



Estudio teórico experimental de la transferencia de calor, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CUO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono

Betancourt García, Raymond Adrián y Tonguino Alcoser, Juan David

Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

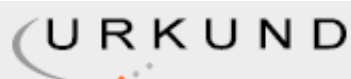
Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Carrión Matamoros, Luis Miguel

01 de septiembre de 2021

Reporte urkund



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS BETANCOURT-TONGUINO_NANOFLUIDOS.pdf
(D111898430)

Submitted: 9/1/2021 3:55:00 AM

Submitted By: vaerazo@utn.edu.ec

Significance: 9 %

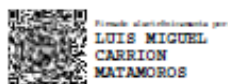


Sources included in the report:

Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Cengel_4.pdf (D49657807)
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUJOS PARALELO Y CRUZADO UTILIZANDO COMO FLUIDO DE TRABAJO AGUA PARA EL LAB DE CONVERSION DE LA ENERGÍA DEL DECEM.pdf (D43590040)
<https://pdfcoffee.com/transferencia-de-calor-cengel-2-pdf-free.html>
<https://updocs.net/download/pdf-transfer-calor-a5b374659054c4>
<https://pdfcookie.com/documents/1-unidad-i-mecanismos-de-transferencia-de-calor-yv85nyddm9v1>
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3516/Medina%20Palomino.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17617/1/UPS%20-%20ST004211.pdf>
<https://es.slideshare.net/FranciscoTorrealba1/diseo-de-un-intercambiador-de-calor-termodinamica>

Instances where selected sources appear:

39



Ing. Carrión Matamoros Luis Miguel
Docente Tutor

Ing. Castellanos Villa Santiago David
Docente Tutor



Certificación

ESPE**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Estudio teórico experimental de la transferencia de calor, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono" fue realizado por los señores Betancourt García Raymond Adrián y Tonguino Alcoser Juan David el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

Firma

Firma digitalizada por:
LUIS MIGUEL
CARRION
MATAMOROS

Ing. Carrión Matamoros Luis Miguel

Director de trabajo de titulación

Ci: 1103574677



Responsabilidad de autoría

ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Betancourt García Raymond Adrián**, con cédula de identidad N° : 171649428-9 y **Tonguino Alcoser Juan David**, con cédula de identidad N° 172102306-5, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Estudio teórico experimental de la transferencia de calor, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 y nanotubos de carbono”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando debidamente las citas bibliográficas.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

Betancourt García Raymond Adrián
CI: 171649428-9

Tonguino Alcoser Juan David
CI: 172102306-5

Autorización de publicación



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA****DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA****AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros, **Betancourt García Raymond Adrián**, con cédula de identidad N°171649428-9 y **Tonguino Alcoser Juan David**, con cédula de identidad N°172102306-5, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Estudio teórico experimental de la transferencia de calor, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

Betancourt García Raymond Adrián

CI: 171649428-9

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

Tonguino Alcoser Juan David

CI: 172102306-5

Dedicatoria

Porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas,

A Él sea la gloria para siempre. Amén.

Romanos 11:36

A Dios, por permitirme tener vida, salud, y darme la sabiduría necesaria para enfrentar cada obstáculo en este camino, poder cumplir y ser Ingeniero Mecánico. A mi madre Judith, por su paciencia, sus atenciones y todo su amor. A mi padre Juan, por su inagotable esfuerzo día tras día para verme ser un profesional, a mi hermana Maricela y mi sobrina Analía por aconsejarme y brindarme motivación y a cada una de las personas que forman parte de mi familia y de mi vida por todo su cariño y apoyo a lo largo de esta inolvidable etapa, sin ustedes este logro profesional no sería posible.

Juan D. Tonguino A.

Se lo dedico a mis padres que desde el día de mi nacimiento han sido fuente de esfuerzo y dedicación para que me encuentre en el lugar que estoy y ser la persona que soy en este momento; a mis hermanos que siempre me supieron apoyar a su manera y siempre haciéndome notar que cuento con ellos como ellos conmigo; al recuerdo de mi abuela que me dio más amor que cualquier persona que en mi vida pudiese dar, poniendo en mí mucha fe y esperanza de ser una gran persona, a mi abuelo que siempre supo darme con ejemplos el lineamiento de un verdadero hombre y ahora un gran profesional, muchas gracias a todos ellos porque de otra manera esto no hubiese sido posible.

R. Adrián Betancourt G.

Agradecimiento

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, profesores, compañeros por el apoyo y las herramientas necesarias para obtener mi ingeniería. Al laboratorio de Conversión de la Energía y al Laboratorio de Reología de la Universidad por permitirnos el uso de sus instalaciones. En especial a nuestro director de tesis Ing. Luis Carrión por guiarnos y brindarnos la ayuda necesaria para la realización de este proyecto.

Juan D. Tinguino A.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, carrera de Ingeniería Mecánica, docentes, amigos. A los Jefes de Laboratorio tanto de Reología como Conversión de la Energía que supieron ayudar con su apoyo y equipos para el desarrollo de esta tesis. Especialmente a nuestro director de tesis, el Ing. Luis Carrión por su predisposición, guía, ayuda y dedicación para la culminación de este proyecto.

R. Adrián Betancourt G.

Tabla de contenido

Reporte urkund.....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras	13
Nomenclatura.....	15
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo 1: generalidades.....	21
Introducción	21
Antecedentes	22
Definición del problema.....	24
Objetivos	25
<i>Objetivo General</i>	25
<i>Objetivos Específicos</i>	25
Justificación	25
Alcance.....	26
Capítulo 2: marco teórico.....	27
Nanotecnología	27
<i>Aplicaciones</i>	28
Nanopartículas	30
<i>Principales Nanopartículas y sus características.</i>	30
<i>Métodos de obtención</i>	33
Nanopartículas de interés.....	38
<i>Oxido de Aluminio – Al₂O₃</i>	38
<i>Óxido de cobre - CuO</i>	38
<i>Óxido de hierro – Fe₃O₄</i>	39
<i>Nanotubos de carbono</i>	39
Nanofluidos	40

<i>Factores que influyen en la conductividad térmica de nanofluidos</i>	40
<i>Estabilidad nanofluidos</i>	42
Correlaciones teóricas para determinar características de los nanofluidos	43
Transferencia de calor	46
<i>Conducción</i>	47
<i>Convección</i>	49
<i>Conservación de la energía para un volumen de control</i>	51
<i>Balance de energía en una superficie</i>	51
<i>Sistemas radiales</i>	52
<i>Capa limite</i>	54
<i>Flujo interno y flujo externo</i>	55
<i>Flujo laminar y flujo turbulento</i>	56
<i>Número de Nusselt</i>	56
<i>Número de Prandtl</i>	58
<i>Número de Reynolds</i>	59
Intercambiadores de calor	59
Tipos de un intercambiador de calor	60
Intercambiador de calor de tubos concéntricos	60
Intercambiador de calor de tubo y coraza	61
Análisis de los intercambiadores de calor	66
Análisis del intercambiador de calor - método de efectividad ϵ	67
Pérdidas de presión	68
Pérdidas de presión en los tubos.....	69
Pérdidas de presión en la coraza.....	69
<i>Aplicaciones en la industria</i>	70
Intercambiadores de doble tubo.....	70
Intercambiadores de tubo y coraza	71
Reología.....	72
Capítulo 3: calibración de equipo y preparación	75
Equipo utilizado	75
<i>Banco de pruebas de intercambiadores de calor del laboratorio de conversión de energía</i>	75
Intercambiadores de calor	75

	10
<i>Intercambiador de calor concéntrico</i>	76
<i>Intercambiador de calor multitubo</i>	76
Reparaciones	77
<i>Cambio de sistema de medición de temperatura</i>	77
<i>Adecuación de manómetros</i>	79
<i>Limpieza banco de intercambiadores</i>	79
<i>Limpieza caudalímetros</i>	79
<i>Arduino</i>	80
Definición de parámetros	80
<i>Datos a ser recolectados</i>	81
<i>Proceso</i>	81
Ensayos de funcionamiento	82
Preparación de los nanofluidos	83
<i>Datos de partículas utilizadas</i>	84
Proceso realizado	84
<i>Fluido base</i>	84
<i>Pesaje Nanoparticulas</i>	85
<i>Agitación Magnética</i>	85
<i>Sonicación</i>	87
Capítulo 4: experimentación	88
Análisis de incertidumbre	88
Análisis térmico	91
Transferencia de calor (Q)	91
<i>Concentración 0.03%</i>	92
<i>Concentración 0.1%</i>	94
Coeficiente de convección (h)	97
<i>Concentración 0.03%</i>	97
<i>Concentración 0.1%</i>	100
Coeficiente Global de transferencia de calor (U)	102
<i>Concentración 0.03%</i>	102
<i>Concentración 0.1%</i>	105
Número Adimensional de Prandtl (Pr)	107
<i>Concentración 0.03%</i>	108

<i>Concentración 0.1%</i>	110
Número Adimensional de Nusselt (Nu)	112
<i>Concentración 0.03%</i>	112
<i>Concentración 0.1%</i>	115
Caída de Presión	117
<i>Concentración 0.03%</i>	117
<i>Concentración 0.1%</i>	119
Efectividad.....	121
<i>Concentración 0.03%</i>	122
<i>Concentración 0.1%</i>	123
Análisis Reológico	125
<i>Gráficas Obtenidas</i>	125
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	131
Conclusiones	131
Recomendaciones.....	132
Bibliografía	133
Anexos.....	139

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Principales aplicaciones de la nanotecnología</i>	28
Tabla 2	<i>Rangos típicos de los números de Prandtl para fluidos comunes</i>	58
Tabla 3	<i>Factores de impureza representativos</i>	63
Tabla 4	<i>Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor</i>	64
Tabla 5	<i>Rangos de operación del equipo</i>	75
Tabla 6	<i>Características del intercambiador de calor concéntrico</i>	76
Tabla 7	<i>Características del intercambiador de calor multitubo</i>	77
Tabla 8	<i>Características de las nanopartículas utilizadas</i>	84
Tabla 9	<i>Incertidumbres de datos</i>	88
Tabla 10	<i>Ajuste reológico del esfuerzo - H₂O</i>	126
Tabla 11	<i>Ajuste reológico del esfuerzo – NTC 0.03%</i>	127
Tabla 12	<i>Ajuste reológico del esfuerzo – NTC 0.1%</i>	128
Tabla 13	<i>Ajuste reológico del esfuerzo – Al₂O₃ 0.03%</i>	129
Tabla 14	<i>Ajuste reológico del esfuerzo – Al₂O₃ 0.1%</i>	130

Índice de figuras

Figura 1 <i>Aplicación de las nanopartículas en ciertas industrias</i>	32
Figura 2 <i>Enfoque de constitución de nanopartículas Top Down y Bottom-Up</i>	34
Figura 3 <i>Diferencia en los métodos de obtención Top-Down y Bottom-Up</i>	34
Figura 4 <i>Esquema del proceso Top Down molienda.</i>	36
Figura 5 <i>Esquema de procesamiento de partículas por método de obtención química</i>	37
Figura 6 <i>Formas de nanopartículas</i>	42
Figura 7 <i>Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debida a la actividad molecular</i>	48
Figura 8 <i>Transferencia unidimensional de calor por conducción</i>	49
Figura 9 <i>Balance de energía para conservación en la superficie de un medio.</i>	52
Figura 10 <i>Circuito térmico equivalente para cilindro hueco</i>	53
Figura 11 <i>Circuito térmico equivalente para paredes cilíndricas compuestas</i>	54
Figura 12 <i>Desarrollo de la capa límite de velocidad o hidrodinámica sobre una placa plana</i>	55
Figura 13 <i>Intercambiadores de calor de tubos concéntricos. (a) Flujo paralelo. (b) Contraflujo.</i>	61
Figura 14 <i>Intercambiador de calor tubo y coraza</i>	62
Figura 15 <i>Analogía térmica de un intercambiador de calor de tubo doble</i>	65
Figura 16 <i>Intercambiadores de doble tubo</i>	71
Figura 17 <i>Intercambiador de tubo y coraza.</i>	72
Figura 18 <i>Banco de pruebas de intercambiadores de calor</i>	75
Figura 19 <i>Intercambiador concéntrico</i>	76
Figura 20 <i>Intercambiador Multitubo</i>	76
Figura 21 <i>Perno propio de los intercambiadores de calor</i>	77
Figura 22 <i>Fabricación de los pernos de Grilon</i>	78
Figura 23 <i>Pernos elaborados de Grilon para la colocación de termocuplas</i>	78
Figura 24 <i>Termocupla colocada y pegada en los pernos elaborados</i>	78
Figura 25 <i>Manómetros adecuados para el ensayo</i>	79
Figura 26 <i>Arduino armado y conectado para medir temperaturas</i>	80
Figura 27 <i>Ensayo de funcionamiento del banco de pruebas</i>	82
Figura 28 <i>Pesaje de las nanopartículas en la balanza electrónica</i>	85
Figura 29 <i>Agitadores magnéticos</i>	86
Figura 30 <i>Agitación magnética de las nanopartículas con el fluido base en proceso.</i>	86
Figura 31 <i>Equipo de sonicación</i>	87
Figura 32 <i>Muestras de los diferentes nanofluidos realizados</i>	87
Figura 33 <i>Esquemas de flujos en los intercambiadores de calor</i>	91
Figura 34 <i>Curvas de Calor Q vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.03</i>	92
Figura 35 <i>Curvas de Calor Q vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.1</i>	94
Figura 36 <i>Curvas de coeficiente de transferencia de calor h vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.03</i>	97
Figura 37 <i>Curvas de coeficiente de transferencia de calor h vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.1</i>	100
Figura 38 <i>Curvas de coeficiente global de transferencia de calor U vs Reynolds con concentración 0.03</i>	102

Figura 39 <i>Curvas de coeficiente global de transferencia de calor U vs Reynolds con concentración 0.1</i>	105
Figura 40 <i>Curvas de Prandtl Pr vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.03</i> ...	108
Figura 41 <i>Curvas de Prandtl Pr vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.1</i>	110
Figura 42 <i>Curvas de Nusselt (Nu) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.03</i>	112
Figura 43 <i>Curvas de Nusselt (Nu) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.1</i>	115
Figura 44 <i>Curvas de Caída de presión (ΔP) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.03</i>	117
Figura 45 <i>Curvas de Caída de presión (ΔP) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.1</i>	119
Figura 46 <i>Curvas de Efectividad (ϵ) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.03</i>	122
Figura 47 <i>Curvas de Efectividad (ϵ) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.1</i>	123
Figura 48 <i>REÓMETRO DISCOVERY DHR2</i>	125
Figura 49 <i>Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – H₂O</i>	126
Figura 50 <i>Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – NTC 0.03%</i>	127
Figura 51 <i>Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – NTC 0.1%</i>	128
Figura 52 <i>Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – Al₂O₃ 0.03%</i>	129
Figura 53 <i>Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – Al₂O₃ 0.1%</i>	130

Nomenclatura

Al_2O_3	:	Oxido de Aluminio.
CuO	:	Oxido de Cobre.
Fe_3O_4	:	Oxido de hierro.
NTC	:	Nanotubos de Carbono.
ICP	:	Intercambiador de calor Concéntrico flujo Paralelo.
ICC	:	Intercambiador de calor Concéntrico Contraflujo.
IMP	:	Intercambiador de calor Multitubo flujo Paralelo.
IMC	:	Intercambiador de calor Multitubo Contraflujo.
np	:	Nanopartícula.
fb	:	Fluido base.
nf	:	Nanofluido.
k_{nf}	:	Conductividad térmica efectiva del nanofluido.
k_{np}	:	Conductividad térmica de la fase sólida.
k_{fb}	:	Conductividad térmica del fluido.
ϕ	:	Fracción de volumen.
β	:	Relación de conductividades térmicas.
μ	:	Viscosidad.
C_p	:	Capacidad calorífica específica.

- q''_x : Transferencia de calor por unidad de área.
- k : Conductividad térmica.
- m : Masa.
- dT/dx : Gradiente de temperatura.
- T : Temperatura.
- T_h : Temperatura del aceite.
- T_c : Temperatura del nanofluido.
- ΔT : Variación de temperatura.
- P : Presión.
- V : Velocidad del fluido.
- ΔP : Diferencia de presión.
- ΔT_m : Diferencia de temperaturas media.
- h : Coeficiente de transferencia de calor.
- U : Coeficiente global de transferencia de calor.
- T_s : Temperatura de la superficie.
- T_∞ : Temperatura del fluido.
- E_{ent} : Energía de entrada.
- E_g : Energía generada.

E_{sal}	:	Energía de salida.
E_{alm}	:	Energía almacenada.
q''_{cond}	:	Calor de conducción.
q''_{conv}	:	Calor de convección.
q''_{rad}	:	Calor de radiación.
r	:	Radio.
D	:	Diámetro.
d_i	:	Diámetro interno.
d_e	:	Diámetro externo.
L	:	Longitud
L_e	:	Longitud efectiva.
A	:	Área.
r_1	:	Radio interno.
r_2	:	Radio externo.
R_t	:	Resistencia térmica.
Nu	:	Número de Nusselt.
L_c	:	Longitud característica.
Re	:	Número de Reynolds.

- f : Factor de fricción.
- Pr : Número de Prandtl.
- α : Difusividad térmica.
- ν : Viscosidad cinemática.
- \dot{m} : Flujo másico.
- ϵ : Efectividad.
- \dot{Q} : Razón de la transferencia de calor real.
- Q_{max} : Razón máxima posible de la transferencia de calor.
- LTG : Línea de Tendencia General

Resumen

El presente trabajo de titulación teórico experimental, trata sobre la transferencia de calor de nanofluidos con el uso de cuatro nanopartículas Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC , aplicando dos concentraciones en peso (%w) 0.03% y 0.1%, mediante el uso del banco de pruebas de intercambiadores de calor del laboratorio de conversión de energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Los nanofluidos fueron ensayados en condiciones de flujo paralelo y contraflujo para lograr evidenciar el comportamiento que presentan en los dos distintos intercambiadores de calor, concéntrico y multitubo.

Los resultados se muestran mediante gráficas de las diferentes variables térmicas: transferencia de calor (Q), coeficiente de convección (h), coeficiente global de transferencia de calor (U), número de Prandtl (Pr), número de Nusselt (Nu), efectividad de cada ensayo (%). Siendo el intercambiador multitubo a contraflujo el de mejor resultados, donde se logra evidenciar que la transferencia de calor aumenta en los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC de la siguiente manera 2.39; 3.29; 4.2 y 5.14 veces más respectivamente, en relación al fluido base H_2O que tiene como valor en su máximo caudal 14050.42 watts. Mientras que la efectividad del mejor ensayo es en las nanopartículas de NTC con 19.51%, con un 13.31% mayor que el fluido base H_2O .

Palabras clave:

- **TRANSFERENCIA DE CALOR**
- **NANOFLUIDOS**
- **NANOPARTÍCULAS**
- **INTERCAMBIADORES DE CALOR**
- **EFFECTIVIDAD.**

Abstract

This theoretical and experimental titration work deals with the heat transfer of nanofluids with the use of four nanoparticles Fe₃O₄, Al₂O₃, CuO and NTC, applying two concentrations in weight (%w) 0.03% and 0.1%, through the use of the heat exchanger test bench of the energy conversion laboratory of the Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. The nanofluids were tested in parallel flow and counterflow conditions to demonstrate their behavior in the two different heat exchangers, concentric and multi-tube.

The results are shown through graphs of the different thermal variables: heat transfer (Q), convection coefficient (h), overall heat transfer coefficient (U), Prandtl number (Pr), Nusselt number (Nu), effectiveness of each test (%). Being the counter-flow multi-tube exchanger the one with the best results, where it is evidenced that the heat transfer increases in the nanofluids Fe₃O₄, Al₂O₃, CuO and NTC in the following way: 2.39; 3.29; 4.2 and 5.14 times more respectively, in relation to the base fluid H₂O that has as value in its maximum flow 14050.42 watts. While the effectiveness of the best test is in the NTC nanoparticles with 19.51%, with 13.31% higher than the H₂O base fluid.

Key words:

- **HEAT TRANSFER**
- **NANOFLUIDS**
- **NANOPARTICLES**
- **HEAT EXCHANGERS**
- **EFFECTIVENESS.**

Capítulo 1: generalidades

Introducción

Hoy en día, los altos precios de la energía han llevado a la industria a adoptar métodos de eficiencia energética tanto como sea posible en sus instalaciones. Durante décadas, la gente ha intentado mejorar la transferencia de calor de los intercambiadores de calor, reducir el tiempo de transferencia de calor y, en última instancia, aumentar la eficiencia energética. Estos esfuerzos suelen incluir métodos pasivos y activos, como generar turbulencias, agrandar la superficie de intercambio o utilizar fluidos que contengan mayores propiedades termofísicas.

La nanotecnología es una ciencia que permite el estudio de la materia a nivel de átomos y moléculas (menos de 100 nanómetros de tamaño). Aquí es donde aparecen los nanofluidos, que contienen nanopartículas que pueden dar lugar a modificaciones en sus propiedades, llegando a tener características distintas de los fluidos comunes como agua o etilenglicol, por lo que se han convertido en áreas de intensa investigación científica, para aplicaciones en campos como: la energía, la biomedicina, la óptica, la electrónica, la nanoquímica o la agricultura.

La investigación sobre nanofluidos ha demostrado que estos materiales son suspensiones estables y homogéneas, compuestas por fluidos base y otras nanopartículas como aditivos, que hacen posible mejorar significativamente el rendimiento térmico en intercambiadores de calor. Además, los estudios han demostrado que la conductividad térmica de los nanofluidos es significativamente mayor que la de los fluidos que no contienen nanopartículas.

El presente estudio teórico experimental tiene como finalidad comparar el aumento de la transferencia de calor en un intercambiador multitubo y tubo concéntrico, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol con nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono.

Antecedentes

La transferencia de calor toma un papel importante en una gran cantidad de procesos y productos como sistemas de refrigeración de coches, sistemas de aire acondicionado, torres de refrigeración, climatización de piscinas y otras aplicaciones térmicas (Ranjbarzadeh, Meghdadi, Afrand, Karimipour, & Hojaji, 2017). Debido a la importancia del proceso, las investigaciones se centran en la mejora de la velocidad de transferencia de calor para así reducir el tiempo del proceso y mejorar la eficiencia energética (Devendiran & Amirtham, 2016).

Un método propuesto es la llamada técnica pasiva, una técnica que proporciona, en un sistema dado, mayor intercambio de calor sin adición de energía. Esta técnica comprende propuestas como el tratamiento de superficies, la extensión de superficies, la utilización de tubos enrollados o la agregación de partículas a los fluidos entre otros (Hasanpour, Farhadi, & Sedighi, 2014)

En 1873, Maxwell propuso dispersar micropartículas en los fluidos para la mejora de la conductividad térmica, pero esta técnica se descartó por problemas como la sedimentación, la erosión o la alta caída de presión (Tawfik, 2017)

Desde la década de 1990, los investigadores comenzaron a aplicar la tecnología de nanomateriales al campo de transferencia de calor y han logrado muchos resultados significativos en la mejora de la transferencia de calor (Zhen-Hua Liu, 2012). En 1995, Choi, propuso por primera vez el concepto de "nano fluido", que es un fluido con algunos tipos de partículas de tamaño nanométrico suspendidas en un líquido base (Choi & Eastman, 1995).

Debido al avance de la síntesis de nanomateriales en los últimos años, se ha abierto una exclusiva vía de optimización para mejorar el proceso, la suspensión de nanopartículas en un

fluido base. Esta mezcla, llamada nanofluido, se estima que sea el nuevo medio de intercambio de calor en un futuro muy cercano, esto debido al aumento de la conductividad térmica que aportan las nanopartículas (Seong, y otros, 2018).

Existen algunos estudios que cuantifican el ahorro que supone el uso de los nanofluidos y como éstos ayudan en la transferencia de calor. Vahdat Azad y Vahdat Azad (2016) diseñaron un intercambiador de carcasa y tubos con la utilización de nanofluido de alumina. Lograron obtener un aumento de 185% del coeficiente de intercambio de calor en el lado de los tubos y una reducción en la caída de presión de un 94%.

Jafari y otros (2018), realizaron un análisis experimental, en donde, después de diseñar un intercambiador para aplicaciones en el campo alimenticio, ejecutaron pruebas con nanofluidos de alumina al 2 y 4%. Como resultado, lograron obtener una reducción en el tiempo de procesado del zumo de sandía del 24,14 y 51,72% respectivamente. Por lo tanto, consiguieron una reducción del consumo energético de un 24,64 y 48,34%.

Suroso y otros (2019), mediante un estudio experimental en un intercambiador concéntrico llegaron a concluir que, el coeficiente de transferencia de calor por convección de los nanofluidos TiO₂ / Thermo oil XT 32 aumenta junto con la adición de fracción de volumen y aumenta en línea con el aumento de temperatura.

Ramalingam y otros (2019), realizaron un estudio experimental usando nanopartículas de carburo de silicio, donde se analizó el coeficiente de transferencia de calor y la tasa de transferencia de calor de un intercambiador de calor concéntrico; los resultados muestran que el uso de nanopartículas aumenta dicho coeficiente y dicha tasa de transferencia de calor.

Definición del problema

La recuperación de calor residual a gran escala en la producción industrial se ha convertido en un tema de preocupación mundial. Por lo tanto, es particularmente importante mejorar la eficiencia de la transferencia de calor (Qian, y otros, 2019).

La agregación de aletas y el aumento del área de transferencia de calor, son métodos que se aplican comúnmente para mejorar la eficiencia del sistema de recuperación de calor. Sin embargo, estos enfoques causan que el intercambiador de calor sea más grande y voluminoso. Kulkarni y otros (2008) concluyó que la utilización de aletas y microcanales ya ha alcanzado su límite.

En los intercambiadores de calor, se hace uso como medio de transferencia de calor fluidos convencionales como el agua, el etilenglicol, el keroseno (Huminić & Huminić, 2018). La mayor parte de estos fluidos tienen como desventaja la baja conductividad térmica, lo que implica un bajo rendimiento en el proceso (Kumar, Sonawane, & Sonawane, 2018), por esta razón se hace necesario el desarrollo de mejoras en los fluidos que son utilizados en intercambiadores de calor.

Los recientes avances en nanotecnología han brindado posibilidades en el avance de la tecnología utilizada en el intercambiador de calor. Saidur y otros (2011) revisó exhaustivamente las posibles aplicaciones de los nanofluidos en la refrigeración de motores, refrigeración de transformadores, procesos de mecanizado y refrigeración de reactores nucleares. Es normal y posible que el rendimiento de un sistema de recuperación de calor pueda mejorarse aplicando este fluido de transferencia de calor avanzado.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar teórica y experimentalmente la transferencia de calor, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono.

Objetivos Específicos

- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U) para cada ensayo y a diferentes porcentajes de nanofluido.
- Determinar el coeficiente de convección (h) para cada ensayo y a diferentes porcentajes de nanofluido.
- Calcular la efectividad que presenta cada nanofluido en los ensayos.
- Realizar gráficas comparativas de los coeficientes encontrados y de la efectividad versus Reynolds.
- Estudiar Reológicamente a diferentes tasas de corte y temperatura el nanofluido con mejor resultado.

Justificación

La aplicación de nanopartículas a fluidos comunes usados en intercambiadores de calor puede mejorar notablemente la capacidad de transferencia de calor, para poder evidenciar y comparar estos beneficios es pertinente la ejecución de un estudio teórico experimental; cabe resaltar que en el Ecuador no existen estudios similares que se enfoquen en los nanofluidos como lo hace este trabajo.

El uso de nanopartículas en el campo de la energía es relativamente nuevo y es un campo de estudio que se ha tornado de mucho interés en la última década, debido a los resultados que se evidencian en el rendimiento de los nanofluidos. La experimentación de estas

nuevas tecnologías aplicadas a métodos comunes, ayudara a encontrar nuevos comportamientos que beneficien al campo industrial.

Además, es preciso dar a conocer a la sociedad ecuatoriana las características y beneficios de los nanofluidos, a fin de impulsar la implementación de esta alternativa en el campo energético. Y a su vez que éste estudio sirva como fuente bibliográfica para futuras investigaciones.

Alcance

El presente proyecto comprende en realizar el estudio teórico experimental de la transferencia de calor, con el uso de distintos nanofluidos en el banco de intercambiadores de calor del laboratorio de conversión de la energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Se ejecutaran ensayos con flujo paralelo y contraflujo en cada intercambiador de calor, donde se recopilaran datos que permitirán elaborar cálculos de variables térmicas, con las cuales, se podrá elaborar gráficas comparativas de los nanofluidos ensayados para conocer su comportamiento y los beneficios que podrían tener en el campo energético. Además se ejecutara un análisis reológico del nanofluido que presente mejor resultado en la experimentación.

Capítulo 2: marco teórico

Nanotecnología

La nanotecnología es un campo amplio de la ciencia y la ingeniería en la actualidad y puede lograr tener extensas aplicaciones en cualquier tipo de industria. Para llegar al momento actual que atraviesa este tema es importante destacar algunos acontecimientos en el tiempo.

Uno de los precursores en el campo de la nanotecnología fue el físico estadounidense Richard Feynman, quien manifestó un discurso en la Sociedad Estadounidense de Física de Caltech en 1959 "There's Plenty of Room at the Bottom" (Hay mucho espacio ahí abajo). Fue ahí donde describió un proceso que permitirá la manipulación de átomos y moléculas con instrumentos que son de alta precisión. De esta manera, se pueden diseñar y construir sistemas átomo a átomo en la nanoescala. En este discurso, Feynman también indicó que estos nanosistemas serán diferentes de los macrosistemas. (NANOTECNOLOGO, 2019)

El término nanotecnología fue tratado por primera vez en el año de 1974 por el científico japonés Norio Taniguchi, usó el término para describir procesos de semiconductores. Su definición de nanotecnología fue la siguiente: "La nanotecnología consiste principalmente en el proceso de separación, consolidación y deformación de los materiales por un átomo o una molécula". (Zarzycki, 2014)

La nanotecnología consta de la investigación y el desarrollo de sistemas a nanoescala. El prefijo "Nano" pertenece al Sistema Internacional de Unidades. Proviene de la palabra griega *vávoç*, que traducido al español es enano, pertenece a un factor de 10^{-9} , que se designa a unidades de longitud y es equivalente a una mil millonésima fracción de un metro (10^{-9} metros), lo que se le nombra como 1 nanómetro. En esta escala, se ha podido observar propiedades y fenómenos completamente nuevos. Estas propiedades y fenómenos se rigen por

las leyes de la mecánica cuántica. Los científicos han utilizado estas nuevas propiedades para generar nuevos materiales (nanomateriales) y dispositivos nanotecnológicos.

(NANOTECNOLOGO, 2019)

Se espera que la nanotecnología brinde soluciones a una variedad de problemas que enfrenta actualmente la humanidad, como el medio ambiente, la energía, la salud (nanomedicina) y muchos otros problemas, pero si se abusa de estas nuevas tecnologías, pueden traer riesgos y peligros.

Aplicaciones

Hoy en día, la nanotecnología es un campo que involucra varias áreas como la energía, electrónica, química, física, ciencia de los materiales, sistemas electromecánicos, incluyendo el uso en la bioingeniería y la biomedicina, en la Tabla 1 podemos ver las aplicaciones más importantes.

Alrededor del mundo tanto países como instituciones privadas proyectan fuertes inversiones hacia el desarrollo y aplicación de la nanotecnología a través de nanomateriales para todas las industrias. (Zarzycki, 2014)

Tabla 1

Principales aplicaciones de la nanotecnología

INDUSTRIA	APLICACIONES
Medio Ambiente	Tratamiento de aguas residuales, descontaminación de suelos, tratamiento de residuos, desalinización de agua, reciclaje de sustancias, nanosensores para la detección de sustancias químicas dañinas o gases tóxicos, son algunas de las aplicaciones de la nanotecnología en este campo.

INDUSTRIA	APLICACIONES
Energía	En cuanto al sector energético, se busca mejorar los sistemas de producción y almacenamiento de energía, en especial las renovables, como la energía solar, o basadas en el Hidrógeno; también tecnologías que disminuyan el consumo de energía por medio del desarrollo de aislantes térmicos más eficientes basados en nanomateriales.
Medicina	Nanomedicina, en esta área encontramos el desarrollo de nano transportadores de fármacos dirigidos a sitios específicos del cuerpo, que pueden ser útiles en el tratamiento del cáncer u otras enfermedades; biosensores moleculares con capacidad de detectar sustancias de interés como glucosa o un biomarcador de alguna enfermedad, nanobots programados para reconocer y destruir células tumorales o a su vez para reparar algún tejido como el tejido óseo a raíz de una fractura, nanopartículas con propiedades antisépticas y desinfectantes; partes del cuerpo creadas en laboratorio.
Tecnologías de la comunicación e informática.	Creación sistemas de almacenamiento de datos con mayor capacidad y reduciendo su actual tamaño, pantallas basadas en materiales con mayor flexibilidad u otras propiedades como transparencia, así como el desarrollo de la computación cuántica.
Alimentos	La nanotecnología se aplica en la industria alimentaria desarrollando nanosensores y nanochips útiles en el control de la calidad y seguridad del alimento, dispositivos que funcionen como nariz y lengua electrónica, detección de frescura y vida útil de un alimento, detección de microorganismos patógenos, aditivos, fármacos, metales pesados, toxinas y otros contaminantes, desarrollo de nanoenvases, e incluso nanoalimentos con propiedades funcionales nutritivas y saludables.
Textil	La industria textil está desarrollando tejidos que repelen las manchas y no se ensucian, incorpora nanochips electrónicos que dan la posibilidad de cambio de color a las telas o el control de color variando la temperatura.

Fuente: (Florez, 2020)

Nanopartículas

Las nanopartículas son partículas nuevas con al menos una dimensión inferior a 100 nm. Debido a varias aplicaciones potenciales en biomedicina, óptica, electrónica, nanoquímica, agricultura y otros campos (ver Figura 1), las nanopartículas son actualmente un campo importante de investigación científica. Las partículas se clasifican por su diámetro y, según su tamaño, tendrán propiedades físicas y químicas específicas. Las partículas ultrafinas son iguales a las nanopartículas con un tamaño entre 1 y 100 nm. Las partículas finas están entre 100 y 2500 nm. Las partículas gruesas cubren el rango entre 2500 y 10,000 nm. (S.f, 2010)

Principales Nanopartículas y sus características.

Nanoarcillas (nanoclays): Silicatos laminados. Su estructura consiste en dos capas formadas por tetraedros de óxido de aluminio (Al_2O_3) y una capa de octaedros de óxido de silicio (SiO_2), formando apilamientos, con un espaciado regular entre ellas denominada galería. El silicato más utilizado es la montmorillonita. Se emplean por sus propiedades barrera a gases/vapores, propiedades mecánicas y térmicas, anti ignífugo, etc. (Araque, 2014)

Carbonato de calcio: Provee una mejoría en la dureza, viscosidad, estabilidad dimensional y propiedades térmicas, en diversos materiales como; poliolefinas, PET o ácido poliláctico (PLA).

Nanopartículas de óxidos metálicos: entre los más usados tenemos TiO_2 , ZnO y SiO_2 , que son empleados gracias a su capacidad de absorción de rayos UV, dureza, rigidez, propiedades foto catalíticas, propiedades antimicrobianas, colorantes, etc.

Nanopartículas metálicas: en este grupo se encuentran: el zinc, la plata, y el oro. Éstos

presentan propiedades catalíticas, antifricción y desgaste, propiedades antimicrobianas, propiedades barreras, etc. Además son usados por sus propiedades eléctricas y magnéticas, como por ejemplo en circuitos electrónicos impresos. Entre otras aplicaciones tenemos para para el aumento de rigidez o dureza en superficies.

Grafeno: este producto causa gran interés por las excelentes propiedades mecánicas, estructurales, térmicas y eléctricas que posee el grafito. (Araque, 2014)

Negro de carbono: objeto de estudio por su color, la resistencia mecánica que posee y su capacidad térmica.

Nanocelulosa: suele ser objeto de estudio por sus propiedades mecánicas y sus propiedades biodegradables.

Nanotubos de carbono: es un tipo especial de nanopartícula debido a su estructura, se la define como una lámina de grafito plegada sobre sí misma. Se obtienen nanotubos de distinto diámetro y geometría interna dependiendo del grado de enrollamiento y de cómo se conforma la lámina original. Habitualmente existen tres tipos de CNT:

- Nanotubos monocapa, o SWNTs (Single-Walled Nanotubes) a modo de canuto.
- Nanotubos de doble capa, o DWCNT (Double-wall carbon nanotubes).
- Nanotubos multicapa, o MWNTs (Multi-walled Nanotubes): Su estructura se asemeja a la de una serie de tubos concéntricos.

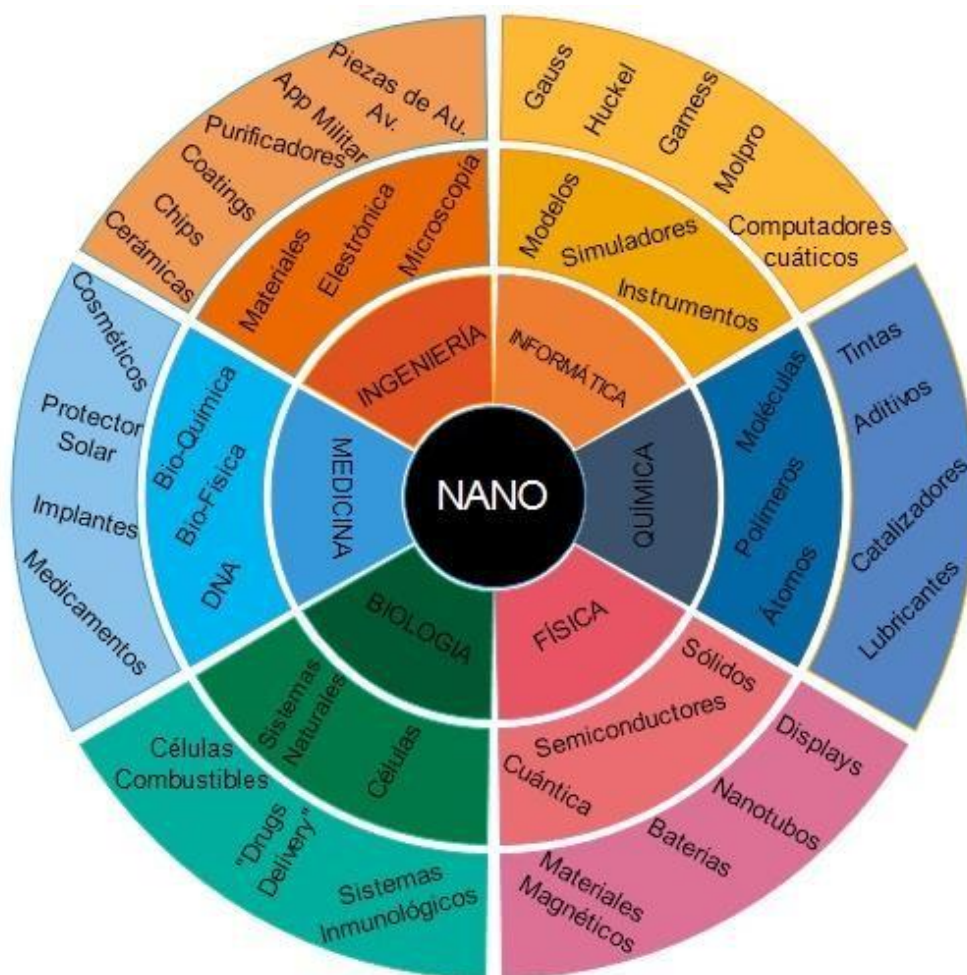
Como consecuencia a la resistencia termo mecánica que suministran a los polímeros, son usados como agentes para reforzar matrices poliméricas como poliésteres, policarbonato,

poliestireno, y también en poliolefinas. Cabe mencionar que se los usa además por su conductividad eléctrica. (Araque, 2014)

En la Figura 1 se muestran las principales aplicaciones de las nanopartículas, en cada subdivisión se muestra el tipo de industria el campo de aplicación y al final tenemos el producto o servicio que se puede obtener al utilizar los nanomateriales.

Figura 1

Aplicación de las nanopartículas en ciertas industrias



Nota. Recuperado de (Martaelm, 2014).

Métodos de obtención

Los materiales en la escala del nanómetro se han producido por varias décadas. El Negro de carbón (material producto de la combustión incompleta de los hidrocarburos), por ejemplo, se ha utilizado en neumáticos desde 1930. Hoy en día, las capacidades de producción de nanomateriales especialmente diseñados han aumentado considerablemente.

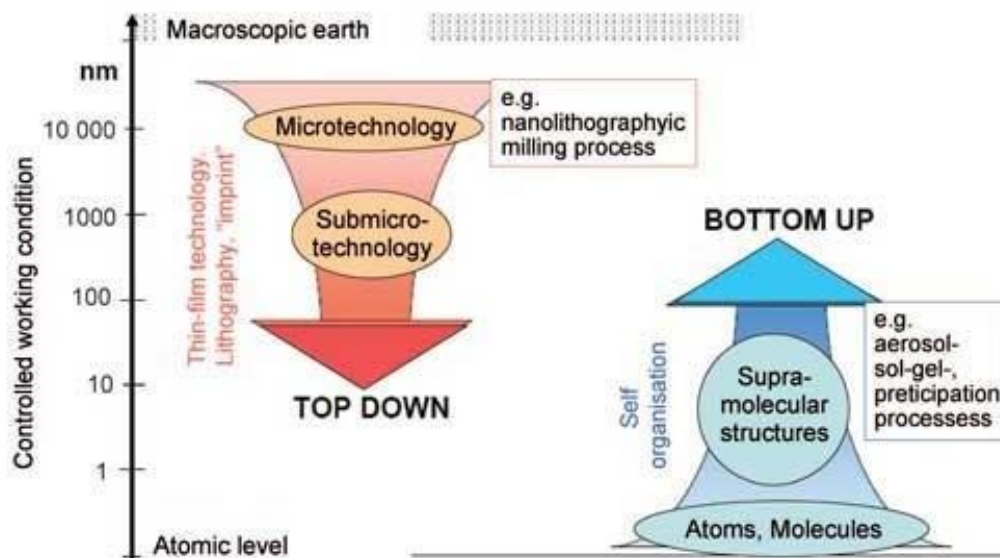
La mayoría de los nanomateriales son producidos sintéticamente y las diversas aplicaciones requieren que las características de las nanopartículas sean definidas con precisión. Se han desarrollado una serie de procesos de producción para satisfacer las formas, composiciones y distribuciones de los tamaños buscados (Santos, 2017).

Para comprender y distinguir los métodos de obtención de las nanopartículas dos términos deben ser explicados y definidos; “de arriba hacia abajo” (Top-Down) y de “abajo hacia arriba” (Bottom-Up). Rápidamente, “de arriba hacia abajo” se refiere a los métodos de fabricación de nano objetos para los cuales se utilizan métodos de obtención macroscópicos (métodos físicos), tales como grabado, deposición, mecanizado, etc.; mientras que “de abajo hacia arriba” refiere a los métodos donde las estructuras se construyen átomo por átomo o molécula por molécula (métodos químicos).

En la Figura 2 y en la Figura 3 se ilustra el proceso de formación de las nanopartículas dependiendo el método utilizado (Top-Down o Bottom-Up). Logramos observar que el tipo de método utilizado permite definir el tamaño e incluso la calidad de la nanopartícula obtenida.

Figura 2

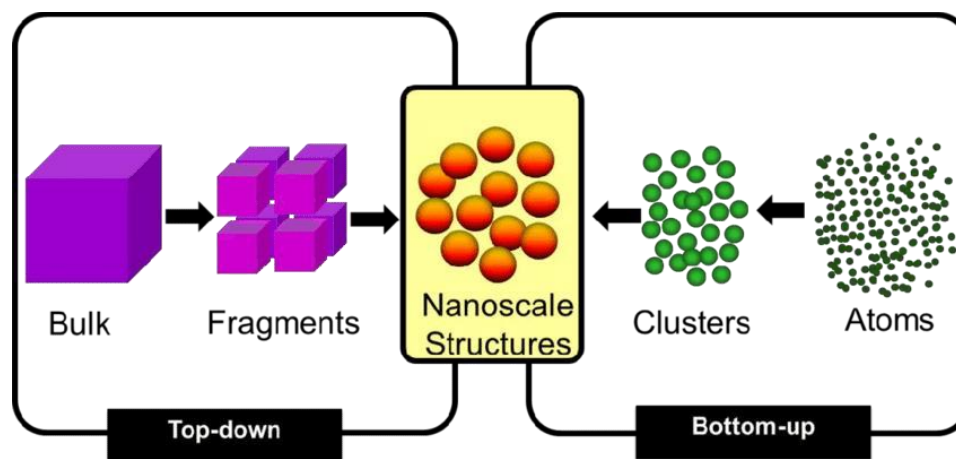
Enfoque de constitución de nanopartículas Top Down y Bottom-Up



Nota. Recuperado de (Scherrer, s.f.)

Figura 3

Diferencia en los métodos de obtención Top-Down y Bottom-Up



Nota. Recuperado de (Scherrer, s.f.)

Método Top-Down

“De arriba hacia abajo” es un método que tiene como punto de partida el material macizo o *bulk* (*top*) que mediante el uso de distintas metodologías (principalmente métodos físicos) es dividido en partículas de menor tamaño (*down*) (Zanella, 2012). Entre las metodologías destacan las siguientes:

Evaporación/ Descomposición térmica: el material *bulk*, en este caso plata metálica, se calienta en un ambiente de vacío (horno cilíndrico) a alta temperatura y presión atmosférica para evaporar o sublimar la plata para obtener partículas de menor tamaño que son llevadas por el flujo de un gas hacia una lámina fría en la cual son depositadas. La principal desventaja de este método es el alto consumo de energía y el largo tiempo requerido para la estabilidad térmica de las nanopartículas. (Arribas Pardo, 2012).

Ablación por láser pulsado (PLD25): El *bulk* se encuentra sumergido en una mezcla de precursores, y cuando se irradia con láser, se calienta inmediatamente para promover la reacción con los precursores en la solución para formar un precipitado esférico con un tamaño de 2-5 nm. La mayor desventaja de este método es que su efectividad depende de muchos factores, como la energía del láser, su frecuencia, longitud de onda, duración del pulso, etc. (Sánchez, 2017)

Elaboración de clusters gaseosos o vaporización laser: El *bulk* es sujeto a un láser de alta potencia en un situación de ultra vacío, dicho vapor compuesto de clusters se coloca en una lámina de óxido monocristalino a partir de una corriente de gas inerte (Zanella, 2012).

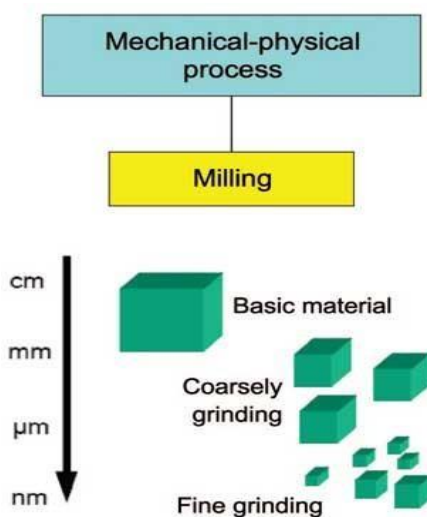
Implementación de iones o pulverización por bombardeo iónico: Consta de la “implantación” de iones (no es necesario la misma identidad que el *bulk*) que pueden afectar la

estructura cristalina del *bulk*, así como afectar sus propiedades químicas o físicas. La implementación de iones se hace por un bombeo de estos mismos a altas energías acelerados electrostáticamente, luego la atomización de este se hace reaccionar con un gas para su posterior deposición produciendo así una capa delgada del nanomaterial sobre una lámina (Zanella, 2012).

Molienda: Este proceso involucra el aditamento del *bulk en* un recipiente cilíndrico con una resistencia mayor al del material que se pretende moler, después de aquello se da la fracturación y división del *bulk* causada por ordenados y continuos impactos y choques de este contra bolas de molienda que son aptos para resistir los impactos y son del mismo material que el recipiente cilíndrico, con este método se obtienen nanocompuestos que poseen formas y tamaños distintos cuya mayor desventaja es la contaminación de la muestra producto del desgaste de las bolas a través del tiempo y el uso que tiene como consecuencia la adición de fragmentos del material de las bolas (Garduño, 2011).

Figura 4

Esquema del proceso Top Down molienda.



Nota. Recuperado de (Santos, 2017)

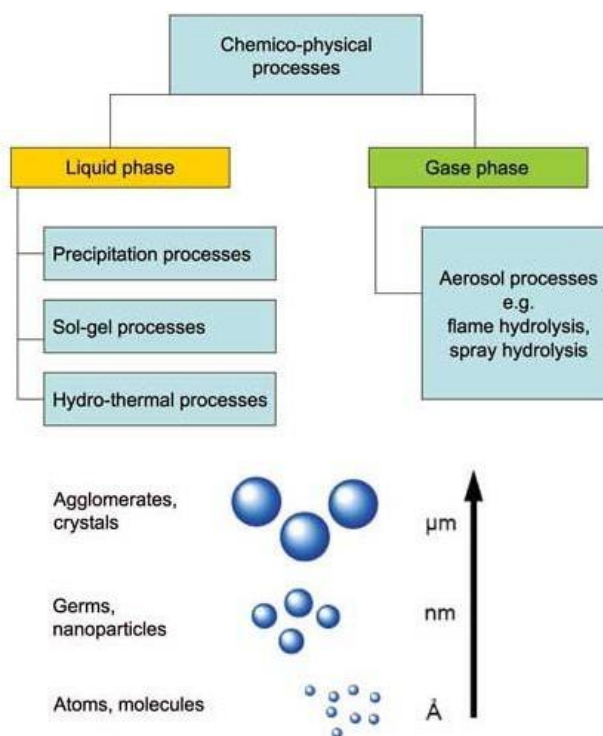
Método Bottom-Up

Los métodos ascendentes se basan en principios fisicoquímicos de auto organización molecular o atómica. Consiste en construir a partir de las menores “piezas de materia” conocidas, como son los átomos y las moléculas, entidades supramoleculares en la escala nanométrica con propiedades específicas y un mejor control del tamaño (Mendoza & Rodríguez, 2007).

En la Figura 5 se muestra los procesos químico físicos de fase líquida o gaseosa para la obtención de nanopartículas (Bottom-Up). Se observa que el proceso da inicio en la escala atómica siendo posible obtener nanomateriales e inclusive cuerpos micrométricos.

Figura 5

Esquema de procesamiento de partículas por método de obtención química



Nota. Recuperado de (Santos, 2017)

Nanopartículas de interés

Oxido de Aluminio – Al₂O₃

El óxido de aluminio (Al₂O₃) también conocido como Alúmina, es un polvo blanco de elevada dureza y resistencia media. Está presente en la naturaleza en forma de corindón y de esmeril. Su obtención puede realizarse de forma sintética a partir de la bauxita (Haynes, 2014).

Se encuentra formado por: 2 átomos de aluminio y 3 átomos de oxígeno

Las principales propiedades del óxido alumínico (Al₂O₃) son:

- Densidad: 3,95 g/cm³
- Masa molar: 101,9 g/mol
- Punto de fusión: 2072 °C
- Punto de ebullición: 2980 °C

Óxido de cobre - CuO

Es el contenido principal del mineral que se lo conoce como Tenorita, fue nombrada por el botánico italiano Michele Tenore, su nombre es en honor al apellido del descubridor. Se suele producir en la intemperie o también en zonas oxidadas relacionadas con los yacimientos primarios más recónditos de sulfuro de cobre, es decir con la crisocola y los carbonatos de cobre, azurita y malaquita. El color gris-negro opaco de la tenorita contrasta potentemente con el veteadado azul de la crisocola. (ECURED, s.f.)

- Densidad: 6,31 g/cm³
- Masa molar: 79,545 g/mol
- Punto de fusión: 12,01 °C
- Punto de ebullición: 2000 °C

Óxido de hierro – Fe₃O₄

El óxido de hierro (Fe₃O₄) también llamado magnetita es un mineral ferrimagnético que atrae un imán y se puede magnetizar para convertirse en un imán permanente. Es el más magnético de todos los minerales naturales que existen en la Tierra. Pequeños granos de magnetita se originan en la mayoría de las rocas ígneas y metamórficas. La magnetita es negra o marrón-negra con un brillo metálico, tiene una dureza Mohs de 5-6 y deja una franja negra (CONCEPTDEFINICION, 2021).

- Densidad: 5,175 g/cm³
- Masa molar: 231,5326 g/mol
- Punto de fusión: 1535 °C

Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono se asemejan a pequeñas placas de grafito enrolladas con diámetros nanométricos y longitudes del orden de micrómetros. Son materiales únicos con excepcionales propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, térmicas y químicas que los hacen adecuados para mejorar muchos productos existentes e incluso crear otros nuevos.

Muchas aplicaciones pueden lograr importantes ventajas en la incorporación de nanotubos de carbono. Para nombrar algunas: materiales compuestos fortalecidos con nanotubos, pantallas planas que hacen uso de nanotubos como emisores de campo, sensores biológicos y químicos para la detección de contaminantes, suministro de fármacos o pilas de combustible. Generalmente, industrias como la electrónica, materiales, química, energía, mecánica, sensores, biotecnología, e instrumentos científicos tendrían la posibilidad de beneficiarse de la introducción de nanotubos de carbono en muchos de sus productos. (MEETTHINGS, 2016).

Nanofluidos

Factores que influyen en la conductividad térmica de nanofluidos

El concepto de agregar pequeñas partículas sólidas a un fluido base para aumentar su conductividad térmica se ha implementado durante 150 años, pero la mayor parte de la investigación inicial se ha llevado a cabo utilizando suspensiones (suspensiones coloidales) de partículas de tamaño milimétrico o micrométrico. Este tipo de suspensión tiene los problemas de estabilidad de la suspensión y la obstrucción de los microcanales del intercambiador por donde circula el fluido debido a la sedimentación de las partículas, lo que limita su aplicación práctica. Sin embargo, con el auge de la nanotecnología en la última década, muchos grupos de investigación han incorporado nanopartículas en fluidos básicos, dando como resultado un nuevo tipo de fluido térmico, los nanofluidos (Segarra, 2020).

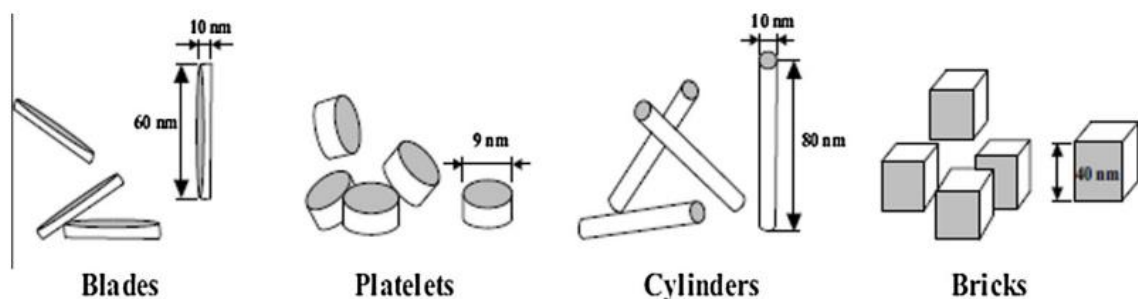
El material de la nanopartícula: Las nanopartículas de materiales con mayor conductividad térmica pueden mejorar en gran medida la conductividad térmica del fluido base, por lo que las nanopartículas a base de carbono (como los nanotubos de carbono y el grafeno) y las nanopartículas metálicas tendrán un mayor impacto que los óxidos metálicos. (Lomascolo, Colangelo, Milanese, & De Risi, 2015). Al agregar nanopartículas de grafeno con una concentración de 0.005 vol% se puede lograr mejoras en la conductividad térmica de hasta 90% (Sadeghinezhad, y otros, 2016), mientras que usando nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos de concentraciones 100 veces más altas a las usadas con grafeno solo se alcanzan mejoras de 50% y para los óxidos metálicos es solo de 25% (Godson, Raja, Lal, & Wongwises, 2010). Es por esto que es conveniente realizar estudios en nanofluidos de materiales basados en carbono, metales y en híbridos de carbono-metal. Hajjar y otros, estudiaron la conductividad térmica del óxido de grafeno (GO) usando agua como fluido base, obteniendo para la

concentración más alta de 0,25 wt% un aumento de 33,9% a 20°C y 47,5% a 40°C (Hajjar, Rashidi, & Ghozatloo, 2014).

Concentración de las nanopartículas: Un aumento en la concentración de nanopartículas en un nanofluido aumenta la conductividad térmica obtenida por el fluido. El uso de diferentes materiales particulados como el óxido de aluminio (Chandrasekar, Suresh, & Senthilkumar, 2012), óxido de zinc (Akbarzadeh, Farhadi, Sedighi, & Ebrahimi, 2014) y grafeno (Sadeghinezhad, y otros, 2016) lo han demostrado.

Tamaño de las nanopartículas: la reducción del tamaño de las partículas aumentará la conductividad térmica del nanofluido porque aumentará el área de superficie de la partícula. Sin embargo, se pueden llegar a medidas extremas, en cuyo caso este efecto se puede revertir, pues si se produce una mayor reducción de las nanopartículas, su diámetro será menor que la trayectoria libre de fonón; cuasipartícula de calor; provocando una dispersión de este (Suganthi & Rajan, 2017).

Forma de las nanopartículas: La forma que maximiza el área de la superficie es la forma con mayor conductividad térmica porque tienen más espacio para la conducción del calor. En consecuencia, la forma con la mayor superficie corresponde a un cubo, seguida de una forma cilíndrica y finalmente una forma esférica. En la Figura 6 se muestran algunas de las diferentes formas que se han estudiado (Lomascolo, Colangelo, Milanese, & De Risi, 2015).

Figura 6*Formas de nanopartículas*

Nota. Recuperado de (Kumar Verma & KumarTiwari, 2015)

Estabilidad nanofluidos

La estabilidad del nanofluido es el criterio básico para la selección de un termofluido, ya que si el nanofluido es inestable, las nanopartículas se aglomerarán, dándoles una mayor tendencia a depositarse, lo que reducirá el rendimiento de calor y radiación. Además, cuando se utiliza en pequeños dispositivos electrónicos, la precipitación de partículas también puede ocasionar problemas de desgaste de tuberías y bloqueo de microcanales (Martínez, 2016).

Hay varios factores que afectan la estabilidad del nanofluido, como la concentración, las características de la nanopartícula (como la forma y el tamaño), el fluido base utilizado y el valor de pH. Cuanto mayor es la concentración de nanopartículas, menor es la distancia entre ellas, por lo que es más probable que choquen y, por lo tanto, se aglomeren. Las formas de nanopartículas con áreas de superficie más grandes tienden a aglomerarse más fácilmente debido a su mayor potencial de colisión. El fluido de base polar contiene iones que permiten que se forme una capa eléctrica en cada nanopartícula, provocando así la repulsión entre dos nanopartículas adyacentes. El cambio de pH puede controlar la concentración de iones en el

fluido, por lo que está directamente relacionado con la fuerza repulsiva entre partículas (Yu, Chen, Liang, Xu, & Lee, 2017).

Correlaciones teóricas para determinar características de los nanofluidos

Hay dos razones por las que los nanofluidos mejoran la transferencia de calor: una es que las partículas en suspensión aumentan la conductividad térmica de la mezcla de dos fases; la otra es que el movimiento caótico de las partículas ultrafinas acelera el proceso de intercambio de energía en el fluido. El nanofluido se comporta más como un fluido que las mezclas convencionales sólido-fluido donde se suspenden partículas relativamente grandes con un tamaño de orden micrométrico o milimétrico. El nanofluido es un fluido de dos fases por naturaleza y tiene algunas características comunes de las mezclas sólido-fluido. Los efectos de diversos factores como la gravedad, la fuerza browniana y la fuerza de fricción entre el fluido y las partículas sólidas ultrafinas, los fenómenos de difusión, la sedimentación y la dispersión browniana pueden coexistir en el flujo principal de un nanofluido. Esto significa que la velocidad de deslizamiento entre el fluido y las partículas puede no ser cero, incluso si las partículas son ultrafinas. El aumento de las tasas de intercambio de energía en el fluido se debe al movimiento irregular y aleatorio de las partículas, es decir, se origina la dispersión térmica en el flujo del nanofluido. La dispersión en caliente enderezará el transporte de temperatura y hará que el ángulo de temperatura entre el líquido y la pared se module progresivamente, expandiendo la velocidad del movimiento del calor entre el fluido y la pared. Visiblemente, la dispersión en caliente necesita un trabajo significativo para mejorar el movimiento del calor. Por lo que, no es apropiado que la información numérica del movimiento de calor de los nanofluidos se corresponda con las estructuras comunes de los líquidos de una sola etapa (Qiang & Yimin, 2002).

Correlación teórica para determinar la conductividad térmica del nanofluido

La conductividad térmica del nanofluido es función de varios factores, como las partículas (tamaño, forma y material), el material del fluido base, la aglutinación, la acidez (pH), los aditivos y la temperatura (Gupta & Singh, 2017).

El primer modelo para explicar las mejoras en la conductividad térmica observadas en fluidos que contienen pequeñas partículas esféricas fue desarrollado por Maxwell (Poinern, Brundavanam, Fung, Fawcett, & Chamsa-ard, 2017). El modelo Maxwell está diseñado para pequeñas concentraciones de pequeñas partículas esféricas no interactivas dispersas en un material isotrópico homogéneo continuo. La conductividad térmica efectiva (k_{nf}) de los nanofluidos se determina mediante la ecuación a continuación, que integra las conductividades térmicas de la fase sólida (k_{np}) y del fluido (k_{fb}). Mientras que la fracción de volumen es ϕ y β expresa la relación de conductividades térmicas ($\beta = k_{np} / k_{fb}$).

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + \frac{3(\beta - 1)\phi}{(\beta + 2) - (\beta - 1)\phi} \quad (1)$$

Se observa que en la ecuación anterior, los factores más importantes son la conductividad térmica de los dos periodos del nanofluido y la agrupación volumétrica de las nanopartículas. Sin embargo, para las propiedades de conductividad térmica extremadamente alta de las nanopartículas ($k_{np} \gg k_{fb}$), la expansión de la conductividad del nanofluido es solo un elemento del método volumétrico. Físicamente, este comportamiento se aclara por la forma en que la temperatura de la nanopartícula se mantiene estable, lo que provoca una condición de frontera similar para el estado del flujo de calor en el líquido que la incluye (Chaupis & Edher, 2013).

Correlación teórica para determinar la viscosidad del nanofluido

Otra propiedad importante para el uso útil de los nanofluidos es la viscosidad, que por su proximidad a las nanopartículas sufre un ajuste en relación a la consistencia del líquido base. Un nanofluido progresivamente viscoso requerirá una mayor capacidad de transferencia de potencia, en condiciones de funcionamiento que son indistinguibles de un fluido de trabajo tradicional (Chaupis J. , 2013). Einstein (Einstein, 1906) fue el primero en construir una relación en la expansión en la consistencia de las suspensiones:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2.5\phi) \quad (2)$$

Donde μ representa la viscosidad y los índices se mantienen. El modelo de Einstein sirvió como base para modelos posteriores como los de Bruijin (Bruijin, 1942), Vand (Vand, 1948), Brinkmann (Brinkman, 1952). Entre ellos, destaca el modelo de Batchelor (Batchelor, 1977), ecuación:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \quad (3)$$

Mientras tanto, el uso de este modelo se ha convertido en conductividad térmica, y los resultados de las pruebas superan la calidad evaluada más allá de lo creíble. Esto ha sido demostrado por Chevalier et al. (Chevalier, Tillement, & Ayela, 2007), que estimó la consistencia de los nanofluidos de óxido de silicio (SiO₂) en el etanol; cuantificó las viscosidades dos veces el primer estímulo para fijaciones moderadamente bajas. Independientemente de los numerosos modelos que se crearon para conductividad y viscosidad, la investigación con información de prueba aún no permite sacar conclusiones sobre cuál de ellos realmente describe los fenómenos térmicos e hidrodinámicos de los nanofluidos. Tenga en cuenta que el modelo Batchelor es el más utilizado entre los modelos regulares para la consistencia de nanofluidos (Batchelor, 1977).

Correlaciones teóricas para determinar la densidad y el calor específico del nanofluido

El calor y la densidad específicos son dos de las principales propiedades de los nanofluidos que influyen significativamente en la tasa de transferencia de calor de los fluidos de trabajo (Saini & Das Agarwal, 2016).

El calor es una porción de la energía térmica que influye evidentemente en la tasa de transferencia de calor de los nanofluidos. La densidad influye de forma justificada en el número de Reynolds, el factor de fricción, la caída de presión y el número de Nusselt (Rudyak & Minakov, 2018). La densidad aumenta aproximadamente de forma lineal con la fracción de volumen de las nanopartículas, mientras que disminuye de manera no lineal con la temperatura del fluido.

Las fórmulas generales de nanofluidos para la densidad según Dehaj y Mohiabadi (Dehaj & Mohiabadi, 2019) y para la capacidad calorífica específica de Zhou et al. (Wang, Zhou, Peng, Du, & Yang, 2010) son los siguientes:

$$\rho_{nf} = \rho_{np}\phi + \rho_{fb}(1 - \phi) \quad (4)$$

$$Cp_{nf} = (1 - \phi)Cp_{fb} + \phi Cp_{np} \quad (5)$$

Transferencia de calor

La termodinámica se puede definir como ciencia energética. Aunque todo el mundo sabe qué es la energía, es difícil definirla con precisión. Se puede pensar en la energía como la capacidad de provocar cambios.

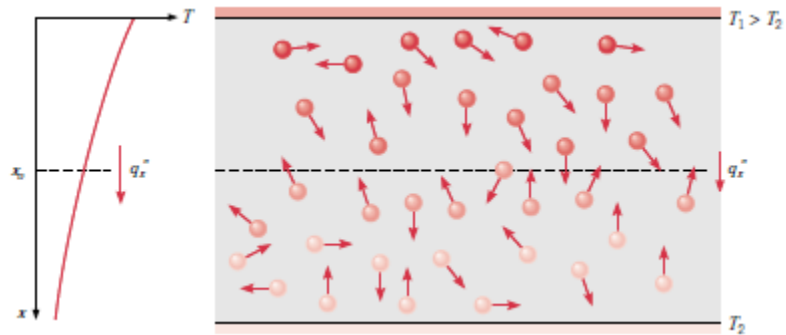
Termodinámica es un término que proviene de las palabras griegas *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza), corresponde a la descripción más antigua de la conversión de energía térmica en energía. Hoy en día, el concepto se ha interpretado ampliamente para incluir todos los aspectos de la energía y su conversión, incluida la generación de energía, la refrigeración y la relación entre las propiedades de la materia (Yunus A. Cengel).

Conducción

La palabra conducción al ser mencionada, debemos recordar de inmediato el concepto de actividad atómica y molecular, porque están procesos en estos niveles que afirman este método de transferencia de calor. Debido a la interacción entre ellos, se considera conducción a la transferencia de energía de las partículas con mayor energía a las partículas con menor energía. Las temperaturas más altas se asocian con energía molecular alta y, cuando las moléculas aledañas chocan, debe ocurrir una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de una diferencia de temperaturas, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir entonces en la dirección de la temperatura decreciente. Esta transferencia es evidente en Figura 7. Las moléculas de abajo y de arriba se cruzan siempre en el plano hipotético en el punto x_0 debido a su movimiento aleatorio. Sin embargo, la molécula superior tiene una temperatura más alta que la molécula inferior, en este caso, es necesaria una transferencia neta de energía en la dirección x positiva. La transferencia neta de energía debida al movimiento molecular aleatorio se designa como la difusión de energía (Frank P. Incropera).

Figura 7

Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debida a la actividad molecular



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

En los líquidos la situación es muy similar, aunque la distancia entre las moléculas es menor, la interacción de las moléculas es más fuerte y frecuente. De manera similar, en los sólidos, la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones reticulares. La visión moderna consiste en atribuir la transferencia de energía a las ondas reticulares provocadas por el movimiento atómico. En los no conductores, la transferencia de energía se produce solo a través de estas ondas reticulares; en los conductores, la transferencia de energía también se debe al movimiento de traslación de los electrones libres (Frank P. Incropera).

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en base a modelos matemáticos apropiados. Estas ecuaciones sirven para calcular la medida de energía transferida por unidad de tiempo. En la conducción de calor, tenemos que la ecuación se conoce como ley de Fourier. En la pared plana unidimensional que se ve en la Figura 7, la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación se enuncia como:

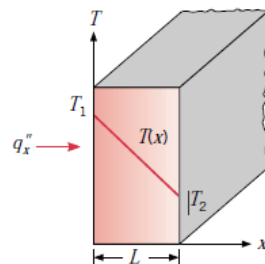
$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

La transferencia de calor por unidad de área q''_x (W/m²) es la tasa a la que el calor se mueve la dirección x por unidad de área perpendicular a la dirección de la transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La constante k , es una conocida como conductividad térmica (W/m. °K) y es una propiedad del material divisor. El signo menos es un resultado de la forma en que el calor se mueve hacia la disminución de la temperatura. El flujo del calor viene a ser:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (7)$$

Figura 8

Transferencia unidimensional de calor por conducción



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

Convección

La transferencia de calor por convección se compone de dos elementos. Además de la transferencia de energía debida a la difusión, la energía también se transfiere por el movimiento general del fluido. El movimiento del fluido está asociado al movimiento conjunto de las moléculas que lo componen. Este movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura,

ayuda a la transferencia de calor. Las moléculas del agregado continúan con su movimiento aleatorio, la transferencia de calor total sucede gracias a la superposición de transporte energético por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento general del fluido. Es habitual utilizar el término convección para designar este transporte acumulado y el término advección para hablar de transporte debido al movimiento volumétrico del fluido.

El estudio de la transferencia de calor por convección da su enfoque en ver el comportamiento entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando estos tienen diferentes temperaturas (Frank P. Incropera).

La ecuación de transferencia de calor por convección corresponde a:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (8)$$

Donde:

q'' es el flujo de calor por convección (w/m^2)

T_s es la temperatura de la superficie

T_∞ es la temperatura del fluido

Cuando se usa la ecuación (8) se supone que el flujo de calor por convección es positivo si el calor se transfiere desde la superficie ($T_s > T_\infty$) y negativo si el calor se transfiere hacia la superficie ($T_\infty > T_s$) Sin embargo, si $T_\infty > T_s$ no hay nada que nos impida expresar la ley de enfriamiento de Newton como

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \quad (9)$$

en este caso la transferencia de calor es positiva hacia la superficie (Frank P. Incropera).

Conservación de la energía para un volumen de control

Para aplicar la primera ley, primero debemos identificar qué es un volumen de control, y es un área del espacio delimitada por una superficie de control a través de la cual pueden pasar la energía y la materia. Una vez que se identifica el volumen de control, se debe proporcionar una base de tiempo adecuada. Hay dos posibilidades. Dado que la primera ley debe cumplirse en cada punto en el tiempo t , una opción es formular la ley sobre la base de la velocidad, es decir, en cada punto en el tiempo debe haber un equilibrio entre todas las velocidades de energía medidas en Jules por segundo (W). Alternativamente, la primera ley también debe cumplirse en cada intervalo de tiempo Δt . Para este intervalo debe haber un equilibrio entre las cantidades de todos los cambios de energía medidos en Jules (Frank P. Incropera).

Una forma general del requerimiento de conservación de la energía se expresa entonces en una base de velocidades como

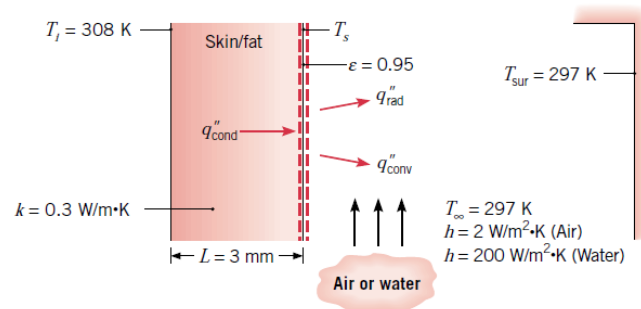
$$E_{ent} + E_g - E_{sale} = \Delta E_{atm} \quad (10)$$

Balance de energía en una superficie

A menudo tenemos la oportunidad de aplicar el requisito de ahorro de energía a la superficie de un medio. En este caso particular, la superficie de control no incluye masa ni volumen y se muestra como se muestra en la Figura 9. En consecuencia, las condiciones de generación y almacenamiento para la expresión de conservación, Ecuación (10), ya no son relevantes y solo necesitan lidiar con el fenómeno superficial. En este caso, la necesidad de conservación se convierte en:

Figura 9

Balance de energía para conservación en la superficie de un medio.



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

$$E_{ent} - E_{sale} = 0 \quad (11)$$

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0 \quad (12)$$

Sistemas radiales

Los sistemas cilíndricos y esféricos a menudo experimentan gradientes de temperatura solo en la dirección radial y, por lo tanto, se tratan como unidimensionales. Además, estos sistemas se analizan en condiciones de estado estacionario sin generación interna de calor utilizando el método estándar, que comienza con la forma apropiada de la ecuación de calor, o el método alternativo, que comienza con la forma apropiada de la ley de Fourier (Frank P. Incropera).

Un cilindro hueco en cuyas superficies pasan los fluidos internos y externos con diferentes temperaturas en condiciones de estado estacionario sin la generación de calor, la ecuación es:

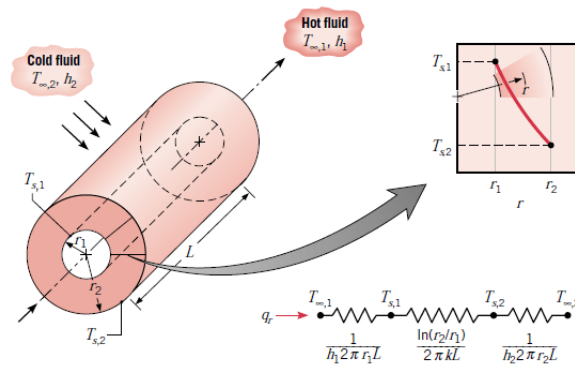
$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (13)$$

La rapidez en que la energía se conduce a través de cualquier superficie cilíndrica se expresa como:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (14)$$

Figura 10

Circuito térmico equivalente para cilindro hueco



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

Formula general para conducción en superficies cilíndricas:

$$q_r = -2\pi Lk \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (15)$$

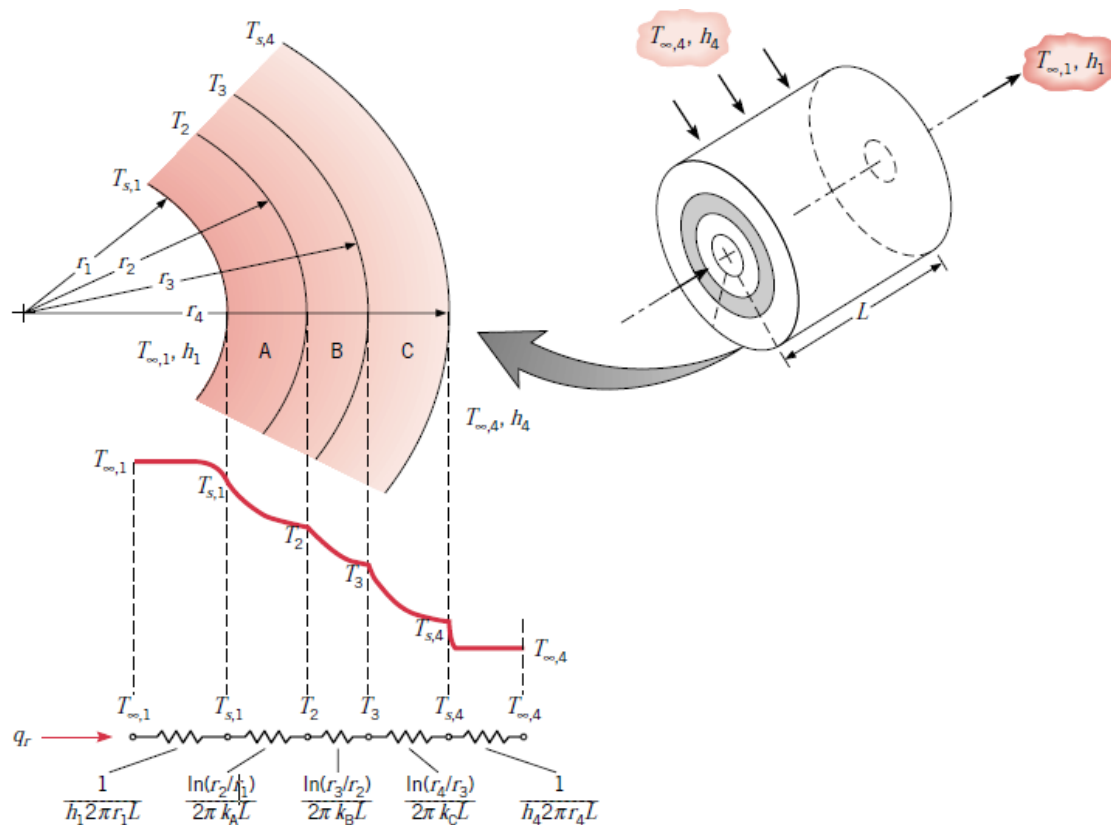
Formula de la resistencia térmica por conducción en superficies cilíndricas:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (16)$$

Para el caso de paredes compuestas cilíndricas

Figura 11

Circuito térmico equivalente para paredes cilíndricas compuestas



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} \quad (17)$$

Capa limite

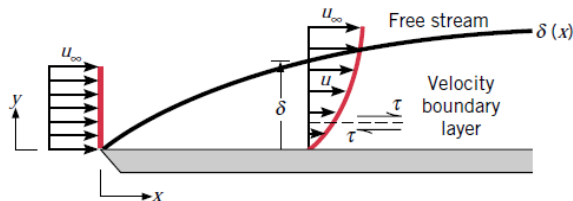
Si se considera un flujo de un fluido sobre una superficie sólida que no es porosa o más bien impermeable al líquido, se puede observar que el fluido en movimiento tiende a detenerse completamente en la superficie y por ello toma velocidad cero, es decir en otras palabras, cuando el fluido entra en contacto con la superficie, se adhiere debido a las fuerzas viscosas que

ocurren cuando entra en contacto con la superficie, esto se llama condición de no deslizamiento.

La capa adherida a la superficie cumple la función de retardar la capa siguiente o adyacente debido a la viscosidad que presenta cada una de ellas, de manera que cada capa cumple la función de retardar la siguiente y así sucesivamente, de esta manera, la capa límite se define como el área de flujo que se encuentra adyacente a la superficie donde afecta la viscosidad y, por lo tanto, las variaciones de velocidad son considerables. Cuando la primera capa del fluido toca la superficie, es decir, la capa adyacente a la superficie tiene una velocidad relativa de cero con respecto a la superficie (Frank P. Incropera).

Figura 12

Desarrollo de la capa límite de velocidad o hidrodinámica sobre una placa plana



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

Flujo interno y flujo externo

Clasificando el flujo de fluido en interno y externo. El flujo interno es cuando forzamos al líquido a moverse entre superficies limitadas como tuberías. En cambio, un flujo externo es cuando el fluido transitará sobre una superficie como una placa o un canal.

En general, estos dos tipos de flujo se muestran en los intercambiadores de calor ya que existen intercambiadores de calor que utilizan múltiples tubos internos por los que se va a

descargar el fluido, así como fluidos transportados a través del exterior de los tubos que funcionan para obtener el proceso de convección.

Flujo laminar y flujo turbulento

Se puede diferenciar el flujo laminar del turbulento simplemente mirando una columna de humo, cuando la columna de humo recién comienza a salir, se observa que el flujo de humo tiene líneas suaves que son bastante ordenadas y continuas hasta después de cierto tiempo la altura comienza a desordenarse, presentándose en forma de fluctuaciones o con movimientos muy alterados, el primer caso en el que el flujo es continuo se conoce como flujo laminar, mientras que cuando el flujo presenta cambios de forma y aumento de velocidad se conoce como flujo turbulento.

Número de Nusselt

En honor al señor Wilhelm Nusselt quien realizó grandes aportaciones a la transferencia de calor por convección en la primera mitad del siglo XX se creó el Número de Nusselt con el objetivo de reducir las variables y dimensiones en las ecuaciones y reemplazarlas por números adimensionales, es así como al quitar las variables del coeficiente de transferencia de calor h el Número de Nusselt se define como:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (18)$$

Siendo k la conductividad térmica del fluido y L_c es la longitud característica, y en tubos viene a ser el diámetro (D). La ecuación (18) también es utilizada para poder encontrar h teniendo previamente los datos

Por lo tanto, el número de Nusselt representa la mejora en la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en comparación con la

conducción a través de la misma capa. Cuanto mayor sea el número de Nusselt, mayor será la eficiencia del proceso de convección.

Cuando se presentan distintos tipos de flujo en un mismo sistema es indispensable usar ecuaciones que permitan tener un mejor análisis por lo que la ecuación general queda limitada y es indispensable recurrir a ecuaciones que reflejen mejor el comportamiento; es así como las ecuaciones de Dittus-Boelter y Sieder-Tate se aplican fácilmente y son ciertamente satisfactorias para los propósitos de un mejor análisis, su uso puede ocasionar errores de hasta un 25%. Estos errores pueden reducirse con el uso de correlaciones más recientes, pero que por lo general son mucho más complejas, como lo es la correlación de Gnielinski. Esta ecuación es válida para tubos donde se evidencia un amplio rango de números de Reynolds, incluida la región de transición.

Gnielinski:

$$\text{Nu} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (\text{Re} - 1000) \cdot \text{Pr}}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (19)$$

Dónde: Pr es el número de Prandtl, Re es el número de Reynolds y f es el factor de fricción.

$$f = (0.790 \cdot \ln(\text{Re}_c) - 1.64)^{-2} \quad (20)$$

Ecuación válida para:

$$0.5 \leq \text{Pr} \leq 2000 \quad (21)$$

$$3000 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^6 \quad (22)$$

Número de Prandtl

El número Prandtl se utiliza para definir el espesor relativo entre la capa límite de velocidad y la capa térmica, en sí mismo es un número adimensional que indica la relación entre la difusividad de momento mejor conocida como viscosidad y la difusividad térmica. Podemos anotar la siguiente fórmula:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (23)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática, α es la difusividad térmica, C_p es la capacidad calorífica a presión constante, μ es la viscosidad dinámica y k es la conductividad térmica.

Tabla 2

Rangos típicos de los números de Prandtl para fluidos comunes

FLUIDO	Pr
Materiales líquidos	0.004 – 0.03
Gases	0.7 – 1
Agua	1.7 – 13.7
Fluidos orgánicos ligeros	5 – 50
FLUIDO	Pr
Aceites	50 – 100000
Glicerina	2000 - 100000

Nota. Recuperado de (Yunus A. Cengel)

Número de Reynolds

El número de Reynolds se conoce como la relación entre las fuerzas de inercia del fluido y las fuerzas viscosas del fluido. La transición de flujo laminar a turbulento depende de varios factores como la velocidad del flujo, su temperatura, el tipo de fluido, la temperatura de la superficie, la geometría de la superficie, su temperatura y entre otros factores. Es por ello por lo que Osborn Reynolds, habiendo realizado varios estudios significativos sobre el comportamiento de los fluidos, determina la relación de las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas, estableciendo así el número de Reynolds que viene dado por la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (24)$$

Donde L_c es la longitud característica viene a ser el diámetro (D) de la tubería por el que circula el fluido. V es la velocidad del fluido y μ es la viscosidad dinámica. Una manera simplificada de la fórmula de Reynolds la podemos obtener si reemplazamos la velocidad del fluido:

$$V = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} \cdot (\rho) \cdot D^2} \quad (25)$$

Y obtenemos una fórmula de Reynolds reducida:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi \cdot (D) \cdot \mu} \quad (26)$$

Intercambiadores de calor

En muchas aplicaciones de ingeniería, existe un proceso de intercambio de calor entre dos fluidos con diferentes temperaturas, y estos fluidos están separados por una pared sólida. El

equipo utilizado para este intercambio se denomina *intercambiador de calor* y puede encontrar aplicaciones específicas en calefacción y aire acondicionado de espacios, generación de energía, recuperación de calor residual y ciertos tratamientos químicos (Frank P. Incropera).

Es importante anotar que, en los intercambiadores de calor, la transferencia de calor se da por convección en cada fluido y por conducción en la superficie que los separa, por esto mismo es importante trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total U que toma en consideración todos los procesos de transferencia.

Tipos de un intercambiador de calor

Existen variedad de formas de clasificar los intercambiadores de calor como, por ejemplo:

Por sus componentes:

- Tubos concéntricos
- Tubos y coraza
- De placas

Otra forma puede ser por el flujo:

- Flujo paralelo
- Flujo contracorriente
- Flujo cruzado

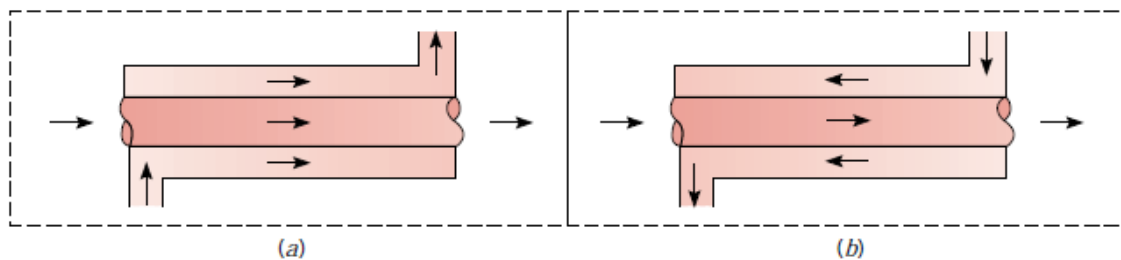
Intercambiador de calor de tubos concéntricos

Este intercambiador es nombrado como el más básico de los intercambiadores de calor en el cual los fluidos interactuantes se mueven en dirección paralela u opuesta a través de tubos concéntricos o también denominado doble tubo. Debido a estas direcciones se conoce como flujo paralelo cuando el ingreso del flujo es por el mismo extremo y fluyen en la misma dirección hacia su evacuación, caso contrario se conoce como contracorriente.

Tales intercambiadores de calor se utilizan en situaciones de transferencia de calor líquido-líquido; entre una de sus ventajas se encuentra su sencillo diseño y montaje; no obstante, su desventaja viene de la pequeña superficie de transferencia de calor no es aplicable para un uso industrial muy amplio donde se requiere mayor transferencia de calor y su mantenimiento es más cauteloso por el riesgo de fugas en sus elementos (Frank P. Incropera).

Figura 13

Intercambiadores de calor de tubos concéntricos. (a) Flujo paralelo. (b) Contraflujo.



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

Intercambiador de calor de tubo y coraza

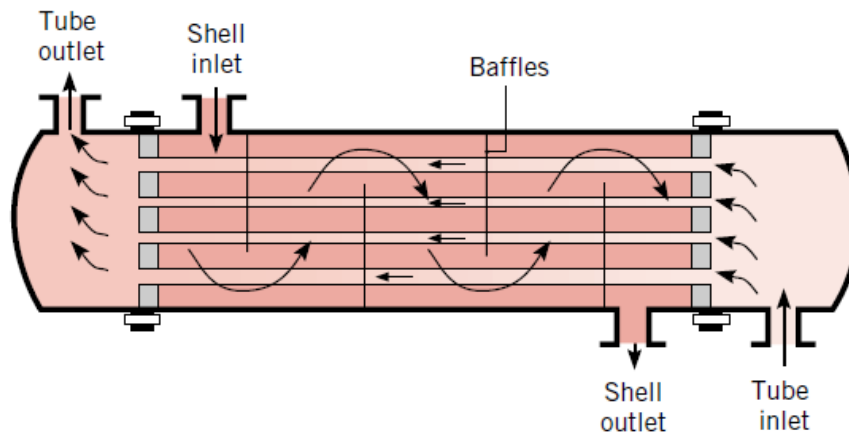
Este tipo de intercambiadores quizás sean los más utilizados en aplicaciones industriales contando con un gran número de tubos distribuidos de forma paralela en un casco. La transferencia de calor se presenta a medida que uno de los fluidos se mueve por la coraza y el otro por dentro de los tubos.

La transferencia de calor mejora con el uso de deflectores quienes son los que hacen forzar el paso del fluido haciéndolo turbulento para aumentar esta transferencia de calor.

Los intercambiadores de tubo y coraza se pueden clasificar dependiendo la dirección del flujo en paralelo o contraflujo, pero también es común clasificarlos por el número de pasos (Frank P. Incropera).

Figura 14

Intercambiador de calor tubo y coraza



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

Coeficiente global de transferencia de calor

Dicho coeficiente se encuentra definido en términos de la resistencia térmica total de transferencia de calor entre dos fluidos, el coeficiente se lo determina al tomar en cuenta las resistencias de convección y conducción que tiene el fluido cuando se encuentra separado por paredes planas o cilíndricas compuestas. Es importante tener en cuenta que este valor se aplica en superficies sin aletas.

En el funcionamiento de normal de un intercambiador de calor surgen situaciones en las que se forman impurezas y dichas impurezas representadas en láminas o películas sobre la superficie logran aumentar considerablemente la resistencia a la transferencia de calor entre los fluidos, para ello es común utilizar un factor de resistencia adicional denominado factor de impureza R_f . Este factor es dependiente de algunos factores como la temperatura de operación, velocidad del fluido y el tiempo de funcionamiento que presente el intercambiador de calor (Frank P. Incropera).

Los factores de impureza más representativos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3

Factores de impureza representativos

FLUIDO	R_f'' ($m^2 \cdot K/W$)
Agua de mar y agua tratada para alimentación de una caldera (por debajo de 50°C)	0.0001
Agua de mar y agua tratada para alimentación de una caldera (por arriba de 50 °C)	0.0002
Agua de río (por debajo de 50 °C)	0.0002-0.001
Aceite de motor	0.0009
Líquidos refrigerantes	0.0002
Vapor (no aceitoso)	0.0001

Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

El término conducción de pared se ignora a menudo porque generalmente se usa una pared delgada de alta conductividad. También a menudo, uno de los coeficientes de convección es más bajo que el otro y es por esta razón que se determina el coeficiente general de transferencia de calor. Tomando como ejemplo que uno de los fluidos es un gas y el otro fluido es un líquido; o está presente una mezcla líquido-vapor, el coeficiente de convección del fluido gaseoso es mucho menor que el del fluido líquido, para ello y para aumentar el coeficiente de

convección del gas se utilizan aletas. Los valores representativos del coeficiente de transferencia de calor general se muestran a continuación:

Tabla 4

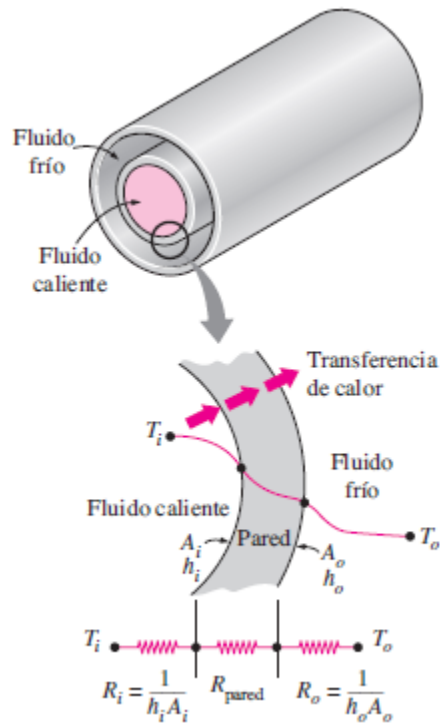
Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor

COMBINACION DE FLUIDOS	U(W/m²*K)
Agua con agua	850 - 1700
Agua con aceite	110 - 350
Condensador de vapor (agua en tubos)	1000 - 6000
Condensador de amoníaco (agua en tubos)	800 - 1400
Condensador de alcohol (agua en tubos)	250 - 700
Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25 - 50

Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

Figura 15

Analogía térmica de un intercambiador de calor de tubo doble



Nota. Recuperado de (Frank P. Incropera)

El coeficiente de transferencia de calor global se puede determinar sobre la base del conocimiento de los coeficientes de convección para fluidos fríos y calientes, factores de contaminación y parámetros geométricos adecuados.

La fórmula usada para el presente trabajo experimental fue la siguiente:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} \quad (27)$$

$$U_{int} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{A_{int} * \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2 * \pi * k * L} + \frac{A_{int}}{A_{ext} * h_{ext}}} \quad (28)$$

Dónde: las superficies interna y externa del tubo a los subíndices i y o respectivamente, y donde $A_i = \pi \cdot D_i \cdot L$ y $A_o = \pi \cdot D_o \cdot L$. Además, el siguiente gráfico muestra una red de resistencias térmicas asociadas con la transferencia de calor de un intercambiador de calor de doble tubo.

Análisis de los intercambiadores de calor

El objetivo del diseño del intercambiador de calor es que un experto en la técnica pueda seleccionar un intercambiador de calor para lograr un cambio de temperatura particular y también predecir las temperaturas de los fluidos de entrada y salida del intercambiador de calor. Calor, si un experto en la técnica necesita poder disipar el calor transferido (q) que define el coeficiente de transferencia de calor global. Determinar las temperaturas de entrada y salida al intercambiador de calor teniendo en cuenta la transferencia de calor insignificante entre el dispositivo y el entorno y finalmente determinar los cambios en el potencial y la energía cinética; Para un balance energético, se pueden expresar las siguientes ecuaciones:

$$q = \dot{m}_h(i_{h,i} - i_{h,o}) \quad (29)$$

$$q = \dot{m}_c(i_{c,i} - i_{c,o}) \quad (30)$$

La entalpía del fluido está representada por la letra i , los índices h y c se refieren a fluidos calientes y fríos (cold and hot), los índices (i) , (o) indican las condiciones de entrada y salida del fluido (input and output).

Si los fluidos no muestran un cambio de fase y se asumen calores específicos constantes, la expresión se reduce a:

$$q_h = \dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (31)$$

$$q_c = \dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (32)$$

Las temperaturas se denominan temperaturas medias del fluido en las posiciones en las que se encuentran. Debe tenerse en cuenta que las ecuaciones descritas son independientes de la disposición del flujo y del tipo de intercambiador de calor (Frank P. Incropera).

Se puede expresar de otra manera relacionando la transferencia de calor total q con la diferencia de temperatura ΔT entre el fluido caliente y el frío, teniendo:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (33)$$

Para el experimento la capacidad de intercambio de calor promedio de un fluido térmico (aceite) a un fluido frío (nanofluidos) se define como:

$$Q = \frac{q_h + q_c}{2} \quad (34)$$

Hay dos métodos utilizados para el análisis de intercambiadores de calor, el primero es la diferencia logarítmica media de temperatura (DMLT) y el segundo es el método de efectividad. El método de la LMTD resulta muy adecuado para la determinación del tamaño de un intercambiador de calor con el fin de dar lugar a las temperaturas prescritas de salida cuando se especifican los gastos de masa y las temperaturas de entrada y de salida de los fluidos caliente y frío. Con el método de la LMTD, la tarea es seleccionar un intercambiador que satisfaga los requisitos prescritos de transferencia de calor.

Análisis del intercambiador de calor - método de efectividad ϵ

Pero también se introdujo otra situación de análisis, en este caso, la tarea es determinar el rendimiento de transferencia de calor de un intercambiador de calor específico, o determinar si los intercambiadores de calor disponibles en el almacén pueden hacer el trabajo. El método LMTD aún se puede aplicar a este problema alternativo, pero el proceso requiere iteraciones

tediosas, por lo que no es práctico. Con el fin de eliminar las iteraciones para resolver estos problemas, Kays y London introdujeron un proceso llamado método de efectividad en 1955, que simplificó enormemente el análisis de los intercambiadores de calor. Este método se basa en un parámetro adimensional llamado efectividad de la transferencia de calor ε definido como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{\text{Razón de la transferencia de calor real}}{\text{Razón máxima posible de la transferencia de calor}} \quad (35)$$

La razón de la transferencia de calor real de un intercambiador de calor se puede determinar con base en un balance de energía en los fluidos caliente y frío y se puede expresar como:

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,sal} - T_{c,ent}) = C_h(T_{h,ent} - T_{h,sal}) \quad (36)$$

En donde $C_c = \dot{m}_c \cdot c_{pc}$ y $C_h = \dot{m}_h \cdot c_{ph}$, son las razones de capacidad calorífica de los fluidos fríos (cold=c) y caliente (hot=h). Para un análisis rápido según CENGEL se puede considerar lo siguiente para la aplicación de las formulas:

$$\text{Sí } C_{min} = C_c \quad \varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{C_c(T_{c,sal} - T_{c,ent})}{C_c(T_{h,ent} - T_{c,ent})} \quad (37)$$

$$\text{Sí } C_{min} = C_h \quad \varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{C_h(T_{h,ent} - T_{h,sal})}{C_h(T_{h,ent} - T_{c,ent})} \quad (38)$$

Pérdidas de presión

La pérdida de presión en un intercambiador de calor es un factor muy importante en la medida en que se requiere su diseño. Puede haber varios factores limitantes, como el factor económico en términos de costos de bombeo o debido a las limitaciones del proceso. En

algunos casos las limitaciones suelen ser ambas, para ello es de gran importancia realizar los respectivos cálculos de caída de presión para el diseño de los intercambiadores de calor.

El objetivo del diseño de un intercambiador de calor es que esté diseñado para evitar caídas de presión improductivas tanto como sea posible porque las pérdidas de presión afectan el costo de los intercambiadores de calor. En los intercambiadores de calor se toman dos pérdidas de presión importantes, una es la pérdida de presión en las tuberías y la otra es la pérdida de presión en la carcasa (Frank P. Incropera).

Pérdidas de presión en los tubos

La siguiente fórmula conocida como la ecuación de Darcy es la utilizada para el cálculo de caídas de presión en los tubos:

$$\Delta P_T = f \frac{L}{d_i} x \frac{V^2}{2g} \quad (39)$$

Donde L es la longitud del tubo, d_i es el diámetro interno del tubo, V es la velocidad del flujo interno y es el factor de fricción en el cual:

$$f = \frac{64}{Re} \text{ si } Re < 2000 \quad (40)$$

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \text{ si } Re \leq 2x10^4 \quad (41)$$

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \text{ si } 3000 \leq Re \leq 5x10^6 \quad (42)$$

Pérdidas de presión en la coraza

A la hora de calcular las caídas de presión en la coraza, es necesario tener en cuenta que el fluido que circula por la coraza debe atravesar el casco guiado por los desviadores y pasar por

la ventana o abertura que dejan. Los deflectores deben estar separados por 1/5 del diámetro del casco y 30 pulgadas.

En el caso de la coraza, cuando la cáscara se ve como un tubo, se puede usar la misma fórmula de Darcy expresada anteriormente, con la diferencia de que se usa el diámetro interior de la cáscara (DI):

$$\Delta P_T = f \frac{L}{DI} \times \frac{V^2}{2g} \quad (43)$$

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \text{ si } Re \leq 2 \times 10^4 \quad (44)$$

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \text{ si } 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (45)$$

Donde DI es el diámetro interno del tubo, L es la longitud, g es la gravedad, V es la velocidad del fluido y Re es Reynolds (Frank P. Incropera).

Aplicaciones en la industria

Hay varias razones por las que los intercambiadores de calor se utilizan en la industria, si son muchas las aplicaciones industriales en las que participan los intercambiadores de calor, que se describirán a continuación en función del tipo de intercambiador de calor que se desee utilizar.

Intercambiadores de doble tubo.

- Se utiliza para trabajar en aplicaciones líquido-líquido y en general para procesos donde no se pueden utilizar intercambiadores de calor de placas.
- Industrias alimentaria, química, petroquímica y farmacéutica.

Figura 16*Intercambiadores de doble tubo*

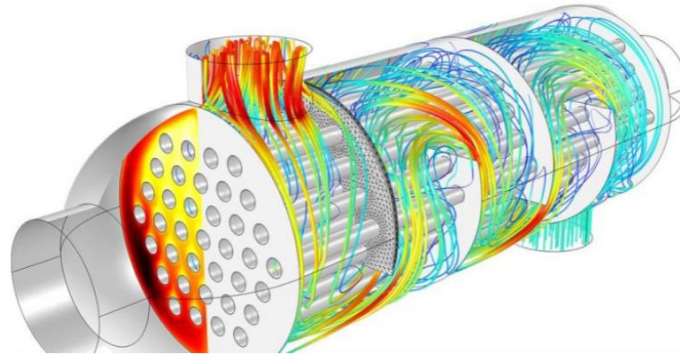
Nota. Recuperado de (Sacome, 2019)

Intercambiadores de tubo y coraza.

- Vapor / agua para condensar el vapor y calentar el agua.
- Aceite / agua, para refrigeración de aceite en sistemas de lubricación o hidráulicos y transformadores eléctricos.
- Vapor / fuel oil para calentar fuel oil en tanques de almacenamiento, pozos receptores y estaciones de bombeo.
- Aire / agua, para enfriar el aire como postenfriador para compresor de aire.
- Refrigerante / agua para condensar refrigerante.
- Intercambiadores de calor para procesos químicos y petroquímicos; fabricado en acero al carbono, acero inoxidable y acero especial.
- Radiador (intercambiador de calor para agua de refrigeración con gas de refrigeración) para unidades de agua de refrigeración.
- Intercooler y postenfriador para compresores Atlas Copco.
- Intercooler y Postcooler para compresores Ingellson Rand.

Figura 17

Intercambiador de tubo y coraza.



Nota. Recuperado de (Soutullo, 2018)

Reología

Durante mucho tiempo, los fluidos han recibido una gran atención, porque cuando los humanos comenzaron a estudiar ciertos fenómenos en la tierra, descubrieron que existen varios tipos de líquidos, algunos de los cuales son más viscosos que otros y tienen diferentes propiedades físicas.

Esta persona descubrió que hay dos tipos principales de fluidos, estáticos y en movimiento. Los fluidos estáticos son los más fáciles de explicar porque no tienen movimiento, lo que demuestra que tienen las mismas propiedades en cualquier parte del fluido. Sin embargo, los fluidos en movimiento se dividen en muchas categorías, según su composición, cinemática, características físicas o simplemente en la dificultad del movimiento. Una de las principales características de un fluido en movimiento es la viscosidad, es decir, lo fácil que es fluir en una tubería específica. Dividido en fluido newtoniano (el esfuerzo cortante es proporcional a la relación de deformación) y fluido no newtoniano (el esfuerzo cortante no es proporcional a la deformación). (Escobar, 2017)

Al estudiar estas condiciones del movimiento de los fluidos, Bingham introdujo el término reología en 1929, y se define como el estudio de los principales fenómenos físicos que regulan el movimiento de los fluidos.

En base a la ecuación de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas podemos despejar la fórmula para ver la tasa de corte de los nanofluidos.

$$\mu \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\delta}{\delta r} \left(r \cdot \frac{\delta u}{\delta r} \right) \right] = \frac{\delta P}{\delta x}$$

$$\frac{\delta}{\delta r} \left(r \cdot \frac{\delta u}{\delta r} \right) = r \cdot \frac{\delta P}{\mu \cdot \delta x}$$

$$r \cdot \frac{\delta u}{\delta r} = \frac{r^2}{2\mu} \cdot \frac{\delta P}{\delta x} + C_1$$

$$u = \frac{r^2}{4\mu} \cdot \frac{\delta P}{\delta x} + C_1 \cdot \ln r + C_2$$

Cuando

$$\left. \frac{\delta u}{\delta r} \right|_{r=0} = 0$$

$$\frac{\delta u}{\delta r} = \frac{r^2}{2\mu} \cdot \frac{\delta P}{\delta x} + C_1 \cdot \frac{1}{r} = 0$$

$$C_1 = 0$$

Cuando $u = 0 \xrightarrow{\text{entonces}} r = R$

$$0 = \frac{R^2}{4\mu} \cdot \frac{\delta P}{\delta x} + C_2$$

$$C_2 = -\frac{R^2}{4\mu} \cdot \frac{\delta P}{\delta x}$$

Por lo que considerando la diferencia máxima de presión en 10psi y el radio de análisis en 0.0198m.

$$u = \frac{\delta P}{\delta x} \cdot \frac{1}{4\mu} [r^2 - R^2]$$

$$\frac{\delta P}{\delta x} = \frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{68947.6 \text{ Pa}}{0.6 \text{ m}} = 114912.67 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

$$\frac{\delta u}{\delta r} = \frac{114912.67 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}}{4(1 \times 10^{-3}) \text{ Pa} \cdot \text{s}} [2 \times 0.0198 \text{ m}]$$

$$\dot{\gamma} = \left. \frac{\delta u}{\delta r} \right|_{r=R} = 1137628.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 1.086 \times 10^7 \text{ rpm.}$$

Debido a que el valor obtenido es un número demasiado alto para poder colocarlo en el reómetro, se ha establecido que se ubica en una zona con turbulencia por lo que se ha establecido que para el análisis de los nanofluidos se establecerá en un rango mucho menor comprendido entre 0 a 1000 rpm como máximo para analizarlos.

Capítulo 3: calibración de equipo y preparación

Equipo utilizado

Banco de pruebas de intercambiadores de calor del laboratorio de conversión de energía.

Figura 18

Banco de pruebas de intercambiadores de calor



Tabla 5

Rangos de operación del equipo

FLUIDO	CAUDAL (Lpm)	Temperatura en el tanque (°C)
ACEITE	5 – 25	40 – 90
AGUA	5 – 25	2 – 40

Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor propios del equipo no contaban con aislamiento térmico en su longitud; por lo que se hizo necesario la utilización de otros intercambiadores disponibles en el laboratorio que si dispongan de este aislamiento, con la finalidad de obtener mejores resultados.

Intercambiador de calor concéntrico

Figura 19

Intercambiador concéntrico



Tabla 6

Características del intercambiador de calor concéntrico

PARTES	MATERIAL	DIMENSIONES	MEDIDA (mm)
TUBO INTERNO	COBRE	Diámetro externo (de)	42
		Diámetro interno (di)	39.6
		Longitud efectiva (le)	600
TUBO EXTERNO		Diámetro externo (De)	152
		Diámetro interno (Di)	149.6
		Longitud efectiva (Le)	700

Intercambiador de calor multitubo

Figura 20

Intercambiador Multitubo



Tabla 7

Características del intercambiador de calor multitubo

PARTES	MATERIAL	DIMENSIONES	MEDIDA (mm)
TUBOS INTERNOS (5)	COBRE	Diámetro externo (de)	22
		Diámetro interno (di)	20.2
		Longitud efectiva (le)	600
TUBO EXTERNO ó CARCASA		Diámetro externo (De)	152
		Diámetro interno (Di)	149.6
		Longitud efectiva (Le)	700

Reparaciones

Cambio de sistema de medición de temperatura

Se realizó el cambio de los pernos propios de los intercambiadores que eran de acero, por unos elaborados en Grilon y se colocaron nuevas termocuplas; todo esto debido a que se elaboró un sistema de medición mediante el software ARDUINO para poder tener precisión en la toma de datos de la temperatura.

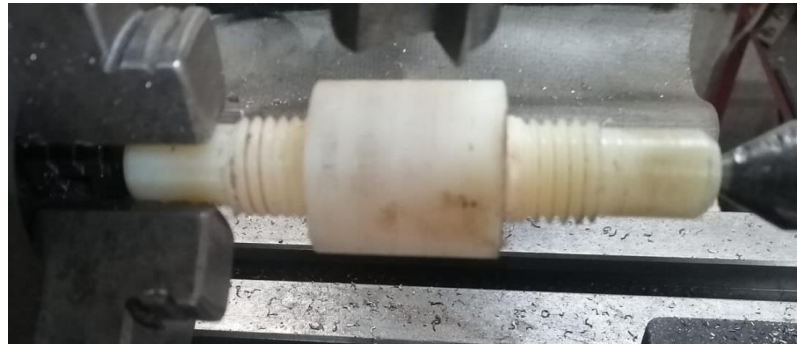
Figura 21

Perno propio de los intercambiadores de calor



Figura 22

Fabricación de los pernos de Grilon

**Figura 23**

Pernos elaborados de Grilon para la colocación de termocuplas

**Figura 24**

Termocupla colocada y pegada en los pernos elaborados



Adecuación de manómetros

Los intercambiadores de calor utilizados contaban con acoples para mangueras que eran conectadas directamente en la máquina para la obtención de datos; sin embargo para los ensayos efectuados fue necesario adecuar los manómetros de forma directa en el intercambiador de calor.

Figura 25

Manómetros adecuados para el ensayo



Limpieza banco de intercambiadores

Se ejecutó una limpieza del tanque de agua del banco de pruebas, debido a que presentaba residuos de óxido en el fondo, de igual manera se realizó una limpieza de las mangueras que se conectan en los intercambiadores de calor.

Limpieza caudalímetros

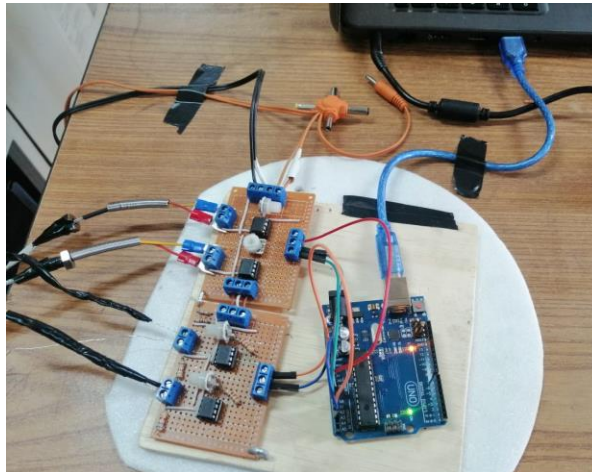
Los caudalímetros del banco de intercambiadores de calor fueron retirados tanto del aceite como del agua, con la finalidad de hacerles una limpieza interna para conseguir una correcta medición de los caudales requeridos en los ensayos.

Arduino

Se elaboró con algunos componentes un circuito, que mediante el software Arduino permita la recolección de datos de la temperatura, con el objetivo de poder tener las cuatro temperaturas en el mismo instante.

Figura 26

Arduino armado y conectado para medir temperaturas



Definición de parámetros

Intercambiador Concéntrico e Intercambiador Multitubo

Para la definición de los parámetros se eligieron conjuntamente variables para ambos intercambiadores de calor, y poder recolectar datos que servirán para el análisis y comparación de resultados.

Caudal Aceite: constante 15 Lpm.

Caudal Agua: Variable, desde 10 Lpm hasta 25 Lpm, en intervalos de 2.5 Lpm, para obtener un total de 7 datos de caudal por ensayo; se recolectaran datos cada minuto, en un total de 10 datos por caudal para poder realizar un promedio.

Datos a ser recolectados

1. Temperatura de entrada y temperatura de salida del agua
2. Temperatura de entrada y temperatura de salida de aceite
3. Presión de entrada y presión de salida de agua
4. Presión de entrada y presión de salida de aceite

Proceso

1. Encender equipo, conjuntamente la resistencia del aceite y el sistema de refrigeración del banco, hasta tener estabilidad de temperaturas.
2. Alistar el intercambiador a ser usado ya sea este paralelo o multitubo, ajustar correctamente cada perno y cada manómetro.
3. Conectar las termocuplas al Arduino y posteriormente al computador. En el código fuente programar para obtener datos cada minuto.
4. Conectar las mangueras del banco al intercambiador de calor. Encender la bomba del aceite como del agua, para dar estabilidad en la lectura de las termocuplas.
5. Abrir y configurar el programa CoolTerm para grabar datos y trasladarlos a Excel. Revisar que cada Termocupla arroje datos coherentes en el programa.
6. Ajustar el caudal del aceite y del agua con los parámetros iniciales. Aceite 15 Lpm, Agua 10 Lpm.
7. Empezar a grabar los datos en el programa CoolTerm, cambiar el caudal progresivamente cada 10min hasta poder obtener 70 datos y parar la grabación.
8. Apagar las bombas del aceite y del agua, para poder cambiar el tipo de flujo en cada intercambiador de calor. Y repetir el proceso para obtener los datos.

9. Cuando se requiera cambiar de intercambiador es necesario desconectar el Arduino, y quitar los pernos de las termocuplas, además de evacuar el líquido contenido en el intercambiador de calor usado, esto se lo debe realizar con mucho cuidado.

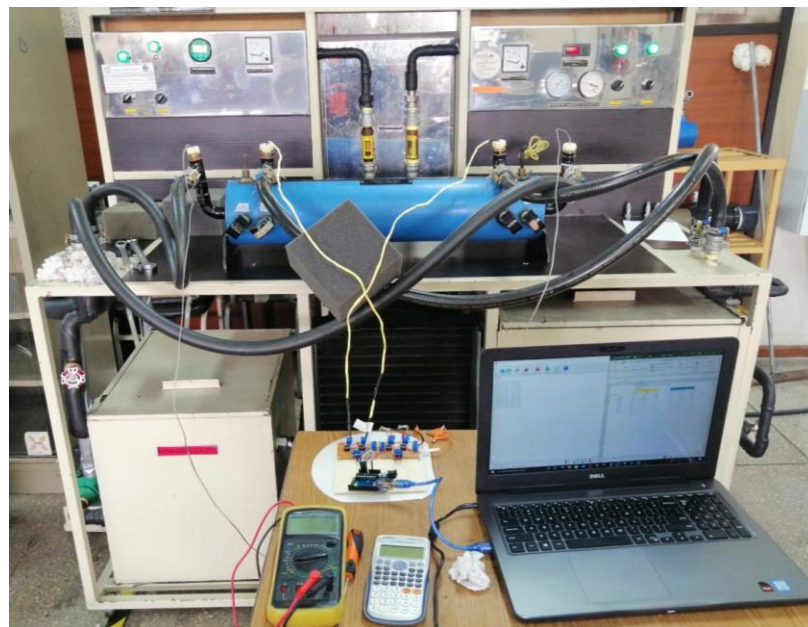
Ensayos de funcionamiento

Se probaron cada uno de los parámetros definidos con anterioridad, además de calibrar cada una de las termocuplas en el Arduino para una correcta adquisición de datos.

Fue necesario la colocación de teflón en cada uno de los pernos que contenían las termocuplas para evitar fugas, se revisó por última vez que no existan fugas tanto en el lado del aceite como en la del agua; para proceder con el inicio definitivo de la toma de datos en el banco de pruebas de intercambiadores de calor.

Figura 27

Ensayo de funcionamiento del banco de pruebas



Preparación de los nanofluidos

Determinación de las concentraciones de porcentaje en peso (%w) para la realización de los nanofluidos en base a la cantidad de fluido en el tanque del equipo disponible en el laboratorio.

- Volumen tanque de agua: 130 litros = 130 000 cm³.

Se utilizó la fórmula general de densidad para poder obtener la masa del fluido y con ello calcular los gramos necesarios para cada concentración que se necesita en los ensayos.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (46)$$

$$m = \rho \cdot v$$

$$m = 1 \frac{g}{cm^3} * 130000cm^3 = 130000 g$$

Las concentraciones elegidas para los ensayos fueron 0.03% y 0.1% en porcentaje de peso (%w)

$$\% = \frac{m_{soluta}}{m_{solucion}} * 100 \quad (47)$$

$$m_{soluta} = \frac{\%}{100} * m_{solucion}$$

Para 0.03%

$$m_{soluta} = \frac{0.03}{100} * 130000g = 39 g$$

Para 0.1%

$$m_{soluta} = \frac{0.1}{100} * 130000g = 130 g$$

Datos de partículas utilizadas

FABRICANTE: Compañía Química Kunshan Yosoar New Materials Co. Ltd - CHINA

Tabla 8

Características de las nanopartículas utilizadas

	Unidades	CuO	Fe ₃ O ₄	Al ₂ O ₃	NTC
DENSIDAD (ρ)	kg/m ³	6310	5175	3961	1400
CALOR ESPECIFICO (Cp)	J/kg*°K	550.5	619.4	875	711
CONDUCTIVIDAD TERMICA (k)	w/m**°K	76.5	6	40	6000
TAMAÑO NANO	nm	20-30	40-100	30	15-25
PUREZA	%	>99	>99.8	>99.99	>97
SUPERFICIE ESPECIFICA (ssa)	m ² /g	30 a 40	10 a 40	9	150-210

Nota: Referencias de los datos: CuO (Caiza & Caiza, 2019); Fe₃O₄ (Vargas, 2011), (Korolev, Arefyev, & Blinov, 2008); Al₂O₃ (GOODFELLOW, s.f.); NTC (Veléz, 2018). Conductividad térmica: (Yanjiao, Tung, Schneider, & Xi, 2009); Características del fabricante (Kunshan Yosoar New Materials Co. Ltd, 2021).

Proceso realizado

Para la elaboración de los nanofluidos se hizo uso del laboratorio de fluidos del DECEM, ya que contaba con los equipos que a continuación se detallaran, conjuntamente con el proceso realizado en cada uno de ellos.

Fluido base

En el tanque de agua se añadieron 13 litros de Etilenglicol representando el 10% del total, es decir obtener en el tanque una solución 90-10 H₂O-EG, de la cual se utilizaron aproximadamente 3.5 litros en cada nanopartícula para poder realizar los nanofluidos, volumen que fue dividido y colocado en vasos precipitados para continuar con la elaboración de las concentraciones.

Pesaje Nanopartículas

Se pesó los 39g y 130g de cada una de las partículas para poder cumplir con las concentraciones en peso definidas 0.03% y 0.1%, fue necesario disponer de papel aluminio con la finalidad de que las nanopartículas puedan depositarse en su totalidad en los recipientes.

Figura 28

Pesaje de las nanopartículas en la balanza electrónica



Nota: La balanza disponible y utilizada fue la Balanza de precisión marca SHIMADZU, modelo: UW2200H.

Agitación Magnética

Para tratar de obtener una mejor estabilidad de las nanopartículas en el fluido base se empieza por realizar una agitación magnética mediante los equipos disponibles en el laboratorio, la agitación se la ejecuto durante 1 hora a 1000 rpm.

Figura 29

Agitadores magnéticos



(A)

(B)

Nota. (A) Thermo Scientific Cimarec SP142025Q placa calefactora de aluminio con agitación, 7 "; 120 VCA; (B) SH-4 Lab Magnetic Stirrer Hot Plate, placa calefactora de cerámica de 19x19cm, 600W, 100 ~ 1600RPM.

Figura 30

Agitación magnética de las nanopartículas con el fluido base en proceso.



Sonicación

Después de la agitación magnética el paso siguiente que se realizó fue una sonicación, la cual fue de 1 hora a una temperatura de 40°C.

Figura 31

Equipo de sonicación



Figura 32

Muestras de los diferentes nanofluidos realizados



Capítulo 4: experimentación

Análisis de incertidumbre

Dentro de los datos tomados está

- El diámetro externo del intercambiador de calor mediante un metro con una precisión de $\pm 0,5$ mm
- La longitud efectiva del tubo externo del intercambiador de calor mediante un metro con una precisión de $\pm 0,5$ mm
- El caudal de aceite mediante un caudalímetro con precisión de $\pm 2,5$ lpm
- El caudal de agua mediante un caudalímetro con precisión de $\pm 2,5$ lpm
- Temperaturas de entrada y salida de los tubos internos como externos mediante termocuplas tipo K con lectura digital con precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$
- Presiones de entrada y salida de intercambiador mediante manómetros de resorte con precisión de ± 2.5 psi

Tabla 9

Incertidumbres de datos

Mediciones	Incertidumbre
Diámetro	$\pm 0,5$ mm
Longitud efectiva	$\pm 0,5$ mm
Caudal	$\pm 2,5$ lpm
Temperatura	$\pm 1^\circ\text{C}$

Mediciones	Incertidumbre
Presión	±2.5 psi
Masa	±0.05 g
Flujo volumétrico	±2.5%
Diferencia de presión ΔP	±2%
Flujo de Calor, Q	±1.25%
Coefficiente de transferencia de calor, h	±1.77%
Número de Reynolds, Re	±3.71%
Número de Nusselt, Nu	±3.59%

El rendimiento de transferencia de calor del intercambiador de calor lleno de nanofluidos se investiga cambiando algunos parámetros, como la temperatura de entrada, la tasa de flujo de entrada, la fracción de masa de nanopartículas, etc. Las incertidumbres de los valores probados y calculados se enumeran en la Tabla 9. Se realiza un análisis de la incertidumbre experimental con base en el método presentado en (Maré, y otros, 2011):

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (48)$$

Donde la variable R es una función de los parámetros X_1, X_2, \dots, X_n , y $\delta X_1, \delta X_2, \dots, \delta X_n$ son las incertidumbres correspondientes de estos parámetros. Incertidumbres del número de Reynolds,

flujo de calor, coeficiente de transferencia de calor y el número de Nusselt se pueden calcular aplicando:

$$\delta Re = \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\mu}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2} \quad (49)$$

$$\delta Re = \sqrt{(2.5)^2 + (1.5)^2 + (2.5)^2 + (0.5)^2}$$

$$\delta Re = 3.87\%$$

$$\delta Q = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_p}{C_p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad (50)$$

$$\delta Q = \sqrt{(0.05)^2 + (2)^2 + (1)^2}$$

$$\delta Q = 2.23\%$$

$$\delta h = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad (51)$$

$$\delta h = \sqrt{(0.1)^2 + (1.25)^2 + (1)^2}$$

$$\delta h = 1.603\%$$

$$\delta Nu = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2} \quad (52)$$

$$\delta Nu = \sqrt{(1.77)^2 + (2)^2 + (0.5)^2}$$

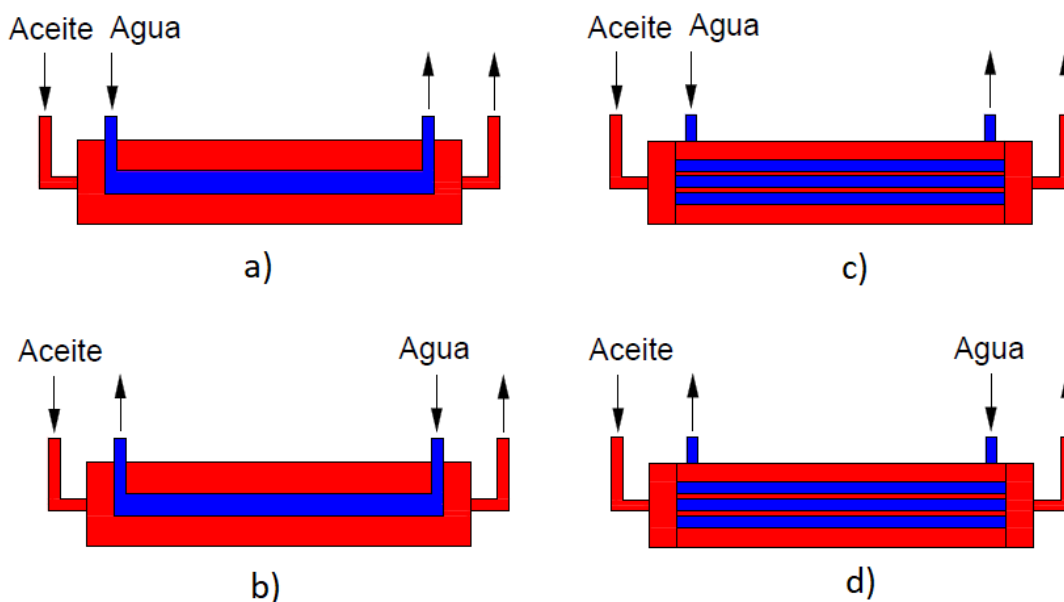
$$\delta Nu = 2.71\%$$

Análisis térmico

Se efectuó la toma de datos para cada uno de los intercambiadores de calor, cabe mencionar que cada intercambiador se realizó pruebas con flujo paralelo y contraflujo como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Esquemas de flujos en los intercambiadores de calor



Nota: a) Intercambiador concéntrico flujo paralelo; b) Intercambiador concéntrico contraflujo; c) Intercambiador multitubo flujo paralelo; d) Intercambiador multitubo contraflujo.

Mediante el software Excel se elaboró una plantilla de cálculos para cada una de las muestras de nanofluidos, en las cuales se insertaron las formulas descritas en el capítulo dos para poder realizar el análisis de transferencia de calor de cada nanofluidos, teniendo como resultado lo siguiente:

Transferencia de calor (Q)

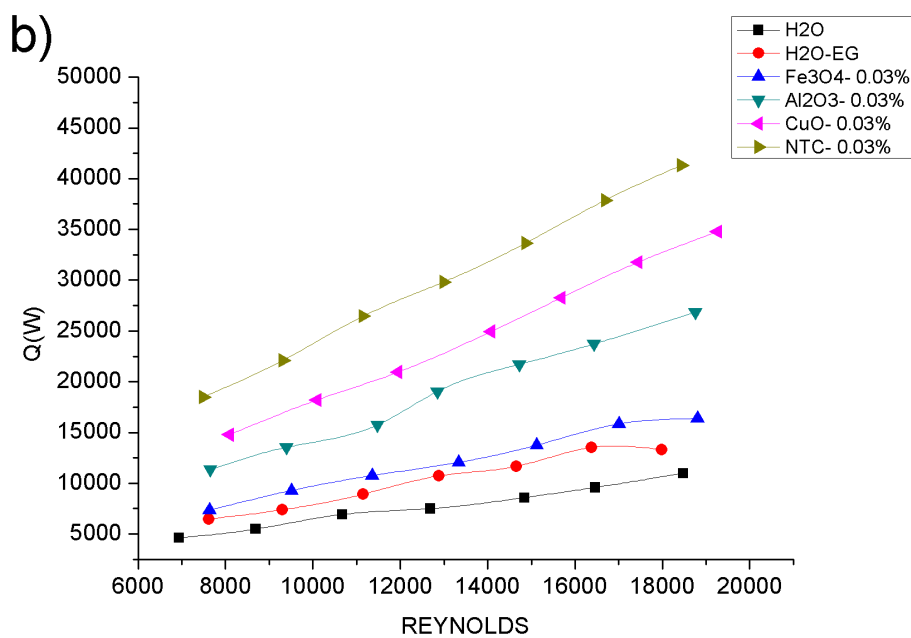
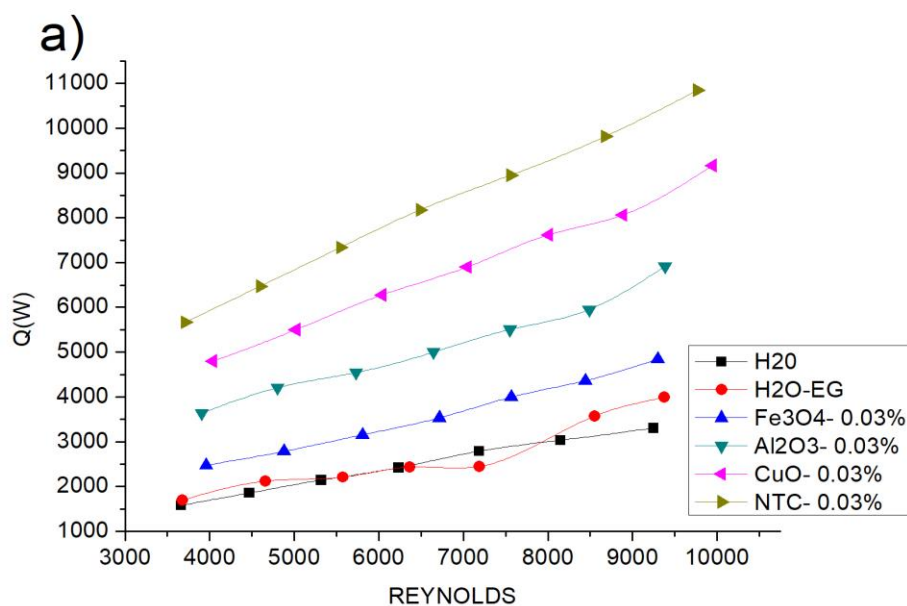
Las gráficas de transferencia de calor Q vs Reynolds que se muestra en la Figura 34 y 35, son producto de las ecuaciones (31), (32) y (34) del capítulo dos, y hacen evidente que cada una de las nanopartículas ensayadas muestran un incremento con relación al fluido base (Agua). De

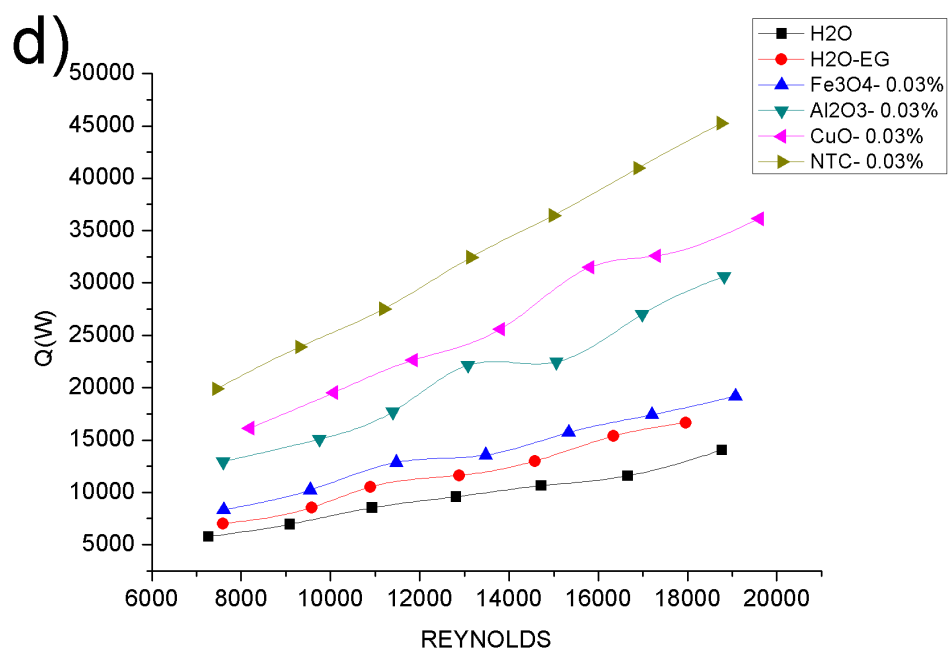
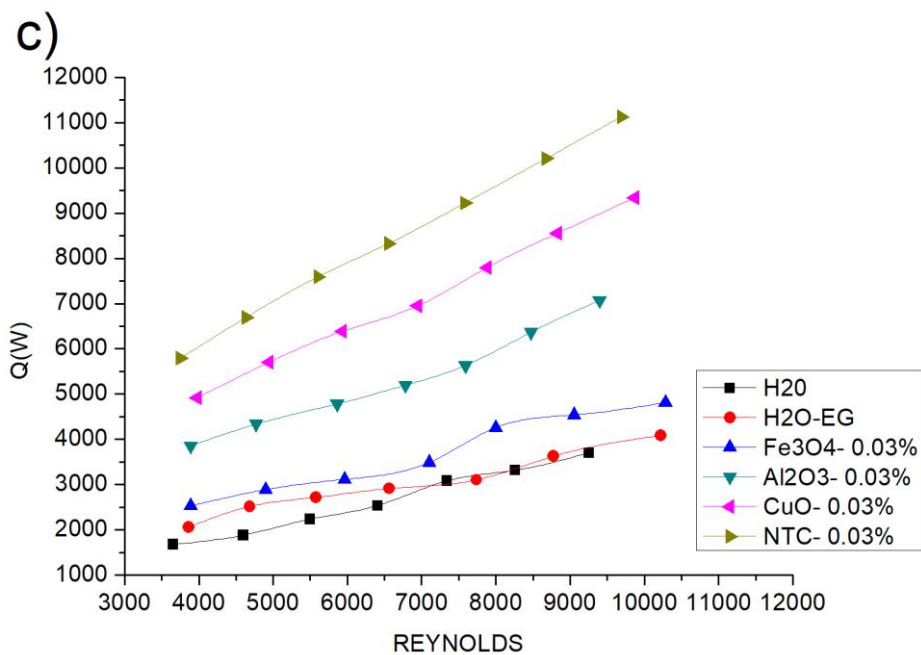
igual manera indica que el aumento del número de Reynolds (velocidad) promueve la mejora de la transferencia de calor.

Concentración 0.03%

Figura 34

Curvas de Calor Q vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.03





Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

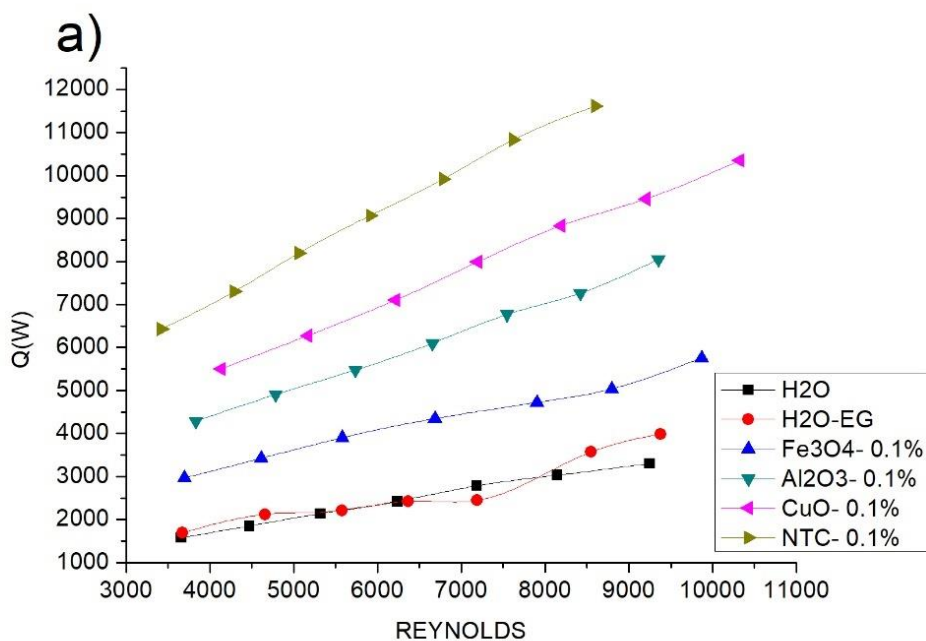
En la gráfica a) el valor de Q de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC incrementa en: 1.47, 2.09, 2.77, y 3.28 veces más respectivamente que el fluido base con 3305 W; La gráfica b) el valor de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC incrementa en: 1.59, 2.46, 3.23 y 3.90 veces

más respectivamente que el fluido base con 10991W; La gráfica c) el valor de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC incrementa en: 1.30, 1.91, 2.52, y 3.01 veces más respectivamente que el fluido base con 3704W; mientras que los datos obtenidos en la gráfica d) se evidencia que el incremento de calor Q (W) de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC es de 1.37; 2.18; 2.57 y 3.22 veces mayor respectivamente, en relación al fluido base H_2O que tiene como valor en su máximo caudal 14050.42 watts. En los cuatro ensayos efectuados el intercambiador multitubo presenta mejores valores para Q que en el caso del intercambiador concéntrico.

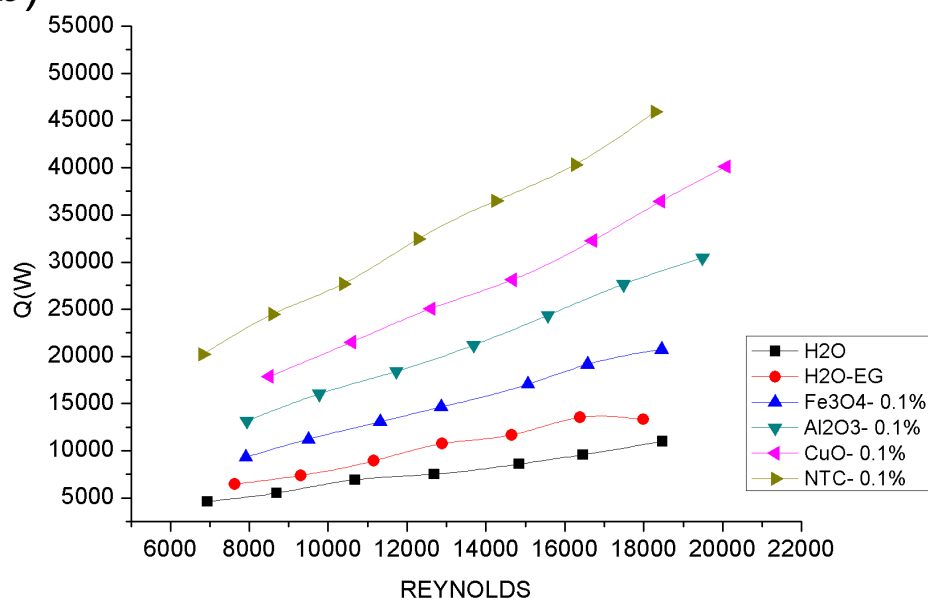
Concentración 0.1%

Figura 35

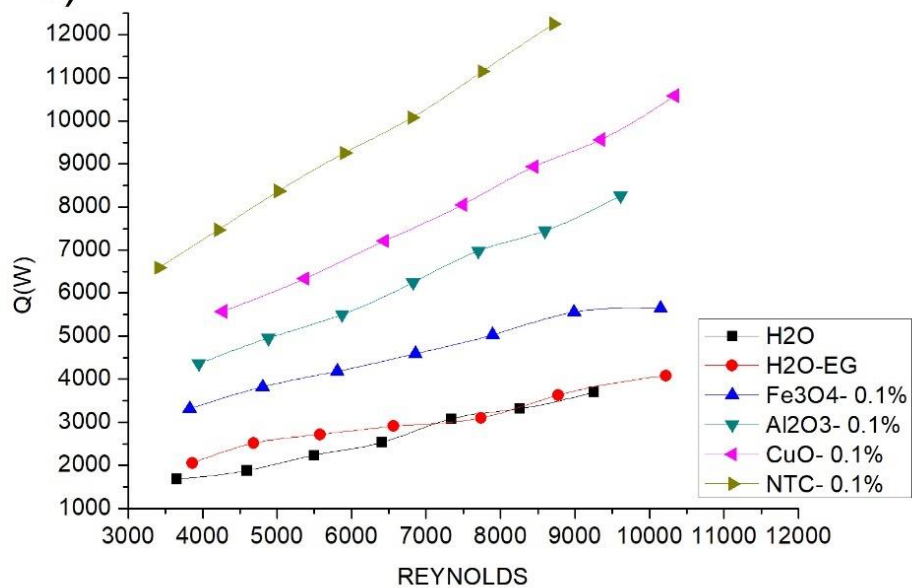
Curvas de Calor Q vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.1

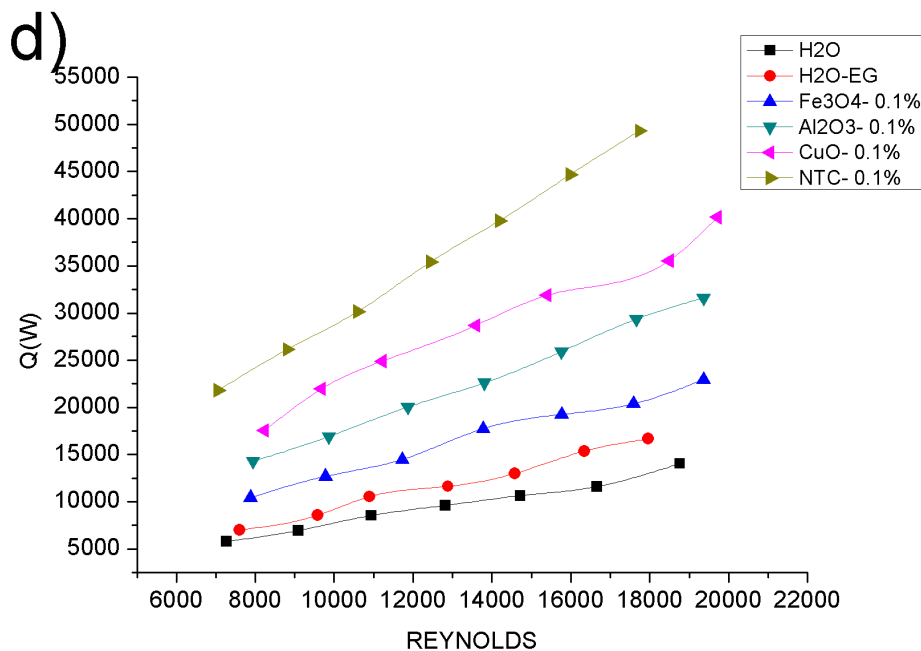


b)



c)





Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

En la gráfica a) el valor de Q de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC incrementa en: 1.76, 2.5, 3.24, y 3.7 veces más respectivamente que el fluido base con 3305 W; La gráfica b) el valor de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC incrementa en: 1.96, 2.81, 3.75 y 4.23 veces más respectivamente que el fluido base con 10991W; La gráfica c) el valor de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC incrementa en: 2.14, 3.14, 4.02, y 4.65 veces más respectivamente que el fluido base con 3704W; mientras que los datos obtenidos en la gráfica d) se evidencia que el incremento de calor Q (W) de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC es de 2.39; 3.29; 4.2 y 5.14 veces mayor respectivamente, en relación al fluido base H_2O que tiene como valor en su máximo caudal 14050.42 watts. En los cuatro ensayos efectuados el intercambiador multitubo presenta mejores valores para Q que en el caso del intercambiador concéntrico.

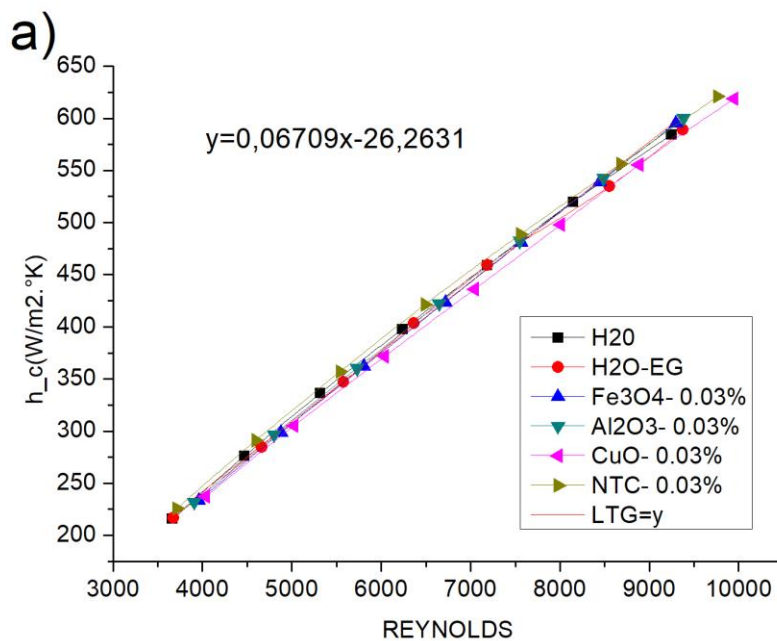
Coeficiente de convección (h)

Las Figuras (36) y (37), son resultado de aplicar la ecuación (18) descrita en el capítulo número dos, donde en cada una de las gráficas elaboradas se observa que el coeficiente de convección en cada uno de los ensayos aumenta proporcionalmente al número de Reynolds; además las curvas si presentan una diferencia en sus valores con respecto al fluido base, valores que serán descritos en cada una de las figuras.

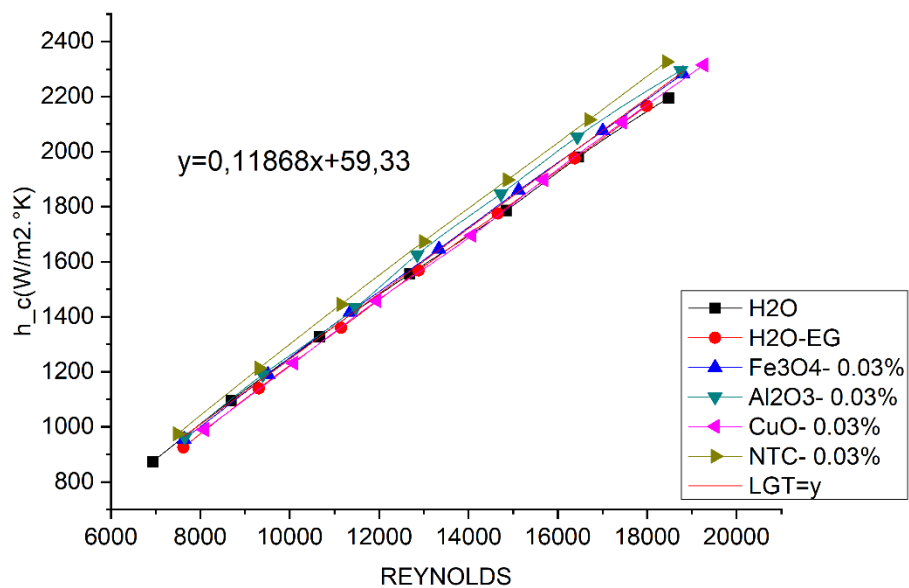
Concentración 0.03%

Figura 36

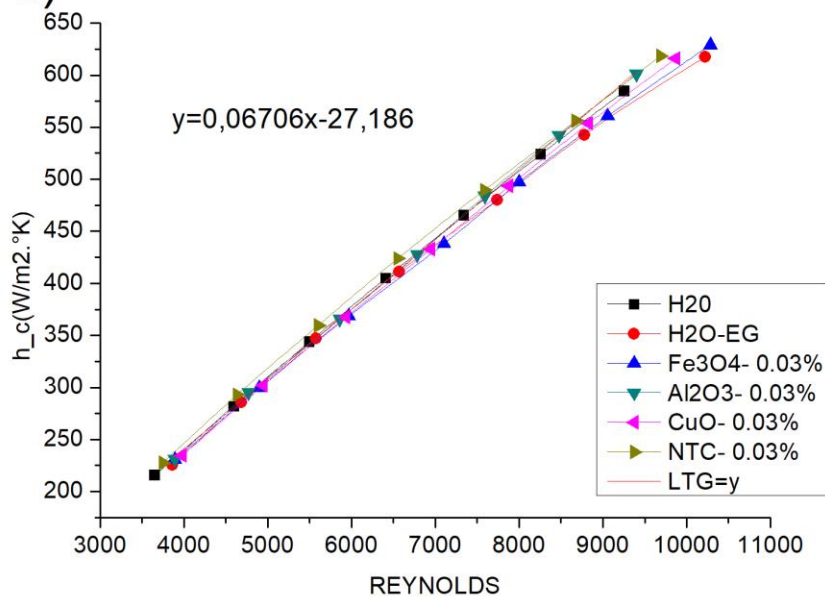
Curvas de coeficiente de transferencia de calor h vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.03

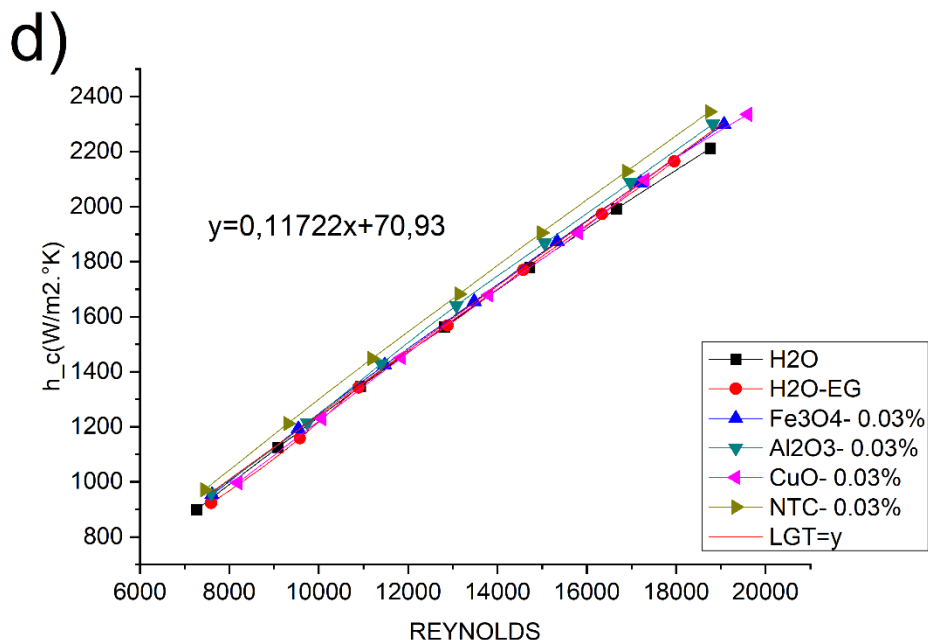


b)



c)





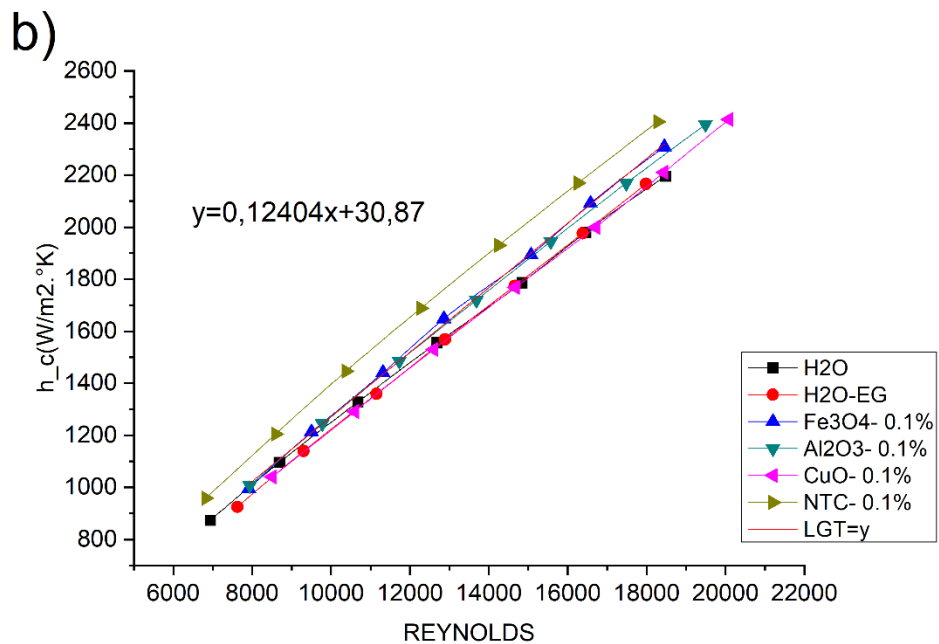
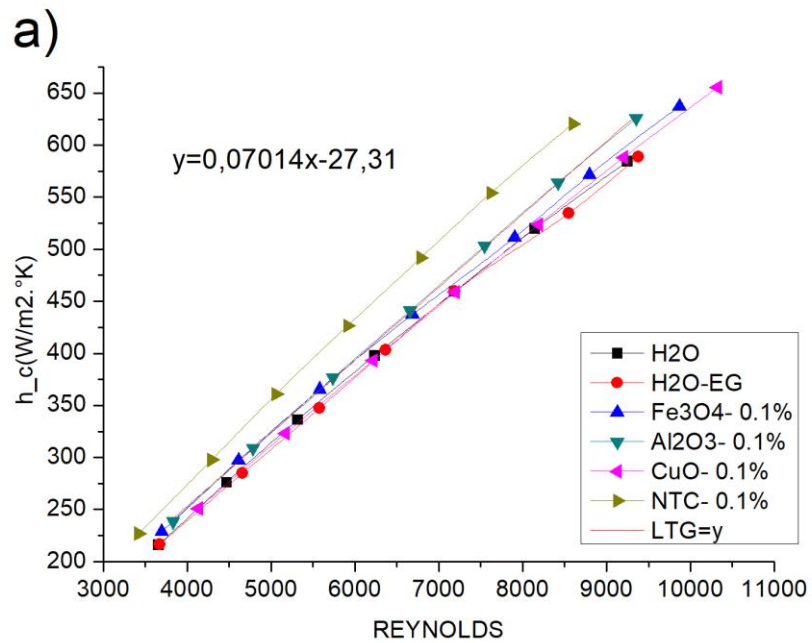
Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

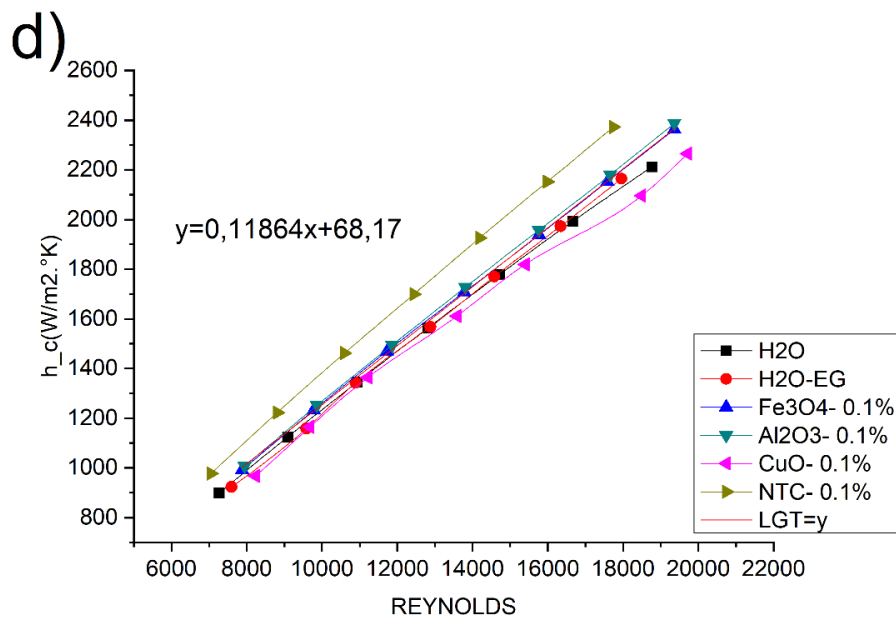
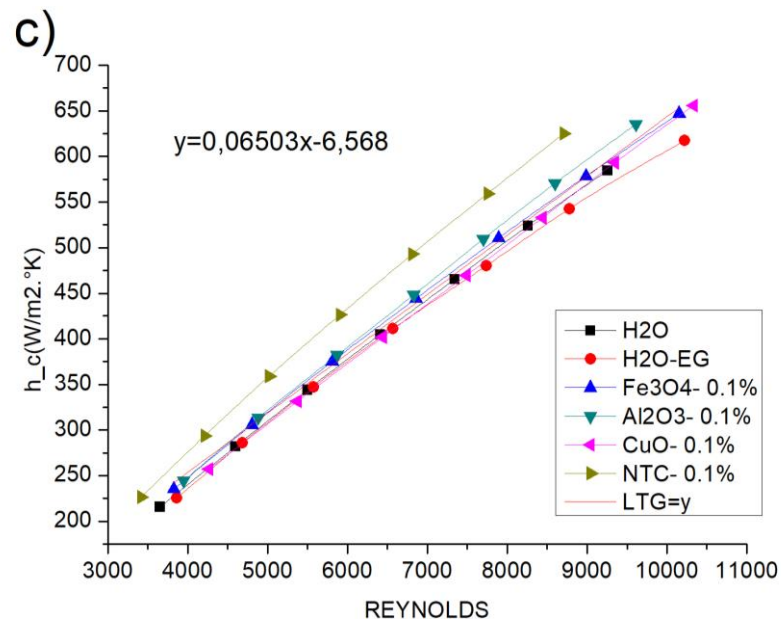
Realizando una comparación en el mayor caudal, en el literal a) los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC aumentan en 1.86%, 2.76%, 5.12%, 5.73% respectivamente comparado con el agua que tiene un valor de $584.33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.06709x - 26.263$; literal b) los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC aumentan en 3.92%, 3.96%, 5.48%, 5.97% respectivamente comparado con el agua que tiene un valor de $2195.17 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.11868x + 59.33$; literal c) los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC aumentan en 2.61%, 5.97%, 5.34%, 5.78% respectivamente comparado con el agua que tiene un valor de $584.63 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.06706x - 27.18$; literal d) el coeficiente de convección de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC aumenta en 3.94%, 3.95%, 5.57%, 6.02% respectivamente, en relación al fluido base H_2O que tiene como valor $2211.98 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.11722x + 70.93$.

Concentración 0.1%

Figura 37

Curvas de coeficiente de transferencia de calor h vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.1





Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

En el mayor caudal, en el literal a) los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC aumentan en 9.04%, 7.08%, 12.14%, 6.2% respectivamente comparado con el agua cuyo valor es 584.33 $W/m^2 \cdot ^\circ K$, donde su línea de tendencia general esta descrita por $y = 0.07014x - 27.31$; literal b) los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC aumentan en 5.14%, 9.11%, 9.93%, 9.58% respectivamente comparado con el agua cuyo valor es 2195.17 $W/m^2 \cdot ^\circ K$ donde su línea de tendencia general esta descrita por $y = 0.12404x + 30.87$; literal c) los nanofluidos Fe_3O_4 ,

Al_2O_3 , CuO y NTC aumentan en 10.68%, 8.66%, 12.16%, 6.91% respectivamente comparado con el agua cuyo valor es $584.63 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$, donde su línea de tendencia general esta descrita por $y = 0.06503x - 6.568$; literal d) el coeficiente de convección de los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC aumenta en 6.82%, 7.94%, 2.4%, 7.22% respectivamente, en relación al fluido base H_2O que tiene como valor $2211.98 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$, donde su línea de tendencia general esta descrita por $y = 0.11864x + 68.17$.

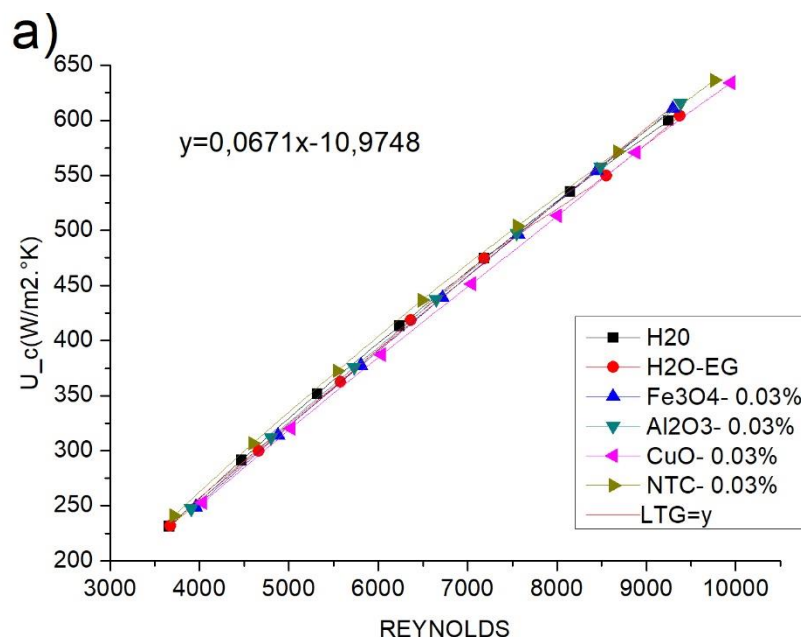
Coeficiente Global de transferencia de calor (U)

El coeficiente de transferencia de calor total o valor U se refiere a la conducción de calor a través de una serie de medios resistentes. Por tanto, mediante la ecuación (28), se obtienen como resultado las Figuras 38-39. La tendencia que se presenta en las figuras, manifiesta que el coeficiente de convección es directamente proporcional al número de Reynolds.

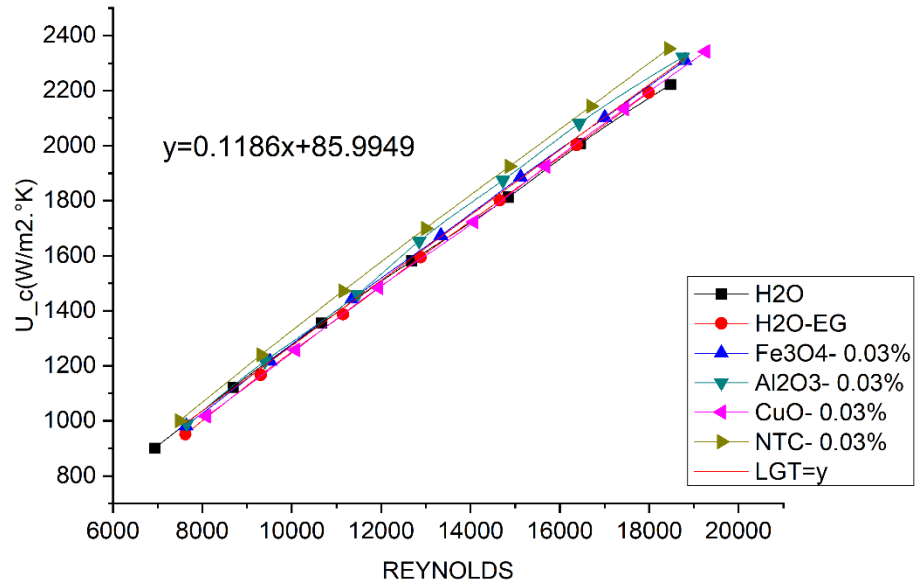
Concentración 0.03%

Figura 38

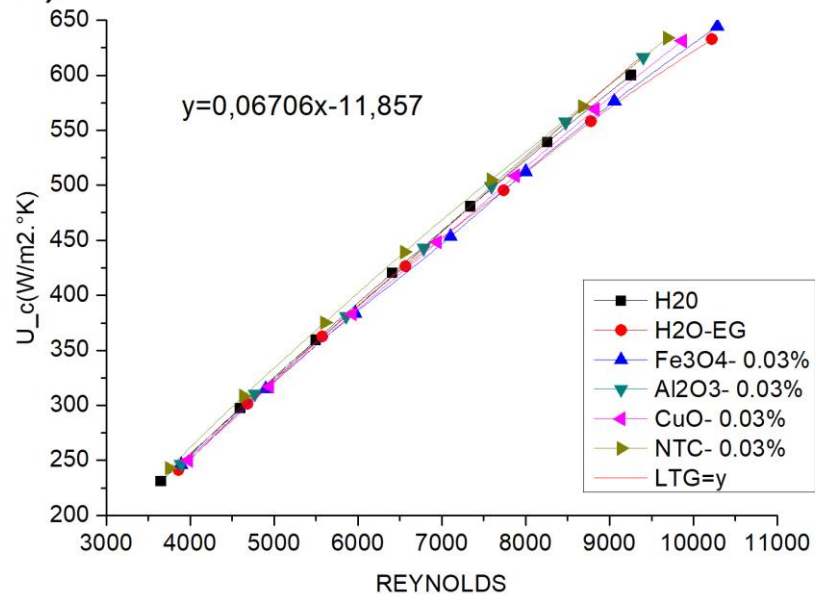
Curvas de coeficiente global de transferencia de calor U vs Reynolds con concentración 0.03

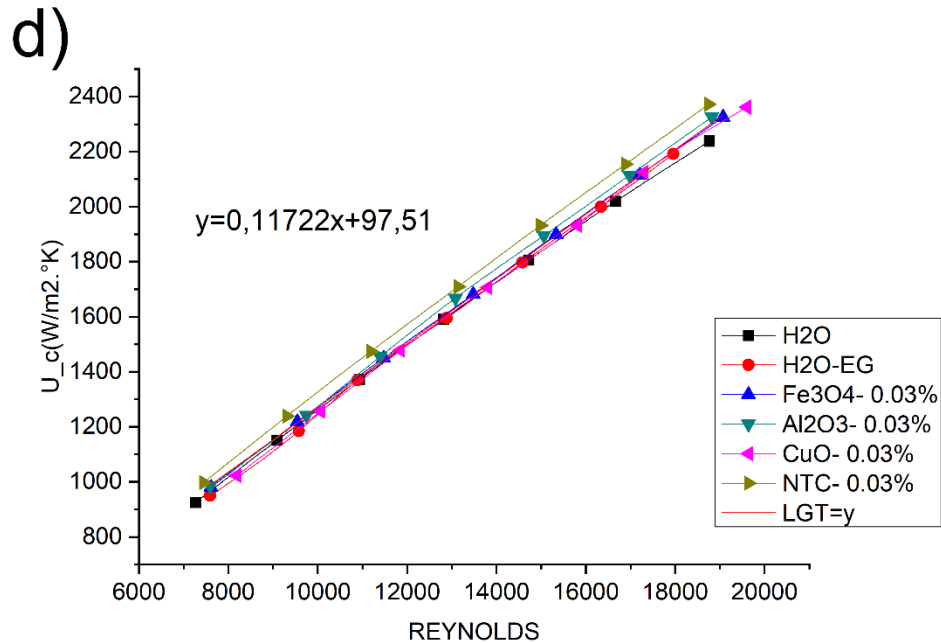


b)



c)





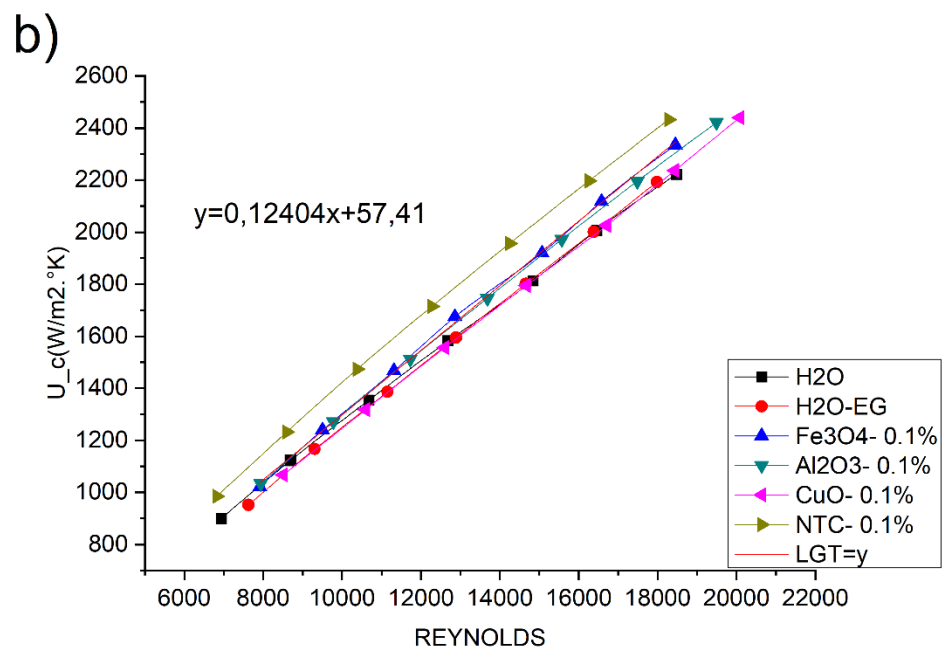
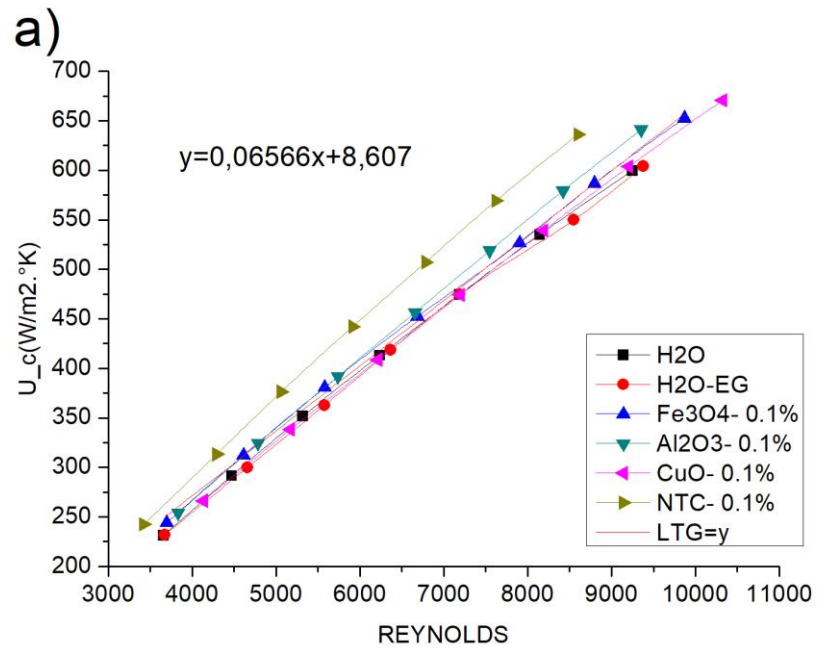
Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

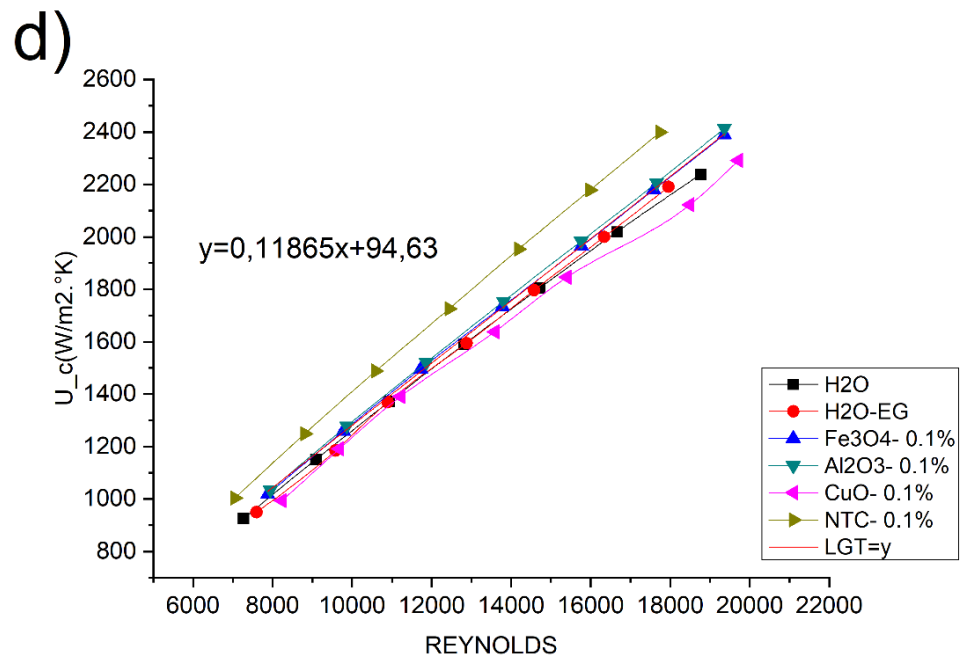
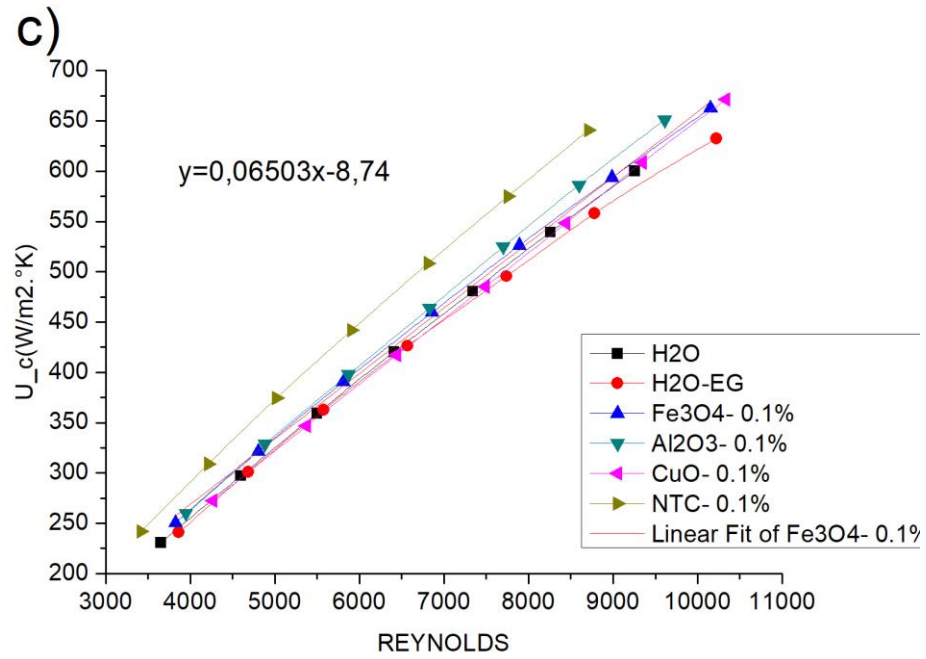
En el literal a) el coeficiente U aumenta en los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC en 1.82%, 2.68%, 5.70% y 6.13% respectivamente comparándolos con el agua que tiene 599.66 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.0671x - 10.97$; literal b) el coeficiente U aumenta en los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC en 3.80%, 3.90%, 5.41% y 5.90% respectivamente comparándolos con el agua que tiene 2221.75 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.1186x + 85.99$; literal c) el coeficiente U aumenta en los nanofluidos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC en 1.88%, 6.21%, 5.87% y 6.17% respectivamente comparándolos con el agua que tiene 599.96 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.067x - 11.85$; en el literal d) considerado el experimento con mayores valores, se obtuvo que el coeficiente global aumenta 3.90%, 3.91%, 5.50% y 5.95% con cada una de los ensayos Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC respectivamente, comparándolos en el caudal máximo del fluido base que tiene como valor 2238.47 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.11722x + 97.51$; literal .

Concentración 0.1%

Figura 39

Curvas de coeficiente global de transferencia de calor U vs Reynolds con concentración 0.1





Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

En el literal a) el coeficiente U aumenta en los nanofluidos Fe₃O₄, Al₂O₃, CuO y NTC en 8.81%, 6.9%, 11.83% y 6.05% respectivamente comparándolos con el agua que tiene 599.66 W/m².°K y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.0656x + 8.60$; literal b) el coeficiente U aumenta en los nanofluidos Fe₃O₄, Al₂O₃, CuO y NTC en 5.07%, 9%, 9.81% y 9.47% respectivamente comparándolos con el agua que tiene 2221.75 W/m².°K y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.12404x + 57.41$; literal c) el coeficiente U aumenta en los nanofluidos Fe₃O₄, Al₂O₃, CuO y NTC en 10.41%, 8.47%, 11.85% y 6.74% respectivamente comparándolos con el agua que tiene 599.96 W/m².°K y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.065x - 8.74$; literal d) considerado el experimento con mayores valores, se obtuvo que el coeficiente global aumenta 6.74%, 7.85%, 2.37% y 7.14% con cada una de los ensayos Fe₃O₄, Al₂O₃, CuO y NTC respectivamente, comparándolos en el caudal máximo del fluido base que tiene como valor 2238.47 W/m².°K y mantienen una línea de tendencia general descrita por $y = 0.11865x + 94.63$.

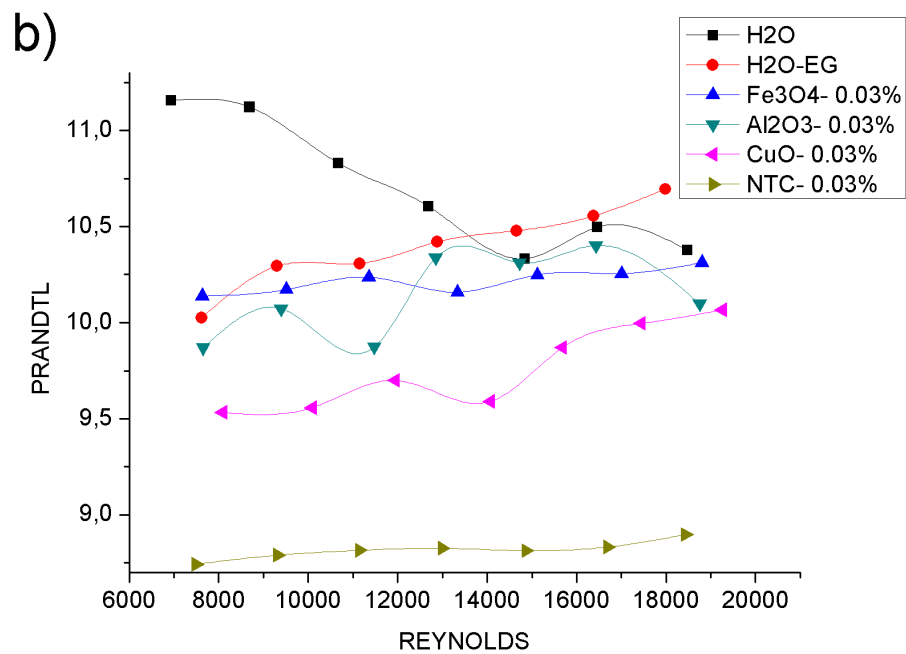
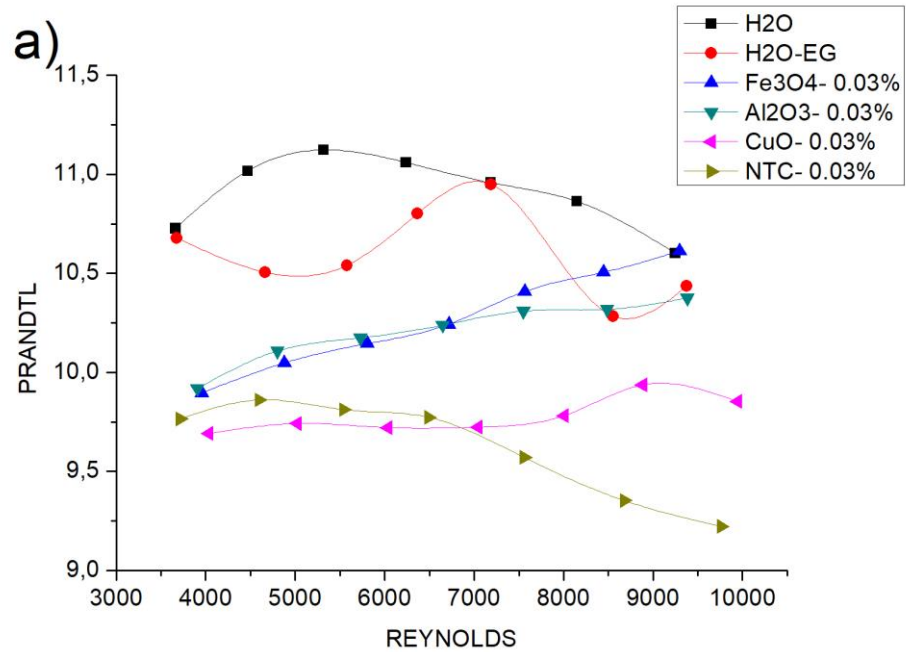
Número Adimensional de Prandtl (Pr)

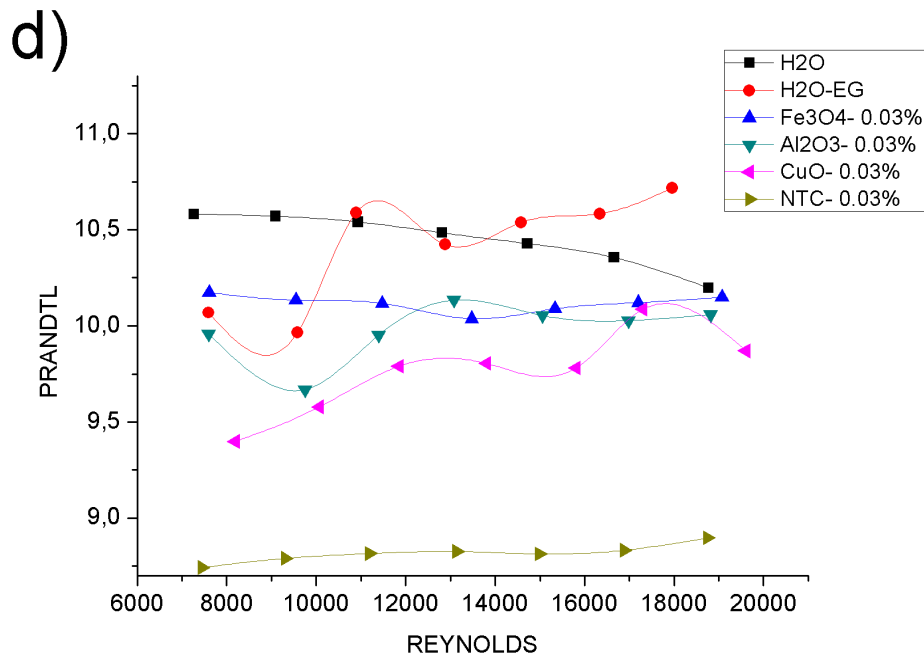
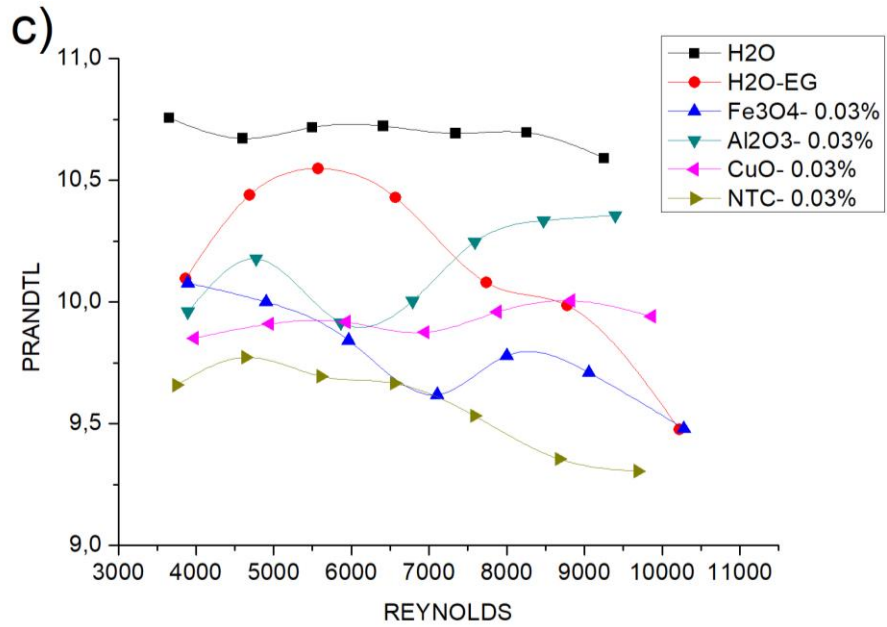
Dentro del estudio de variables térmicas es necesario ver el comportamiento que tiene el número de Prandtl mediante la ecuación (23), además de incluir las ecuaciones (2), (4), (5) que son correlaciones que permiten determinar las propiedades termofísicas que tendrán los nanofluidos y es aquí donde se empezaran a evidenciar las propiedades de cada una de las nanopartículas.

Concentración 0.03%

Figura 40

Curvas de Prandtl Pr vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.03





Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

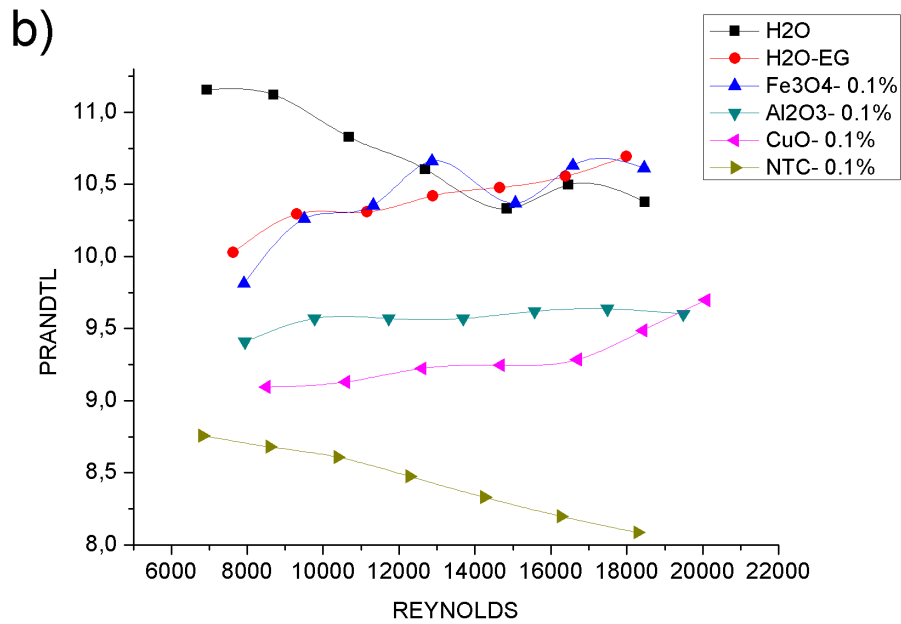
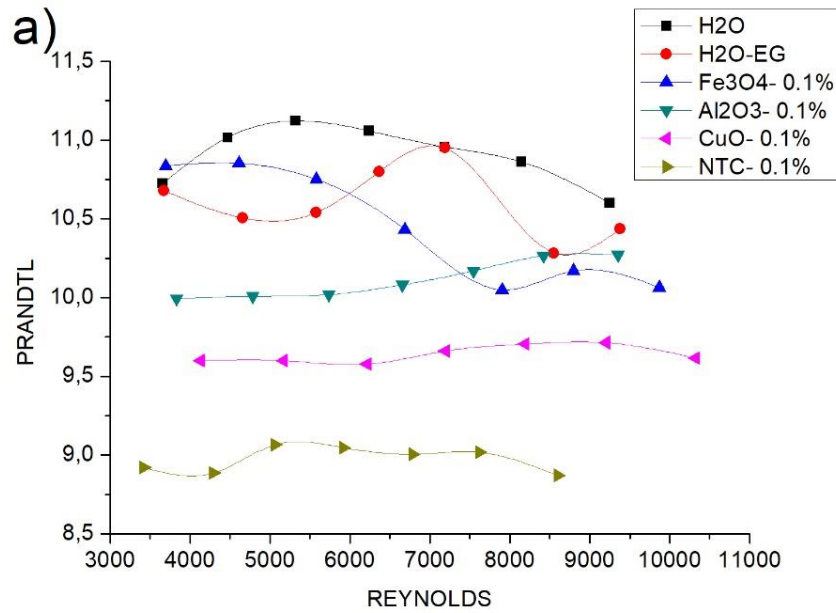
Dentro de las gráficas obtenidas, se logra observar que no existe una tendencia marcada en las curvas de cada fluido, lo que podemos destacar es que las nanofluidos están con valores por debajo del fluido base, y NTC es mucho menor las otras tres nanopartículas Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO comparándolas con el fluido base en los siguientes porcentajes, literal a) 11.78%, b)

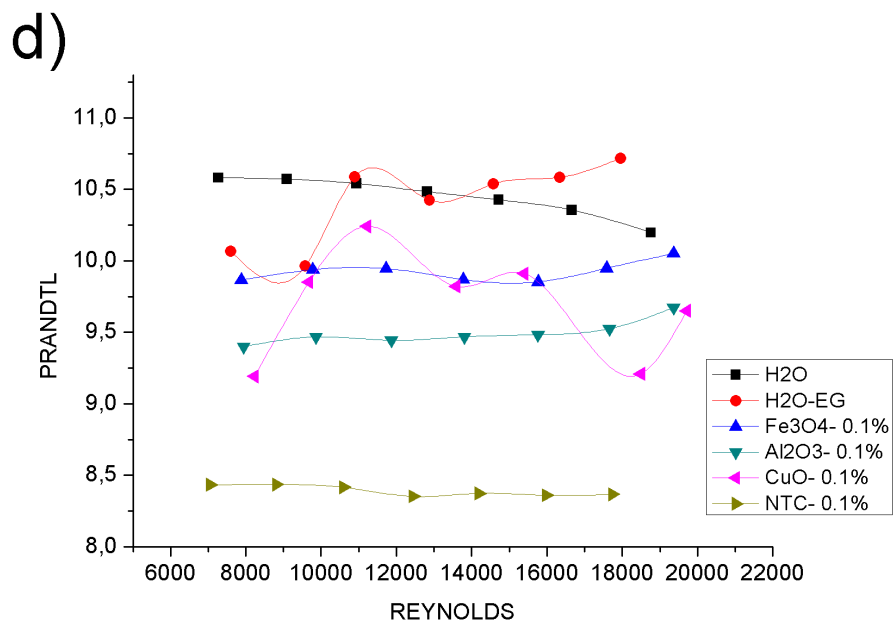
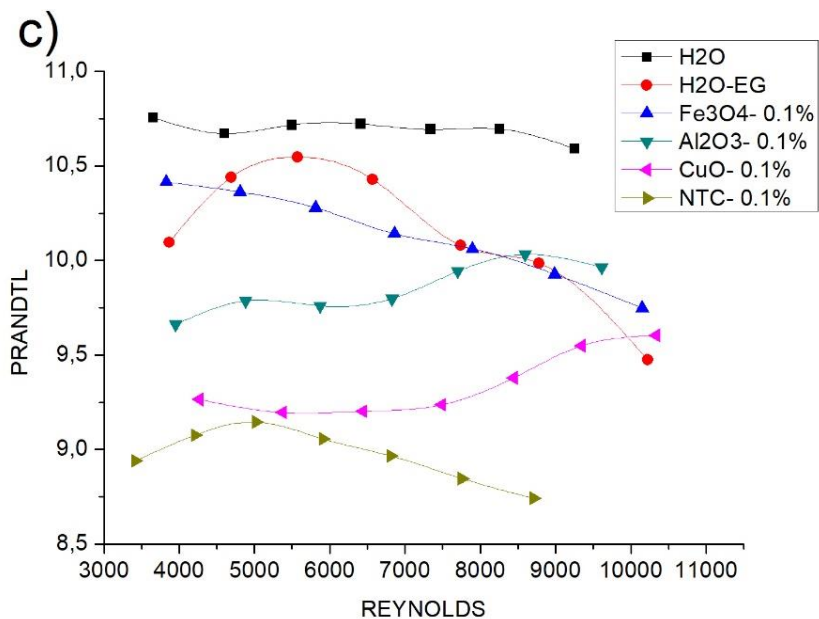
17.63%, c) 10.51% y en d) es 15.64% en relación al fluido base H₂O que tiene como promedio un número de Prandtl 10.91.

Concentración 0.1%

Figura 41

Curvas de Prandtl Pr vs Reynolds de los diferentes fluidos con concentración 0.1





Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

Dentro de las gráficas obtenidas, se logra observar que no existe una tendencia marcada en ningún ensayo, lo que si podemos destacar y dar a conocer es que las nanopartículas están con valores por debajo del fluido base, y NTC es mucho menor que las demás de la siguiente

manera: en el literal a) es 17.73 b) es 22.54%, en c) es 16.13%, en d) es 21.52% en relación al fluido base H₂O.

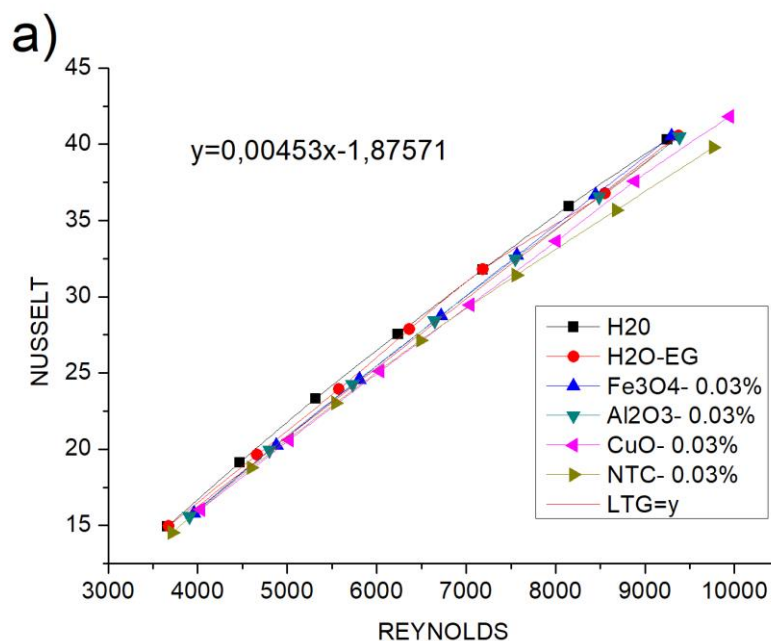
Número Adimensional de Nusselt (Nu)

Al aplicar las formulas (19),(20),(23) y (26) del capítulo dos se puede obtener el número de Nusselt, que prácticamente es la relación entre la convección y la conducción que se da en un proceso de transferencia de calor. Donde nos permite determinar cuál de los dos procesos mencionas predomina en el proceso experimental ensayado en los nanofluidos Fe₃O₄, Al₂O₃, CuO y NTC.

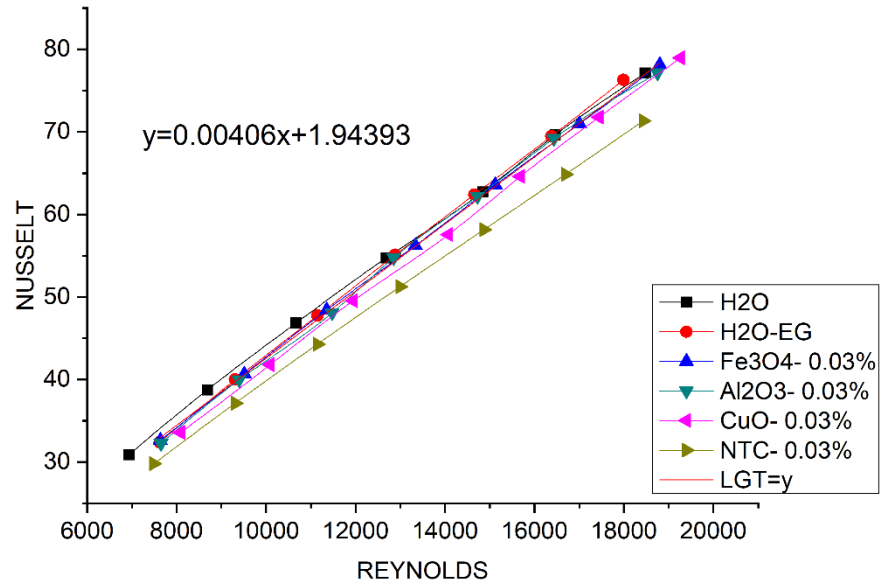
Concentración 0.03%

Figura 42

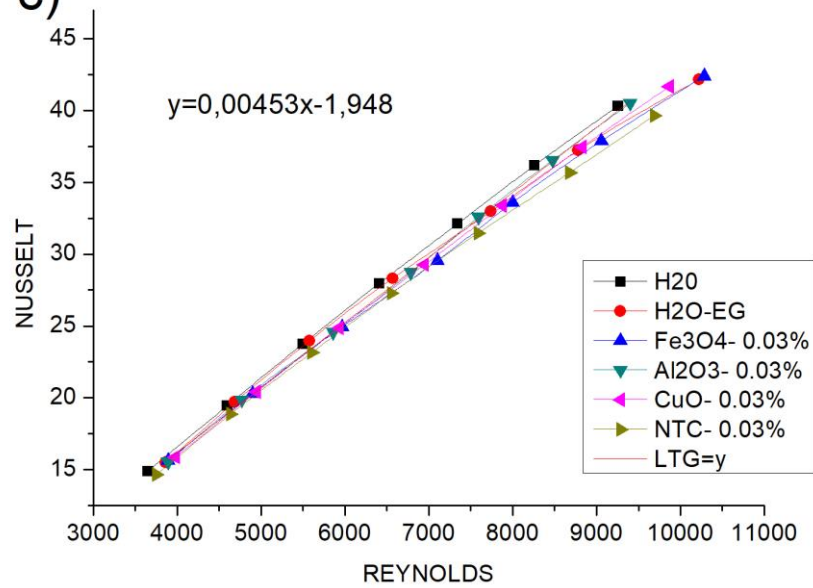
Curvas de Nusselt (Nu) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.03

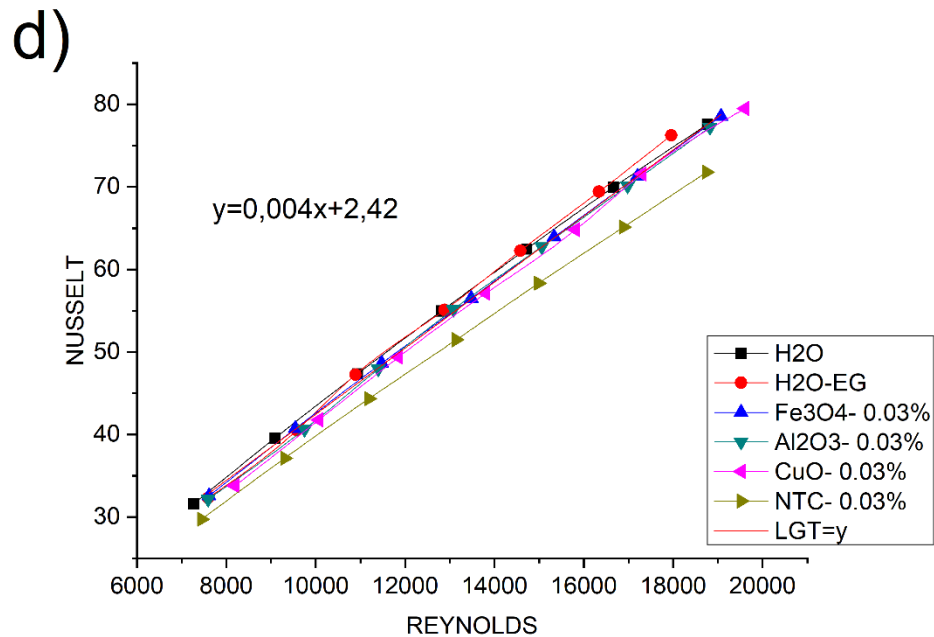


b)



c)





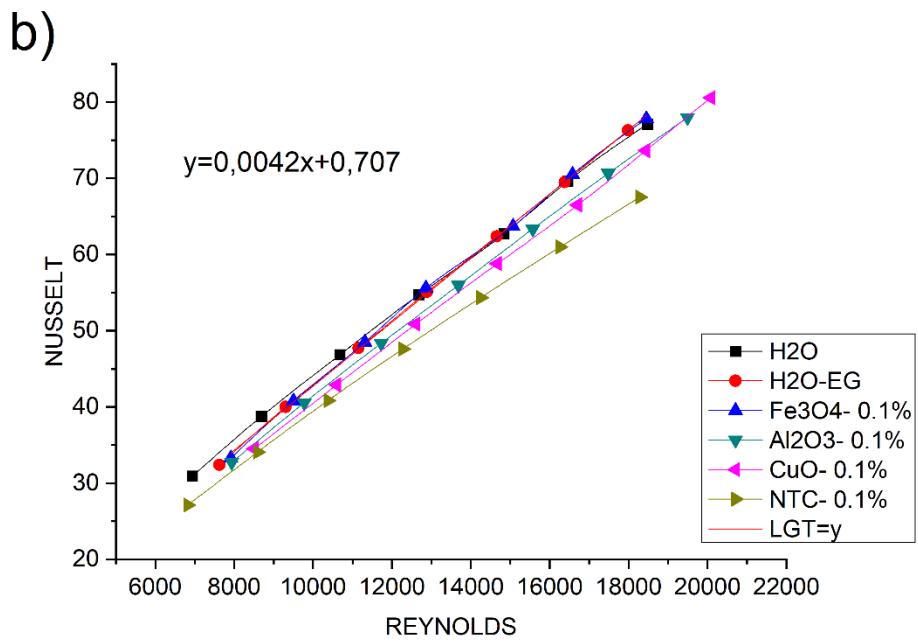
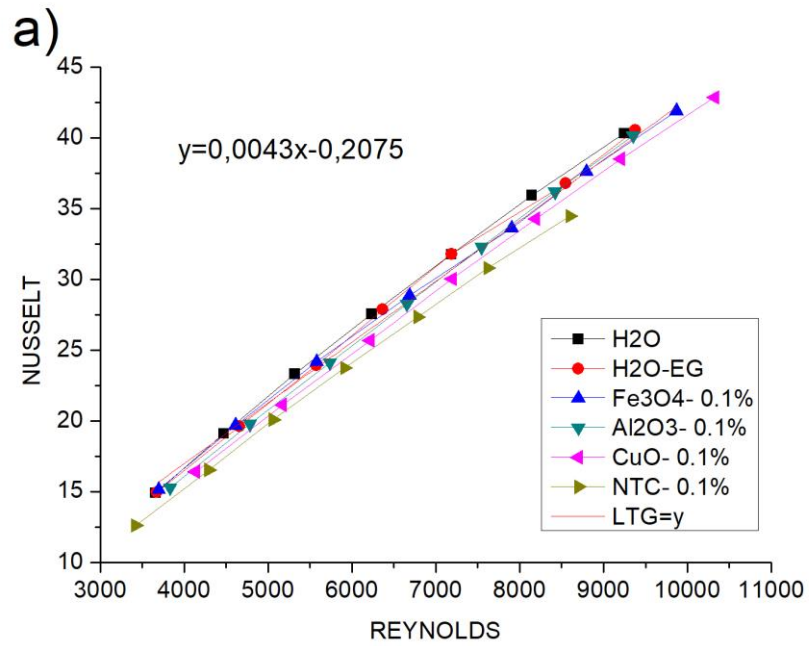
Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

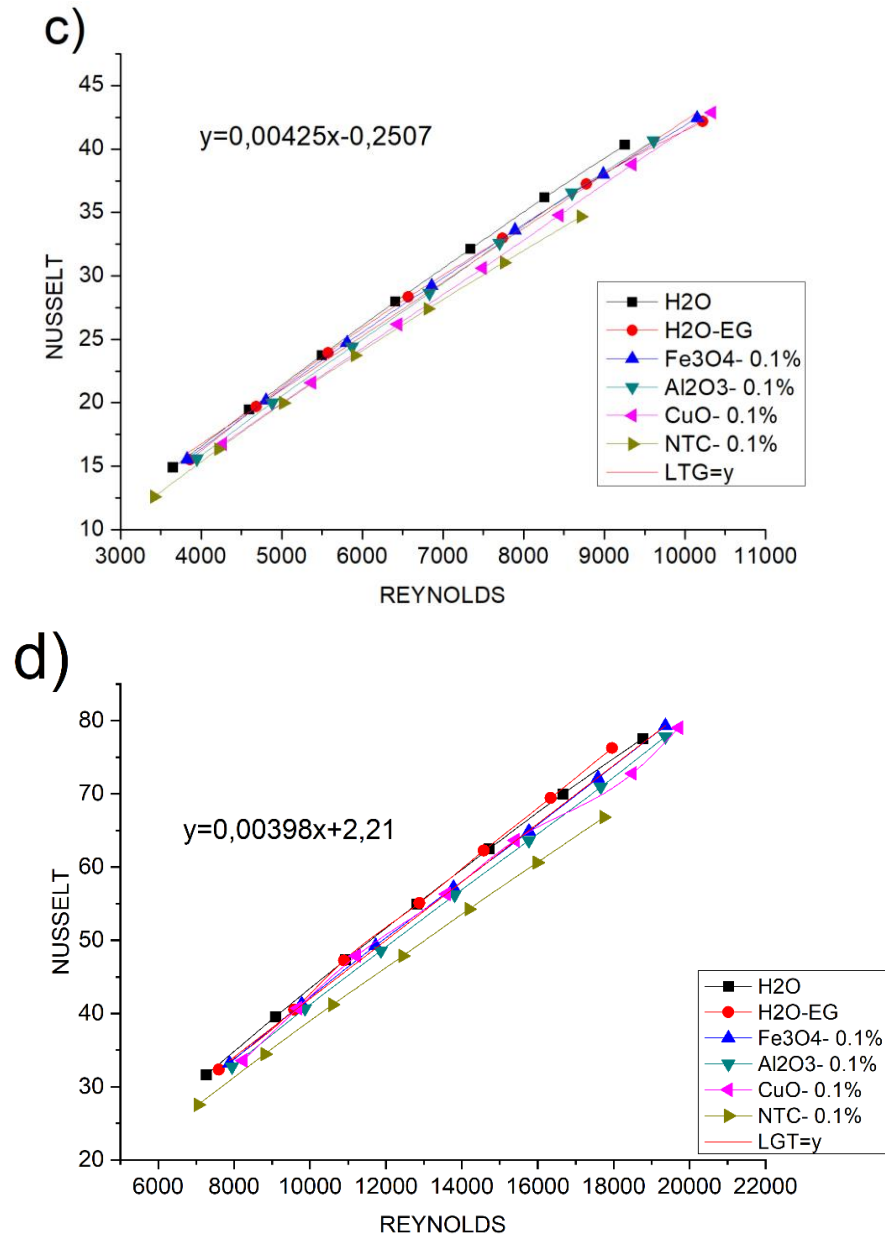
En los ensayos efectuados se evidencia una tendencia marcada, en donde a mayor caudal existirá un mayor valor en el número de Nusselt; sin embargo se nota que las curvas de los nanofluidos se interceptan con una mínima diferencia del fluido base, notándose que la curva de NTC es la que menor valor posee en el literal a) con un 1.28% en comparación al fluido base con un valor Nu 40.31, y existe una línea de tendencia general descrita por $y = 0.00453x - 1.875$; En el literal b) con un 7.46% menos que el fluido base que tiene un valor de Nu 77.09, y existe una línea de tendencia general descrita por $y = 0.00406x + 1.94$; el literal c) de igual manera un 1.66% menos que el fluido base que tiene un valor de 40.33 y existe una línea de tendencia general descrita por $y = 0.00453x - 1.948$; y literal d) de igual manera un 7.46% menos pero el fluido base tiene en este ensayo un valor de 77.56, y existe una línea de tendencia general descrita por $y = 0.004x + 2.42$.

Concentración 0.1%

Figura 43

Curvas de Nusselt (Nu) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.1





Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

En los ensayos efectuados se evidencia una tendencia marcada, en donde a mayor caudal existirá un mayor valor en el número de Nusselt; sin embargo se nota que las curvas de los nanofluidos se interceptan con una mínima diferencia del fluido base, notándose que la curva de NTC es la que menor valor posee en el literal a) con un 14.5% en comparación al fluido base con un valor Nu 40.31, con una línea de tendencia general descrita por $y = 0.0043x -$

0.2075; literal b) con un 12.42% menos que el fluido base que tiene un valor de Nu 77.097, con una línea de tendencia general descrita por $y = 0.0042x + 0.707$; el literal c) de igual manera un 14.03% menos que el fluido base que tiene un valor de 40.33, con una línea de tendencia general descrita por $y = 0.00425x - 0.2507$; y literal d) de igual manera un 13.87% menos pero el fluido base tiene en este ensayo un valor de 77.56, con una línea de tendencia general descrita por $y = 0.00398x + 2.21$.

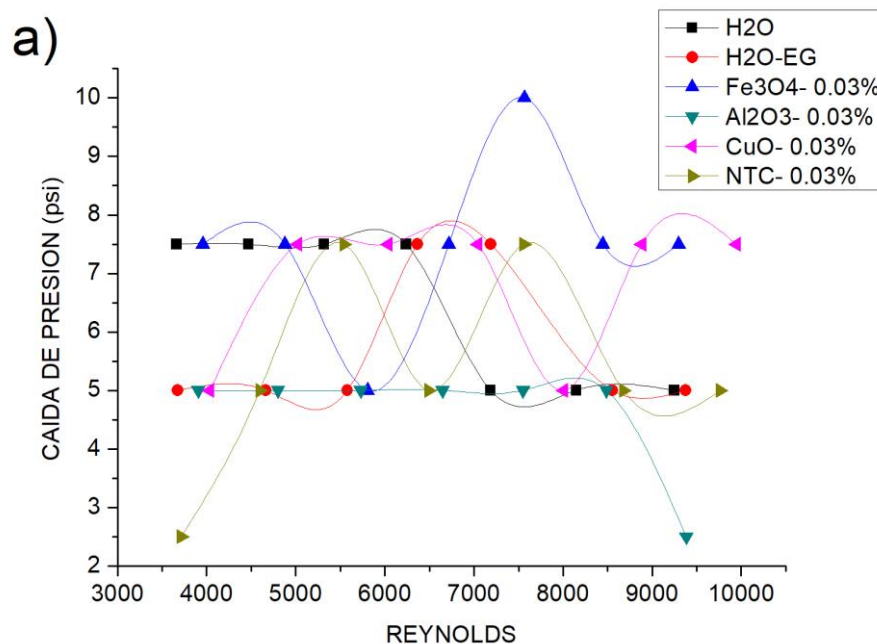
Caída de Presión

En este literal podemos observar las Figuras 44 y 45, en donde la caída de presión tiene una tendencia con muy poca variación cuando son procesos con flujo paralelo, independientemente del tipo de intercambiador que se haya ensayado; mientras que en el proceso contraflujo existen 4 puntos de variación.

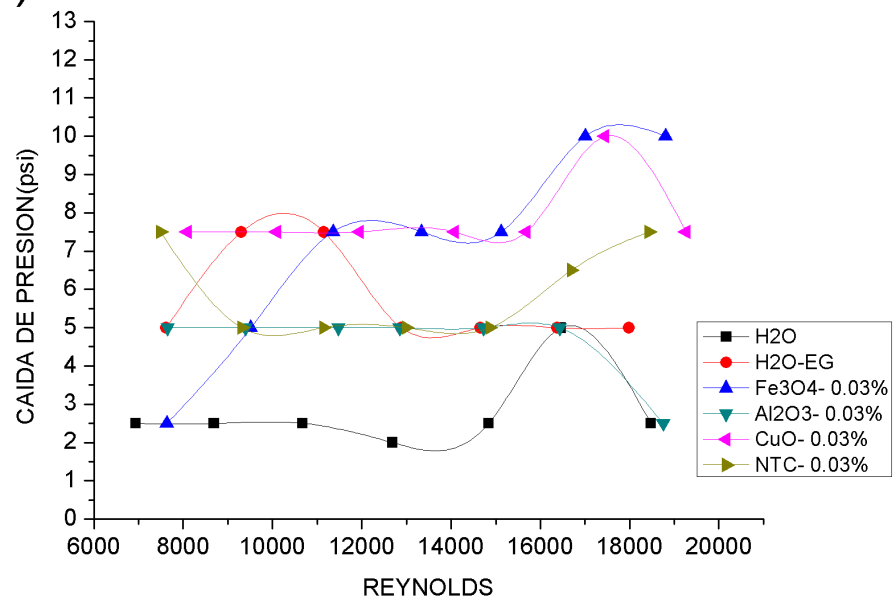
Concentración 0.03%

Figura 44

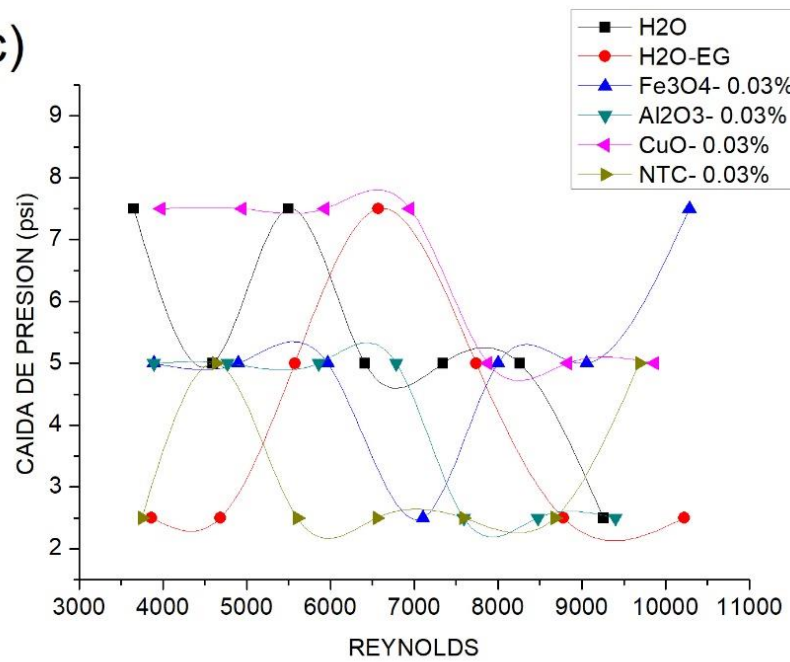
Curvas de Caída de presión (ΔP) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.03

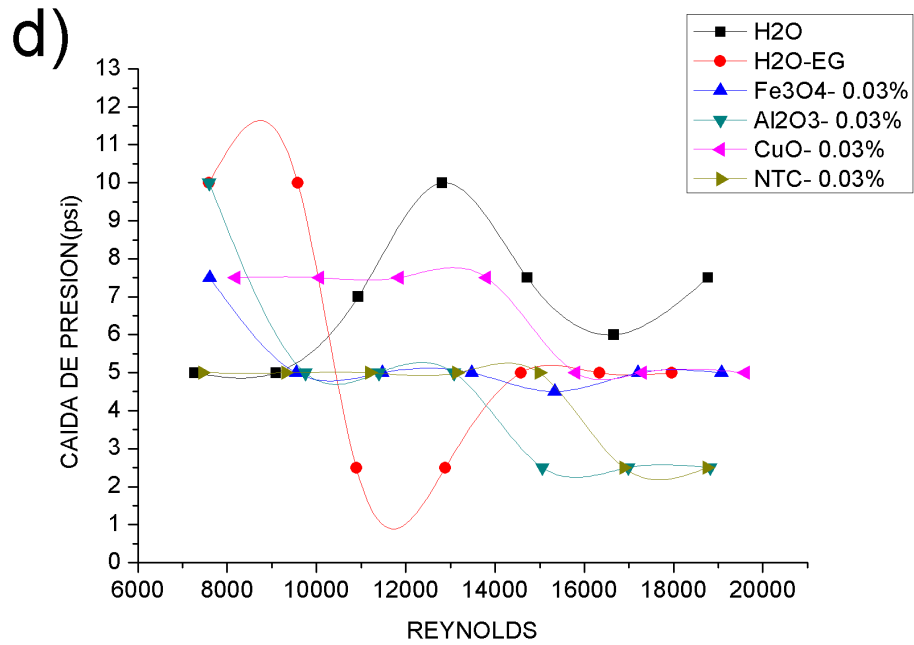


b)



c)



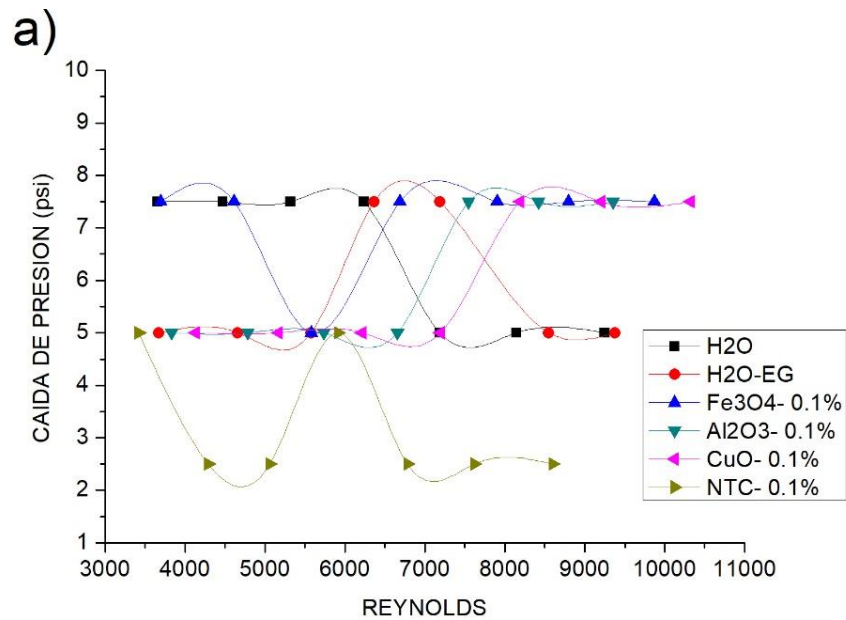


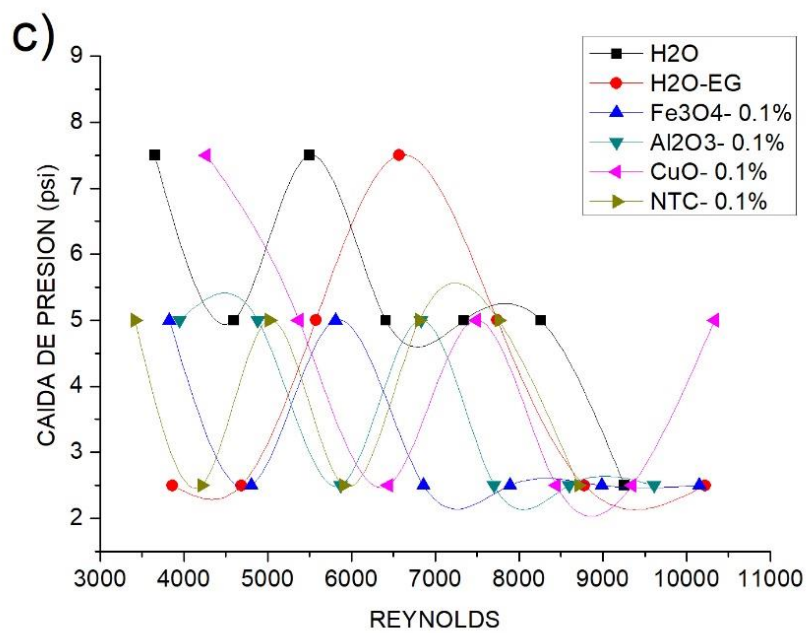
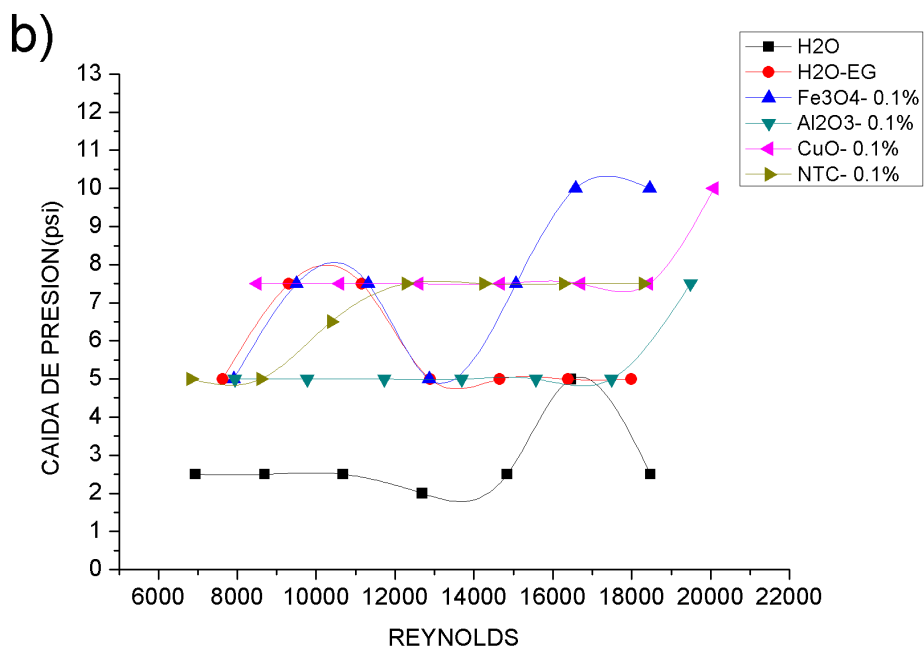
Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

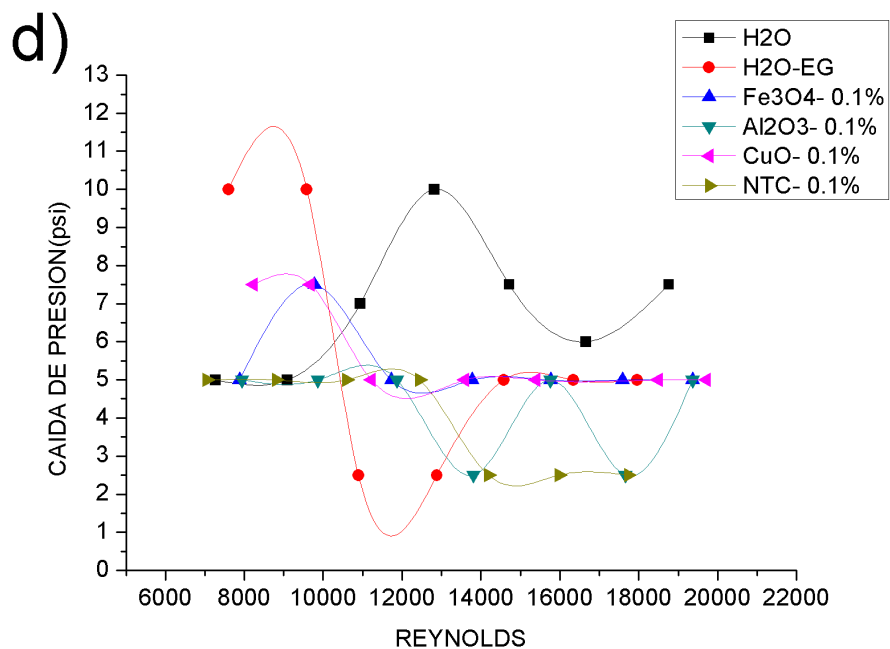
Concentración 0.1%

Figura 45

Curvas de Caída de presión (ΔP) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.1







Nota: a) ICP; b) IMP; c) ICC; d) IMC.

Efectividad

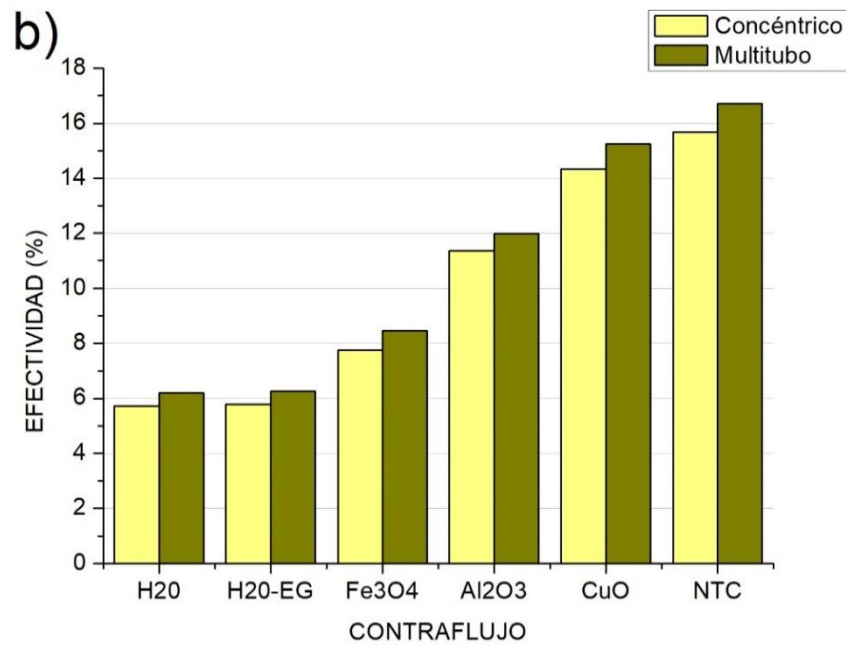
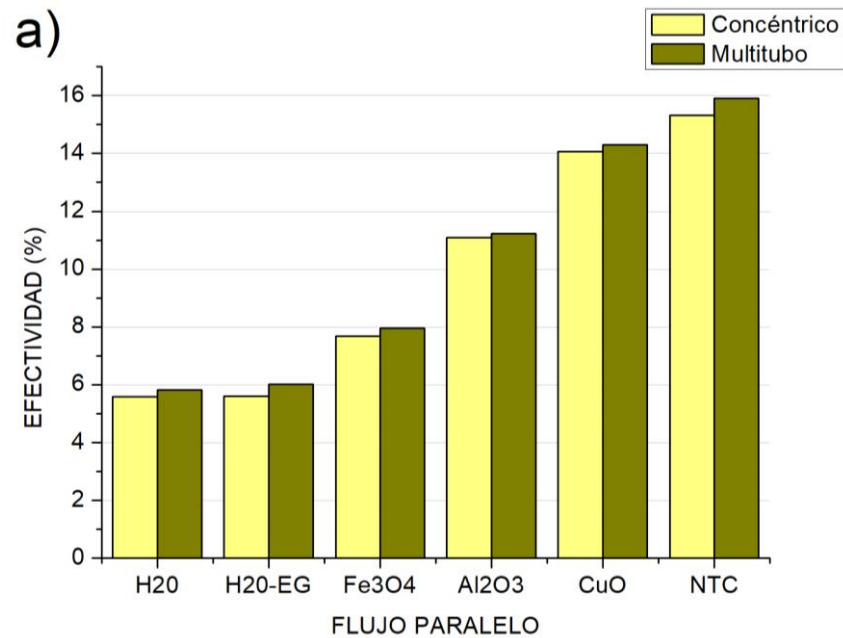
Las Figuras 46 y 47 son resultados de aplicar las ecuaciones (35) y (36) descritas en el capítulo dos, en donde se obtiene la efectividad de cada una de las nanopartículas ensayadas con su diferente concentración.

Debido a la cantidad de ensayos que se efectuaron y a las distintas condiciones que se usaron, se puede realizar una comparación clara del efecto de los nanofluidos con el agua y además la diferencia que existe entre cada uno de ellos con respecto a la efectividad.

Concentración 0.03%

Figura 46

Curvas de Efectividad (ϵ) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.03



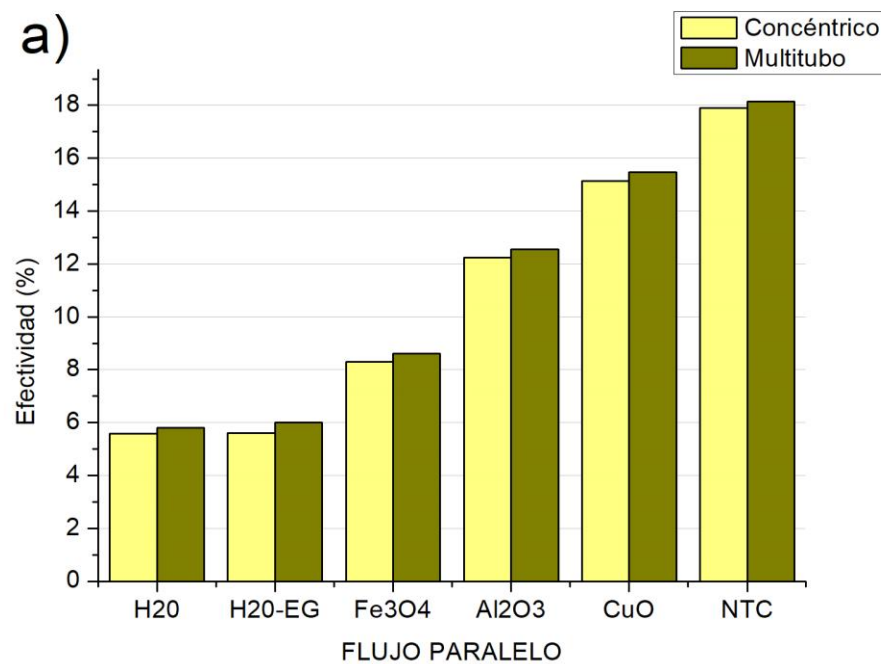
Nota: a) Flujo paralelo; b) Contraflujo.

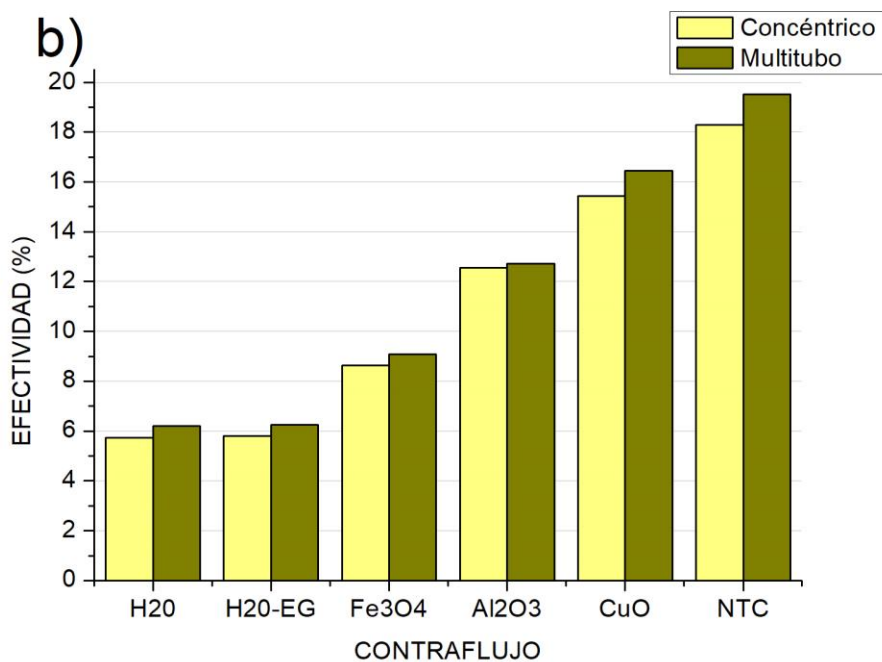
Como se puede ver en la Figura 46 se evidencia que entre las 6 sustancias de trabajo existe mejor eficiencia con respecto al fluido base H₂O, el nanofluido con mayor efectividad es el que cuenta con nanotubos de carbono (NTC), comparando los procesos con la misma sustancia se puede ver que tiene mayor efectividad el proceso en el intercambiador de calor multitubo. En flujo paralelo la mayor efectividad es de 15.9% en NTC, 10.08% mayor que la del fluido base H₂O. Mientras que en contraflujo el mayor valor sigue siendo de NTC con 16.72%, con un 10.52% mayor que el fluido base H₂O.

Concentración 0.1%

Figura 47

Curvas de Efectividad (ϵ) vs Reynolds (Re) de los diferentes fluidos con concentración 0.1





Nota: a) Flujo paralelo; b) Contraflujo.

Como se puede ver en la Figura 47 se evidencia que entre las 6 sustancias de trabajo, el nanofluido con mayor efectividad es el que cuenta con nanotubos de carbono (NTC) y comparando los procesos con la misma sustancia se puede ver que tiene mayor efectividad el proceso con el intercambiador de multitubo. En flujo paralelo la mayor efectividad es de 18.13% en NTC, 12.31% mayor que la del fluido base H₂O. Mientras que en contraflujo el mayor valor sigue siendo de NTC con 19.51%, con un 13.31% mayor que el fluido base H₂O.

Análisis Reológico

Mediante la utilización del REÓMETRO DISCOVERY DHR2 del Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se pudo realizar el análisis de los diferentes fluidos utilizados en este trabajo, lo que se efectuó fue un análisis de cada muestra a tres diferentes temperaturas 5°C, 10°C y 15°C.

Figura 48

REÓMETRO DISCOVERY DHR2



Gráficas Obtenidas

Las gráficas realizadas del estudio reológico de los nanofluidos, muestran claramente un comportamiento Newtoniano de los fluidos, hay q resaltar que en la taza de corte a partir de 400 1/s se evidencia un incremento en el esfuerzo, sin embargo este fenómeno se da por la turbulencia que se genera, ya que en el ajuste reológico realizado mediante el programa

ORIGIN, se evidencia una línea recta que describe a los fluidos newtonianos. En cuanto a la viscosidad se denota que al incrementar la temperatura de análisis la viscosidad aumenta.

Figura 49

Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – H₂O

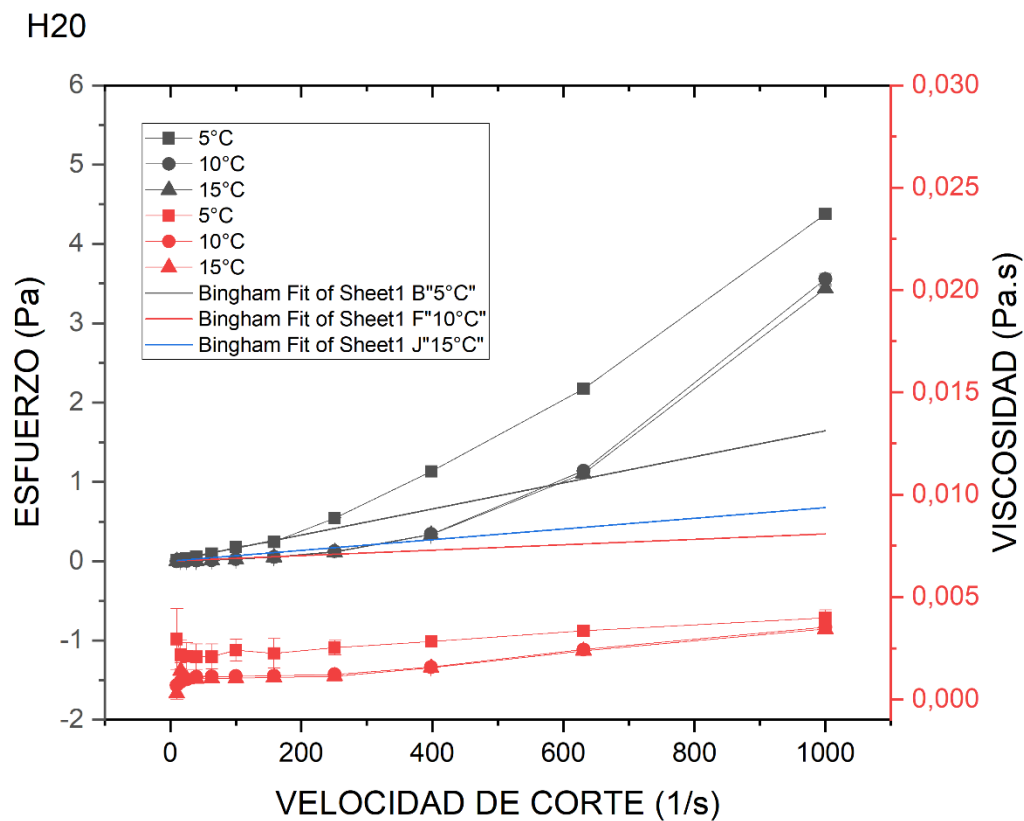


Tabla 10

Ajuste reológico del esfuerzo - H₂O

Model	Bingham		
Equation	$y = y_0 + A \cdot x$;		
Plot	5°C	10°C	15°C
y0	$0 \pm 0,01357$	$0 \pm 0,0041$	$0 \pm 0,01624$
A	$0,00164 \pm 1,52557E-4$	$3,42438E-4 \pm 1,23018E-4$	$6,74478E-4 \pm 3,49186E-4$
Reduced Chi-Sqr	17118,5385	3255,11515	31733,52711
R-Square (COD)	0,92761	0,30191	-0,8334
Adj. R-Square	0,91957	0,22435	-1,03711

Figura 50

Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – NTC 0.03%

NTC 0.03%

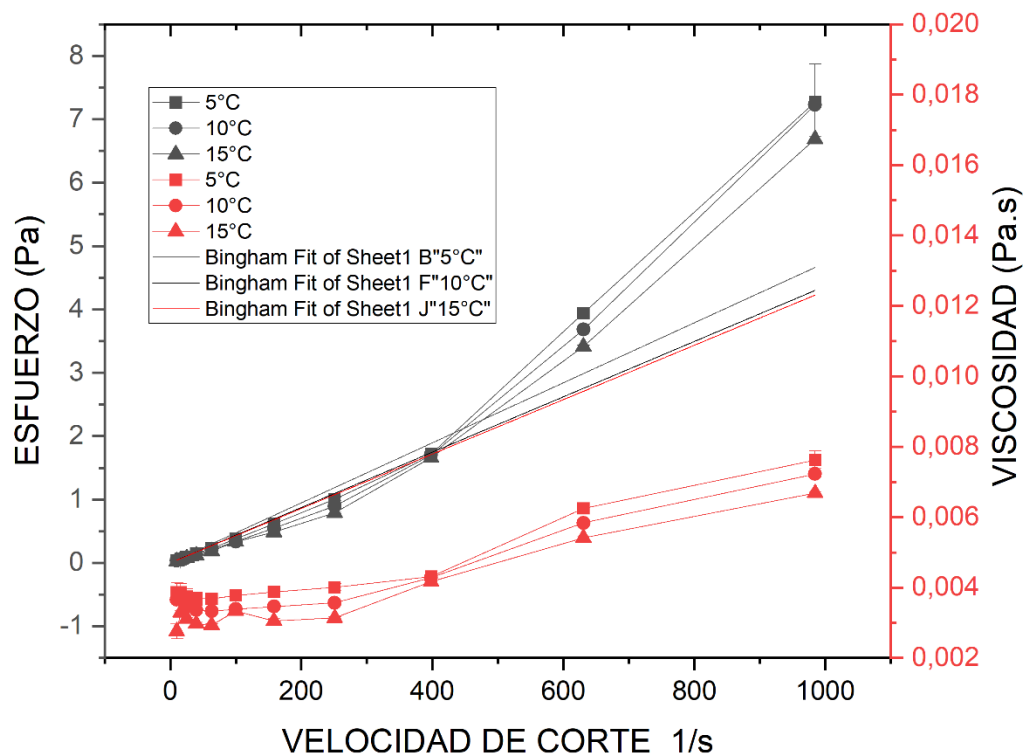


Tabla 11

Ajuste reológico del esfuerzo – NTC 0.03%

Model	Bingham		
Equation	$y = y_0 + A \cdot x$;		
Plot	5°C	10°C	15°C
y0	$0 \pm 0,02844$	$0 \pm 0,01077$	$0 \pm 0,02031$
A	$0,00474 \pm 3,03917E-4$	$0,00437 \pm 4,82057E-4$	$0,00429 \pm 2,91791E-4$
Reduced Chi-Sqr	201,96218	15339,55769	1360,20962
R-Square (COD)	0,96417	0,89757	0,95965
Adj. R-Square	0,96019	0,88619	0,95517

Figura 51

Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – NTC 0.1%

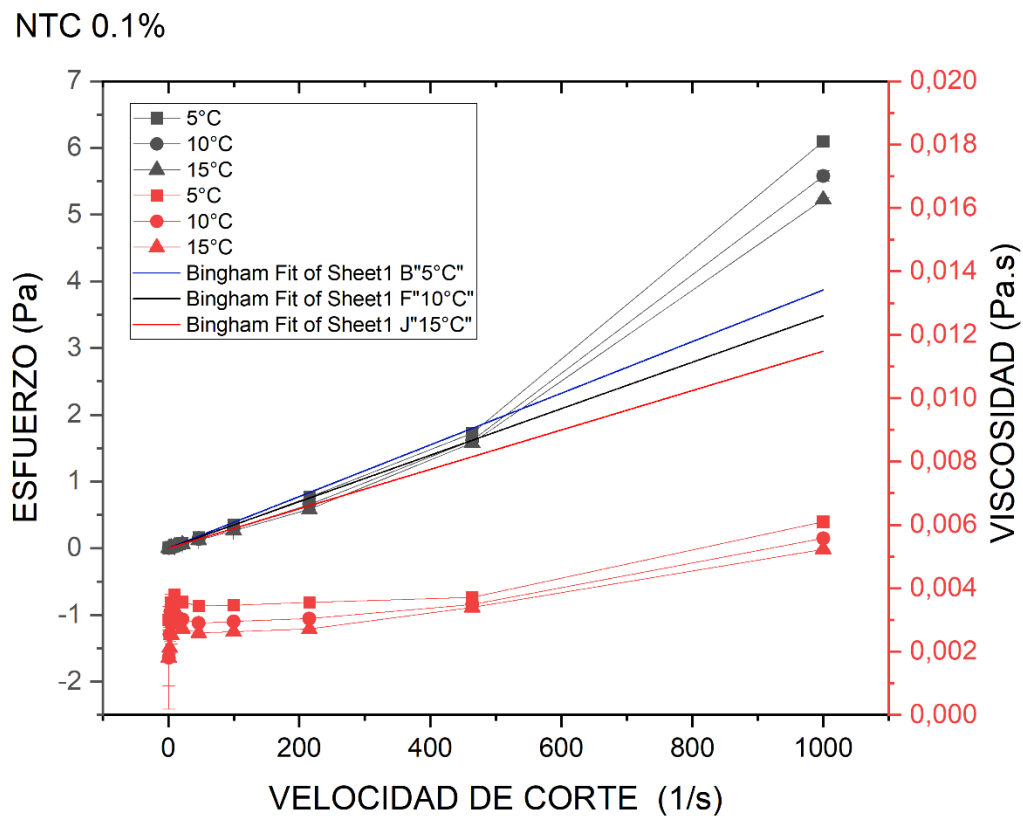


Tabla 12

Ajuste reológico del esfuerzo – NTC 0.1%

Model	Bingham		
Equation	$y = y_0 + A \cdot x$;		
Plot	5°C	10°C	15°C
y0	$0 \pm 0,00247$	$0 \pm 0,00176$	$0 \pm 0,01446$
A	$0,00387 \pm 2,88908E-4$	$0,00348 \pm 4,6516E-5$	$0,00295 \pm 2,69252E-4$
Reduced Chi-Sqr	123,47617	199,67813	2124,80961
R-Square (COD)	0,95725	0,99858	0,93745
Adj. R-Square	0,9519	0,9984	0,92963

Figura 52

Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – Al_2O_3 0.03%

Al_2O_3 0.03%

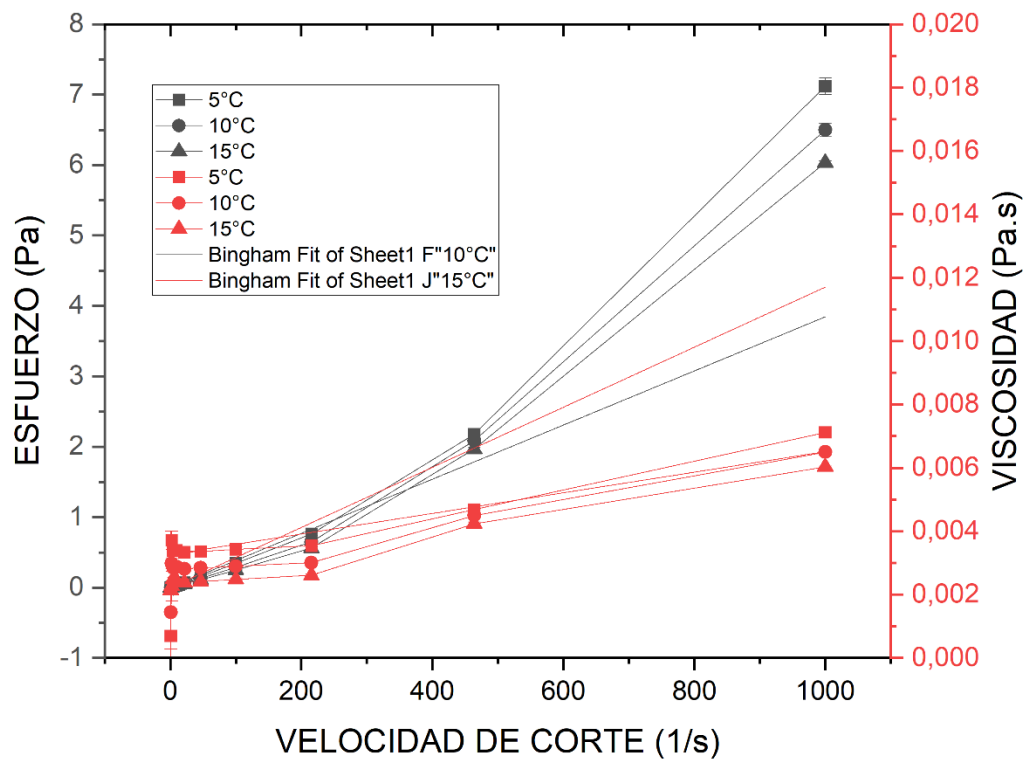


Tabla 13

Ajuste reológico del esfuerzo – Al_2O_3 0.03%

Model	Bingham		
Equation	$y = y_0 + A \cdot x$;		
Plot	5°C	10°C	15°C
y0	$0,00326 \pm 7,62385E-5$	$0 \pm 0,00353$	$0 \pm 0,00747$
A	$3,25283E-6 \pm 2,50311E-7$	$0,00384 \pm 4,46687E-4$	$0,00427 \pm 7,14106E-4$
Reduced Chi-Sqr	9,6349	436,36339	1711,50545
R-Square (COD)	0,95477	0,89884	0,80533
Adj. R-Square	0,94912	0,8862	0,78099

Figura 53

Curvas obtenidas del reómetro a diferentes temperaturas – Al_2O_3 0.1%

Al_2O_3 0.1%

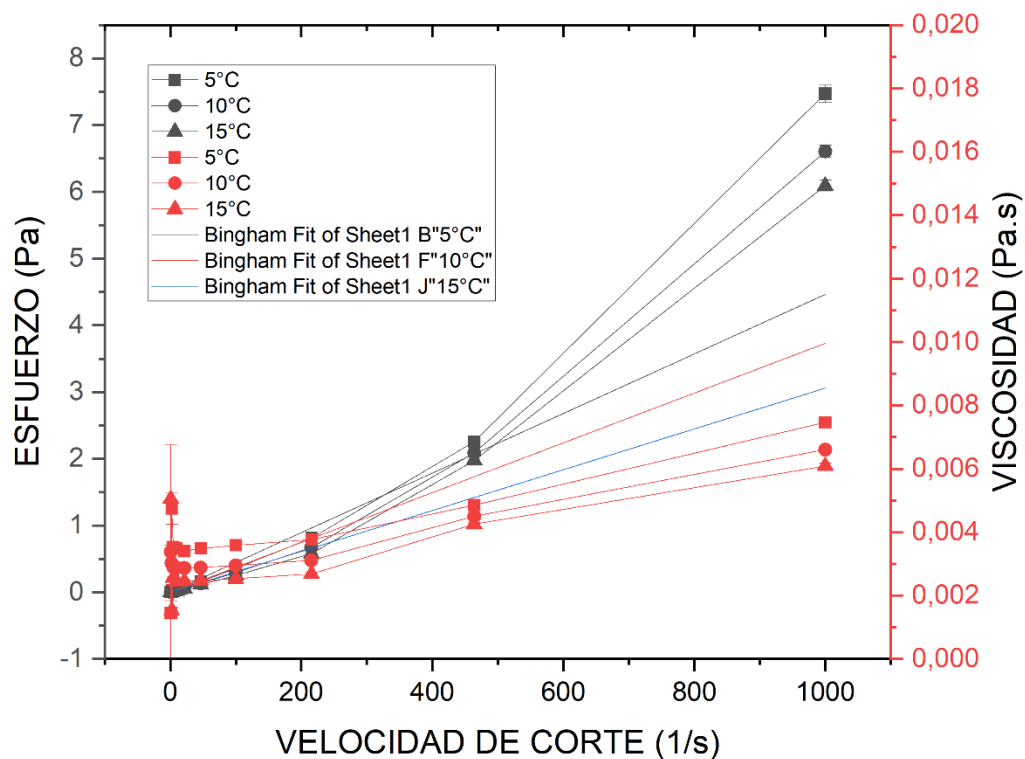


Tabla 14

Ajuste reológico del esfuerzo – Al_2O_3 0.1%

Model	Bingham		
Equation	$y = y_0 + A \cdot x$;		
Plot	5°C	10°C	15°C
y0	$0 \pm 0,00477$	$0 \pm 0,00474$	$0 \pm 0,00303$
A	$0,00446 \pm 3,97825E-4$	$0,00373 \pm 4,74735E-4$	$0,00306 \pm 4,16313E-4$
Reduced Chi-Sqr	198,95315	308,22645	455,00364
R-Square (COD)	0,93923	0,88141	0,86611
Adj. R-Square	0,93163	0,86659	0,84937

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Los nanofluidos de Fe_3O_4 , Al_2O_3 , CuO y NTC mejoran la capacidad de transferencia de calor y hace que su uso en intercambiadores de calor sea una opción interesante, que lleva a un mejor rendimiento del sistema y por ende a un mejor resultado en la eficiencia energética. Sin embargo, la estabilidad de los nanofluidos y su forma de producción son factores importantes que influyen en la comercialización de los nanofluidos para que puedan ser utilizados.
- Se concluye que el mejor valor de transferencia de calor en ambas concentraciones se da al utilizar nanotubos de carbono (NTC) en el intercambiador de calor multitubo a contraflujo, en 0.03% con un valor de 45.23 kW que representa 3.22 veces más que el valor del fluido base Agua; y en la mayor concentración 0.1% con un valor de 49.31 kW que representa 3.51 veces más que el valor del fluido base Agua.
- EL coeficiente de convección (h) presenta su mayor valor para la concentración de 0.03% en el ensayo d) IMC obteniendo un valor de 2345.04 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ que es 6.02% mayor que el fluido base; en la concentración 0.1% en el ensayo d) IMC obteniendo un valor de 2371.68 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ que es 7.22% mayor que el fluido base.
- El mayor coeficiente global de transferencia de calor (U) para la concentración de 0.03%, se presenta en nanotubos de carbono (NTC) en el intercambiador de calor multitubo a contraflujo, con un valor de 2371.61 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ y para la concentración de 0.1% un valor de 2398.26 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$.
- Las gráficas de Nusselt demuestran que las curvas de los nanofluidos están por debajo de la curva del fluido base, lo que indica que en la transferencia de calor el proceso que esta predominando es la conducción.

- Los resultados en las gráficas de Prandtl tanto para la concentración de 0.03% y 0.1% evidencian que la difusividad térmica predomina en cada uno de los nanofluidos en comparación con el fluido base, lo que ayuda contundentemente en la transferencia de calor, cada nanopartícula se diferencia debido a sus propiedades C_p , k , μ .
- La mayor efectividad alcanzada está presente en NTC en el intercambiador de calor multitubo a contraflujo, en la concentración de 0.03% con 16.72%, siendo 10.52% superior al del fluido base; y para la concentración de 0.1% con 19.51%, siendo 13.31% superior al fluido base, cabe mencionar que el intercambiador multitubo presenta mejores valores comparándolo con el intercambiador concéntrico.

Recomendaciones

- Se necesitan más investigaciones teóricas y experimentales sobre la conductividad térmica y la viscosidad efectiva para demostrar el potencial de estos fluidos y comprender las características de transferencia de calor de los nanofluidos, así como identificar aplicaciones nuevas y únicas para estos campos.
- Se recomienda en la preparación de los nanofluidos, tener tiempos mayores tanto en la etapa de agitación magnética como en la de sonicación, con el objetivo de que los nanofluidos presenten mayor estabilidad, o a su vez conseguir equipos semi industriales para estos procesos.
- Ejecutar ensayos de las nanopartículas produciendo mezclas híbridas, para ver si éstas presentan mejores resultados que las mostradas en este trabajo.
- Se recomienda el uso de microscopio electrónico como método de control para observar la distribución de las nanopartículas en el fluido base.

Bibliografía

- Admin. (21 de Septiembre de 2018). *Enfoque alimentos*. Obtenido de <http://www.enfoquealimentos.com/blog/2018/09/21/intercambiadores-de-calor-a-placas-y-aplicaciones-industriales/>
- Akbarzadeh, S., Farhadi, M., Sedighi, K., & Ebrahimi, M. (2014). "Experimental Investigation on the Thermal Conductivity and Viscosity of ZnO Nanofluid and Development of New Correlations",. *Nano and Micro Scales*, 2(2), 149-160. doi: 10.7508/TPNMS.2014.02.007
- Alba, R. (2006). *pi-dir*. Obtenido de <http://pi-dir.com/calor/index.html>
- Araque, E. (04 de Diciembre de 2014). *SLIDESHARE*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://es.slideshare.net/Invassat-GVa/araque-e-2014-la-nanotecnologia-en-la-industria-tipos-y-aplicaciones-principales-de-los-nanomateriales>
- Batchelor, G. K. (1977). The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. 97-117.
- Brinkman, H. C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. 571.
- Brujin, H. d. (1942). The viscosity of suspensions of spherical particles. 863-887.
- Caiza, A., & Caiza, L. (Agosto de 2019). *ANÁLISIS Y SIMULACIÓN MEDIANTE FLUENT DE ANSYS DEL PROCESO DE EVAPORACIÓN DE LA MEZCLA DE REFRIGERANTE 600a Y NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE COBRE EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO RECTO*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, Quito. Recuperado el 02 de Junio de 2020
- Chandrasekar, M., Suresh, S., & Senthilkumar, T. (2012). Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3917-3938. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.013>
- Chaupis, J. (2013). *Análisis térmico e hidrodinámico del flujo de nanofluidos con propiedades termofísicas modificadas fluyendo a través de una tubería recta y su efecto sobre la transferencia de calor*. Lima.
- Chaupis, R., & Edher, J. (2013). *Análisis térmico e hidrodinámico del flujo de nanofluidos con propiedades termofísicas modificadas fluyendo a través de una tubería recta y su efecto sobre la transferencia de calor*. Lima.
- Chevalier, J., Tillement, O., & Ayela, F. (2007). Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. *Applied Physics Letters*, 1-4.
- Choi, L., & Eastman, J. . (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *Developments and Applications of Non-Newtonian FLOws* , ASME, 99-105.

- CONCEPTODEFINICION*. (06 de Febrero de 2021). Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://conceptodefinicion.de/magnetita/>
- Dehaj, M., & Mohiabadi, M. (2019). Experimental investigation of heat pipe solar collector using MgO nanofluids. 91-99.
- Devendiran, D. K., & Amirtham, V. A. (2016). A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 21-40. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.055>
- ECURED. (s.f.). *ECURED*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de [https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_cobre_\(II\)#:~:text=Es%20un%20%C3%B3xido%20met%C3%A1lico%2C%20de,Su%20f%C3%B3rmula%20qu%C3%ADmica%20es%20CuO.](https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_cobre_(II)#:~:text=Es%20un%20%C3%B3xido%20met%C3%A1lico%2C%20de,Su%20f%C3%B3rmula%20qu%C3%ADmica%20es%20CuO.)
- Einstein, A. (1906). Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. 289-306.
- Escobar, F. (2017). *DOCPLAYER*. Obtenido de <https://docplayer.es/40438110-Universidad-nacional-experimental-francisco-de-miranda-area-de-tecnologia-complejo-docente-el-sabino-programa-ingenieria-quimica-catedra-fenomeno-de.html>
- Florez, W. (02 de Marzo de 2020). *GOCONQR*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://www.goconqr.com/es/quiz/3401039/nanotecnologia>
- Frank P. Incropera, D. P. (s.f.). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (Cuarta ed.). Pearson Education.
- Garduño, M. (16 de Noviembre de 2011). Fabricación de nanopartículas metálicas para aplicaciones fotovoltaicas. México D.F. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17839/1/Fabricacion%20de%20nanoparticulas%20metalicas.pdf>
- Godson, L., Raja, B., Lal, D. M., & Wongwises, S. (22 de Septiembre de 2010). Experimental Investigation on the Thermal Conductivity and Viscosity of Silver-Deionized Water Nanofluid. *Experimental Heat Transfer*, 23(4), 317-332. doi:<https://doi.org/10.1080/08916150903564796>
- GOODFELLOW*. (s.f.). Recuperado el 02 de Junio de 2021, de <http://www.goodfellow.com/S/Alumina.html>
- Gupta, M., & Singh, V. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 638-670.
- Hajjar, Z., Rashidi, A., & Ghozatloo, A. (Octubre de 2014). Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 128-131. doi:<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.018>

- Hasanpour, A., Farhadi, M., & Sedighi, K. (2014). review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *55*, 53-62. doi:<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.04.008>
- Haynes, W. (2014). *Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Ratón: CRC Press.
- Huminic, G., & Huminic, A. (2018). Hybrid nanofluids for heat transfer applications – A state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *125*, 82-103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.059>
- Jafari, S. M., Saramnejad, F., & Dehnad, D. (2018). Designing and application of a shell and tube heat exchanger for nanofluid thermal processing of liquid food products. *Journal of Food Process Engineering*, *41*. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12658>
- Korolev, V., Arefyev, I., & Blinov, A. (2008). HEAT CAPACITY OF SUPERFINE OXIDES OF IRON UNDER APPLIED MAGNETIC FIELDS. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *92*(03), 697-700.
- Kulkarni, D., Vajjha, R., Das, D., & Oliva, D. (2008). Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant. *Applied Thermal Engineering*, *28*(14-15), 1774-1781. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.11.017>
- Kumar Verma, S., & KumarTiwari, A. (2015). Progress of nanofluid application in solar collectors: A review. *Energy Conversion and Management*, *100*, 324-346. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.071>
- Kumar, N., Sonawane, S., & Sonawane, S. H. (2018). Experimental study of thermal conductivity, heat transfer and friction factor of Al₂O₃ based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *90*, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.001>
- Kunshan Yosoar New Materials Co. ltd. (20 de Mayo de 2021). *YOSOAR*. Obtenido de <https://copper-powder99.com/contact-us/>
- Lomascolo, M., Colangelo, G., Milanese, M., & De Risi, A. (2015). Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results. *Renew. Sustain. Energy Rev*, *43*, 1182-1198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.086>
- Maré, T., Halefadi, S., Sow, O., Estellé, P., Duret, S., & Bazantay, F. (2011). *Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger*.
- Martaelm. (29 de Septiembre de 2014). Obtenido de <https://lamamapachama.wordpress.com/2014/09/29/aplicaciones-de-la-nanotecnologia-en-la-agricultura-e-industria-alimentaria/>

- Martínez, V. (2016). *Estudio del tratamiento a altas presiones en la estabilidad de un nanofluido*. Universidad de Santiago de Chile.
- MEETTHINGS. (23 de Mayo de 2016). Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://meetthings.com/blog/index.php/23-05-2015/nanotubo-de-carbono-que-es/>
- Mendoza, G., & Rodríguez, L. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una evolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos*(29), 161-186. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/115/11502906.pdf>
- NANOTECNOLOGO. (15 de marzo de 2019). Recuperado el 29 de abril de 2021, de <https://nanotecnologo.com>
- Poinern, G., Brundavanam, S., Fung, C., Fawcett, D., & Chamsa-ard, W. (2017). Nanofluid Types, Their Synthesis, Properties and Incorporation in Direct Solar Thermal Collectors: A Review.
- Qian, X., Lin Liu, C., Junxiao, F., Lihong, Q., Chuqiao, Y., Wenjun, S., . . . D., Y. (2019). A comparative investigation on the effect of different nanofluids on the thermal performance of two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119189>
- Qiang, L., & Yimin, X. (2002). *Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-nanofluid*. China: Sci. China (Series E).
- Ramalingam, S., Dhairiyasamy, R., & Govindasamy, M. (2019). Consequence of nanoparticle physiognomies on heat transfer characteristics of heat exchanger. *Energy Sources Part A Recover Util Environ Eff*. doi:<https://doi.org/10.1080/15567>
- Ranjbarzadeh, R., Meghdadi, A. H., Afrand, M., Karimipour, A., & Hojaji, M. (2017). An experimental study on heat transfer and pressure drop of water/graphene oxide nanofluid in a copper tube under air cross-flow: Applicable as a heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 126, 69-79. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.110>
- Rudyak, V., & Minakov, A. (2018). Thermophysical properties of nanofluids. 91-99.
- S.f. (03 de Diciembre de 2010). *EPA.GOV*. Obtenido de <https://web.archive.org/web/20101203205130/http://www.epa.gov/apti/bces/module3/category/category.htm>
- Sacome. (21 de Octubre de 2019). *Sacome*. Obtenido de <https://www.sacome.com/intercambiador-tubular-usos-ventajas-aplicaciones/>
- Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Saidur, R., Mehrali, M., Tahan Latibari, S., Akhiani, A. R., & Cornelis, H. (01 de Marzo de 2016). A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications. *Energy Conversion*

- and Management*, 111, 466-487.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.004>
- Saidur, R., Leong, K., & Mohammad, H. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15, 1646-1668.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>
- Saini, D., & Das Agarwal, G. (2016). Thermo-Physical Properties of Nano Fluids- A Review. 39-45.
- Sánchez, M. (Octubre de 2017). Nanopartículas de plata: preparación, caracterización, y propiedades con aplicaciones en inocuidad de los alimentos. España.
- Santos, A. (23 de Septiembre de 2017). *NANOVA ORG*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://nanova.org/fabricacion-de-nanoparticulas/>
- Scherrer, P. (s.f.). *Laboratory for Micro and Nanotechnology*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://www.psi.ch/lmn/about-lmn>
- Segarra, C. (2020). *Estudio de la dispersión de nanopartículas en medio acuoso para su posterior aplicación como fluido térmico*. UNIVERSITAT JAUME I DE CASTELLÓ, Castellon de la Plana.
- Seong, H., Kim, G., Jeon, J., Jeong, H., Noh, J., Kim, Y., & ... Huh, S. (2018). Experimental Study on Characteristics of Grinded Graphene Nanofluids with Surfactants. *Materials*, 11, 1-8. doi:<https://doi.org/10.3390/ma11060950>
- Soutullo, R. G. (25 de Junio de 2018). *Ingeniero Marino*. Obtenido de <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>
- Suganthi, K. S., & Rajan, K. S. (2017). Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 226-255.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.043>
- Suroso, B., Kamal, S., Kristiawan, B., Irawansyah, H., Wibowo, B., & M., Y. (2019). Convective heat transfer of nanofluids TiO₂/Thermo Oil XT 32 in concentric tube heat exchanger. *Serie de conferencias IOP: Ciencia e ingeniería de materiales*, 674. doi:[doi:10.1088/1757-899X/674/1/012063](https://doi.org/10.1088/1757-899X/674/1/012063)
- Tawfik, M. (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.111>
- Vahdat Azad, A., & Vahdat Azad, N. (2016). Application of nanofluids for the optimal design of shell and tube heat exchangers using genetic algorithm. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 198-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.07.004>

- Vand, V. (1948). Viscosity of solutions and suspensions. I. Theory. *ACS Publications*, 277-299.
- Vargas, C. (29 de Octubre de 2011). *MENTE ACIDA*. Obtenido de <https://menteacida.com/fe3o4-hierro-ii-iii-de-oxido.html>
- Veléz, C. (2018). *Conductividades térmicas de sistemas con cambio de fase: nanofluidos*. Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, Departamento de Física Aplicada I (Termología), Madrid. Recuperado el 01 de Junio de 2021, de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/47591/1/T39914.pdf>
- Wang, B., Zhou, L., Peng, X., Du, X., & Yang, Y. (2010). On the specific heat capacity of CuO nanofluid.
- Xuan, Y., & Roerzel, W. (2000). *International Journal of Heat Mass Transfer*. Nanjing: Board.
- Yanjiao, L., Tung, S., Schneider, E., & Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*, 196(02), 89-101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.025>
- Yu, F., Chen, C., Liang, X., Xu, J., & Lee, C. (Octubre de 2017). Dispersion stability of thermal nanofluids. *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(5), 531-542. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.08.010>
- Yunus A. Cengel, M. A. (s.f.). *Termodinámica* (Octava ed.). Mc Graw Hill Education.
- Zanella, R. (Marzo de 2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas controlando forma y tamaño. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 5(1). doi:10.22201/ceiich.24485691e.2012.1.45167
- Zarzycki, A. (2014). En la fuente de la nanotecnología. *TecnoLógicas*, 17(32). Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992014000100001
- Zhen-Hua Liu, Y.-Y. L. (2012). A new frontier of nanofluid research – Application of nanofluids in heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 6786-6797. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.086>

Anexos