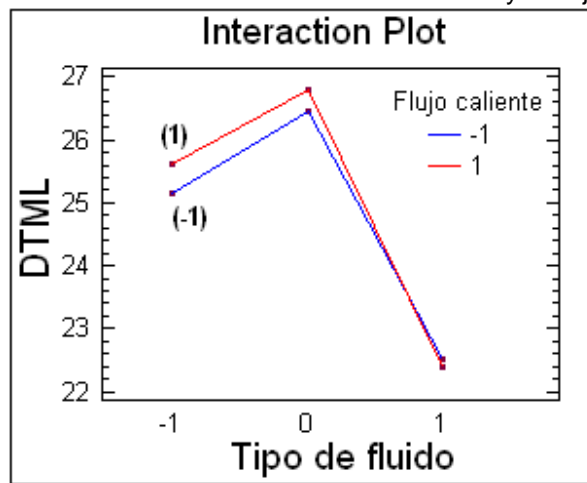
Cuando uno de los factores no produce el mismo efecto en la respuesta con niveles diferentes de otro factor se dice que hay una interacción entre ellos, por tanto luego de analizar los efectos, es necesario analizar las interacciones. Dado que solo dos de ellas resultaron significativas en el ANOVA, se le dará mayor importancia en el análisis de resultados, aunque también se verificarán las interacciones que involucre el tipo de fluido debido a que este factor está directamente relacionado con el nanofluido en estudio y permite compararlo contra el fluido base.

Figura 33 Interacción entre el tipo de fluido y el flujo frío



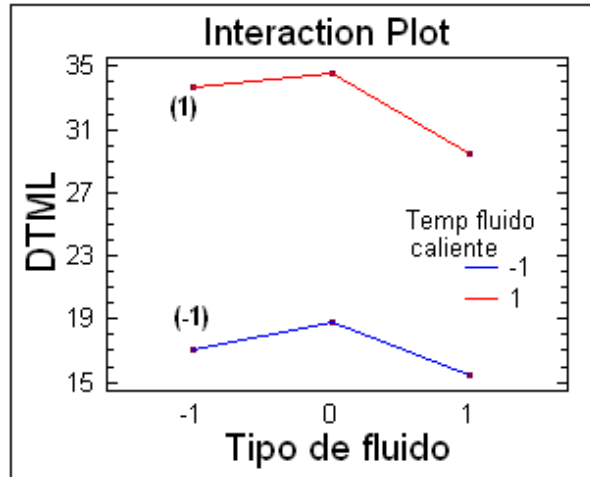
En la Figura 33 se muestra el efecto de la interacción entre el tipo de fluido y el flujo frío sobre la temperatura media logarítmica, es posible observar que cuando el caudal de fluido frío se encuentra en el nivel bajo, el nanofluido de 50nm puede transferir más calor que el fluido base y que el nanofluido de 100nm, mientras que en el nivel alto del flujo frío, se evidencia a que el nanofluido con 100nm es quien puede transferir menos calor mostrando una diferencia significativa frente al fluido base y el nanofluido de 50nm.

Figura 34 Interacción entre la fracción volumétrica y el flujo caliente



Por otra parte la interacción entre el tipo de fluido y el flujo caliente (ver Figura 34) muestra claramente que se transfiere mas calor con el nanofluido de 50nm que con el fluido base y el nanofluido de 100nm, esto ocurre tanto en el nivel alto como en el nivel bajo del caudal del fluido caliente. Este análisis revela que el nanofluido con nanopartículas de alúmina de 50nm tiene mejores características para el transporte del calor por convección.

Figura 35 Interacción entre el tipo de fluido y la temperatura de entrada del fluido caliente



Para finalizar el análisis de las interacciones se observa en la Figura 35 la interacción entre el tipo de fluido y la temperatura de entrada del fluido caliente al intercambiador de calor. Una vez más, es posible observar que el nanofluido de 50nm presenta mayor diferencia de temperatura que el fluido base. En general el tamaño de partículas (100nm) usadas para la preparación del nanofluido no presentas cambios atractivos en el transporte de calor por convección.

## 5.2 MODELO EXPERIMENTAL PARA EL NÚMERO DE NUSSELT

Con la base en la experimentación realizada se calculara al coeficiente convectivo de transferencia de calor, para ello inicialmente se realizara un balance de energía, por tanto:

$$\dot{Q}_{Fluido\ Caliente} - \dot{Q}_{Fluido\ Frio} - \dot{W}_{Fluido\ Frio} = \frac{dE}{dt}$$

$$\dot{Q}_{Fluido\ Frio} = \dot{Q}_{Fluido\ Caliente}$$

Este balance es valido debido a que no se realiza trabajo sobre el sistema y no hay pérdidas de calor al ambiente ya que el sistema esta completamente aislado.

Para todas las pruebas realizadas se usó agua como fluido frío, desde el punto de vista termodinámico el calor que gana el fluido frío se puede obtener a partir de:

$$\dot{Q}_{Fluido Frio} = \dot{m}_{H2O} C_{P H2O} \Delta T_{Fluido Frio}$$

El calor que cede el fluido caliente por convección es posible obtenerlo por medio de la ley de enfriamiento de Newton. El efecto de la conducción se desprecia ya que el fluido caliente circula a través de un tubo de espesor delgado.

$$\dot{Q}_{Fluido Caliente} = \bar{h}_{Fluido caliente} A \Delta T_{Fluido caliente}$$

Considerando el balance de energía se obtiene:

$$\bar{h}_{Fluido caliente} A \Delta T_{Fluido caliente} = \dot{m}_{H2O} C_{P H2O} \Delta T_{Fluido Frio}$$

$$\bar{h}_{Fluido caliente} = \frac{\dot{m}_{H2O} C_{P H2O} \Delta T_{Fluido Frio}}{A \Delta T_{Fluido caliente}}$$

El flujo másico del agua fría se obtiene a partir de  $\dot{m} = \rho \nabla$ , donde  $\rho$  es la densidad del fluido frío y  $\nabla$  representa el caudal. Por tanto:

$$\bar{h}_{Fluido caliente} = \frac{\rho \nabla C_{P H2O} \Delta T_{Fluido Frio}}{A \Delta T_{Fluido caliente}}$$

La densidad  $\rho$  y el calor específico  $C_p$  son función de la temperatura a la cual se encuentre el fluido frío, para estimarlos se calculo la temperatura promedio a partir de la temperatura de entrada y salida del intercambiador de calor, los valores obtenidos para el coeficiente convectivo  $h$ , se listan en el Anexo 2. El número de Nusselt está definido por:

$$Nu = \frac{\bar{h} L}{K}$$

En 2006 Wong [20] propuso una ecuación experimental para la conductividad térmica de un nanofluido de alúmina, la cual esta dada por

$$K = K_o \left[ \frac{K_p + n + 1 \overline{K_o} - n - 1 \overline{K_o} - K_p \varphi}{K_p + n - 1 \overline{K_o} + \alpha \overline{K_o} - K_p} \right]$$

K – Conductividad térmica del nanofluido

K<sub>o</sub> – Conductividad térmica del fluido base

K<sub>p</sub> – Conductividad térmica de las nanopartículas (Alumina)

φ – Fracción de volumen

n – factor experimental de forma = 3/ψ

ψ se define como el cociente entre el área superficial de una esfera (con igual volumen que la partícula) y el área superficial de la partícula. Para nanopartículas esféricas n=3, los valores obtenidos para la conductividad térmica de los dos nanofluidos (50nm y 100nm) y la del fluido base se listan el Anexo 1.

Tabla 14 Resultados para el número de Nusselt

	Solución base							
	HW 1,5lt/min				HW 2,5 lt/min			
	CW 1lt/min		CW 1,5lt/min		CW 1lt/min		CW 1,5lt/min	
IHW 50°C	85,2	67,3	66,9	64,2	131,4	85,6	108,1	105,2
IHW 70°C	61,7	68,1	57,0	61,8	95,3	108,4	89,6	99,5

	Nanofluido 50nm							
	HW 1,5lt/min				HW 2,5 lt/min			
	CW 1lt/min		CW 1,5lt/min		CW 1lt/min		CW 1,5lt/min	
IHW 50°C	67,8	76,3	56,4	61,1	113,7	119,3	95,8	93,4
IHW 70°C	56,2	58,6	59,7	65,2	94,9	184,5	123,5	109,3

	Nanofluido 100nm							
	HW 1,5lt/min				HW 2,5 lt/min			
	CW 1lt/min		CW 1,5lt/min		CW 1lt/min		CW 1,5lt/min	
IHW 50°C	74,2	69,2	16,0	63,1	110,8	159,2	107,1	118,0
IHW 70°C	68,3	78,3	56,3	78,3	107,4	119,4	92,3	118,4

De transferencia de calor se sabe que el número de Nusselt es función del número de Reynolds y del número de Prandtl, adicionalmente se incluye el número de Peclet, esto es.

$$Nu = f(Re, Pr, Pe)$$

A continuación se plantea un aproximación para el número de Nusselt, tal como

$$Nu = c Re^a Pr^b (1 + Pe^k)$$

Antes de realizar la regresión, es necesario linealizar esta ecuación, por tanto

$$\ln Nu = \ln c + a \ln Re + b \ln Pr + k \ln(1 + Pe)$$

En 2005 Nara [3] describe la viscosidad cinemática para un nanofluido usando la siguiente ecuación:

$$v = \frac{1}{Re} \sqrt{\frac{18 K_b T}{\pi \rho d}}$$

Donde:

v – Viscosidad cinemática del nanofluido

Re – Número de Reynolds para el movimiento Browniano de las nanopartículas = 0.029 para nanopartículas de alúmina en agua

kb – constante de Boltzmann =  $1.3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg s}^{-2}\text{K}^{-1}$

T – Temperatura

$\rho$  – Densidad de las nanopartículas

d – Diámetro de las nanopartículas de alúmina

El número de Prandtl se establece como

$$Pr = \frac{v}{K / \rho C_p} = \frac{v}{\alpha_{nf}}$$

En 2002 Quian [21] define la difusividad térmica de un nanofluido como:

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{\rho C_p}_{nf} = \frac{K_{nf}}{\rho C_p}_f + \phi C_p_d$$

Donde  $(\rho C_p)_f$  es la capacidad calorífica del fluido base,  $(\rho C_p)_d$  es la capacidad calorífica de las nanopartículas y  $\phi$  es la fracción de volumen. El número de Peclet esta definido como:

$$Pe = \frac{U d_{np}}{\alpha}$$

Pe: número de Peclet

U: velocidad del fluido

$d_n$  : diámetro de las nanopartículas

$\alpha$ : difusividad térmica del nanofluido

En la Tabla 16 se registran los datos empleados para obtener el modelo de regresión, para este fin se empleo el modulo “Análisis de datos” de la herramienta informática Excel, la cual permite estimar el valor de las constantes c, a, b y k.

Tabla 15 Estimación de parámetros para el modelo de regresión

<i>Coefficientes</i>	
Intercepción	-5,4703
Variable X 1	0,9362
Variable X 2	1,0924
Variable X 3	0,5525

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,8853
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,78375
R <sup>2</sup> ajustado	0,769
Error típico	0,144089
Observaciones	48

Se observa que el R<sup>2</sup> ajustado es 76.9%

**Tabla 16 Datos empleados para la regresión**

<b>Ln(Nus)</b>	<b>Ln(Re)</b>	<b>Ln(Pr)</b>	<b>Ln(1+Pe)</b>
4,878	9,301	1,309	0,000
4,445	8,834	1,324	0,000
4,450	9,322	1,308	0,000
4,209	8,794	1,311	0,000
4,204	8,773	1,335	0,000
4,683	9,290	1,326	0,000
4,162	8,765	1,328	0,000
4,656	9,288	1,329	0,000
4,122	9,041	1,032	0,000
4,557	9,564	1,013	0,000
4,221	9,048	1,017	0,000
4,686	9,572	1,008	0,000
4,496	9,549	1,030	0,000
4,042	9,045	1,035	0,000
4,600	9,565	1,021	0,000
4,124	9,024	1,037	0,000
4,562	9,709	0,909	0,220
4,537	9,709	0,909	0,220
4,033	9,198	0,909	0,138
4,113	9,198	0,909	0,138
4,733	9,707	0,909	0,220
4,782	9,707	0,909	0,220
4,216	9,197	0,909	0,138
4,334	9,198	0,909	0,138
4,553	9,681	0,903	0,213
4,028	9,170	0,903	0,133
5,218	9,678	0,902	0,213
4,070	9,170	0,903	0,133
4,816	9,679	0,903	0,213
4,089	9,171	0,903	0,134
4,695	9,681	0,903	0,213
4,177	9,170	0,903	0,133
4,673	10,054	0,562	0,400
4,216	9,544	0,563	0,259
4,771	10,055	0,563	0,400
4,145	9,544	0,563	0,259
4,708	10,053	0,562	0,400
4,307	9,543	0,562	0,259
5,070	10,054	0,562	0,400
4,237	9,544	0,563	0,259
4,677	10,026	0,556	0,388
4,224	9,516	0,556	0,251
4,783	10,025	0,556	0,388
4,360	9,515	0,556	0,251
4,031	9,518	0,556	0,251
4,525	10,027	0,556	0,389
4,774	10,027	0,556	0,389
4,361	9,516	0,556	0,251

El valor de la constante c se obtiene de la siguiente manera:

$$\ln C = -5.4703$$

$$C = e^{-5.4703}$$

Tabla 17 Valores de las constantes del modelo de regresión

	<i>Coeficientes</i>
c	0,0042099
a	0,9362
b	1,0924
k	0,5525

Por tanto el modelo de regresión estará dado por:

$$\overline{Nu} = 0.0042099 Re^{0.9362} Pr^{1.0924} \left( 1 + Pe^{-0.5525} \right)$$

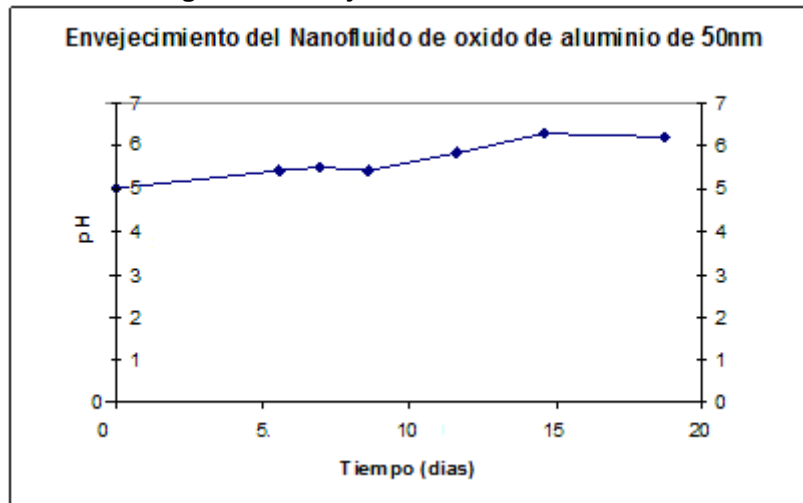
Valido para:

$6400 \leq Re \leq 23000$  y nanopartículas esféricas de oxido de aluminio de 50nm y 100nm. El error promedio obtenido con el modelo de regresión es del 10%

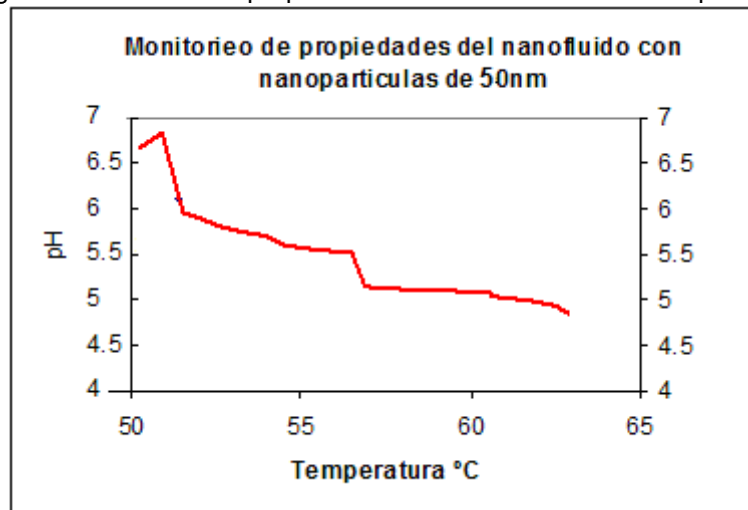
### 5.3. MONITOREO DE PROPIEDADES

Posterior a la preparación del nanofluido se inició un monitoreo diario del pH de la solución preparada, los datos obtenidos se muestran en la Figura 36. Claramente se aprecia que con el pasar del tiempo el pH tiende a aumentar hasta alcanzar una estabilidad en aproximadamente 7.

**Figura 36 Envejecimiento del nanofluido**

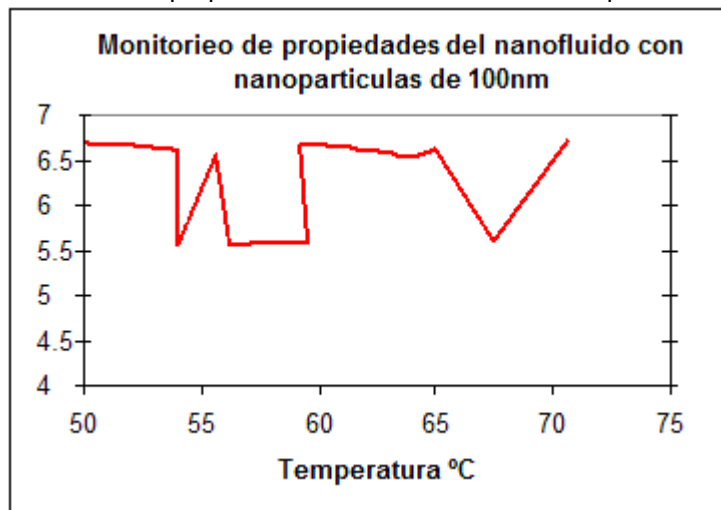


**Figura 37 Variación de propiedades del nanofluido con la temperatura**



En la Figura 37 se muestra el comportamiento que presenta el pH al variar la temperatura, para este ensayo los datos se monitorearon entre 50° y 70°C, mostrando que al aumentar la temperatura el pH de la solución tiene alejarse cada vez más del punto isoeléctrico de la alúmina, aunque esta propiedad no mostró un punto de estabilización para el rango monitoreado.

Figura 38 Variación de propiedades del nanofluido con nanopartículas de 100nm



Para el caso del nanofluido con nanopartículas de 100nm no fue posible observar un patrón claro en el comportamiento del pH, solo se observa fluctuaciones al variar la temperatura, tampoco presenta puntos de estabilización definida

## CONCLUSIONES

Las nanopartículas de alúmina de 50nm permitieron incrementar la transferencia de calor por convección en el intercambiador de calor de tubos concéntricos frente al comportamiento mostrado por el fluido base.

Las nanopartículas de óxido de aluminio de 100nm no muestran un efecto importante sobre las propiedades térmicas del fluido base. Por otra parte las partículas al ser más pequeñas tienen menos restricciones para moverse, al ser tan diminutas las únicas fuerzas que permiten que estas permanezcan aglomeradas son las moleculares (Van der Waals) y definitivamente se requiere que las partículas estén completamente dispersas en el fluido (forma homogénea) para que no existan puntos calientes localizado en el fluido.

La selección del surfactante es un punto importante en la preparación del nanofluido, para el caso del óxido de aluminio que es una sustancia anfótera se requiere que el surfactante permita alejarse del punto isoeléctrico con el fin de que las partículas se separen completamente y de esta manera no exista aglomeración de las mismas, ya que las partículas aglomeradas tienen incidencia sobre la transferencia de calor, siendo posible que se presenten puntos localizados con mayor temperatura y no una distribución uniforme que facilite el transporte del calor.

El nanofluido con nanopartículas de 50nm de alúmina presenta mayor estabilidad de propiedades como el pH y la conductividad eléctrica, las cuales al aumentar la temperatura en un rango de 50°C a 70°C muestran variaciones aproximadamente lineales de la siguiente forma: el pH decrece desde 6.9 hasta 4.8, mientras que la conductividad eléctrica tiene un comportamiento contrario aumentando de 110mV hasta 150 mV.

De igual forma se observó que a temperatura ambiente el nanofluido con el paso de tiempo va perdiendo las propiedades de conductividad eléctrica y el pH de la solución empieza a ascender buscando el punto isoeléctrico de la alúmina ( $\text{pH}=9$ ). Aproximadamente 15 días después de iniciado la observación la conductividad eléctrica ha caído a la mitad.

## DISCUSIÓN

Las nanopartículas de alúmina de 100nm no mostraron mejoras en la transferencia de calor en el intercambiador de calor, lo cual lleva a pensar que las propiedades térmicas de fluido base se podrían aumentar con el uso de partículas más pequeñas a 50nm. Por otra parte, es necesario establecer hasta que fracción volumétrica se puede llevar el nanofluido con el fin de maximizar la transferencia de calor, dado que la experimentación es de efectos fijo no es posible hacer inferencias fuera de estos niveles. Queda abierta la discusión y la posibilidad de seguir investigando para llegar a un punto donde se establezca bajo que condiciones se obtendría un proceso optimo de transferencia de calor. Por otra parte se recomienda emplear los nanofluidos en sistemas compuestos por minicanales para diferentes números de Reynolds tanto para flujo laminar como para flujo turbulento. De igual manera, se recomienda realizar experimentación para establecer curvas del calor específico a presión constante a diferentes temperaturas y fracción volumétrica

## BIBLIOGRAFIA

[1] **Atkins**, P.W. Physical Chemistry. Oxford University Press, Walton street. Oxford, Inglaterra, 1983.

[2] **IUPAC**, Compendium of Chemical Terminology, 2nd Edition (1997). <http://www.iupac.org/goldbook/B00637.pdf>

[3] **S. Nara**, P. Bhattacharya, P. Vijayan, W. Lai, W. Rosenthal and P.E. Phelan, Arizona State University Mechanical & Aerospace Engineering. R.S. Prasher, D.W. Song and J. Wang, Assembly Technology Development Intel Corporation. "Experimental Determination of the Effect of Varying the Base Fluid on Static Thermal Conductivity of Nanofluids" 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 5-11, 2005, Orlando, Florida USA

[4] **Ramos**, Antonio. "Caracterización y estudio experimental del proceso de intercambio de calor en minicanales para aplicaciones de componentes electrónicos de alto poder". Proyecto Jóvenes Investigadores-Colciencias, 2005

[5] **Ortega**, A., 2003, "Air cooling of electronic components: review of research developments in the period 1981-2001 and their impact on our understanding of cooling limits", 2003 ASME IMECE, Washington D.C. Nov. 2003, paper # IMECE 2003-42412.

[6] **Cely**, Maria de las Mercedes. "Estudio Experimental Sobre El Proceso De Transferencia De Calor En Micro Componentes Por Medio De Chorro Sumergido". Tesis de maestría en ingeniería mecánica, 2005, Universidad del Norte.

[7] **Patrick E. Phelan** and **Prajesh Bhattacharya**. Effect of Colloidal Chemistry on the Thermal Conductivity of Nanofluids. ASME 2006.

[8] **Ortega**, A., **Bower**, C., **Skandakumaran**, P., **Green**, C., **Phillips**, T., **Vaidyanathan**, R. 2003, "Heat transfer in water-cooled silicon carbide milli-

channel heat sinks for high power electronic applications”,2003 ASME IMECE, Washington D.C. Nov. 2003, paper # IMECE 2003-43865.

**[9] Kiyuel Kwak** and Chongyup Kim, “Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol”. Dept. of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Anam-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-713, Korea, (Received March 22, 2005; final revision received April 11, 2005).

**[10] Jacob Eapen**, “Modeling Transport Mechanism in Nanofluids”. Department of Nuclear Engineering, MIT

**[11] Corie, L.**, Febrero 2004 “Cooling off Computers” Technology Review. Vol. 107, Iss. 1; p. 77.

**[12] Sigma Aldrich Corporation**, laboratorio especializado en la fabricación de nanopartículas. <http://www.sigma-aldrich.com>

**[13] RAMOS, Antonio, BULA, Antonio, CELY, Maria.** [2005]. Experimental Study of Heat Transfer in Milli Channels for Cooling of Micro components Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2005), Orlando, FL, USA.

**[14] BULA, ANTONIO, RAHMAN, MUHAMMAD,** [2004] Transient thermal management of microelectronics using free liquid jet impingement. Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2004), Anaheim, CA, USA. ISBN 0-7918-4180-4

**[15] VÁSQUEZ, Ricardo y BULA, Antonio.** Uncoupling the Conjugate Heat Transfer Problem in a Horizontal Plate under the Influence of a Laminar Flow.

Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2003), Washington D.C., USA. ISBN 0791846636.

**[16] BULA**, Antonio, RAHMAN, Muhammad, [2001]. Solids Thermal Response to Jet Impingement. Proceedings of the International Association of Science and Technology for Development, International Conference, pp 370 – 375. (IASTED 01), Marbella, España, pp. 370 – 375, ISSN 1021 – 8181, ISBN 0 889863113.

**[17] BULA**, Antonio y RAHMAN, Muhammad, [2001]. Transient Response of Microelectronics during Free Liquid Jet Impingement. Proceedings of the 36<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Advanced Program (IECEC 01), Savannah, Georgia, USA, pp. ISBN 079181937X.

**[18] BULA**, Antonio. [1999]. Numerical Modeling of Conjugate Heat Transfer During Free Liquid Jet Impingement, Doctoral Dissertation, Mechanical Engineering Department, University of South Florida, Tampa, Florida, USA.

**[19] Daungthongsuk**, Weerapun and Wongwises Somchai. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. Fluid mechanics, thermal engineering and multiphase flow research laboratory. Department of mechanical engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand.

**[20] Wong**, Kau-Fui, 2006, Transport properties of alumina nanofluids. ASME international mechanical engineering congress and exposition. IMECE2006-13282.

**[21] Quian Li**, Yimin Xuan, 2002, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluido. Science in China, series E, vol. 45 No 4.

Página de Internet consultadas

<http://www.abacovital.com/fichastecnicas/tensoactivos/clasificacion.htm>

<http://www.intel.com>

[http://www.rheology.or.kr/down/17-2\(1\).pdf](http://www.rheology.or.kr/down/17-2(1).pdf)

## **GLOSARIO**

**MICELA** : Se denomina micela al conglomerado de moléculas que constituye una de las fases de los coloides

**HIDRÓFILO**: Es el comportamiento de toda molécula que tiene afinidad por el agua. En una solución o coloide, las partículas hidrófilas tienden a acercarse y mantener contacto con el agua.

**HIDROFOBO**: En el contexto fisicoquímico, el término se aplica a aquellas sustancias que son repelidas por el agua o que no se pueden mezclar con ella. Ejemplos de hidrófobos son los aceites.

**COLOIDAL**: Sistema formado por partículas finas en suspensión.

**MINICANALES**: Minicanales o canales de diámetro muy pequeño (menos de 1 milímetro) son encontrados en muchos sistemas tanto artificiales como biológicos donde son aprovechadas sus capacidades de transferir grandes cantidades de energía eficientemente; es por esto, que las aplicaciones de este tipo de tecnologías van desde los minicanales utilizados para transporte de nutrientes, sangre y distintas sustancias en el cuerpo humano hasta los dispositivos de enfriamiento de rayos láser y microprocesadores. Sistemas de micro y minicanales de una fila fueron inicialmente implementados sobre la parte posterior de discos de silicio donde se mostró que el sistema era eficiente, logrando rechazar un máximo

de  $790 \text{ W/cm}^2$  con un incremento de temperatura de  $71^\circ\text{C}$ . Este trabajo fue presentado por Tuckeman and Pease [6].

**TENSOACTIVO:** Son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases, por ejemplo: dos líquidos insolubles uno en otro.

## **ANEXOS**

## Anexo 1 Estimación de la conductividad térmica

			Fluido Caliente		T Caliente promedio	K [W/mK]
	Flujo Caliente [lt/min]	Flujo Frio [lt/min]	Temp T1 [°C]	Temp T3 [°C]		
Fluido base (Agua)	2,5	1,0	47,1	49,9	48,50	0,643
	1,6	1,0	46,4	48,8	47,60	0,642
	2,5	1,0	47,2	49,9	48,55	0,643
	1,5	1,0	46,8	49,9	48,35	0,642
	1,5	1,5	44,6	49,4	47,00	0,641
	2,5	1,5	45,7	49,3	47,50	0,642
	1,5	1,5	44,9	49,9	47,40	0,641
	2,5	1,5	45,5	49,2	47,35	0,641
	1,5	1,0	61,1	69,2	65,15	0,659
	2,5	1,0	63,3	69,6	66,45	0,661
	1,5	1,0	62,1	70,2	66,15	0,660
	2,5	1,0	63,8	69,7	66,75	0,661
	2,5	1,5	61,3	69,3	65,30	0,659
	1,5	1,5	59,7	70,2	64,95	0,659
	2,5	1,5	62,1	69,7	65,90	0,660
1,5	1,5	59,8	69,9	64,85	0,659	
Nanopartículas 40nm	2,5	1,5	45,6	49,5	47,55	0,645
	2,5	1,5	45,4	49,4	47,40	0,645
	1,5	1,5	44,7	50,0	47,35	0,645
	1,5	1,5	44,9	49,9	47,40	0,645
	2,5	1,0	47,1	50,0	48,55	0,646
	2,5	1,0	47,2	50,0	48,60	0,646
	1,5	1,0	46,1	50,3	48,20	0,646
	1,5	1,0	45,6	49,1	47,35	0,645
	2,5	1,0	63,1	69,3	66,20	0,664
	1,5	1,0	61,2	70,2	65,70	0,664
	2,5	1,0	66,4	69,7	68,05	0,666
	1,5	1,0	61,7	70,7	66,20	0,664
	2,5	1,5	63,3	70,5	66,90	0,665
	1,5	1,5	59,9	70,2	65,05	0,663
	2,5	1,5	62,1	69,4	65,75	0,664
1,5	1,5	61,4	70,9	66,15	0,664	
Nanopartículas 100nm	2,5	1,5	46,6	49,7	48,15	0,646
	1,5	1,5	45,9	49,8	47,85	0,646
	2,5	1,5	46,3	49,0	47,65	0,645
	1,5	1,5	45,8	50,2	48,00	0,646
	2,5	1,0	47,6	50,0	48,80	0,647
	1,5	1,0	46,7	49,8	48,25	0,646
	2,5	1,0	47,5	49,2	48,35	0,646
	1,5	1,0	46,0	49,2	47,60	0,645
	2,5	1,0	64,4	70,0	67,20	0,665
	1,5	1,0	62,7	70,4	66,55	0,664
	2,5	1,0	64,7	70,1	67,40	0,665
	1,5	1,0	63,1	70,4	66,75	0,665
	1,5	1,5	60,5	70,1	65,30	0,663
	2,5	1,5	62,6	69,8	66,20	0,664
	2,5	1,5	63,5	69,3	66,40	0,664
1,5	1,5	62,7	70,3	66,50	0,664	

## Anexo 2 Propiedades térmicas del fluido frío

		Fluido Frío (Agua)										
		Flujo Caliente [lt/min]	Flujo Frío [lt/min]	Temp T4 [°C]	Temp T6 [°C]	T fría promedio	Cp agua (J/kg K)	Rho agua (kg/m3)	Caudal (m3/seg)	Flujo masico (kg/seg)	Q (W)	h W/m2 K
Fluido base (Agua)		2,5	1,0	34,3	26,2	30,25	4176,70	995,03	1,667E-05	1,66E-02	561,05	10172,45
		1,6	1,0	35,2	30,7	32,95	4175,62	994,22	1,667E-05	1,66E-02	311,36	6586,18
		2,5	1,0	37,6	32,5	35,05	4174,78	993,59	1,667E-05	1,66E-02	352,58	6629,43
		1,5	1,0	37,7	33,1	35,40	4174,64	993,48	1,667E-05	1,66E-02	317,97	5207,22
		1,5	1,5	29,9	25,2	27,55	4177,78	995,84	2,500E-05	2,49E-02	488,84	5170,26
		2,5	1,5	31,1	25,4	28,25	4177,50	995,63	2,500E-05	2,49E-02	592,69	8358,09
		1,5	1,5	29,9	25,2	27,55	4177,78	995,84	2,500E-05	2,49E-02	488,84	4963,45
		2,5	1,5	31,0	25,3	28,15	4177,54	995,66	2,500E-05	2,49E-02	592,71	8132,52
		1,5	1,0	39,6	28,3	33,95	4175,22	993,92	1,667E-05	1,66E-02	781,55	4898,39
		2,5	1,0	40,7	27,1	33,90	4175,24	993,93	1,667E-05	1,66E-02	940,64	7579,96
		1,5	1,0	39,9	27,4	33,65	4175,34	994,01	1,667E-05	1,66E-02	864,65	5419,22
		2,5	1,0	41,6	27,1	34,35	4175,06	993,80	1,667E-05	1,66E-02	1002,71	8627,93
		2,5	1,5	35,5	24,7	30,10	4176,76	995,07	2,500E-05	2,49E-02	1122,17	7121,14
		1,5	1,5	33,8	24,8	29,30	4177,08	995,31	2,500E-05	2,49E-02	935,44	4522,80
		2,5	1,5	36,4	25,0	30,70	4176,52	994,89	2,500E-05	2,49E-02	1184,23	7910,49
Nanopartículas 40nm		1,5	1,5	34,4	25,0	29,70	4176,92	995,19	2,500E-05	2,49E-02	976,85	4910,11
		2,5	1,5	30,7	25,2	27,95	4177,62	995,72	2,500E-05	2,49E-02	571,96	7445,34
		2,5	1,5	31,0	25,5	28,25	4177,50	995,63	2,500E-05	2,49E-02	571,89	7258,34
		1,5	1,5	29,9	25,5	27,70	4177,72	995,79	2,500E-05	2,49E-02	457,61	4383,35
		1,5	1,5	30,1	25,6	27,85	4177,66	995,75	2,500E-05	2,49E-02	467,99	4751,67
		2,5	1,0	33,8	26,5	30,15	4176,74	995,06	1,667E-05	1,66E-02	505,66	8851,99
		2,5	1,0	34,2	26,8	30,50	4176,60	994,95	1,667E-05	1,66E-02	512,51	9292,43
		1,5	1,0	33,1	26,8	29,95	4176,82	995,12	1,667E-05	1,66E-02	436,42	5275,23
	1,5	1,0	32,8	26,9	29,85	4176,86	995,15	1,667E-05	1,66E-02	408,73	5928,59	

				Fluido Frío (Agua)								
		Flujo Caliente [lt/min]	Flujo Frío [lt/min]	Temp T4 [°C]	Temp T6 [°C]	T fría promedio	Cp agua (J/kg K)	Rho agua (kg/m3)	Caudal (m3/seg)	Flujo masico (kg/seg)	Q (W)	h W/m2 K
<b>Nanopartículas 40nm</b>		2,5	1,0	39,5	26,1	32,80	4175,68	994,26	1,667E-05	1,66E-02	927,22	7592,27
		1,5	1,0	37,6	26,1	31,85	4176,06	994,55	1,667E-05	1,66E-02	796,05	4490,33
		2,5	1,0	39,9	26,0	32,95	4175,62	994,22	1,667E-05	1,66E-02	961,76	14795,63
		1,5	1,0	38,0	26,0	32,00	4176,00	994,50	1,667E-05	1,66E-02	830,61	4685,28
		2,5	1,5	37,7	24,2	30,95	4176,42	994,82	2,500E-05	2,49E-02	1402,23	9887,13
		1,5	1,5	33,6	24,3	28,95	4177,22	995,42	2,500E-05	2,49E-02	966,75	4764,97
		2,5	1,5	36,3	24,2	30,25	4176,70	995,03	2,500E-05	2,49E-02	1257,17	8742,84
		1,5	1,5	38,1	28,7	33,40	4175,44	994,08	2,500E-05	2,49E-02	975,42	5212,55
<b>Nanopartículas 100nm</b>		2,5	1,5	34,3	29,4	31,85	4176,06	994,55	2,500E-05	2,49E-02	508,78	8331,98
		1,5	1,5	33,4	29,5	31,45	4176,22	994,67	2,500E-05	2,49E-02	405,01	5272,09
		2,5	1,5	34,2	29,5	31,85	4176,06	994,55	2,500E-05	2,49E-02	488,01	9175,88
		1,5	1,5	33,6	29,5	31,55	4176,18	994,64	2,500E-05	2,49E-02	425,76	4912,43
		2,5	1,0	36,5	30,6	33,55	4175,38	994,04	1,667E-05	1,66E-02	408,13	8633,16
		1,5	1,0	35,7	30,6	33,15	4175,54	994,16	1,667E-05	1,66E-02	352,85	5778,39
		2,5	1,0	36,9	30,9	33,90	4175,24	993,93	1,667E-05	1,66E-02	414,99	12392,84
		1,5	1,0	35,8	30,9	33,35	4175,46	994,10	1,667E-05	1,66E-02	338,98	5377,86
		2,5	1,0	44,3	30,5	37,40	4174,00	988,84	1,667E-05	1,65E-02	949,31	8605,99
		1,5	1,0	42,8	30,8	36,80	4174,08	993,06	1,667E-05	1,66E-02	829,02	5465,86
		2,5	1,0	45,7	30,9	38,30	4174,00	988,48	1,667E-05	1,65E-02	1017,73	9567,97
		1,5	1,0	44,1	31,0	37,55	4174,00	988,78	1,667E-05	1,65E-02	901,10	6266,60
		1,5	1,5	37,5	29,3	33,40	4175,44	994,08	2,500E-05	2,49E-02	850,90	4499,75
		2,5	1,5	39,4	29,3	34,35	4175,06	993,80	2,500E-05	2,48E-02	1047,66	7387,05
		2,5	1,5	44,3	33,8	39,05	4174,00	988,18	2,500E-05	2,47E-02	1082,72	9477,03
		1,5	1,5	43,3	34,2	38,75	4174,00	988,30	2,500E-05	2,47E-02	938,47	6268,90

**Anexo 3** Especificaciones técnicas del intercambiador de tubos concéntricos

#### Anexo 4 Datos experimentales obtenido para las temperaturas

Corrida	Fluido Caliente	Flujo Caliente [l/min]	Flujo Frío [l/min]	Fluido Caliente			Fluido Frío		
				Temp T1 [°C]	Temp T2 [°C]	Temp T3 [°C]	Temp T4 [°C]	Temp T5 [°C]	Temp T6 [°C]
1	Agua	1,5	1,0	46,8	48,8	49,9	37,7	36,1	33,1
2	Nanofluido 40nm	1,5	1,5	59,9	65,2	70,2	33,6	30,1	24,3
3	Nanofluido 100nm	1,5	1,0	46,7	48,8	49,8	35,7	33,7	30,6
4	Nanofluido 40nm	2,5	1,0	47,1	49,0	50,0	33,8	31,0	26,5
5	Nanofluido 40nm	1,5	1,0	61,7	66,5	70,7	38,0	33,4	26,0
6	Nanofluido 100nm	1,5	1,5	45,9	48,3	49,8	33,4	31,7	29,5
7	Agua	2,5	1,0	63,3	67,0	69,6	40,7	35,4	27,1
8	Agua	2,5	1,5	61,3	65,5	69,3	35,5	31,3	24,7
9	Nanofluido 100nm	2,5	1,5	46,3	48,0	49,0	34,2	32,3	29,5
10	Agua	1,5	1,5	44,6	47,4	49,4	29,9	27,9	25,2
11	Nanofluido 40nm	1,5	1,0	45,6	47,7	49,1	32,8	30,8	26,9
12	Agua	2,5	1,5	45,7	48,1	49,3	31,1	28,6	25,4
13	Nanofluido 100nm	2,5	1,0	47,6	49,3	50,0	36,5	34,3	30,6
14	Agua	1,5	1,0	61,1	65,9	69,2	39,6	34,6	28,3
15	Nanofluido 100nm	2,5	1,0	64,4	68,0	70,0	44,3	38,8	30,5
16	Agua	2,5	1,0	63,8	67,1	69,7	41,6	36,2	27,1
17	Nanofluido 40nm	1,5	1,5	44,7	47,7	50,0	29,9	28,1	25,5
18	Nanofluido 100nm	2,5	1,5	62,6	66,4	69,8	39,4	35,5	29,3
19	Nanofluido 100nm	1,5	1,5	60,5	65,5	70,1	37,5	34,5	29,3
20	Nanofluido 100nm	2,5	1,5	63,5	66,8	69,3	44,3	40,4	33,8
21	Agua	2,5	1,0	47,2	49,1	49,9	37,6	35,8	32,5
22	Nanofluido 40nm	2,5	1,5	45,6	47,7	49,5	30,7	28,6	25,2
23	Nanofluido 40nm	1,5	1,5	44,9	47,8	49,9	30,1	28,2	25,6
24	Nanofluido 100nm	1,5	1,0	63,1	67,4	70,4	44,1	39,2	31,0
25	Nanofluido 40nm	2,5	1,0	66,4	66,9	69,7	39,9	34,6	26,0
26	Agua	2,5	1,5	45,5	47,8	49,2	31,0	28,6	25,3
27	Nanofluido 100nm	1,5	1,5	62,7	66,9	70,3	43,3	40,1	34,2
28	Nanofluido 40nm	2,5	1,0	47,2	48,9	50,0	34,2	31,6	26,8
29	Agua	1,6	1,0	46,4	47,9	48,8	35,2	33,6	30,7
30	Agua	1,5	1,5	44,9	47,9	49,9	29,9	27,9	25,2
31	Nanofluido 40nm	2,5	1,5	62,1	66,0	69,4	36,3	31,6	24,2
32	Nanofluido 100nm	2,5	1,5	46,6	48,5	49,7	34,3	32,4	29,4
33	Nanofluido 40nm	2,5	1,5	45,4	47,8	49,4	31,0	28,8	25,5
34	Nanofluido 100nm	2,5	1,0	64,7	68,1	70,1	45,7	40,3	30,9
35	Agua	1,5	1,5	59,7	65,0	70,2	33,8	30,4	24,8
36	Nanofluido 40nm	1,5	1,5	61,4	66,4	70,9	38,1	34,4	28,7
37	Nanofluido 40nm	1,5	1,0	46,1	48,6	50,3	33,1	30,8	26,8
38	Agua	2,5	1,0	47,1	49,1	49,9	34,3	31,3	26,2
39	Nanofluido 100nm	1,5	1,5	45,8	48,5	50,2	33,6	31,9	29,5
40	Nanofluido 100nm	2,5	1,0	47,5	48,9	49,2	36,9	34,6	30,9
41	Nanofluido 100nm	1,5	1,0	46,0	48,1	49,2	35,8	34,0	30,9
42	Agua	2,5	1,5	62,1	66,1	69,7	36,4	31,8	25,0
43	Agua	1,5	1,5	59,8	64,9	69,9	34,4	30,7	25,0
44	Nanofluido 100nm	1,5	1,0	62,7	67,4	70,4	42,8	37,8	30,8
45	Agua	1,5	1,0	62,1	66,6	70,2	39,9	35,0	27,4
46	Nanofluido 40nm	2,5	1,0	63,1	66,6	69,3	39,5	34,4	26,1
47	Nanofluido 40nm	1,5	1,0	61,2	66,0	70,2	37,6	33,1	26,1
48	Nanofluido 40nm	2,5	1,5	63,3	67,2	70,5	37,7	32,4	24,2

**Anexo 5** Especificaciones técnicas de las nanopartículas de óxido de aluminio