



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

**Estudio teórico experimental de la transferencia de calor en termosifón de tubos paralelos utilizando una mezcla de agua y nanopartículas de nanotubos de carbono,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  como fluido caloportador**

Haro Mora, Fernando Patricio y Heredia Ramos, Juan Carlos

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

**03 de marzo de 2022**



PROYECTO DE TITULACIÓN\_HARO MORA FERNANDO PATRI...

Scanned on: 17:36 February 25, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	0
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	0
Omitted Words	0



LUIS MIGUEL  
CARRION  
MATAMOROS




### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Estudio teórico experimental de la transferencia de calor en termosifón de tubos paralelos utilizando una mezcla de agua y nanopartículas de nanotubos de carbono,  $Al_2O_3$  y  $Fe_3O_4$  como fluido caloportador" fue realizado por los señores Haro Mora Fernando Patricio y Heredia Ramos Juan Carlos, 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, 25 de Febrero de 2022

Firma



Ing. Carrión Matamoros Luis Miguel

Director de trabajo de titulación

CI: 1103574677



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, Haro Mora Fernando Patricio, con cédula de identidad N° 172315891-9 y Heredia Ramos Juan Carlos, con cédula de identidad N° 172504539-5, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “Estudio teórico experimental de la transferencia de calor en termosifón de tubos paralelos utilizando una mezcla de agua y nanopartículas de nanotubos de carbono,  $Al_2O_3$  y  $Fe_3O_4$  como fluido caloportador” 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, 25 de Febrero de 2022

Heredia Ramos Juan Carlos  
CI: 172504539-5

Haro Mora Fernando Patricio  
CI: 172315891-9



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA


CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros, Haro Mora Fernando Patricio, con cédula de identidad N° 172315891-9 y Heredia Ramos Juan Carlos, con cédula de identidad N° 172504539-5, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar el trabajo de titulación: "Estudio teórico experimental de la transferencia de calor en termosifón de tubos paralelos utilizando una mezcla de agua y nanopartículas de nanotubos de carbono,  $Al_2O_3$  y  $Fe_3O_4$  como fluido caloportador" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 25 de Febrero de 2022

  
Heredia Ramos Juan Carlos  
Ci: 172504539-5

  
Haro Mora Fernando Patricio  
Ci: 172315891-9

### **Dedicatoria**

El presente trabajo de titulación está dedicado a Dios, a la Santísima Virgen del Quinche, a mi madre, hermanos, abuelos y familia ya que sin su apoyo y colaboración mi sueño de obtener un título de tercer nivel no hubiera sido posible.

**Fernando P. Haro M.**

A mi Padre Carlos, por brindarme todo el apoyo incondicional a lo largo de la carrera universitaria, por ser el pilar más importante en mi vida, a mi madre y hermano Fernando por sus consejos, motivación y cariño, a mis amigos y familiares ya que sin ellos esta meta no sería posible.

**Juan C. Heredia R.**

## **Agradecimiento**

A Dios, a la Santísima Virgen del Quinche por la vida y las oportunidades que me han brindado  
para cumplir este objetivo.

A mi madre, hermanos y abuelos que han sido un pilar fundamental, una guía de vida y  
perfectos ejemplos a seguir de esfuerzo, sacrificio, constancia y dedicación.

A Marilyn por ser uno de mis pilares, gracias a su apoyo, sus consejos, su respeto, su cariño y su  
amor he sido capaz de superar las situaciones complicadas que se han presentado, gracias por  
formar parte de mi vida.

Al personal docente que trabajó en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE durante mis  
estudios, gracias por compartir su conocimiento y experiencia para poder formar el profesional  
en el que me he convertido y que aspiro ser, especialmente al Ing. Luis Carrión tutor del  
presente proyecto por brindarnos la oportunidad y la confianza de llevar a cabo este trabajo de  
titulación.

**Fernando P. Haro M.**

A los laboratorios y laboratoristas de Conversión de la Energía y Fluidos, a la Universidad de las  
Fuerzas Armadas ESPE, por permitirnos hacer uso de las instalaciones. Al director de tesis y  
estimado profesor Ing. Luis Miguel Carrión Matamoros por darnos la ayuda requerida para la  
realización y posterior presentación de este proyecto de titulación.

**Juan C. Heredia R.**

## Tabla de contenido

Reporte Copyleaks .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de autoría .....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de tablas .....	11
Índice de figuras.....	11
Resumen .....	17
Abstract.....	18
Capítulo 1: Generalidades .....	19
Introducción.....	19
Antecedentes.....	22
Definición del problema .....	24
Objetivos.....	25
<i>Objetivo General</i> .....	25
<i>Objetivos Específicos</i> .....	26
Justificación.....	26
Alcance.....	27
Capítulo 2: Marco Teórico .....	28
Nanotecnología.....	28
<i>Aplicaciones de la Nanotecnología</i> .....	29
Nanopartículas.....	30
<i>Principales Nanopartículas</i> .....	30
<i>Métodos de obtención (nanopartículas)</i> .....	32
Nanopartículas de análisis.....	35
<i>Oxido de Aluminio – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> .....	35
<i>Óxido de cobre - CuO</i> .....	36
<i>Óxido de hierro – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i> .....	37
<i>Nanotubos de carbono</i> .....	38
Nanofluidos.....	39
<i>Factores que influyen en la conductividad térmica de nanofluidos</i> .....	39



<i>Estabilidad de los nanofluidos</i> .....	41
Transferencia de calor.....	41
<i>Conducción</i> .....	42
<i>Convección</i> .....	44
<i>Conservación de la energía para un volumen de control</i> .....	45
<i>Balance de energía en una superficie</i> .....	45
<i>Sistemas radiales</i> .....	46
<i>Capa limite</i> .....	47
<i>Número de Nusselt</i> .....	48
<i>Número de Prandtl</i> .....	48
<i>Número de Reynolds</i> .....	49
<i>Flujo interno y flujo externo</i> .....	50
<i>Flujo laminar y flujo turbulento</i> .....	50
<i>Flujo sobre banco de tubos</i> .....	51
<i>Zukauskas</i> .....	53
Intercambiadores de calor .....	56
Tipos de un intercambiador de calor (IC) .....	57
Intercambiador de calor de tubo y coraza (termosifón) .....	57
Análisis del termosifón .....	58
Resistencias térmicas .....	58
Cálculo de la eficiencia $\epsilon$ .....	61
<i>Aplicaciones en la industria del termosifón</i> .....	62
Capítulo 3: Diseño, construcción, calibración de equipo y preparación.....	63
Diseño del termosifón de tubos paralelos. Dimensiones generales 21x32x40 cm.....	63
Proceso de construcción .....	64
Sellado del intercambiador de tubos paralelos (coraza).....	68
Diseño para las fuentes (entrada y salida) del intercambiador de calor .....	70
Construcción de una mesa soporte para el equipo .....	71
Montaje y puesta a punto del equipo (termosifón).....	73
Definición de parámetros.....	77
<i>Lado Caliente</i> .....	77
<i>Lado Frío</i> .....	77
Datos a ser recolectados .....	79

Ensayos de funcionamiento .....	81
Preparación de los nanofluidos .....	82
<i>Para 0,1%, 0,5% y 1,5% Y etilenglicol</i> .....	82
Preparación del nanofluido .....	83
<i>Ejemplo de pesaje al 0,5% de nanopartículas</i> .....	84
<i>Agitación de la nanopartícula (Magnética)</i> .....	86
<i>Proceso de Sonicación</i> .....	86
<i>Procedimiento para uso del equipo y pruebas</i> .....	88
<i>Ejemplo de tablas de datos a ser obtenidas en la prueba del equipo</i> .....	89
Capítulo 4: experimentación .....	91
Análisis de Transferencia de calor .....	91
Coeficiente de convección (h) y resistencia térmica .....	91
Análisis de Transferencia de calor individual de los nanofluidos .....	93
Análisis global de transferencia de calor de los nanofluidos en diferentes concentraciones .....	97
Eficiencia .....	100
Análisis de Eficiencia individual de los nanofluidos .....	100
Análisis global de eficiencia de los nanofluidos en diferentes concentraciones .....	104
Costos Directos .....	107
<i>Remuneración a Docentes</i> .....	107
<i>Remuneración a Estudiantes</i> .....	107
<i>Costo de materiales</i> .....	108
<i>Costo de alquiler de máquinas</i> .....	111
<i>Costo de herramientas</i> .....	112
Costos Indirectos .....	112
<i>Costos Asumidos</i> .....	113
Costo Total del proyecto .....	113
Cálculo de retorno de la inversión .....	114
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones .....	116
Conclusiones .....	116
Recomendaciones .....	117
Bibliografía .....	119

### Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Aplicaciones de interés de la nanotecnología en la industria</i> .....	29
<b>Tabla 2</b> <i>Números de Prandtl para fluidos conocidos</i> .....	49
<b>Tabla 3</b> <i>Propiedades termofísicas del aire (presión atmosférica)</i> .....	54
<b>Tabla 4</b> <i>Posibles aplicaciones del termosifón de tubos y coraza</i> .....	62
<b>Tabla 5</b> <i>Tabla de datos de temperaturas</i> .....	89
<b>Tabla 6</b> <i>Tabla de datos de presión</i> .....	89
<b>Tabla 7</b> <i>Tabla de datos de velocidad</i> .....	90
<b>Tabla 8</b> <i>Características de las nanopartículas utilizadas</i> .....	90
<b>Tabla 9</b> <i>Costo de remuneración al docente, tutor y laboratorista.</i> .....	107
<b>Tabla 10</b> <i>Costo de remuneración a los estudiantes, responsables del proyecto.</i> .....	107
<b>Tabla 11</b> <i>Costos de materiales utilizados durante el proyecto.</i> .....	108
<b>Tabla 12</b> <i>Costos de alquiler de máquinas durante el proyecto</i> .....	111
<b>Tabla 13</b> <i>Costos de herramientas utilizadas durante el proyecto.</i> .....	112
<b>Tabla 14</b> <i>Costos que influyeron indirectamente en el proyecto</i> .....	112
<b>Tabla 15</b> <i>Costos asumidos por los responsables del proyecto y la Universidad.</i> .....	113
<b>Tabla 16</b> <i>Costo total del Proyecto (Costos Directos e indirectos)</i> .....	114
<b>Tabla 17</b> <i>Valores mensuales recuperados en los mejores resultados</i> .....	115
<b>Tabla 18</b> <i>Tiempo de recuperación del costo total del proyecto.</i> .....	115

### Índice de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Termosifón de bucle (loop)</i> .....	19
<b>Figura 2</b> <i>Termosifón, Proceso interno en los tubos de cobre, con la mezcla de agua y Nanopartículas.</i> .....	20
<b>Figura 3</b> <i>Intercambiador de Calor tipo Termosifón de tubos paralelos.</i> .....	21
<b>Figura 4</b> <i>Aplicaciones de las nanotecnología industrialmente</i> .....	31
<b>Figura 5</b> <i>Proceso Top Down y Bottom-Up (Condiciones)</i> .....	32
<b>Figura 6</b> <i>Métodos Top-Down y Bottom-Up (Desglose)</i> .....	32
<b>Figura 7</b> <i>Proceso Molienda (Top Down)</i> .....	33
<b>Figura 8</b> <i>Procesamiento de partículas (obtención química)</i> .....	34
<b>Figura 9</b> <i>Oxido de Aluminio (Nanopartícula)</i> .....	35
<b>Figura 10</b> <i>Oxido de Cobre (Nanopartícula)</i> .....	36
<b>Figura 11</b> <i>Óxido de Hierro (Nanopartícula)</i> .....	37
<b>Figura 12</b> <i>Nanotubos de Carbono NTC (Nanopartícula)</i> .....	38
<b>Figura 13</b> <i>Formas existentes en las nanopartículas</i> .....	40
<b>Figura 14</b> <i>Transferencia de calor por conducción (actividad molecular)</i> .....	42
<b>Figura 15</b> <i>Transferencia de calor por conducción (unidimensional)</i> .....	43
<b>Figura 16</b> <i>Circuito térmico equivalente para cilindro hueco</i> .....	46
<b>Figura 17</b> <i>Capa límite de velocidad o hidrodinámica en una placa plana</i> .....	48
<b>Figura 18</b> <i>Configuración en un banco de tubos alineados o escalonados</i> .....	51
<b>Figura 19</b> <i>Constantes de la Ecuación 20, para el banco de tubos en flujo cruzado</i> .....	54
<b>Figura 20</b> <i>Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para <math>NL &gt; 16</math> y <math>0,7 &lt; Pr &lt; 500</math></i> .....	55

<b>Figura 21</b> Factor de corrección $F$ a usarse en $Nu_D$ , $NL < 16 = FNu_D$ para $NL > 16$ y $Re_D > 1000$ .....	56
<b>Figura 22</b> Analogía de la resistencia eléctrica-térmica del HPHE (Heat pipe-based heat exchanger). .....	58
<b>Figura 23</b> Prediseño del termosifón de tubos paralelos en SolidWorks 2018 .....	63
<b>Figura 24</b> Corte de tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ " de diámetro interior de 6m de largo, tipo L, en pedazos de 40 cm .....	64
<b>Figura 25</b> Construcción de los 28 tubos paralelos para el termosifón acorde a los parámetros establecidos. ....	65
<b>Figura 26</b> Construcción Placas de Duralón, colocación de la guía y graneteado para las perforaciones .....	65
<b>Figura 27</b> Perforaciones en las 2 placas de Duralón y colocación de la tela teflón, para soporte de los 28 tubos .....	66
<b>Figura 28</b> Colocación de la cinta autofundente en los 28 tubos de cobre .....	66
<b>Figura 29</b> Adaptación de las tapas de madera para la zona adiabática del termosifón .....	67
<b>Figura 30</b> Colocación de la espuma de poliuretano (aislante), para el posterior sellado. ....	67
<b>Figura 31</b> Selección de los 3 tubos de cobre para soldar las 6 termocuplas .....	68
<b>Figura 32</b> Preparación de las termocuplas y soldadura de las mismas en los tubos de cobre del termosifón .....	68
<b>Figura 33</b> Termosellado del termosifón de tubos paralelos; empernado y colocación de silicón gris en carcasa y tapas superior e inferior .....	69
<b>Figura 34</b> Reducciones y ductos para las fuentes del termosifón .....	70
<b>Figura 35</b> Montaje de los ductos a la fuente para la entrada fría (ductos y fuente) del termosifón .....	70
<b>Figura 36</b> Construcción de una mesa de trabajo para el intercambiador de calor y sus complementos .....	71
<b>Figura 37</b> Montaje de la reducción a la fuente para la entrada caliente del intercambiador de calor .....	72
<b>Figura 38</b> Montaje de la caja de resistencias para el lado caliente del termosifón .....	72
<b>Figura 39</b> Aislamiento con lana de vidrio a la entrada caliente del termosifón .....	73
<b>Figura 40</b> Verificación de fugas de los ductos y del termosifón .....	73
<b>Figura 41</b> Unión de la entrada caliente (ductos, caja de resistencias y fuente) con el termosifón .....	74
<b>Figura 42</b> Unión de la entrada fría (ductos, y fuente), con el termosifón .....	74
<b>Figura 43</b> Verificación de funcionamiento de las termocuplas y adquisición de datos de temperaturas .....	75
<b>Figura 44</b> Temperatura de salida del lado caliente del termosifón (100°C) .....	75
<b>Figura 45</b> Ducto de salida del lado caliente del termosifón (100°C) hacia el ambiente .....	76
<b>Figura 46</b> Temperatura de salida del lado frío del termosifón (32°C) .....	76
<b>Figura 47</b> Ducto de salida del lado frío del termosifón (32°C) hacia el ambiente .....	77
<b>Figura 48</b> Colocación de compuerta para obtener variación de caudal en la entrada fría del termosifón .....	78
<b>Figura 49</b> Colocación de tapas que sirven para obtener velocidades en las entradas fría y caliente del termosifón, mediante un anemómetro .....	78

<b>Figura 50</b> Colocación de termocuplas para obtener las temperaturas de entrada y salida de los ductos (lado y frio caliente) .....	79
<b>Figura 51</b> Colocación de tubos pitot en los ductos para obtener presiones dinámicas y estáticas .....	80
<b>Figura 52</b> Colocación de tubos pitot con mangueras al manómetro multitubos para medir presiones .....	80
<b>Figura 53</b> Preparación del ensayo de funcionamiento, sellado de tubos con agua destilada .....	81
<b>Figura 54</b> Ensayo de funcionamiento del termosifón de tubos paralelos .....	82
<b>Figura 55</b> Pesaje de Agua destilada al 0,5% de nanopartícula .....	84
<b>Figura 56</b> Pesaje de Etilenglicol destilada al 0,5% de nanopartícula .....	85
<b>Figura 57</b> Pesaje al 0,5% de nanopartícula .....	85
<b>Figura 58</b> Colocación de nanopartículas y agitación magnética .....	86
<b>Figura 59</b> Equipo para sonicación .....	87
<b>Figura 60</b> Muestras de los nanofluidos al 1,5% .....	87
<b>Figura 61</b> Curvas de calor $Q$ (W) vs Flujo másico para el nanofluido de cobre a diferentes concentraciones .....	93
<b>Figura 62</b> Curvas de calor $Q$ (W) vs Flujo másico para el nanofluido de hierro a diferentes concentraciones .....	94
<b>Figura 63</b> Curvas de calor $Q$ (W) vs Flujo másico para el nanofluido de aluminio a diferentes concentraciones .....	95
<b>Figura 64</b> Curvas de calor $Q$ (W) vs Flujo másico para el nanofluido de nanotubos de carbono (NTC) a diferentes concentraciones .....	96
<b>Figura 65</b> Curvas de calor $Q$ (W) vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 0,1% de concentración .....	97
<b>Figura 66</b> Curvas de calor $Q$ (W) vs Flujo másico de caudal para los diferentes nanofluidos al 0,5% de concentración .....	98
<b>Figura 67</b> Curvas de calor $Q$ (W) vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 1,5% de concentración .....	99
<b>Figura 68</b> Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de cobre a diferentes concentraciones .....	100
<b>Figura 69</b> Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de hierro a diferentes concentraciones .....	101
<b>Figura 70</b> Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de aluminio a diferentes concentraciones .....	102
<b>Figura 71</b> Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de nanotubos de carbono a diferentes concentraciones .....	103
<b>Figura 72</b> Curvas de eficiencia vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 0,1% de concentración .....	104
<b>Figura 73</b> Curvas de eficiencia vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 0,5% de concentración .....	105
<b>Figura 74</b> Curvas de eficiencia vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 1,5% de concentración .....	106

### Nomenclatura

$Np$	—	Nanopartícula.
NTC	—	Nanotubos de Carbono.
CuO	—	Óxido de Cobre (Tenorita)
$Fe_3O_4$	—	Óxido de hierro (Ferrita)
$Al_2O_3$	—	Óxido de Aluminio (Alúmina)
$k_{np}$	—	Conductividad térmica (fase sólida)
$k_{fb}$	—	Conductividad térmica (fluido)
$k_{nf}$	—	Conductividad térmica (efectiva)
$fb$	—	Fluido base.
$nf$	—	Nanofluido.
$q$	—	Calor
$q''_x$	—	Transferencia de calor por unidad de área.
$k$	—	Conductividad térmica.
$m$	—	Masa.
$Cp$	—	Capacidad calorífica específica.
$\mu$	—	Viscosidad.
$\Delta T$	—	Variación de temperatura.
$T$	—	Temperatura.
$P$	—	Presión.
$dT/dx$	—	Gradiente de temperatura.
$D$	—	Diámetro.
$V$	—	Velocidad del fluido.
$\Delta P$	—	Diferencia de presión.
$\Delta T_m$	—	Diferencia de temperaturas media.
$h$	—	Coefficiente de transferencia de calor.
$L$	—	Longitud

$r$	—	Radio.
$E_{ent}$	—	Energía de entrada.
$E_g$	—	Energía generada.
$E_{sal}$	—	Energía de salida.
$E_{alm}$	—	Energía almacenada.
$q''_{rad}$	—	Calor (radiación)
$q''_{conv}$	—	Calor (convección)
$q''_{cond}$	—	Calor (conducción)
$\alpha$	—	Difusividad térmica.
$A$	—	Área.
$d_e$	—	Diámetro externo.
$d_i$	—	Diámetro interno.
$L_e$	—	Longitud efectiva.
$L_c$	—	Longitud característica.
$r_1$	—	Radio interno.
$\bar{Q}$	—	Razón de la transferencia de calor real.
$R_t$	—	Resistencia térmica.
$Nu$	—	Número de Nusselt.
$\varepsilon$	—	Efectividad.
$f$	—	Factor de fricción.
$Pr$	—	Número de Prandtl.
$T_c$	—	Temperatura del nanofluido.
$\nu$	—	Viscosidad cinemática.
$\dot{m}$	—	Flujo másico.
$r_2$	—	Radio externo.
$Q_{max}$	—	Razón máxima posible de la transferencia de calor.
$Re$	—	Número de Reynolds.

$T_{\infty}$	—	Temperatura del fluido.
$T_s$	—	Temperatura de la superficie.
$HPHE$	—	Intercambiador de calor de tubos
$hp$	—	Tubo de calor
$Pr_s$	—	Número de Prandtl en la superficie
$\Delta T_{LM}$	—	Variación de la temperatura media logarítmica
$SD$	—	Paso Diagonal
$SL$	—	Paso Longitudinal
$ST$	—	Paso Transversal
$V_{max}$	—	Velocidad Máxima
$R_{max}$	—	Numero de Reynolds Máximo
$\rho$	—	Densidad
$NL$	—	Número de Líneas de tubos (filas)
$T_i$	—	Temperatura del fluido en la entrada
$T_o$	—	Temperatura del fluido en la salida del banco de tubos
$F$	—	Factor de corrección
$IC$	—	Intercambiador de calor de tubos
$R_{HPEH}$	—	Resistencia media de un Tubo de Calor
$n$	—	Numero de Tubos de Calor
$R_{c,cond}$	—	Resistencia de Conducción del condensador
$R_{e,cond}$	—	Resistencia de Conducción del evaporador
$R_{c,out}$	—	Resistencia a transferencia de calor por convección en el condensador
$R_{e,out}$	—	Resistencia a la transferencia de calor en el evaporador
$R$	—	Resistencia térmica total



## Resumen

El presente trabajo de titulación teórico experimental, se aplica a la transferencia de calor en nanofluidos, obtenidos de una mezcla de agua destilada con etilenglicol y Nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alúmina),  $\text{CuO}$  (Tenorita),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Magnetita), y Nanotubos de Carbono (NTC), al aplicar concentraciones en peso al 0,1%, 0,5% y 1,5%, con el uso de un intercambiador de calor tipo termosifón, construido en el laboratorio de conversión de la energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Los resultados de los ensayos se muestran en gráficas de variables térmicas de Transferencia de calor ( $Q$ ) y Efectividad ( $\epsilon$ ), obtenidas mediante la recolección de datos de temperaturas y velocidades en las entradas y salidas del intercambiador de calor tipo termosifón; para mejores resultados se realizó los ensayos en configuración de flujo cruzado.

En el mejor resultado, se logra evidenciar que la transferencia de calor aumenta en los nanofluidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y Nanotubos de carbono (NTC), de la siguiente manera 1,04; 1,30; 1,18 y 1,34, veces más respectivamente, en relación al fluido base  $\text{H}_2\text{O}$  (Agua destilada) que tiene como valor máximo de 1030,51 Watts. Mientras que la eficiencia del mejor ensayo es en el nanofluido de Nanotubos de Carbono (NTC) al 0,5% de concentración, con un valor de 2,57 veces más, que el fluido base  $\text{H}_2\text{O}$ .

### Palabras clave:

- **NANOPARTÍCULA**
- **INTERCAMBIADOR DE CALOR**
- **TRANSFERENCIA DE CALOR**
- **NANOFLUIDO**

## Abstract

This theoretical and experimental work is applied to the study of thermal efficiency in a closed thermosyphon heat interchanger using nanofluids, obtained from a mixture of distilled water with ethylene glycol and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alumina), CuO (Tenorite),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Magnetite) nanoparticles, and Carbon Nanotubes (CNT), applying concentrations of the same in weight at 0.1%, 0.5% and 1.5% in the energy conversion laboratory of the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

The results of the tests are shown in graphs of thermal variables of Heat Transfer (Q) and Effectiveness ( $\epsilon$ ), obtained by collecting data on temperatures and velocities at the inlets and outlets of the thermosyphon type heat exchanger; for better results the tests were performed in cross-flow configuration.

The results show that the heat transfer increases 1.04, 1.30, 1.18 and 1.34 times for nanofluids  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CuO,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and Carbon Nanotubes (NTC) respectively, in relation to the base fluid  $\text{H}_2\text{O}$  (distilled water) which has a maximum value of 1030.51 Watts. Finally, the best efficiency is obtained for Carbon Nanotubes (CNT) nanofluid at 0.5% concentration, with a value of 2.57 times more than the  $\text{H}_2\text{O}$  base fluid.

### Keywords:

- NANOPARTICLE
- HEAT EXCHANGER
- HEAT TRANSFER
- NANOFLUID

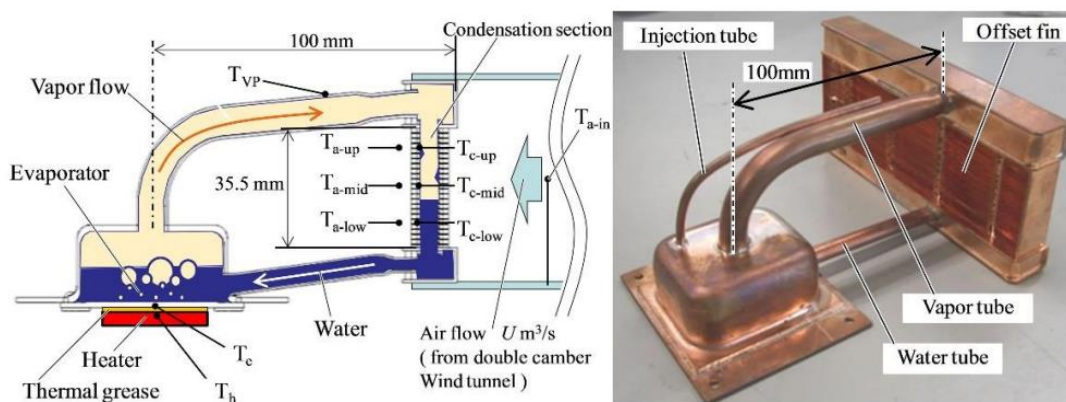
## Capítulo 1: Generalidades

### Introducción

Un modo eficaz y rentable de recuperar energía térmica de procesos industriales es utilizar intercambiadores de calor tipo termosifón los cuales emplean cambio de fase. Termosifón se refiere a un dispositivo simple, confiable y efectivo (Ver un ejemplo en la **Figura 1**), para el transporte de calor que no necesita una fuente externa de potencia, el cual está diseñado para reutilizar la energía sobrante que ha sido empleada en procesos anteriores y por ende dicha energía usualmente es enviada a un sumidero (Aguas, 2018)

**Figura 1**

*Termosifón de bucle (loop)*



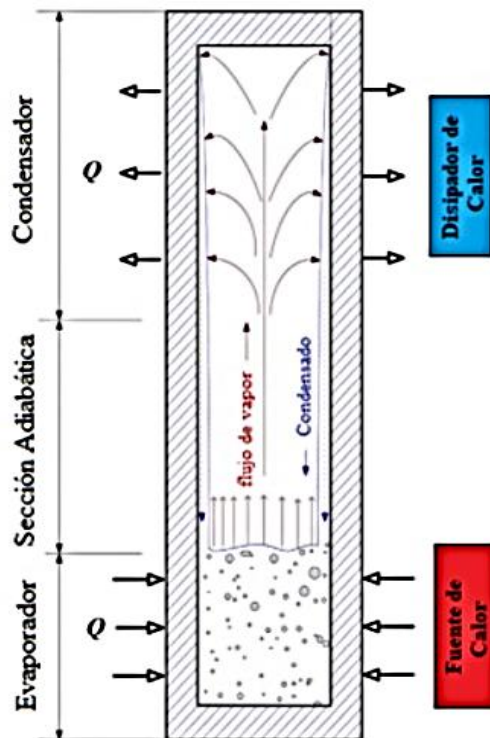
*Nota.* Tomado de (Hiroyuki & Yoshihiro, 2018)

Al analizar dichos dispositivos se tiene que consisten en un depósito sellado con un fluido de trabajo caloportador en su interior. Poseen una sección de evaporación en donde el fluido recepta la energía para que se presente un cambio de fase y el vapor generado lleve la energía a una sección de condensación en donde es recibida por otro fluido y regresa en forma de condensado, para empezar el ciclo nuevamente. Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Se caracteriza principalmente por poseer una alta conductividad térmica equivalente,

lo cual permite mejorar la reutilización de la energía de diversas fuentes externas ya sean de alta o baja temperatura. Mundialmente han sido realizadas numerosas investigaciones referentes a la construcción y funcionamiento de los termosifones, centrándose en los materiales de construcción, relaciones de aspecto, potencia y llenado; diferentes fluidos caloportadores de trabajo, con el objetivo de incrementar la eficiencia de estos dispositivos (Berrio, Berrio, & Hernández, 2019)

**Figura 2**

*Termosifón, Proceso interno en los tubos de cobre, con la mezcla de agua y Nanopartículas.*



*Nota.* Tomado de (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020)

Para realizar el estudio del incremento de la transferencia de calor al utilizar nanofluidos, se ejecutó el diseño y construcción de un intercambiador de calor de tubos paralelos que utiliza el principio del termosifón. Ver la **Figura 3**.

**Figura 3**

*Intercambiador de Calor tipo Termosifón de tubos paralelos.*



Nota. Elaboración Propia.

Este intercambiador de calor consta de 3 secciones:

1. Sección de calentamiento del nanofluido (Evaporador): En este lugar es donde ingresa el aire caliente de la fuente, atraviesa el banco de tubos de cobre, en los cuales se encuentra el nanofluido sellado, el calor es transferido hasta el nano fluido el cual empieza con un proceso de calentamiento hasta llegar a su evaporación.
2. Sección Adiabática: Esta sección se encuentra acondicionada con material aislante, con

el objetivo de evitar la transferencia de calor por convección y radiación hacia el ambiente y así de esta manera se evita que el vapor obtenido en la sección de calentamiento sufra una rápida condensación.

3. Sección de Enfriamiento (Condensador): En esta sección se produce la transferencia de calor, al forzar un fluido frío a través del arreglo de tubos de cobre, el vapor contenido dentro de los mismos cede su energía y empieza un proceso de condensación, en cambio el fluido frío gana energía y como consecuencia incrementa su temperatura.

Para verificar el incremento de transferencia de calor, se utilizará agua y 4 soluciones diferentes de nanofluidos, los cuales actuarán como fluido caloportador. Este tipo de intercambiador puede utilizar el calor residual de los diferentes procesos industriales, transfiere la energía necesaria hacia el nanofluido contenido en el interior de los tubos, a raíz de esto, empieza el proceso de evaporación, asciende hacia la sección adiabática donde se evita al máximo la pérdida de calor y su posible condensación precoz, para garantizar que la mayor cantidad posible de energía sea transferida hacia otro fluido en la sección de enfriamiento.

### Antecedentes

Al pensar en la transferencia de calor se puede imaginar en un gran abanico de posibilidades para aplicaciones tanto domésticas como industriales, dentro del hogar se aplica en la mejora de los tiempos de cocción con un mejor rendimiento, lo que influye en la economía, además de aplicaciones en el campo de la refrigeración lo que significa un mayor tiempo de conservación de los alimentos, dentro de las aplicaciones en el hogar también se puede destacar el acondicionamiento del aire, lo cual brinda confort a los usuarios. A nivel industrial las aplicaciones van desde la obtención de vapor para los diferentes procesos, hasta la

recuperación de calor, lo cual beneficia a las empresas ya que además de ser amigables con el medio ambiente, significa un ahorro de recursos importantes.

Estudios anteriores (Qian, y otros, 2019), han centrado sus esfuerzos en determinar las diferentes propiedades termofísicas de los materiales usualmente utilizados en ingeniería y han concluido cuáles de ellos son los más idóneos en cuanto a transferencia de calor se refiere.

Dada la importancia del tema, las principales investigaciones se centran en mejorar la velocidad y la eficiencia de la transferencia de calor, esto es posible gracias a los estudios previamente realizados acerca de las propiedades termofísicas de los diferentes materiales y dan origen a la optimización en los diseños de las diferentes máquinas que utilizan los principios de transferencia de calor, los procesos modernos requieren en gran medida mejorar los procesos térmicos. Esto ocurre especialmente en la búsqueda de nuevas soluciones que favorecen la miniaturización de componentes para la mayoría de equipos térmicos. Otra necesidad urgente es obtener tasas de transferencia de calor más altas combinadas con grados más altos de conversión de energía. (Minea, 2015)

Los fluidos de transferencia de calor común en realidad tienen capacidades limitadas en términos de propiedades térmicas. A su vez, estas limitaciones pueden imponer varias restricciones en muchas aplicaciones térmicas, de esta manera se genera una necesidad clara y urgente de desarrollar nuevas estrategias para mejorar los comportamientos térmicos efectivos de estos fluidos. (Minea, 2015)

Las propiedades que más afectan al rendimiento de los fluidos en los procesos de intercambio de calor son la conductividad térmica, la viscosidad, la densidad y el calor

específico. La conductividad térmica aumenta con la adición de nanopartículas lo que mejora la transferencia de calor. (Devendiran & Amirtham, 2016)

Gracias a los avances en los estudios sobre la síntesis de nanomateriales en los últimos años, ha posibilitado abrir una nueva vía de mejora en el proceso de la suspensión de nanopartículas en el fluido base. Esta mezcla, denominada nanofluido, tiene potenciales aplicaciones como el nuevo medio de intercambio de calor en el futuro cercano gracias al incremento de la conductividad térmica que aportan las nanopartículas

Actualmente hay pocos estudios que determinan el ahorro que supone el uso de los nanofluidos y el incremento de la transferencia de calor. (Jafari, Hadis, Seid, & Falsafi, 2019) Realizaron un estudio experimental en el cual, al diseñar un intercambiador para aplicaciones alimenticias, mediante el uso de nanofluidos de alúmina al 2 y 4%. Los resultados obtenidos mostraron una reducción del tiempo de procesado de zumo de sandía del 24,14 y 51,72% respectivamente. Además, se observó una reducción del consumo de energía de un 24,64 y 48,34%. (Azad, 2016) realizó el diseño de un intercambiador de carcasa y tubos con la implementación de un nanofluido de alúmina. Visualizaron un aumento de 185% del coeficiente de intercambio de calor en el lado de los tubos. El costo de construcción del intercambiador de calor decreció en un 55%.

### **Definición del problema**

La reutilización de calor residual en las industrias a mediana y gran escala, es un objetivo y motivo de preocupación mundial. Por ende, es importante mejorar la eficiencia de la transferencia de calor



La construcción de aletas y el incremento del área de transferencia de calor, se realizan para mejorar la eficiencia del equipo de recuperación de calor. Sin embargo, dichos procesos hacen que el intercambiador de calor tenga mayor tamaño. (Zhaohui, Zhang, Chen, & Fan, 2018) Concluyeron que maquinar aletas y/o microcanales ya ha alcanzado su límite de aplicación

En los intercambiadores de calor, se utiliza agua, etilenglicol, keroseno, como medio de transferencia de calor (Huminic & Huminic, 2018). Sin embargo, dichos fluidos tienen la desventaja de poseer baja conductividad térmica y como consecuencia se generan procesos con resultados de bajo rendimiento (Kumar, Sonawane, & Sonawane, 2018), por ello es necesario el análisis e implementación de mejoras en los fluidos que utilizan los intercambiadores de calor existentes.

Las recientes investigaciones y resultados en nanotecnología han logrado múltiples posibilidades en la aplicación de nuevas tecnologías utilizadas en el intercambiador de calor. (Saidur, Leong, & Mohamed, 2017) analizaron exhaustivamente varias aplicaciones de los nanofluidos en la refrigeración de motores, reactores nucleares, transformadores y procesos de mecanizado. Es factible y verídico que el rendimiento de un sistema de recuperación de calor pueda incrementarse al aplicar un nanofluido como portador de calor.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

- Estudiar teórica y experimentalmente la transferencia de calor en termosifón de tubos paralelos, al utilizar una mezcla de agua, etilenglicol y nanopartículas de Nanotubos de carbono, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, como fluido caloportador.

### **Objetivos Específicos**

- Diseñar y construir el termosifón de tubos paralelos acorde a los parámetros requeridos para el estudio.
- Preparar los nanofluidos: pesar cantidades, mezclar con un dispersante, agitación mecánica y sonicación
- Realizar ensayos con 4 diferentes caudales en la zona de condensación, en el intercambiador de calor tipo termosifón de tubos paralelos.
- Analizar e interpretar los resultados para determinar la transferencia de calor y la eficiencia térmica del intercambiador de calor tipo termosifón de tubos paralelos.

### **Justificación**

El presente proyecto nace por la iniciativa de generar una mayor eficiencia energética en el uso de los combustibles fósiles como es el caso de las calderas, hornos, reacciones químicas exotérmicas, etc., en las plantas industriales. A través de la aplicación de una tecnología de recuperación de calor residual (termosifón).

En la actualidad, en la industria ecuatoriana, existen pequeñas calderas de calor residual, las cuales recuperan el calor generado en plantas industriales. Estas ubicaciones pueden contener energía significativa que no se debe desperdiciar. En su lugar, esta energía se puede capturar para generar vapor de baja a media presión. Sin embargo, en las mismas, se debe tener una combinación de separador de alta eficiencia y trampa de vapor para garantizar que la caldera proporcione vapor de calidad óptima al proceso del receptor, lo cual dificulta mucho su utilización y es costoso (Sacome, 2019)

Con los incrementos en la demanda industrial, a lo largo de los últimos años, se ha visto la necesidad de hacer más eficientes los consumos de materia y energía en estos procesos. Para

las plantas industriales, se trata primero la aplicación de aprovechamiento de calor, más allá del precalentamiento de aire de combustión que existe en algunos equipos. (Frank P. Incropera)

Por ende, a través del diseño y la construcción de un termosifón de tubos paralelos (intercambiador de calor), se incrementará la eficiencia termodinámica global y se aprovechará de mejor manera la energía residual de dichos procesos, esto debido a que las nanopartículas a utilizar, generan diferentes nanofluidos que permiten el incremento de la eficiencia en la transferencia de calor.

### Alcance

En el presente proyecto se plantea el estudio de la eficiencia de la transferencia de calor en un intercambiador de calor tipo termosifón de tubos paralelos con medidas generales 26 x 16 x 40 cm, el cual será diseñado y construido para este fin específico, al introducir en los tubos de cobre, agua con etilenglicol (al 5% de concentración) y 4 tipos de nanopartículas al 0,1%, 0,5% y 1,5% porcentaje en peso y de esta manera obtener los nanofluidos caloportadores, los cuales constituirán en:

1. Agua, etilenglicol y partículas de aluminio ( $Al_2O_3$ )
2. Agua, etilenglicol y partículas de cobre (CUO)
3. Agua, etilenglicol y partículas de hierro ( $Fe_3O_4$ )
4. Agua, etilenglicol y partículas de nanotubos de carbono (NTC)

Se realizarán ensayos en flujo cruzado de aire (caliente y frío), en el intercambiador de calor, donde se receptorán datos de temperaturas y velocidades, que ayudaran a elaborar cálculos de variables térmicas, con las cuales, se podrá obtener las gráficas comparativas de todos los ensayos (Q vs.  $\dot{m}$  y  $\epsilon$  vs.  $\dot{m}$ ), se analizará los resultados obtenidos y se definirá cuál de

estos nanofluidos ofrece la mejor eficiencia en cuanto a la transferencia de calor, para así conocer su comportamiento y las utilidades que podrían dar en el campo energético industrial.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### Nanotecnología

Es un área extensa de la ciencia y de la ingeniería actualmente y tendrá diversas aplicaciones en todas las industrias. Por ende, es importante detallar ciertos sucesos a lo largo del tiempo.

La palabra nanotecnología nace por primera vez en 1974, este término se usó para detallar los procesos de algunos semiconductores. La definición según el científico japonés Taniguchi Norio: "La nanotecnología es el proceso de consolidación, separación y deformación de materiales por un átomo o una molécula". (Zarzycki, 2014)

Richard Feynman, fue quien manifestó un discurso en la SEF de Física de Caltech en 1959, donde propuso el método que permitirá la manipulación de átomos y moléculas con equipos de alta precisión. De esta manera, se pueden diseñar y construir sistemas átomo a átomo en nanoescala. Aquí, Feynman expuso a su vez que esto será diferente de un macrosistema ya existente. (NANOTECNOLOGO, 2019)

Esta tecnología a nanoescala yace del análisis de sistemas a dicha escala. El prefijo "nano" es del Sistema Internacional de Unidades (SI), en el factor de  $10^{-9}$ , el cual pertenece a unidades de longitud, lo que es igual a una mil millonésima fracciones del metro es decir  $10^{-9}$  metros o también denominado como 1 nanómetro. En la nanoescala, se ha obtenido mediante experimentación nuevas propiedades y fenómenos. Los cuales obedecen leyes de la mecánica cuántica y se han utilizado para generar nuevos materiales y dispositivos. (NANOTECNOLOGO, 2019)

La nanotecnología brindará soluciones a los problemas que enfrenta actualmente la humanidad, en campos como la energía, el medio ambiente, la nanomedicina y/u otros.

(Zarzycki, 2014)

### *Aplicaciones de la Nanotecnología*

La nanotecnología aplica a diferentes campos como la energía, alimentaria, química, física, ciencia de los materiales, electromecánica, etc. en la **Tabla 1**. Se observa las aplicaciones de interés. En el mundo tanto países como instituciones públicas o privadas, aplican nanotecnología mediante nanomateriales. (Zarzycki, 2014)

**Tabla 1**

#### *Aplicaciones de interés de la nanotecnología en la industria*

TIPO DE INDUSTRIA	APLICACIONES
Energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de producción y almacenamiento de energía, (renovables)</li> <li>• Energía solar, o como fuente Hidrógeno</li> <li>• Disminución del consumo de energía con aislantes térmicos más eficientes al utilizar materiales a escala manométrica</li> </ul>
Alimentaria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nanosensores y para en el control de la calidad y seguridad del alimento,</li> <li>• Nanochips y dispositivos que funcionen electrónicamente</li> <li>• Detección de frescura y vida útil de un producto alimenticio</li> <li>• Detección de microorganismos patógenos, metales pesados, toxinas y contaminantes en general</li> <li>• Producción de nanoenvases y nanoalimentos que poseen propiedades nutritivas y saludables.</li> </ul>
Textil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tejidos que sacan las manchas y no se ensucian,</li> <li>• Producción de Nanochips que permiten el cambio de color a las telas o variación de color acorde a la temperatura.</li> </ul>

*Nota.* Tomado de (Florez, 2020)

## **Nanopartículas**

Son partículas con una dimensión inferior a 100 nm. Debido a varias aplicaciones potenciales en biomedicina, agricultura, óptica, electrónica, nanoquímica y otros, son actualmente un campo importante de investigación, Una manera de clasificar a estas nanopartículas es por su diámetro y, según su tamaño, obtendrán propiedades químicas y físicas diferentes. Dentro de su clasificación se tiene:

Las nanopartículas ultrafinas, 1 y 100 nm de tamaño aproximado.

Finas, 100 y 2500 nm., aproximadamente.

Y Gruesas, 2500 y 10,000 nm., de tamaño aproximadamente (S.f, 2010)

### ***Principales Nanopartículas***

- Grafeno
- Nanocelulosa
- Nanoarcillas
- Carbonato de calcio
- Nanopartículas metálicas.
- Nanotubos de carbono
- Nanopartículas de óxidos metálicos.

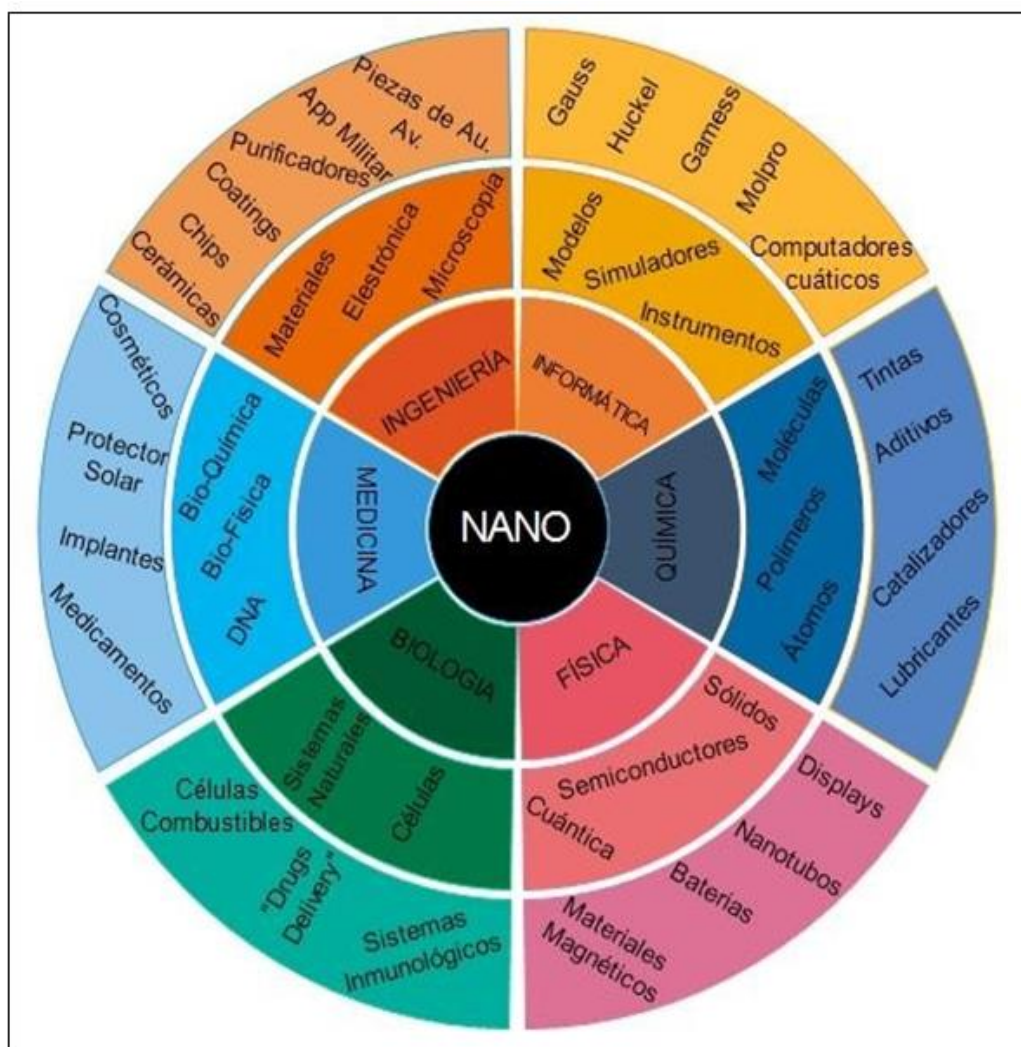
Es importante destacar que la resistencia termomecánica que suministran a los polímeros como el caso de las nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CuO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , puedan ser usadas como agentes para

incrementar las propiedades de las matrices poliméricas ya sean policarbonato, poliestireno, y poliolefinas, los cuales se los usa además por su capacidad de conducir electricidad. (Fanjul, Martinez , & Pelaez, 2018)

En la **Figura 4** se indican aplicaciones de las nanopartículas, en cada división de la rueda se muestra el campo de aplicación en la industria y su vez los productos o servicios que resultan al usar los nanomateriales.

**Figura 4**

*Aplicaciones de la nanotecnología industrialmente*



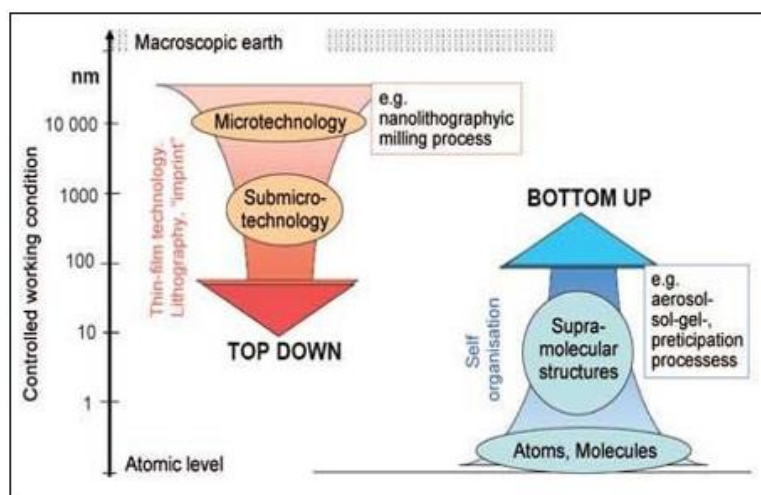
Nota. Tomado de (Martaelm, 2014).

### Métodos de obtención (nanopartículas)

En las **Figura 5 y 6**, se puede observar el proceso de formación de las nanopartículas, de acuerdo al método empleado, se proporciona la calidad y el tamaño de la nanopartícula resultante.

**Figura 5**

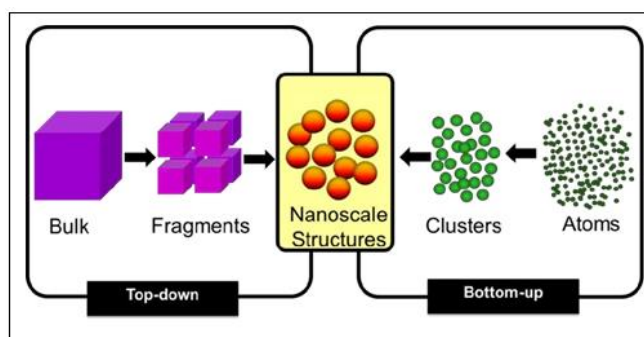
*Proceso Top Down y Bottom-Up (Condiciones)*



Nota. Tomado de (Scherrer, 2018)

**Figura 6**

*Métodos Top-Down y Bottom-Up (Desglose)*





*Nota.* Tomado de (Scherrer, 2018)

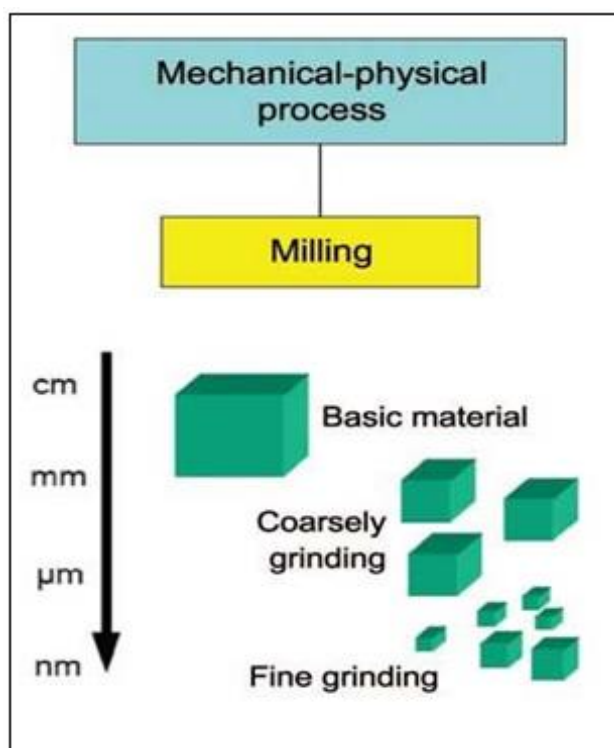
### **Método Top-Down**

Este método por sus siglas en español “De arriba hacia abajo”, parte del material macizo y se logra partículas de menor tamaño, a través de métodos físicos. (Zanella, 2011).

**Molienda:** Este proceso (Ver la **Figura 7**) utiliza un equipo macizo, denominado bial, el proceso consiste en moler dentro de un contenedor pequeño cilíndrico (de mayor resistencia), donde ocurre la fracturación y división; generada por constantes impactos, choques (deben ser ordenado), contra las esferas de la molienda las cuales resisten dichos impactos y poseen material del mismo origen que el contenedor cilíndrico. (Garduño, 2010).

### **Figura 7**

*Proceso Molienda (Top Down)*



*Nota.* Tomado de (Macias, 2018)

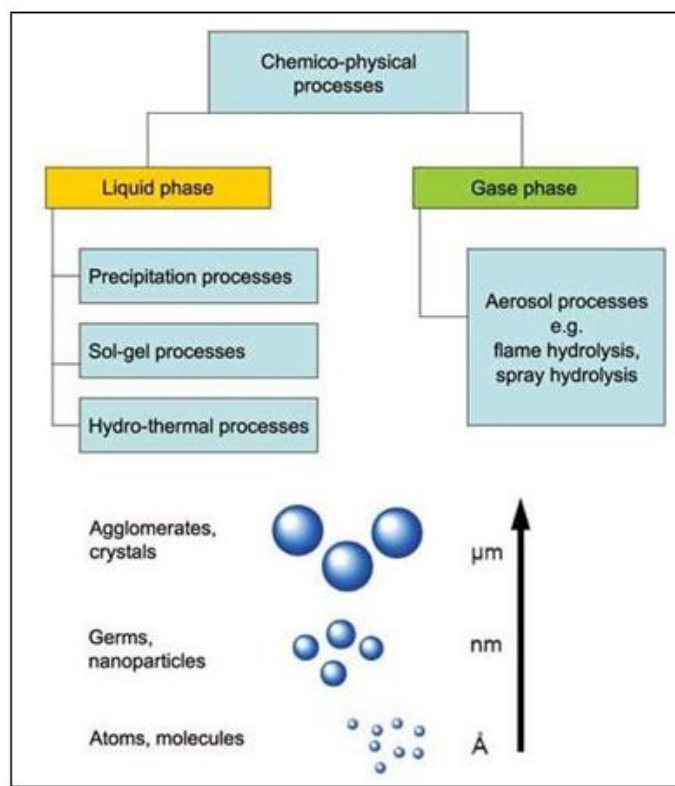
### **Método Bottom-Up**

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 8** se muestra los procesos quimio-físicos de fase líquida o gaseosa para la obtención de nanopartículas (Bottom-Up). Se observa que el proceso da inicio en la escala atómica lo cual hace posible obtener nanomateriales e inclusive cuerpos micrométricos.

**Figura 8**

*Procesamiento de partículas (obtención química)*



*Nota.* Tomado de (Macias, 2018)

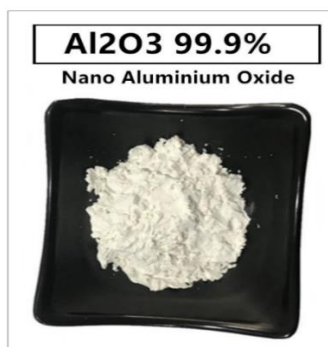
## Nanopartículas de análisis

### *Oxido de Aluminio – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*

Este material también denominado Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), consiste en un polvo de color blanco (Ver la **Figura 9**), con dureza alta y mediana resistencia. En la naturaleza se encuentra como corindón. Para procesar este material se tiene una forma sintética mediante la bauxita. (Macias, 2018)

### **Figura 9**

#### *Oxido de Aluminio (Nanopartícula)*



*Nota.* Tomado de (Macias, 2018)

Constituido por: 2 átomos de aluminio (Al) y 3 átomos de oxígeno (O<sub>2</sub>)

En las principales propiedades se tiene:

- Punto de fusión: 2071.98 °C
- Densidad: 3,891 g/cm<sup>3</sup>
- Punto de ebullición: 2981,01 °C
- Masa molar: 101,89 g/mol
- Tamaño: 30 nm

### Óxido de cobre - CuO

También denominada tenorita, en la naturaleza suele aparecer a la intemperie o en áreas oxidadas de minas profundas de sulfuro de cobre junto con la crisocola (mineral de formación secundaria) y los carbonatos del material base, malaquita y también azurita. Su color gris (Ver la **Figura 10**) se debe a que la tenorita contrasta potentemente la crisocola ya que esta posee un vetado de color azul. (ECURED, 2018)

#### Figura 10

*Oxido de Cobre (Nanopartícula)*



*Nota.* Tomado de (ECURED, 2018)

En las principales propiedades se tiene:

- Punto de ebullición: 2000,08 °C
- Densidad: 6,291 g/cm<sup>3</sup>
- Punto de fusión: 12,10 °C
- Masa molar: 79,605 g/mol
- Tamaño: 20 - 30 nm
- Pureza: 99%

### Óxido de hierro – $Fe_3O_4$

Denominada también magnetita, es un mineral del tipo ferrimagnético el cual atrae un imán y al magnetizarlo se origina un imán permanente. Este óxido es el más magnético de todos los que existen en la naturaleza con una dureza Mohs de 4,9 a 5,9. Se ha observado que diminutos granos de magnetita se producen en casi todas las rocas metamórficas e ígneas. A su vez este mineral es de color negro o marrón muy oscuro (Ver la **Figura 11**), que usualmente genera una franja negra, que tiene brillo metálico (CONCEPTODEFINICION, 2020).

#### **Figura 11**

*Óxido de Hierro (Nanopartícula)*



*Nota.* Tomado de (CONCEPTODEFINICION, 2020).

En las principales propiedades se tiene:

- Punto de fusión: 1534,92 °C
- Masa molar: 231,606 g/mol
- Densidad: 5,286 g/cm<sup>3</sup>
- Tamaño: 40 - 100 nm
- Pureza: 99.8 %

### ***Nanotubos de carbono***

Este material (Ver la **Figura 12**) se parece a diminutas placas de grafito, enrolladas con radios nanométricos y longitudes en micrómetros. Se considera un material único con excepcionales propiedades térmicas, eléctricas, ópticas, químicas y mecánicas lo cual hace que sean útiles para mejorar productos e incluso crear nuevos.

Existen aplicaciones que pueden presentar múltiples beneficios al usar nanotubos de carbono. Por mencionar algunas se tiene:

- Sensores que detectan contaminantes (biológicos y químicos)
- Materiales compuestos reforzados con nanotubos de carbono
- Suministro de fármacos y pilas de combustible con nanotubos de carbono
- Pantallas planas con nanotubos que producen emisores de campo

Principalmente, industrias como la ciencia de materiales, física, química, sensores, biotecnología, energía e instrumentos científicos tendrían la posibilidad de beneficiarse de la introducción de nanotubos de carbono en muchos de sus productos. (SciELO, 2018).

Tamaño: 15 - 25 nm y Pureza: 97 %

### **Figura 12**

*Nanotubos de Carbono NTC (Nanopartícula)*



*Nota.* Tomado de (SciELO, 2018).

## Nanofluidos

### *Factores que influyen en la conductividad térmica de nanofluidos*

El método de implementar pequeñas partículas sólidas a un fluido base ha logrado incrementar su conductividad térmica, y éste se ha puesto en práctica hace más de un siglo, pero gran parte de la investigación inicial se ha hecho mediante la utilización de suspensiones de tipo coloidales, de partículas en el orden milimétrico o micrométrico. La suspensión coloidal tiene los problemas de estabilidad de la suspensión y la obstrucción de los microcanales del intercambiador por donde circula el fluido ya que existe sedimentación de las partículas, lo que reduce su aplicación práctica. Sin embargo, con el avance en la nanotecnología, varios grupos de investigaciones han utilizado nanopartículas en fluidos bases y como resultado han obtenido, un nuevo tipo de fluido térmico, los nanofluidos (Segarra, 2020).

**El material:** Los materiales con una conductividad térmica elevada utilizados en las nanopartículas, mejoran notablemente la conductividad térmica del fluido base, en el caso de las nanopartículas a base de carbono (nanotubos de carbono y grafeno) y las nanopartículas metálicas lograrán mejores resultados que los óxidos metálicos. (Lomascolo, Colangelo, Milanese, & De Risi, 2015). Si durante la experimentación se utiliza nanopartículas de grafeno con una concentración de 0.005% en volumen, la conductividad térmica se incrementa hasta un 90% (Sadeghinezhad, y otros, 2016), en cambio al utilizar nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos de concentraciones 100 veces más altas comparadas al grafeno, únicamente se consiguen incrementos de 50% y en el caso de los óxidos metálicos de 25% (Godson, Raja, Lal, & Wongwises, 2010) . Por ende es necesario realizar estudios más centrados en nanofluidos de materiales con base en carbono, metales y en híbridos de carbono-metal. Hajjar y otros, analizaron la conductividad térmica del óxido de grafeno, al aplicar como fluido base agua, y

como resultado para la concentración más alta de 0,25 % en peso, un aumento de 33,90% a 20,00°C y 47,50% a 40,00°C (Hajjar, Rashidi, & Ghozatloo, 2014).

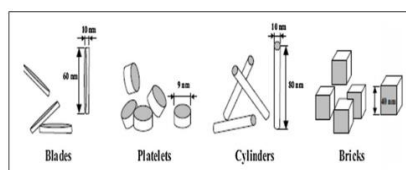
**Concentración:** El incremento de la concentración de nanopartículas en un nanofluido tiende a aumentar la conductividad térmica del nanofluido. La aplicación de diferentes materiales como el grafeno, el óxido de zinc y el de aluminio dan fe de esta afirmación (Sadeghinezhad, y otros, 2016)

**Tamaño:** Si la nanopartícula presenta un tamaño menor se incrementará la conductividad térmica del nanofluido, esto permite una adecuada dispersión y suspensión de dichas nanopartículas en el fluido base, lo cual evita que se agrupen en partículas de mayor tamaño, lo que provoca su rápida decantación y genera resistencias térmicas. Esto se puede revertir, pues si se da una mayor reducción de las mismas, lo cual provoca una separación del nanofluido (Suganthi & Rajan, 2017).

**Forma:** La forma con la mayor superficie es de un cubo, seguido de la forma cilíndrica y por último la esfera (Ver la **Figura 13**). Ya que se maximiza el área y esto logra una mejor conductividad térmica debido al mayor espacio en la conducción de calor. En la Figura 13 se muestran la variedad de formas que se han analizado (Lomascolo, Colangelo, Milanese, & De Risi, 2015).

### Figura 13

*Formas existentes en las nanopartículas*



*Nota.* Tomado de (Kumar Verma & KumarTiwari, 2015)



### **Estabilidad de los nanofluidos**

La estabilidad del nanofluido sirve como una base para elegir un termofluido, En el caso de que el nanofluido no sea estable, las nanopartículas pueden agruparse y de esta manera genera tendencia a sedimentarse, lo cual ocasiona una disminución en el rendimiento de calor y de la radiación. También, al utilizarlo en dispositivos electrónicos, la precipitación de partículas puede provocar bloqueos de microcanales y desgaste de tuberías (Martínez, 2016).

Los factores que reducen la estabilidad del nanofluido son: la concentración, el tamaño y la forma de la nanopartícula, el potencial Hidrogeno (pH), el fluido base.

- Al ser mayor la concentración de nanopartículas, disminuye la distancia entre ellas, lo que conlleva a un incremento de la probabilidad que choquen y por ende se aglomeren.
- Las formas de nanopartículas con áreas de mayor tamaño hacen que se aglomeren con mayor facilidad, generado por su mayor potencial de colisión.
- Un fluido de base polar posee iones que hacen posibles la formación de una capa eléctrica en cada nanopartícula, de esta manera se genera una repulsión entre dos nanopartículas adyacentes.
- El cambio del potencial Hidrogeno controla la concentración de iones en el fluido, por lo cual está directamente asociado con la fuerza repulsiva entre partículas (Yu, Chen, Liang, Xu, & Lee, 2017).

### **Transferencia de calor**

La termodinámica es una ciencia de tipo energética. Al hablar de energía se puede suponer como la capacidad de generar cambios. 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. Actualmente, el concepto ha sufrido modificaciones hasta incorporar todos los conceptos de la energía y su conversión y así se interrelacionan las propiedades de la materia, la generación de energía y la refrigeración (Yunus A. Cengel).

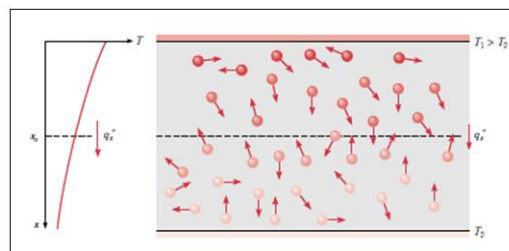
### Conducción

La conducción es la forma de transferencia de calor a nivel atómico, mediante la actividad molecular de la materia, por las colisiones entre moléculas, se produce intercambios energéticos en los cuales las moléculas con mayor carga entregan energía a las partículas con menor carga, en consecuencia de las colisiones y el intercambio energético se genera un flujo de calor desde temperaturas elevadas a más bajas. Los metales presentan mejor conducción, a diferencia del aire y el plástico (aislantes) que es son malos conductores. (RUA, 2017)

Dicha transferencia se puede observar en la **Figura 14**. Las moléculas de abajo y de arriba se atraviesan en un plano hipotético intermedio denominado punto  $X_0$  ocasionado por su movimiento aleatorio. Al considerar que las moléculas en las posiciones superiores poseen temperaturas más altas que las inferiores, se hace evidente y es necesaria una transferencia neta de energía en la dirección  $X(+)$ . La difusión de energía es la transferencia neta de energía, resultado del movimiento molecular aleatorio (Frank P. Incropera).

**Figura 14**

*Transferencia de calor por conducción (actividad molecular)*



*Nota.* Tomado de (Frank P. Incropera)

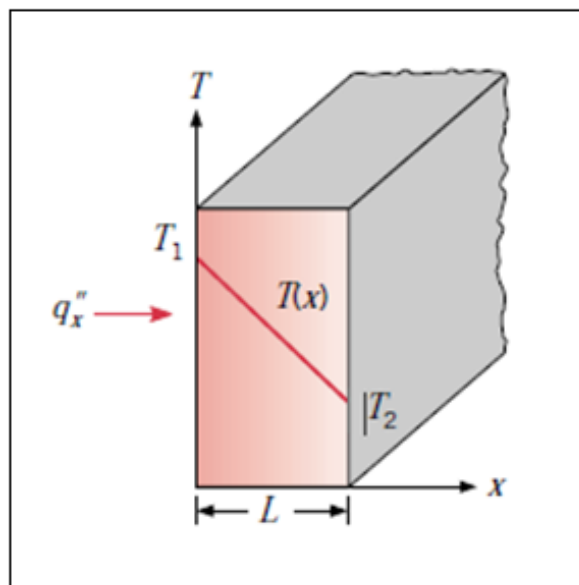
En el caso de los fluidos ocurre un fenómeno muy similar al caso anterior, con la diferencia que la distancia entre las moléculas es mayor, la manera de relacionarse de las moléculas es menos fuerte y frecuente. Al estudiar los sólidos, la conducción es resultado de la actividad atómica debido a vibraciones reticulares, lo que provoca una transferencia de energía (Frank P. Incropera).

La pared plana unidimensional con una distribución de temperatura  $T(x)$ , se puede observar en la **Figura 15**. La Ecuación conocida como Ley de Fourier se aplica en la conducción de calor de dicha pared y la ecuación se define como:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

**Figura 15**

*Transferencia de calor por conducción (unidimensional)*



*Nota.* Tomado de (Frank P. Incropera)

### Convección

Para hablar de transferencia de calor por convección se considera dos elementos, primero se tiene la transferencia de energía por la difusión, además la energía se transfiere por el movimiento general del fluido. Al someter al fluido al movimiento, este se asocia al movimiento conjunto de las moléculas que lo constituyen. Es común emplear el término convección para nombrar este transporte acumulado y el término advección para referirse al transporte causado por el movimiento volumétrico del fluido. El análisis de la transferencia de calor por convección se basa en visualizar el comportamiento entre una superficie limitante y un fluido en movimiento, cuando la temperatura entre ellos tiene diferentes valores (Frank P. Incropera).

La ecuación de transferencia de calor por convección es la siguiente:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Donde:

$q''$ : es el flujo de calor por convección en ( $W/m^2$ )

$T_s$ : es la temperatura de la superficie

$T_\infty$ : es la temperatura del fluido

Si se utiliza la Ecuación (2) se debe tener en cuenta que el flujo de calor por convección es positivo, si el calor se transfiere desde la superficie ( $T_s > T_\infty$ ) y si el calor es transferido hacia la superficie ( $T_\infty > T_s$ ), es negativo. Sin embargo, si ( $T_\infty > T_s$ ), se puede expresar la ley de enfriamiento de Newton como:

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \quad (3)$$

En el caso de esta ecuación, la transferencia de calor es positiva hacia la superficie (Frank P. Incropera).

### **Conservación de la energía para un volumen de control**

Si se va a utilizar la primera ley de la termodinámica, lo primero que se debe tener en cuenta es identificar un volumen de control, este es una superficie del espacio definida por un área de control mediante la cual pueden atravesar la materia y la energía. Ya que se ha definido el volumen de control, también es necesario definir una base de tiempo adecuada. Existen dos posibilidades. Ya que la primera ley rige en cada punto en el tiempo (t), la opción que se contempla es formular la ley basándose en base a la velocidad, lo que es igual, a que en cada punto en el tiempo debe existir un equilibrio entre todas las velocidades de energía medidas en Joules por segundo ( $J/s = W$ ). (Frank P. Incropera).

La ecuación que define el requerimiento de conservación de la energía es formulada en una base de velocidades como:

$$E_{ent} + E_g - E_{sale} = \Delta E_{atm} \quad (4)$$

### **Balance de energía en una superficie**

Usualmente se presenta la oportunidad de ejecutar el requisito de ahorro de energía a la superficie de un medio. En este caso, no interviene la superficie de control con la masa ni el volumen. Lo cual da paso a la generación y almacenamiento para la formulación de conservación, Ecuación (4), ya no sean necesarias y solo se debe analizar con el fenómeno superficial. En dicho caso, la necesidad de conservación se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$E_{ent} - E_{sale} = 0 \quad (5)$$

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0 \quad (6)$$

### Sistemas radiales

En los sistemas cilíndricos y esféricos usualmente se experimenta con gradientes de temperatura únicamente en la dirección radial y, por ende, se tratan unidimensionalmente. También, dichos sistemas se estudian en condiciones de estado estacionario sin generación calor de tipo interna al aplicar el método convencional, el cual empieza con la forma apropiada de la ecuación de calor, o el método alternativo, la cual inicia con la forma apropiada de la ley de Fourier (Frank P. Incropera).

Para un cilindro hueco en la parte central (Ver la **Figura 16**) por cuyas superficies atraviesan los fluidos internos y externos con temperaturas variables y en condiciones de estado estacionario sin considerar la generación de calor, la formulación sería de la siguiente forma:

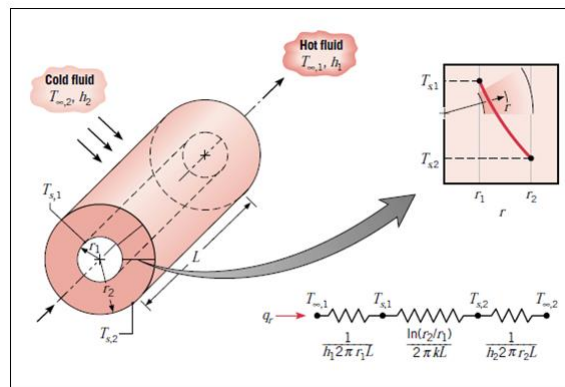
$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (7)$$

Para formular la rapidez en que la energía se conduce en cualquier superficie cilíndrica se define como:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

**Figura 16**

*Circuito térmico equivalente para cilindro hueco*



*Nota.* Tomado de (Frank P. Incropera)

Para la formulación general de conducción en superficies cilíndricas, matemáticamente se tiene:

$$q_r = -2\pi Lk \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (9)$$

Para la formulación de la resistencia térmica por conducción en superficies cilíndricas, se tiene:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (10)$$

### **Capa limite**

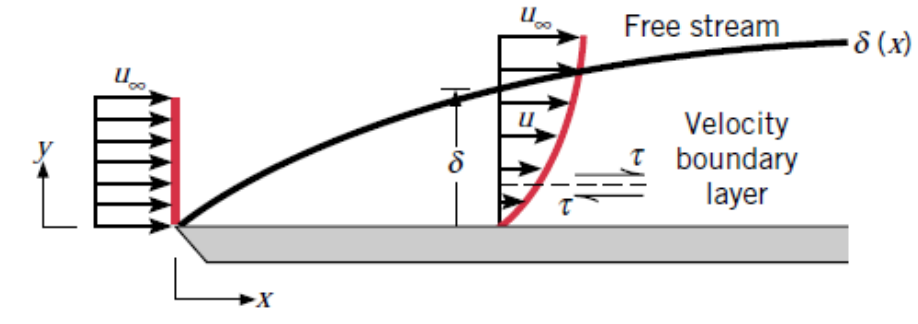
Para un fluido en movimiento a través de una superficie, este tiende a detenerse completamente en la pared y por este motivo tiende a tener una velocidad de cero, es decir, al momento que el fluido hace contacto con la superficie, este se adhiere por las fuerzas viscosas que aparecen cuando entran en contacto entre sí, lo cual se denomina condición de no deslizamiento.

La capa adherida a la superficie genera la función de reducir la velocidad de la capa siguiente o adyacente ocasionado por la viscosidad que presenta cada una de ellas, de tal forma que cada capa tiene la tarea de retardar la siguiente y así sucesivamente. Ver la **Figura 17**.

La capa límite se define como el área de flujo que se encuentra adyacente a la superficie donde afecta la viscosidad y, por ende, las variaciones de velocidad son considerables. (Frank P. Incropera).

**Figura 17**

*Capa límite de velocidad o hidrodinámica en una placa plana*



*Nota.* Tomado de (Frank P. Incropera)

### **Número de Nusselt**

Matemáticamente el Número de Nusselt se expresa como:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (11)$$

Dónde:  $k$  es la conductividad térmica del fluido y  $L_c$  es la longitud característica, y en tubos se cambia por el diámetro ( $D$ ). La Ecuación (11) a su vez es aplicada para calcular  $h$ , si se llegan a conocer los datos relacionados de la ecuación. (Frank P. Incropera).

### **Número de Prandtl**

El número Prandtl es adimensional, sirve para definir el espesor relativo entre la capa térmica y el límite de velocidad, es un número que muestra la relación entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica. Se puede formular de la siguiente manera:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (12)$$



Dónde:  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $k$  es la conductividad térmica,  $C_p$  es la capacidad calorífica (a presión constante),  $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\alpha$  es la difusividad térmica (Frank P. Incropera).

**Tabla 2**

*Números de Prandtl para fluidos conocidos*

FLUIDO	Pr
<b>Materiales que son líquidos</b>	0,0041 – 0,0317
<b>Agua</b>	1,7012 – 13,7231
<b>Gases</b>	0,7095 – 1,0142
<b>Glicerina</b>	2000 - 100000
<b>Fluidos orgánicos (ligeros)</b>	5 - 50
<b>Aceites</b>	50 - 100000

*Nota.* Tomado de (Frank P. Incropera).

### **Número de Reynolds**

El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas de inercia del fluido (Frank P. Incropera).

Determina la transición de flujo laminar a turbulento, que depende de factores como son la temperatura, el tipo de fluido, velocidad del flujo, la temperatura y la geometría de la superficie, entre otros factores. (Frank P. Incropera). Por tal motivo Osborn Reynolds, con la

realización de varios estudios representativos basados en el comportamiento de los fluidos, logró determinar la relación que existe entre las fuerzas viscosas con las fuerzas inerciales y formula de esta manera el número de Reynolds de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (13)$$

Dónde:  $V$  es la velocidad del fluido,  $L_c$  es la longitud característica, en el caso de tubos es el diámetro ( $D$ ) por el que transita el fluido y  $\mu$  es la viscosidad dinámica. Una manera reducida del número de Reynolds se puede obtener si se reemplaza la velocidad del fluido, como:

$$V = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} \cdot (\rho) \cdot D^2} \quad (14)$$

Y se obtiene el número de Reynolds reducido:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi \cdot (D) \cdot \mu} \quad (15)$$

### **Flujo interno y flujo externo**

El flujo interno se da al forzar al líquido a transitar entre superficies limitadas como tuberías (ductos). A diferencia que un flujo externo se da cuando el fluido transita sobre una superficie ya sea una placa o un canal, dichos flujos se observan comúnmente en los intercambiadores de calor ya que existen aquellos que utilizan múltiples tubos internos por los que se va transitar el fluido, así como fluidos transportados a través del exterior de los tubos que sirven para lograr el proceso de convección. (Frank P. Incropera).

### **Flujo laminar y flujo turbulento**

Se puede observar la diferencia entre el flujo laminar y el flujo turbulento al observar ejemplos cotidianos como al abrir una llave de agua, al comienzo se ve un flujo que no sufre

perturbación (armónico), es decir que posee líneas suaves las cuales son ordenadas, pero mientras se abre la misma llave (al pasar el tiempo), se puede apreciar que el flujo se vuelve caótico, el primer escenario en el que el flujo es continuo muestra un flujo que se denomina laminar, en cambio el segundo escenario cuando el flujo tiene cambios de forma e incremento de velocidad se denomina turbulento (Frank P. Incropera).

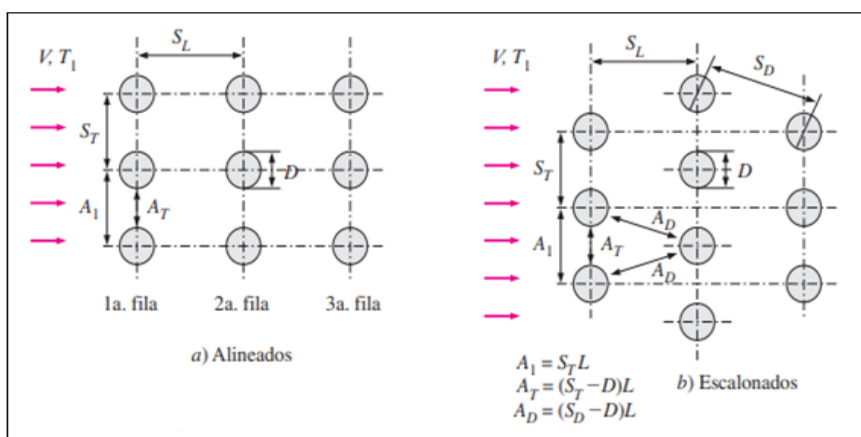
### Flujo sobre banco de tubos

Existen dos configuraciones usualmente utilizadas para bancos de tubos, alineados o escalonados en la dirección del flujo, como se muestra en la **Figura 18**. El diámetro exterior del tubo  $D$  se toma como la longitud característica. La disposición de los tubos en el banco se basa por el paso transversal  $S_T$ , el paso longitudinal  $S_L$  y el paso diagonal  $S_D$  entre los centros de los tubos. (Yunus A. Cengel). Para calcular el paso diagonal se utiliza:

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} \quad (16)$$

**Figura 18**

*Configuración en un banco de tubos alineados o escalonados*



*Nota.* Tomado de (Yunus A. Cengel)

$A_T$ ,  $A_1$ , y  $A_D$ , son las áreas de flujo en las secciones mostradas de la **Figura 18** y  $L$  es la longitud de los tubos.

Cuando un fluido ingresa en un banco de tubos, el área por la cual fluye disminuye de  $A_1 = S_T L$  hasta  $A_T = (S_T - D)L$  entre los tubos que lo conforma, como resultado, la velocidad del flujo se ve incrementa. En la configuración escalonada la velocidad sufre un incremento mayor en la región diagonal si las filas de tubos son muy cercanas entre sí. En los bancos de tubos las características del flujo son dominadas por la velocidad máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) que se tiene dentro del banco más que por la velocidad de aproximación denotada como  $V$  (Yunus A. Cengel). Por ende, el número de Reynolds matemáticamente se formula sobre la base de la velocidad máxima de la siguiente manera:

$$\text{Re}_D = \frac{\rho V_{m\acute{a}x} D}{\mu} = \frac{V_{m\acute{a}x} D}{\nu} \quad (17)$$

La velocidad máxima se determina con base en el requisito de conservación de la masa para el flujo incompresible estacionario. Para la configuración de alineados, la velocidad máxima se tiene en el área mínima de flujo entre los tubos y la conservación de la masa se puede expresar como  $\rho V A_1 = \rho V_{m\acute{a}x} A_T$ , o bien,  $V S_T = V_{m\acute{a}x} (S_T - D)$  (Yunus A. Cengel). Matemáticamente la formulación de la velocidad máxima es:

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (18)$$

En la configuración escalonada el fluido que se aproxima a través del área  $A_1$  de la pasa por el área  $A_T$  y, después, por el área  $2A_D$ , conforme se enrolla alrededor del tubo de la fila siguiente. Si  $2A_D > A_T$ , todavía la velocidad máxima ocurre en  $A_T$  entre los tubos y, por consiguiente, la relación  $V_{m\acute{a}x}$  de la Ecuación (19), se puede usar para bancos de tubos

escalonados. Pero si  $2A_D < A_T$  [o sea, si  $2(S_D - D) < (S_T - D)$ ], se tendrá la velocidad máxima en las secciones transversales diagonales y, en dicho caso, matemáticamente la velocidad máxima es:

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad (19)$$

Se considera  $\rho V A_1 = \rho V_{m\acute{a}x}(2A_D)$  o bien,  $V S_T = 2V_{m\acute{a}x}(S_D - D)$  (Yunus A. Cengel).

### Zukauskas

Se han analizado algunas correlaciones, enfocadas en datos experimentales para calcular el número de Nusselt promedio en el caso de flujo cruzado para bancos de tubos. (Frank P. Incropera). Últimamente, se ha formulado una (Ver la **Figura 20**) la cual tiene como forma general:

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C Re_{D,max}^m Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad (20)$$

$$\left[ \begin{array}{l} N_L > 20 \\ 0,7 < Pr < 500 \\ 1000 < Re_{D,max} < 2 \times 10^6 \end{array} \right]$$

En el que todas estas propiedades excepto  $P_{r_s}$  se determinan en la media aritmética de las temperaturas de entrada y salida del fluido y los valores  $C$  y  $m$  se obtienen en la **Figura 19**. (Frank P. Incropera).

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (21)$$

Dónde:  $T_i$  es la temperatura del fluido en la admisión y  $T_o$  en la salida del banco de tubos.

**Tabla 3**

*Propiedades termofísicas del aire (presión atmosférica)*

Propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica								
T	$\rho$	Cp	$\mu \cdot 10^{-7}$	$\nu \cdot 10^{-6}$	$k \cdot 10^{-3}$	$\alpha \cdot 10^{-6}$	Pr	
(°K)	(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kJ/kg.K)	(N.s/m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> /s)	(W/m.K)	(m <sup>2</sup> /s)	
250	-25,00	1,3947	1,0061	159,61	11,441	22,31	15,91	0,721
300	24,85	1,1614	1,0071	184,61	15,891	26,31	22,51	0,707
350	74,85	0,9951	1,0091	208,21	20,921	30,00	29,91	0,700
400	124,85	0,8711	1,0141	230,11	26,411	33,81	38,31	0,691
450	174,85	0,7741	1,0211	250,71	32,391	37,31	47,21	0,686

*Nota.* Tomado de (Frank P. Incropera).

**Figura 19**

*Constantes de la Ecuación 20, para el banco de tubos en flujo cruzado*

Constantes de la ecuación 7.67 para el banco de tubos en flujo cruzado [16]			
Configuración	$Re_{D, \text{máx}}$	C	m
Alineado	$10 - 10^2$	0.80	0.40
Escalonado	$10 - 10^2$	0.90	0.40
Alineado	$10^2 - 10^3$	Se aproxima como un cilindro único (aislado)	
Escalonado	$10^2 - 10^3$		
Alineado	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.27	0.63
( $S_T/S_L > 0.7$ ) <sup>e</sup>			
Escalonado	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
( $S_T/S_L < 2$ )			
Escalonado	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.40	0.60
( $S_T/S_L > 2$ )			
Alineado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.021	0.84
Escalonado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.022	0.84

<sup>e</sup>Para  $S_T/S_L < 0.7$ , la transferencia de calor es ineficiente y los tubos alineados no se deben usar.

Se han obtenido resultados más recientes [8, 16], y Zhukauskas [16] propuso una correlación de la forma

*Nota.* Tomado de (Frank P. Incropera).

**Figura 20**

Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para  $NL > 16$  y  $0,7 < Pr < 500$

Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para  $N_L > 16$  y  $0.7 < Pr < 500$  (tomado de Zukauskas, 1987)\*

Configuración	Rango de $Re_D$	Correlación
Alineados	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100-1 000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1 000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.35(S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.031(S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

\*Todas las propiedades, excepto  $Pr_s$ , se deben evaluar a la media aritmética de las temperaturas de admisión y de salida del fluido ( $Pr_s$  se debe evaluar a  $T_s$ ).

Nota. Tomado de (Yunus A. Cengel)

Las relaciones del número de Nusselt promedio de la **Figura 20**, corresponden a bancos de tubos con un número de 16 o más filas. A su vez, se aplican dichas correlaciones para bancos de tubos con  $NL < 16$  (Yunus A. Cengel). Siempre y cuando se modifiquen de la siguiente manera:

$$Nu_{D,NL < 16} = F Nu_{D,NL > 16} \quad (22)$$

Dónde:  $F$  es un factor de corrección cuyos valores se obtienen de la **Figura 21**. Para  $ReD > 1000$ , el factor de corrección no depende del número de Reynolds. Una vez que se conoce el número de Nusselt y, por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor promedio para el banco de tubos completo, se puede obtener la razón de la transferencia de calor

mediante la ley de Newton de enfriamiento, con una diferencia de temperaturas apropiada,  $\Delta T$ . (Yunus A. Cengel)

### Figura 21

Factor de corrección  $F$  a usarse en  $NuD$ ,  $NL < 16 = FNuD$  para  $NL > 16$  y  $ReD > 1000$

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Nota. Tomado de (Yunus A. Cengel)

El primer análisis que viene a la aplicación es usar  $\Delta T = T_s - T_{prom} = T_s - \frac{T_i + T_e}{2}$  pero, con esto se obtendrá la razón de la transferencia de calor en exceso, la diferencia de temperaturas óptima para el flujo interno (el flujo sobre los bancos de tubos se puede considerar como interno ya que fluye al interior de la coraza) es la diferencia media logarítmica de temperaturas,  $\Delta T_{ML}$  (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020). Matemáticamente es:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{air\ in,LC} - T_{air\ out,LF}) - (T_{air\ out,LC} - T_{air\ in,LF})}{\ln\left(\frac{(T_{air\ in,LC} - T_{air\ out,LF})}{(T_{air\ out,LC} - T_{air\ in,LF})}\right)} \quad (23)$$

Dónde: LC hace referencia al evaporador y LF al condensador.

### Intercambiadores de calor

En la ingeniería se presenta una variedad de procesos en los cuales es necesario realizar intercambios de calor entre dos fluidos con un diferencial de temperatura entre sí y estos fluidos se encuentran delimitados mediante una pared sólida. Se denomina al equipo a emplear por este proceso como “intercambiador de calor” y tiene varias aplicaciones ya sea en el área de



la industria o en el hogar, aire acondicionado, generación de energía, en calefacción, recuperación de calor residual, algunos tratamientos químicos, entre otros. (Frank P. Incropera).

### **Tipos de un intercambiador de calor (IC)**

Se tiene por los elementos que lo componen:

- IC de placas
- IC de Tubos concéntricos
- IC de Tubos y coraza

También por la dirección de circulación del flujo:

- IC de flujo paralelo
- IC de flujo cruzado
- IC de flujo contracorriente

### **Intercambiador de calor de tubo y coraza (termosifón)**

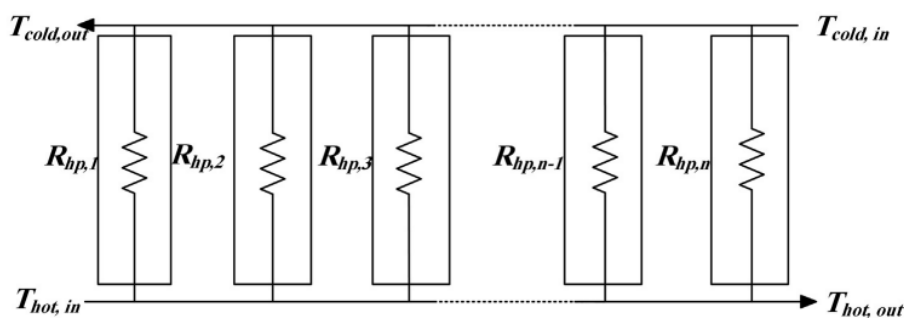
Esta clasificación de intercambiador es la que más se emplea a nivel industrial, el intercambiador (termosifón) cuenta con varios tubos orientados de forma paralela dentro de una carcasa también denominada coraza o casco. Para que exista la transferencia de calor, uno de los fluidos debe moverse por la carcasa y el otro por el interior de los tubos. Al usar turbuladores (baffles, deflectores), la transferencia de calor se incrementa, ya que estos permiten que se fuerce el paso del fluido en forma turbulenta y de esta manera se incrementa la transferencia de calor. Este tipo de intercambiadores, a su vez se pueden subclasificar mediante la dirección del flujo ya sea este en paralelo, contraflujo y flujo cruzado para el caso del termosifón, también es común subclasificarlos por la cantidad de pasos que presenta (Frank P. Incropera).

## Análisis del termosifón

### Resistencias térmicas

**Figura 22**

Analogía de la resistencia eléctrica-térmica del HPHE (Heat pipe-based heat exchanger).



*Nota.* Tomado de (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020)

El Intercambiador de calor basado en tubos de calor (HPHE) consta de varios tubos de cobre conectados en paralelo, donde cada termosifón está en contacto con la corriente de aire caliente en la sección del evaporador. Cada tubo funciona de forma independiente y transfiere calor a la sección del condensador en contacto con el flujo de aire frío. De acuerdo con la analogía eléctrica de la **Figura 22**. (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020)

La resistencia térmica total RHPHE del HPHE se puede calcular como:

$$\frac{1}{R_{HPHE}} = \frac{1}{R_{hp,1}} + \frac{1}{R_{hp,2}} + \dots + \frac{1}{R_{hp,n-1}} + \frac{1}{R_{hp,n}} \quad (24)$$

Donde:

R es la resistencia térmica (K/W)

Los subíndices hp se refieren al tubo de calor

n es el número de tubos de calor en el calor intercambiador

Al suponer que la resistencia de un tubo del termosifón de cobre es igual para todos los tubos del termosifón, la resistencia térmica total  $R_{HPHE}$  del intercambiador de calor de tubos de cobre (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020), se puede expresar como:

$$R_{HPHE} = \frac{R_{hp}}{n} \quad (25)$$

Con  $R_{hp}$  la resistencia media de un tubo de calor  $\frac{K}{W}$  y  $n$  el número de tubos de calor en el intercambiador de calor.

$$R_{hp} = R_{e,out} + R_{e,cond} + R_{c,cond} + R_{c,out} \quad (26)$$

Donde  $R_{e,out}$  y  $R_{c,out}$  representan la resistencia a la transferencia de calor por convección en la sección del evaporador y condensador respectivamente,  $R_{e,cond}$  y  $R_{c,cond}$  representan la resistencia a la conducción en la pared del tubo de cobre en la sección del evaporador y condensador respectivamente. (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020)

$$R = \frac{1}{h A} \quad (27)$$

Donde  $R$  la resistencia térmica total en  $\frac{K}{W}$ ,  $h$  el coeficiente de transferencia de calor en  $\frac{W}{m^2.K}$  y  $A$  la superficie de transferencia de calor en  $m^2$

Para determinar las temperaturas de entrada y salida al termosifón se debe tener en cuenta la transferencia de calor insignificante entre el intercambiador de calor tipo termosifón y el ambiente, y finalmente calcular las variaciones en el potencial y la energía cinética; Para un balance energético (Frank P. Incropera), se tienen las siguientes formulaciones:

$$q = \dot{m}_h(i_{h,i} - i_{h,o}) \quad (28)$$

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

Para representar la entalpía del fluido generalmente se utiliza la letra  $i$ , los subíndices  $h$  y  $c$  para fluidos calientes y fríos respectivamente (cold and hot), los subíndices  $(i)$ ,  $(o)$  indican la entrada y salida del fluido respectivamente (input and output).

En el caso de que los fluidos no presenten una variación de fase y se tengan calores específicos constantes (Frank P. Incropera), la expresión se reduce a lo siguiente:

$$q_h = \dot{m}_{h,c} C_{p h,pc} (T_{h,c,i} - T_{h,c,o}) \quad (30)$$

Otra forma de calcular el valor del calor transferido es al utilizar los valores de la temperatura media logarítmica y de la resistencia térmica total del HPHE. (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020)

$$Q = \frac{\Delta T_{ML}}{R_{HPHE}} \quad (31)$$

Se puede expresar de otra manera con la relación de la transferencia de calor total  $q$  y la diferencia de temperatura  $\Delta T$  entre el fluido caliente y el frío, se tiene:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (32)$$

Existen dos métodos empleados para realizar el estudio de la transferencia de calor en intercambiadores de calor, uno es el método de la diferencia logarítmica media de temperatura por sus siglas también denominado DMLT y el otro es el método de efectividad  $\varepsilon$  y debe considerarse que las ecuaciones descritas no dependen de la disposición del flujo, ni del tipo de intercambiador de calor.

### Cálculo de la eficiencia $\varepsilon$

Es importante considerar el rendimiento de transferencia de calor de un intercambiador, o determinar si los intercambiadores de calor disponibles en el mercado pueden cumplir con determinados valores óptimos de intercambio. Por ende Kays y London en 1955 implementaron una metodología de cálculo denominada “método de la efectividad”, la cual redujo significativamente el análisis de los intercambiadores de calor. Este método emplea un parámetro de naturaleza adimensional el cual es conocido como efectividad de la transferencia de calor  $\varepsilon$  (Yunus A. Cengel), matemáticamente se tiene:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{\text{Razón de la transferencia de calor real}}{\text{Razón máxima posible de la transferencia de calor}} \quad (33)$$

La razón de la transferencia de calor real en un intercambiador de calor se puede obtener basándose en un balance de energía de los fluidos frío y caliente, su formulación es la siguiente:

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,sal} - T_{c,ent}) = C_h(T_{h,ent} - T_{h,sal}) \quad (34)$$

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 del fluido frío (*cold* = *c*) y caliente (*hot* = *h*) (Yunus A. Cengel). Para obtener los valores se puede considerar las siguientes formulaciones:

$$\text{Si } C_{min} = C_c \quad \varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{C_c(T_{c,sal} - T_{c,ent})}{C_c(T_{h,ent} - T_{c,ent})} \quad (35)$$

$$\text{Si } C_{min} = C_h \quad \varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{C_h(T_{h,ent} - T_{h,sal})}{C_h(T_{h,ent} - T_{c,ent})} \quad (36)$$

### *Aplicaciones en la industria del termosifón*

Existen varias razones por las que los intercambiadores de calor tipo termosifón se pueden emplear en la industria, ya que son muchas las aplicaciones industriales en las que participan los intercambiadores de calor en general, las cuales se describirán a continuación en función del tipo de intercambiador de calor que se desee utilizar.

#### *Termosifón de tubos y coraza.*

**Tabla 4**

*Posibles aplicaciones del termosifón de tubos y coraza*

<b>FLUIDOS</b>	<b>APLICACIONES</b>
<b>Agua y Vapor</b>	Condensar el vapor y calentar el agua.
<b>Aceite y Agua</b>	Refrigeración de aceite en sistemas de lubricación  Sistemas hidráulicos  Transformadores eléctricos.
<b>Vapor y Fuel Oil</b>	Calentar fuel oil en tanques de almacenamiento, pozos receptores y estaciones de bombeo.
<b>Aire y agua</b>	Enfriar el aire como postenfriador para compresor de aire.
<b>Refrigerante y agua</b>	Condensar refrigerante

*Fuente: (Sacome, 2019)*

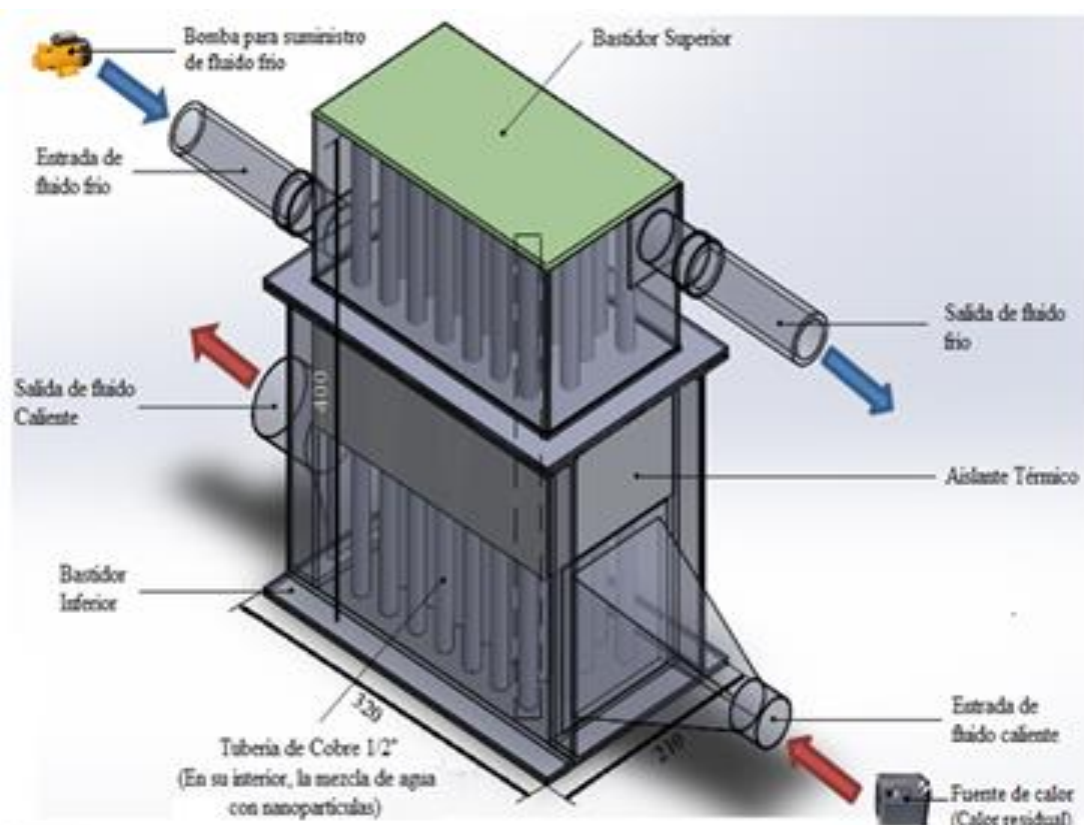
### Capítulo 3: Diseño, construcción, calibración de equipo y preparación

#### Diseño del termosifón de tubos paralelos. Dimensiones generales 21x32x40 cm

Para el diseño del termosifón, se estableció los lineamientos y dimensiones iniciales, en base a esto se procedió a realizar el prediseño, como se observa en la **Figura 23**, posteriormente se realizaron las correcciones necesarias y se obtuvieron las dimensiones finales, para proceder a la construcción.

**Figura 23**

*Prediseño del termosifón de tubos paralelos en SolidWorks 2018*



*Nota.* Elaboración Propia

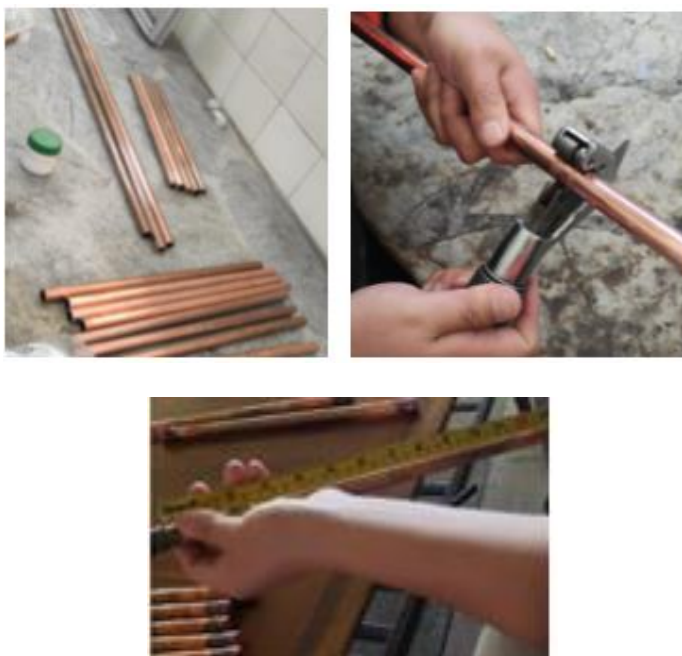
Para obtener el diseño final de la estructura del termosifón se procedió a utilizar el software AutoCAD 2018, (planos de la carcasa, tapas superior e inferior), Ver Anexos 1, 2 y 3.

### Proceso de construcción

- 1) Con el diseño definido, y de acuerdo a los parámetros establecidos, se procedió a la preparación para el corte de los tubos de cobre de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro interior, tipo L (de 6m de largo existente en el mercado nacional), en pedazos de 40cm de largo, como se puede observar en la **Figura 24**.

**Figura 24**

*Corte de tubería de cobre de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro interior de 6m de largo, tipo L, en pedazos de 40 cm*



- 2) El termosifón de tubos paralelos (intercambiador de calor), requirió de 28 tubos, para ello, se midió y cortó en pedazos la tubería acorde a los 40 cm de cada tubo necesario y se soldó (soldadura oxiacetilénica, varilla de plata al 15% y fundente) con sus respectivos accesorios, tanto de sellado en la parte interior (tapones), como de acople en la parte superior (elementos roscados para conexión), como se puede observar en la **Figura 25**.



**Figura 25**

*Construcción de los 28 tubos paralelos para el termosifón acorde a los parámetros establecidos.*



- 3) Para estabilidad de los tubos de cobre del termosifón, se procedió a cortar dos placas de duralón con dimensiones de 21 x 32 x 1 cm, se colocó una plantilla que sirvió como guía para realizar el graneteado. Ver la **Figura 26**.

**Figura 26**

*Construcción Placas de Duralón, colocación de la guía y graneteado para las perforaciones*



- 4) Posteriormente se taladró los 28 agujeros a la medida externa de los tubos y se colocó una cubierta (tela teflón) para protección de estas placas a las altas temperaturas en las que trabajará el termosifón, se cortó los agujeros de la tela teflón acorde al hueco de las placas de duralón y se obtuvo los soportes que servirán tanto en la parte de lado caliente y frío del termosifón. Como se puede observar en la **Figura 27**.

**Figura 27**

*Perforaciones en las 2 placas de Duralón y colocación de la tela teflón, para soporte de los 28 tubos*



- 5) Se colocó en los tubos una cinta autofundente, que ayudará a dar mayor resistencia térmica, a su vez dan mayor estabilidad al colocarlos con las placas antes construidas. Ver **Figura 28**.

**Figura 28**

*Colocación de la cinta autofundente en los 28 tubos de cobre*



- 6) Se adaptaron tapas de madera para dar la forma a la parte adiabática (intermedia), del intercambiador, y se colocaron los 28 tubos de cobre, como se puede observar en la **Figura 29**.

**Figura 29**

*Adaptación de las tapas de madera para la zona adiabática del termosifón*



- 7) Se utilizó un spray con espuma de poliuretano (aislante térmico), para conseguir las medidas requeridas. Ver **Figura 30**.

**Figura 30**

*Colocación de la espuma de poliuretano (aislante), para el posterior sellado.*



### Sellado del intercambiador de tubos paralelos (coraza)

Para el sellado de la coraza y tapas del termosifón construido, se procedió en primer lugar a la soldadura de las 6 termocuplas: 3 en la parte superior (lado caliente del termosifón) y 3 en la parte inferior (lado frío del termosifón), las cuales permitirán obtener los datos de temperaturas, para ello se seleccionaron 3 tubos, 1 en la entrada, 1 en la salida y 1 en la zona intermedia posterior. Como se puede observar en la **Figura 31**.

**Figura 31**

*Selección de los 3 tubos de cobre para soldar las 6 termocuplas*



Posteriormente se procedió a preparar y soldar las termocuplas tipo K, se utilizó soldadura amarilla (bronce) y fundente. Ver **Figura 32**.

**Figura 32**

*Preparación de las termocuplas y soldadura de las mismas en los tubos de cobre del termosifón*



A su vez, con la ayuda de silicón industrial gris, se termoselló los agujeros de las placas y tubos tanto en la parte superior como en la parte inferior, luego se colocó las tapas y coraza (Cortadas con impresión láser en tol galvanizado de 0,5mm de espesor), se empernó y de igual manera se termoselló con silicona gris la cual permite trabajar a temperaturas en un rango de los 300 °C. Como se puede observar en la **Figura 33**.

### Figura 33

Termosellado del termosifón de tubos paralelos; empernado y colocación de silicón gris en carcasa y tapas superior e inferior.



### Diseño para las fuentes (entrada y salida) del intercambiador de calor

Para el uso del termosifón fue necesario diseñar y construir los ductos que darán lugar al uso de las fuentes fría y caliente que se tienen en el laboratorio tanto en el lado superior como en el lado inferior, para ello se procedió a realizar su esquema y diseño. Los planos se pueden observar en los Anexos 4, 5 y 6.

Luego de su diseño, se procedió al corte laser en CNC de todos los ductos, con sus respectivos doblados. Obteniéndose los ductos para las 2 entradas (fría y caliente) y 2 salidas (fría y caliente), Como se puede observar en la **Figura 34**, posteriormente se realizó el montaje a las fuentes (ventiladores) del laboratorio. Ver **Figura 35**.

**Figura 34**

*Reducciones y ductos para las fuentes del termosifón*



**Figura 35**

*Montaje de los ductos a la fuente para la entrada fría (ductos y fuente) del termosifón*



### Construcción de una mesa soporte para el equipo

Para que sostenga el termosifón de tubos paralelos, los accesorios y las fuentes, se construyó una mesa de trabajo con una chapa metálica y perfiles. Se construyó mediante procesos de manufactura, como el lijado, corte, pulido, desbastado, proceso de soldadura SMAW para las uniones, proceso de pintura, finalmente se colocó un tablero de madera acorde a las dimensiones de la estructura metálica. Como se puede Observar en la **Figura 36**.

#### Figura 36

*Construcción de una mesa de trabajo para el intercambiador de calor y sus complementos*



Para el montaje de los ductos de la entrada para la zona caliente del termosifón, se procedió a unir mediante pernos el ducto con la fuente, como se observa en la **Figura 37**.

**Figura 37**

*Montaje de la reducción a la fuente para la entrada caliente del intercambiador de calor*



Se construyó una caja de resistencias para que se genere el calor y por ende la temperatura necesaria en el aire de entrada ( $110^{\circ}\text{C}$ ), para ello se montó 5 resistencias de 1000W cada una, con sus respectivas perillas e indicadores de funcionamiento. A su vez esta caja se unió a la conexión indicada anteriormente. Ver la **Figura 38**.

**Figura 38**

*Montaje de la caja de resistencias para el lado caliente del termosifón*



Posteriormente, se unió esta conexión de la Imagen con los ductos hacia la caja y se aisló con lana de vidrio, como se indica en la **Figura 39**.



**Figura 39**

*Aislamiento con lana de vidrio a la entrada caliente del termosifón*



#### **Montaje y puesta a punto del equipo (termosifón)**

En el montaje, se controló y verificó que el equipo (intercambiador tipo termosifón) no presente perforaciones, ni fugas entre las zonas fría, adiabática y caliente, Ver la **Figura 40**, para ello se utilizó un ventilador: AEROFOIL FAN, Woods de 220V, para el lado caliente. Ver la **Figura 41** y para el lado frío, un banco de pruebas de ventilación LT-53-E de 110V, Ver la **Figura 42**, ambos equipos del laboratorio de conversión de la energía de la universidad y se emperno las entradas respectivamente.

**Figura 40**

*Verificación de fugas de los ductos y del termosifón*



**Figura 41**

*Unión de la entrada caliente (ductos, caja de resistencias y fuente) con el termosifón*

**Figura 42**

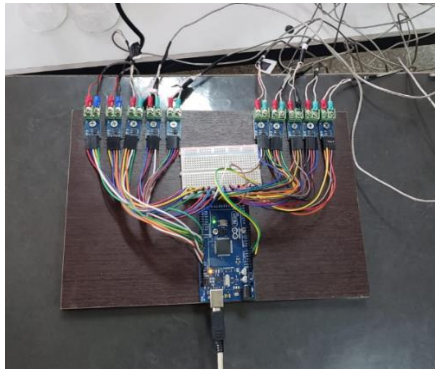
*Unión de la entrada fría (ductos, y fuente), con el termosifón*



Se realizó la prueba de funcionamiento en el termosifón, para ello se colocó agua destilada en cada uno de los tubos de cobre, se encendió las fuentes del lado frío y caliente, se tomó datos de presión y velocidad en las salidas y posteriormente con la ayuda de una interfaz de datos (arduino y computador), se verificó que las termocuplas cumplan la función de adquirir los datos de las temperaturas en los 3 tubos de cobre del intercambiador antes mencionados y seleccionados. Ver la **Figura 43**.

**Figura 43**

*Verificación de funcionamiento de las termocuplas y adquisición de datos de temperaturas*



Se logró el correcto funcionamiento del IC tipo termosifón, ya que en la entrada del lado caliente, se obtuvo aire a 140°C y una salida de aire de 100°C, el cual fue verificado con el uso de un termómetro de carátula (Ver la **Figura 44**) y garantizar la evaporación del fluido (Agua) en el interior del tubo, así como en el lado frío, el aire de entrada fue de 16°C obteniéndose a su salida 32°C. Ver la **Figura 46**.

**Figura 44**

*Temperatura de salida del lado caliente del termosifón (100°C)*



Obtenida la salida de temperatura del lado caliente en la prueba, se montó el ducto correspondiente, junto a una cañería flexible de aluminio para que el aire caliente sea evacuado hacia el ambiente y así evitar el sobrecalentamiento del equipo. Ver la **Figura 45**.

**Figura 45**

*Ducto de salida del lado caliente del termosifón (100°C) hacia el ambiente*



**Figura 46**

*Temperatura de salida del lado frío del termosifón (32°C)*



Comprobada la salida de temperatura del lado frío en la prueba de funcionamiento, se colocó el ducto correspondiente, junto a un accesorio para que el aire frío sea evacuado hacia el ambiente y así evitar el sobrecalentamiento del equipo. Ver la **Figura 47**.

#### **Figura 47**

*Ducto de salida del lado frío del termosifón (32°C) hacia el ambiente*



#### **Definición de parámetros**

Para la definición de los parámetros se eligieron variables del termosifón ( $v$ ,  $T$ ,  $Q$ ,  $P$ ), las cuales sirven para recolectar datos que servirán para el análisis y comparación de resultados.

#### **Lado Caliente**

Velocidad de aire a la entrada constante: 27,4 m/s

Velocidad de aire a la salida constante: 17,9 m/s

#### **Lado Frío**

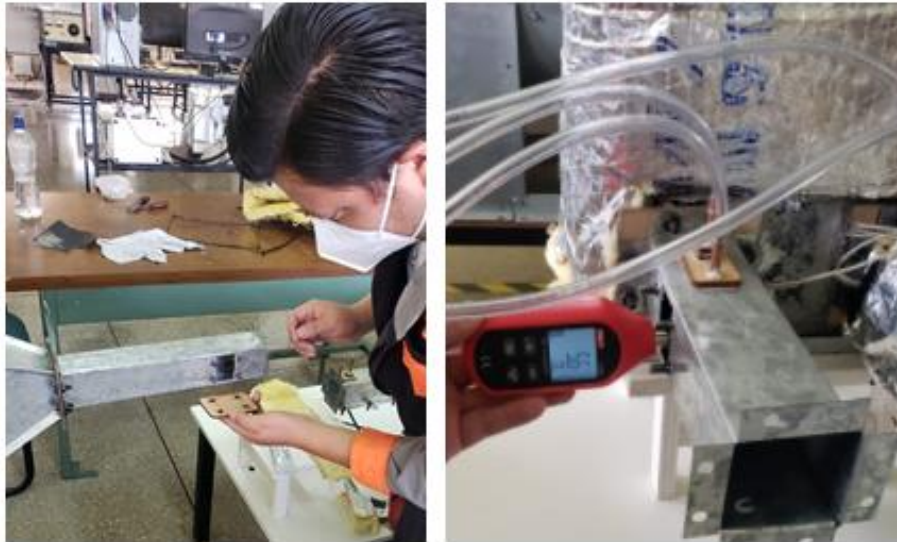
Velocidades de aire a la salida variables: al 25%, 50%, 75% y 100% de abertura del ducto (Mediante una compuerta), como se puede Ver en la **Figura 48** y la **Figura 49**.

**Figura 48**

*Colocación de compuerta para obtener variación de caudal en la entrada fría del termosifón*

**Figura 49**

*Colocación de tapas que sirven para obtener velocidades en las entradas fría y caliente del termosifón, mediante un anemómetro*



Se recolectarán datos cada 10 segundos de temperaturas en las entradas y salidas hasta llegar al estado estable en cada medición, para ello se colocaron 4 termocuplas tipo K en los ductos, como se puede observar en la **Figura 50**.

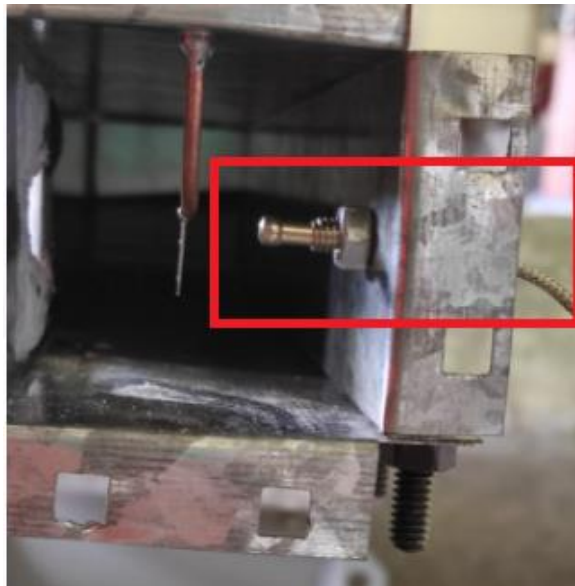
#### Datos a ser recolectados

Temperaturas de aire, a la entrada y salida (lado frio)

Temperaturas de aire a la entrada y salida (lado caliente)

#### Figura 50

*Colocación de termocuplas para obtener las temperaturas de entrada y salida de los ductos (lado y frio caliente)*

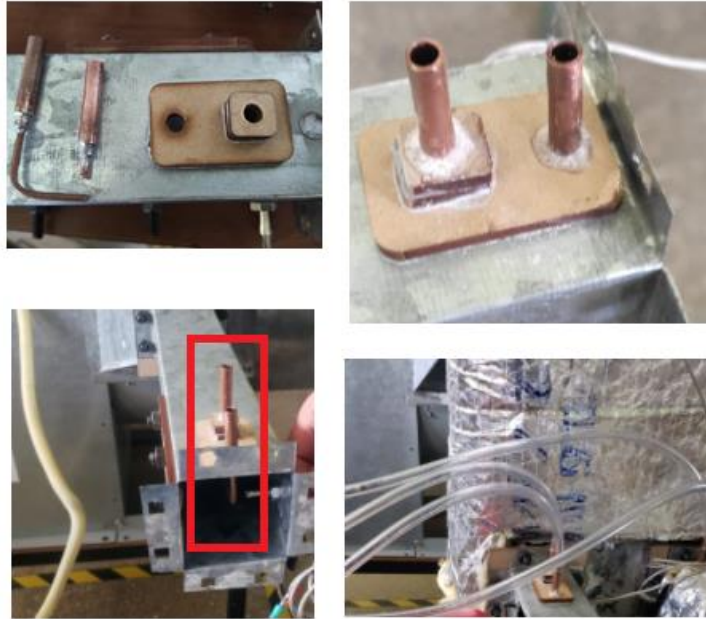


Presión dinámica de entrada y presión de salida del aire tanto en el lado frio y caliente.

Para ello se utilizó tubos pitot en cada ducto del equipo construido (4 en total) y 4 para la presión dinámica (Ver la **Figura 51**) con mangueras acopladas a un manómetro multitubos del laboratorio de fluidos de la universidad, como se observa en la **Figura 52**.

**Figura 51**

*Colocación de tubos pitot en los ductos para obtener presiones dinámicas y estáticas*

**Figura 52**

*Colocación de tubos pitot con mangueras al manómetro multitubo para medir presiones*





## Ensayos de funcionamiento

Se verificaron los parámetros definidos con anterioridad y las termocupas en el sistema (arduino, protoboard y computador), para una correcta adquisición de datos.

Se colocó teflón alrededor de la rosca (macho) y agua destilada ( $17\text{cm}^3$ ) en cada uno de los 28 tubos, posteriormente se colocó el accesorio roscado (hembra) para el sellado, se revisó fugas, para continuar con la eficaz toma de datos en el termosifón de tubos paralelos (Ver la **Figura 53**) y se realizó la prueba de funcionamiento con todos los equipos e instrumentación necesarios, como se puede observar en la **Figura 54**.

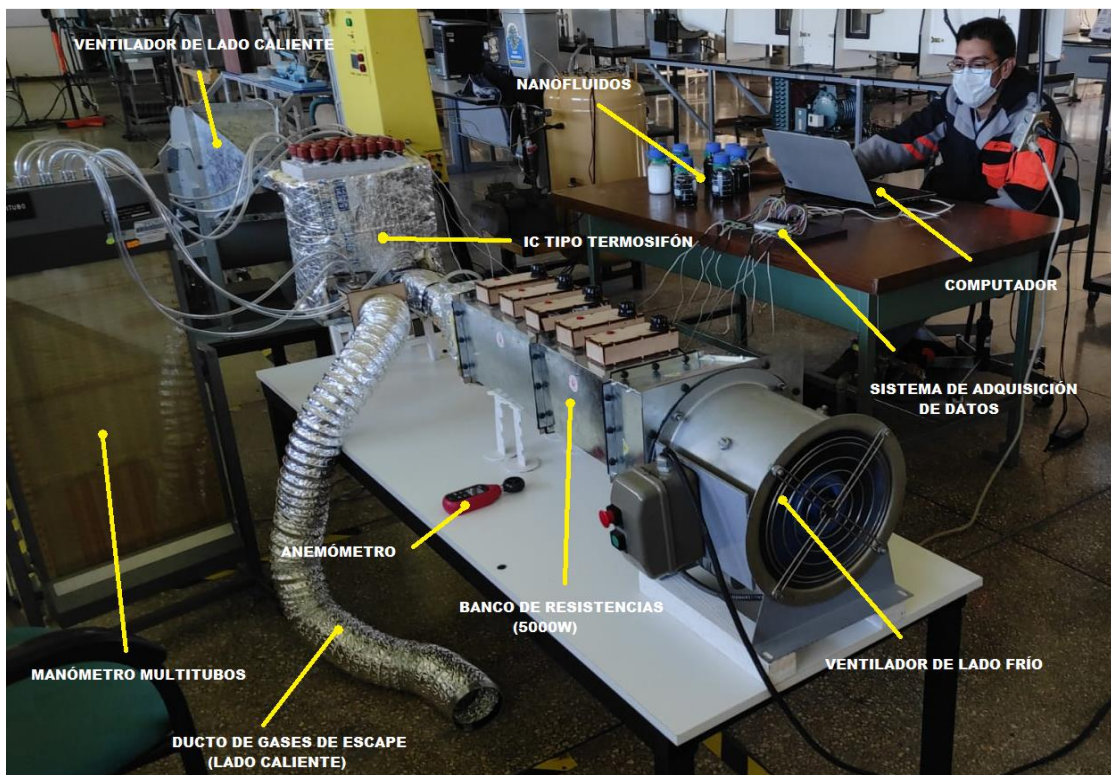
### Figura 53

*Preparación del ensayo de funcionamiento, sellado de tubos con agua destilada*



Figura 54

Ensayo de funcionamiento del termosifón de tubos paralelos



### Preparación de los nanofluidos

Para la determinación de las cantidades en porcentaje en peso (%w), de las 3 concentraciones al 0,1, 0,5 y 1,5 % de nanopartículas a ser utilizadas en la preparación de los nanofluidos, se procede a calcular las cantidades y remplazarlas del total del fluido base utilizado (agua destilada), para un tubo se obtiene el valor de 17 gr de nanofluido, con este valor se procede a calcular el peso de nanopartícula para cada concentración

#### Para 0,1%, 0,5% y 1,5% Y etilenglicol

$$X = \frac{17 \text{ gr} \times 0,1\%}{100\%} = 0,017 \text{ gr}$$

En el caso de 0,1% de concentración en peso, se obtiene que la cantidad de gramos de nanopartículas para un tubo es de: 0,017 gramos

Y al aplicar el cálculo para la concentración de 0,5%, se obtiene que la cantidad de gramos de nanopartículas para un tubo es de 0,085 gramos. (Ver su pesaje en la **Figura 57**) y para la concentración de 1,5% es de 0,255 gramos

Adicionalmente se utiliza como medio dispersante de nanopartículas etilenglicol al 5% de porcentaje en peso del fluido base

$$X = \frac{17gr \times 5\%}{100\%} = 0,85 gr$$

El valor calculado para un tubo del termosifón es de: 0,85 gramos de etilenglicol

Una vez calculados estos valores en porcentaje en peso, se procede a la preparación del nanofluido.

### Preparación del nanofluido

Para obtener el valor total de las nanopartículas a utilizar se multiplica el valor obtenido para un tubo por el número de tubos del termosifón (28):

Para 0,1% = 0,51 gr

Para 0,5% = 2,55 gr

Para 1,5% = 7,65 gr

Mediante la metodología anterior, se realiza el cálculo de la cantidad total de etilenglicol, con un valor de: 25,5 gr, con este valor se realizó su pesaje. Ver la **Figura 56**.

Para el total del agua destilada necesaria, de igual manera, se multiplica la cantidad de agua para un tubo por el número de tubos del termosifón (28), se obtiene un total de 510 gr.

Para realizar la preparación del nanofluido se debe restar las cantidades de nanopartícula en su respectiva concentración y el etilenglicol del total de agua destilada, es decir:

$$\text{Agua destilada}_{Base} = w_{Agua} - w\%_{Nanoparticula} - w\%_{Etilenglicol}$$

#### **Ejemplo de pesaje al 0,5% de nanopartículas**

$$\text{Agua destilada}_{Base} = 510gr - 2,55gr - 25,5gr$$

$$\text{Agua destilada}_{Base} = 481,95 gr$$

Posteriormente se pesó el agua necesaria para la concentración al 0,5%. Ver la **Figura 55**.

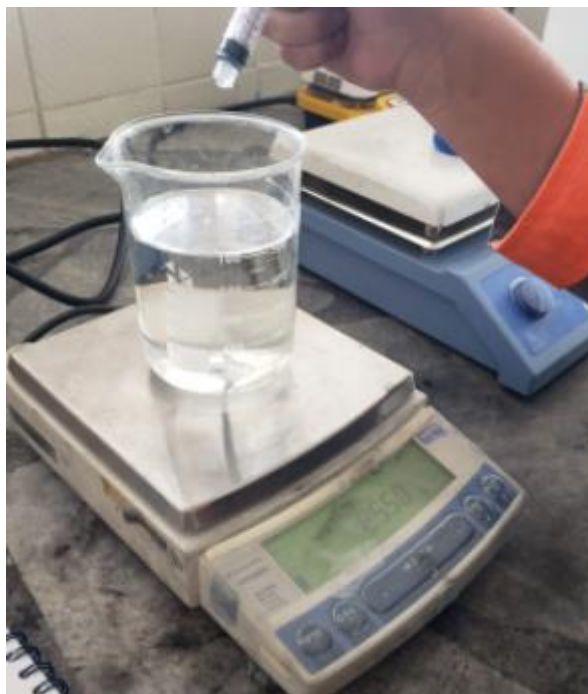
#### **Figura 55**

*Pesaje de Agua destilada al 0,5% de nanopartícula*



**Figura 56**

*Pesaje de Etilenglicol destilada al 0,5% de nanopartícula*

**Figura 57**

*Pesaje al 0,5% de nanopartícula*



### *Agitación de la nanopartícula (Magnética)*

El objetivo de realizar una agitación de tipo magnética es mejorar la homogeneidad de la mezcla, este proceso se realiza con un agitador magnético Marca: Magnetic Stirrer, Modelo SH-4 de 110 V, durante un tiempo aproximado de 60 min, temperatura alrededor de 40°C y una velocidad de rotación de 600 r.p.m. Ver la **Figura 58**.

#### **Figura 58**

*Colocación de nanopartículas y agitación magnética*



### *Proceso de Sonicación*

Una vez realizada la agitación magnética se procede a realizar la sonicación con el equipo de laboratorio de fluidos de la Universidad, seteado a una temperatura de 50°C durante un tiempo de 60 min, con el objetivo de que el nanofluido mantenga su homogeneidad durante un periodo de tiempo necesario para realizar los ensayos, para ello se vierte el nanofluido en recipientes y se los cierra herméticamente para luego ser llevados al interior de dicho equipo. Como se puede observar en la **Figura 59** y se obtuvieron los nanofluidos deseados. Ver la **Figura**

**Figura 59**

*Equipo para sonicación*

**Figura 60**

*Muestras de los nanofluidos al 1,5%*



### *Procedimiento para uso del equipo y pruebas*

1. Montaje de las entradas y salidas de aire frío y caliente en el termosifón
2. Colocación de mangueras al manómetro multitubos
3. Colocación de termocuplas al sistemas de adquisición de datos (Arduino y computador)
4. Colocación de 17 cm<sup>3</sup> de nanofluido en los 28 tubos del termosifón
5. Sellado de los tubos del termosifón con teflón y tapones (hembra)
6. Encender equipo AEROFOIL FAN, Woods de 220V y las 5 resistencias para el lado caliente, esperar hasta que la temperatura alcance el estado estable (para este equipo aproximadamente 25 min)
7. Encender el banco de pruebas de ventilación LT-53-E de 110V, para el lado frío hasta tener estabilidad de temperaturas (aproximadamente 15 minutos)
8. Toma de medidas de presión en el manómetro multitubos
9. Toma de datos de velocidad en las entradas y salidas del termosifón (lado frío y caliente), utilizar anemómetro.
10. Toma de temperaturas mediante software y sistema de adquisición de datos (automático)
11. Variar el caudal, esperar aproximadamente 15 min (estado estable) y repetir pasos 8, 9 y 10.
12. Apagar las cinco resistencias eléctricas
13. Mantener encendidos los ventiladores aproximadamente 5 min, hasta que se enfríe el termosifón
14. Apagar ventiladores
15. Desmontaje del termosifón y retiro de tapones (hembra)
16. Vaciado de nanofluido y limpieza



*Ejemplo de tablas de datos a ser obtenidas en la prueba del equipo*

**Tabla 5**

*Tabla de datos de temperaturas*

<b>Nanofluido:</b>										
LADO CALIENTE					LADO FRIO					Apertura
Entrada	Salida	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 3	Tubo 2	Tubo 1	Entrada	Salida	
TERMOCUPLAS										
T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)	
										25%
										50%
										75%
										100%

**Tabla 6**

*Tabla de datos de presión*

<b>Nanofluido:</b>											
LADO CALIENTE				Presión (mm)		LADO FRIO				Presión (mm)	
				Entrada		Salida					
Apertura				Est.	Din.	Est.	Din.	Apertura			
				Est.	Din.	Est.	Din.	Est.	Din.	Est.	Din.
								25%			
								50%			
100%								75%			
								100%			

**Tabla 7***Tabla de datos de velocidad*

<b>Nanofluido:</b>			
Velocidad (m/s)			
Caliente		Fría	
Entrada	Salida	Entrada	Salida

**Tabla 8***Características de las nanopartículas utilizadas*

	Unidades	CuO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NTC
<b>DENSIDAD (<math>\rho</math>)</b>	kg/m <sup>3</sup>	6310	5175	3961	1400
<b>CALOR ESPECIFICO (Cp)</b>	J/kg*°K	550.5	619.4	875	711
<b>CONDUCTIVIDAD TERMICA (k)</b>	w/m*°K	76.5	6	40	6000
<b>SUPERFICIE ESPECIFICA (ssa)</b>	m <sup>2</sup> /g	30 a 40	10 a 40	9	150-210
<b>FABRICANTE:</b>	Compañía Química Kunshan Yosoar New Materials Co. ltd - CHINA				

*Nota:* Referencias de los datos: CuO (Caiza & Caiza, 2019); Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Vargas, 2011), (Korolev, Arefyev, & Blinov, 2008); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (GOODFELLOW, s.f.); NTC (Veléz, 2018). Conductividad térmica: (Yanjiao, Tung, Schneider, & Xi, 2009); Características del fabricante (Kunshan Yosoar New Materials Co. ltd, 2021).

## Capítulo 4: experimentación

### Análisis de Transferencia de calor

En las siguientes graficas se aprecia de manera visual el calor transferido desde la sección del evaporador (lado caliente) hacia el fluido en la sección del condensador (lado frio) a través del proceso de ebullición de los diferentes nanofluidos caloportadores llevado a cabo en el interior de los tubos, adicionalmente se realiza 4 variaciones del caudal de entrada del condensador.

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

Al aplicar la **Ecuación (19)**, del capítulo dos se puede obtener la velocidad máxima, al tomar como base los parámetros de configuración ST, SL y SD, adicionalmente se aplica la **Ecuación (21)**. Con los datos de temperaturas obtenidas de la **Tabla 5** y velocidades de la **Tabla 7** del capítulo 3, con este resultado y por medio de interpolación en los valores de la **Tabla 3** se obtienen las propiedades termofísicas que se deben aplicar en los cálculos posteriores. Al aplicar la **Ecuación (17)** se calcula el valor del número de Reynolds máximo, el cual es necesario para el siguiente paso.

### Coefficiente de convección (h) y resistencia térmica

Una vez obtenidos los resultados de las **Ecuaciones (21), (17)** y las propiedades termofísicas en la  $T_m$ , se procede a evaluar cuál de las condiciones se aplicarán para calcular el número de Nusselt en la **Figura 18**, se observa que la ecuación que mejor se adapta a las condiciones dadas es la **Ecuación (20)** de Zukauskas y los valores de las constantes que están

involucradas en esta se los obtiene de la **Figura 19**, al utilizar esta ecuación en el cálculo, se obtiene el valor del número de Nusselt con el cual se procede a calcular el coeficiente de convección de transferencia de calor.

Para calcular las resistencias térmicas se utiliza el valor obtenido de la **Ecuación (20)** y se aplica la **Ecuación (27)** para obtener la resistencia de convección a la transferencia de calor, adicionalmente se aplica la **Ecuación (10)** para calcular el valor de la resistencia a la conducción en la pared de los tubos de cobre y con estos resultados se aplica las **Ecuaciones (25) y (26)** para obtener el valor de la resistencia total del HPHE.

Al emplear la **Ecuación (23)** y los datos de temperaturas obtenidos de la **Tabla 5** es posible calcular la temperatura media logarítmica, la cual es necesaria para el posterior análisis del calor transferido.

Las gráficas de transferencia de calor  $Q$  vs Flujo másico que se muestra en la **Figura 61** hasta la **Figura 67**, son producto de la **Ecuación (30)**, del capítulo dos, y con este resultado se observa de manera gráfica como cada una de las nanopartículas ensayadas muestran un incremento de transferencia de calor con relación al fluido base (Agua destilada). De igual manera indica que el aumento del número de Reynolds máximo promueve la mejora de la transferencia de calor.

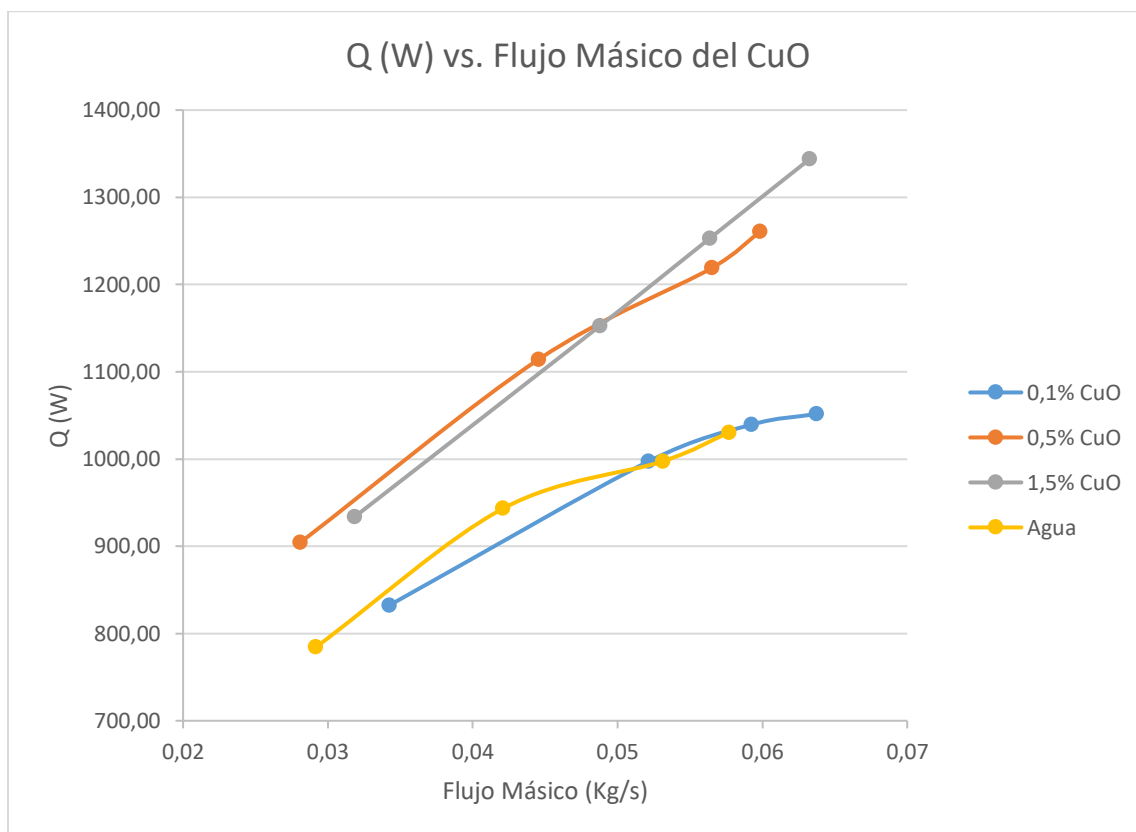
En las gráficas de Eficiencia vs Flujo másico que se muestran en las **Figura 68** a la **Figura 74** son el resultado de las **Ecuaciones (33), (35) y (36)**, en las cuales se observa que las eficiencias obtenidas en los nanofluidos de  $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $Fe_3O_4$  y NTC durante los ensayos realizados son superiores en comparación al fluido base (Agua destilada).

El ejemplo de cálculo se puede observar en el Anexo 7.

## Análisis de Transferencia de calor individual de los nanofluidos

**Figura 61**

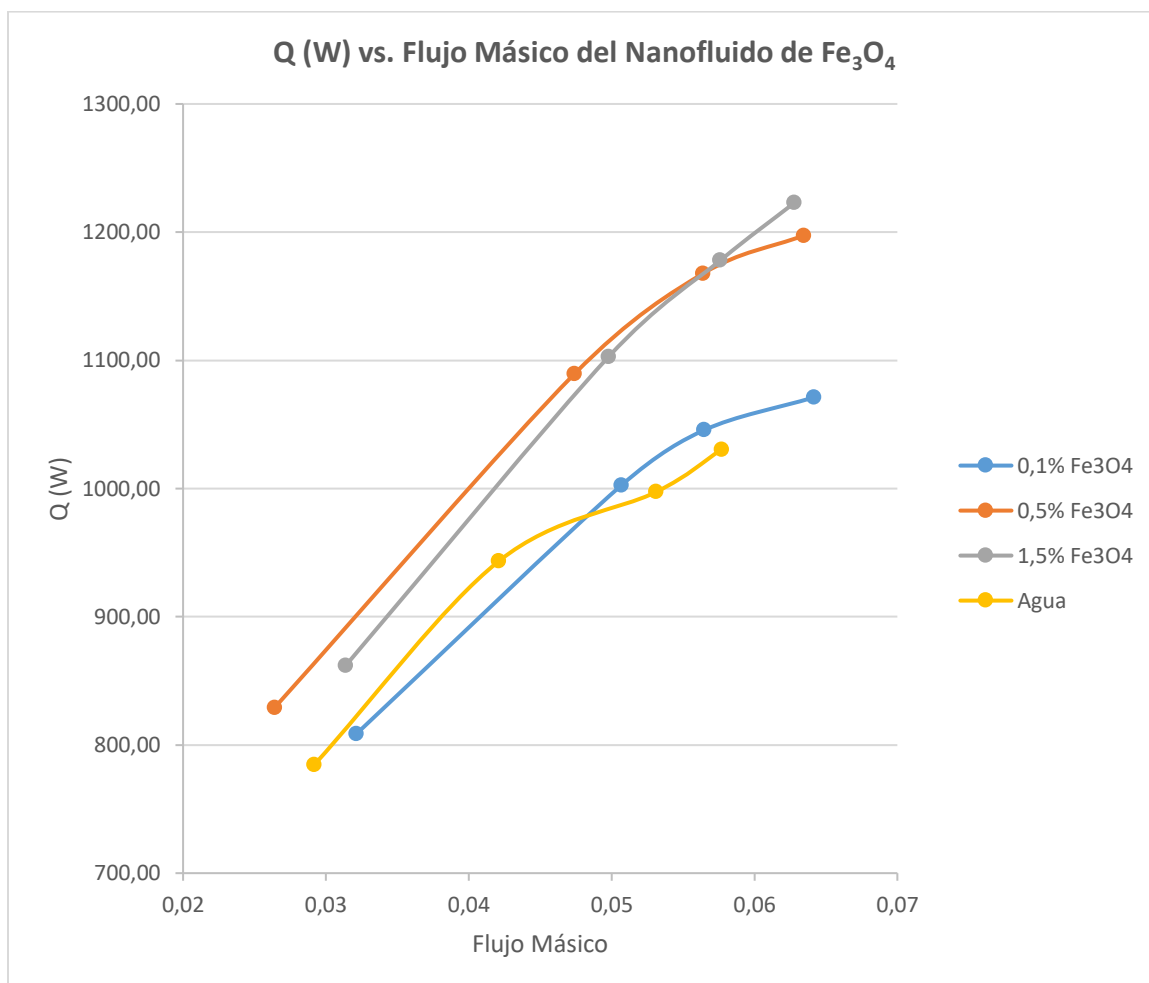
*Curvas de calor Q (W) vs Flujo másico para el nanofluido de cobre a diferentes concentraciones*



De la **Figura 61**, se puede observar que la mejor concentración para el nanofluido de Cobre es al 1,5%, ya que muestra una mayor estabilidad conforme se varía el flujo másico de entrada en la sección del condensador y presenta un valor máximo de transferencia de calor de 1343,63 W, lo cual es 1,30 veces superior al agua destilada con un valor de 1030,56 W; 1,06 veces superior al 0,5% de concentración de nanopartícula de CuO con un valor de 1260,66 W y 1,27 veces superior en comparación de la menor concentración (0,1%), que presenta 1051,70 W.

**Figura 62**

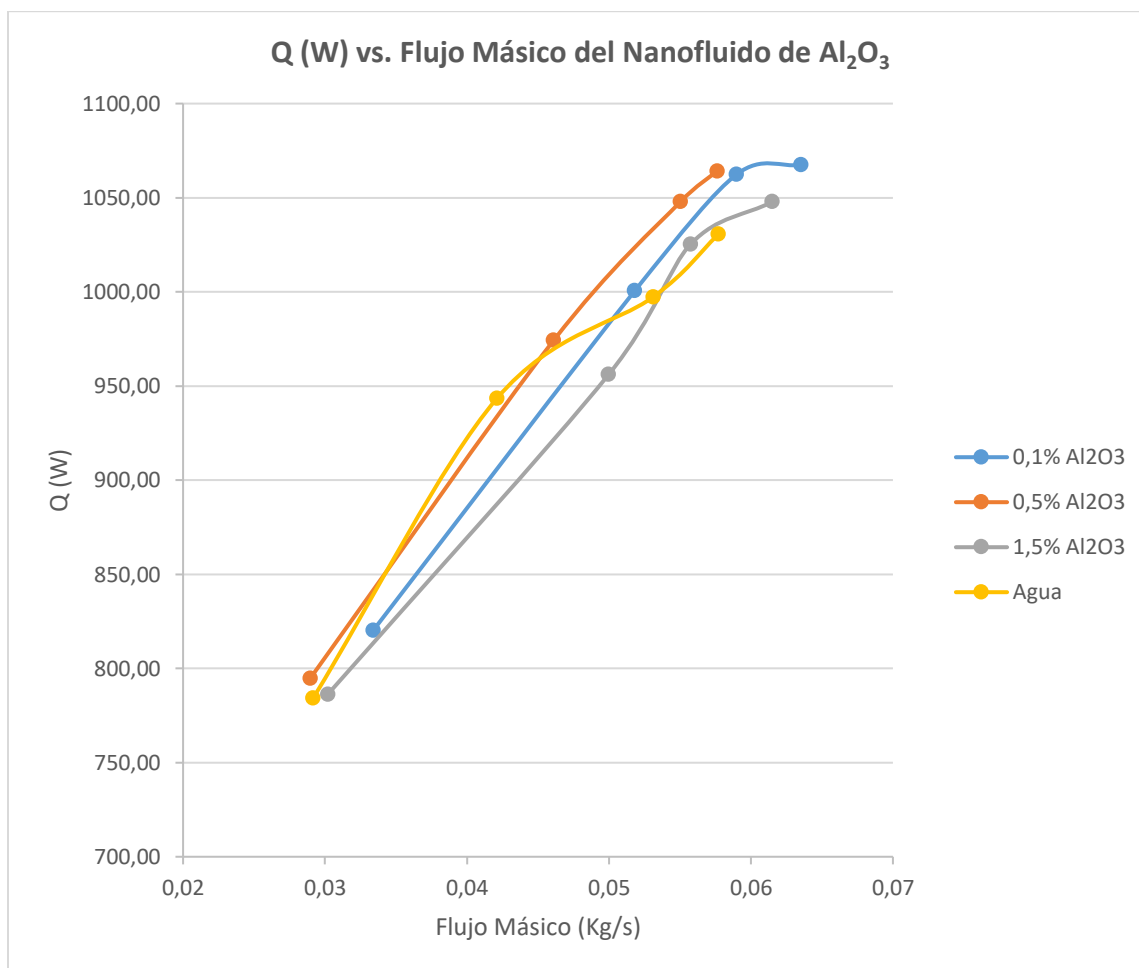
*Curvas de calor Q (W) vs Flujo másico para el nanofluido de hierro a diferentes concentraciones*



De la **Figura 62**, se puede observar que la mejor concentración para el nanofluido de Hierro es al 1,5%, a pesar de que la transferencia de calor es ligeramente menor comparada al 0,5%, esta tiende a estabilizarse conforme se incrementa el flujo másico y presenta un valor máximo de transferencia de calor de 1222,90 W, lo cual es 1,18 veces superior al agua destilada con un valor de 1030,56 W; 1,02 veces superior al 0,5% de concentración de nanopartícula de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con un valor de 1197,34 W y 1,14 veces superior en comparación de la menor concentración (0,1%), que presenta 1071,10 W.

**Figura 63**

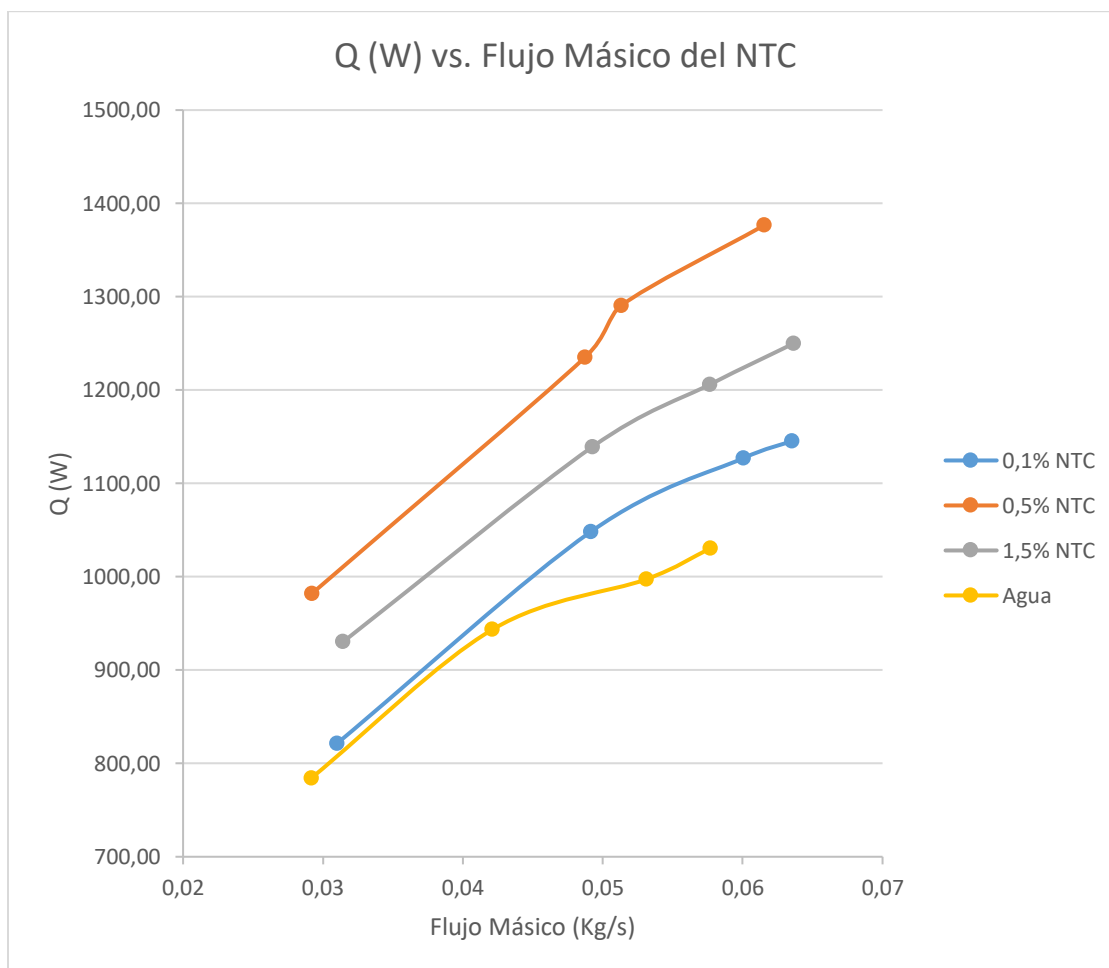
*Curvas de calor Q (W) vs Flujo másico para el nanofluido de aluminio a diferentes concentraciones*



De la **Figura 63**, se puede observar que la mejor concentración para el nanofluido de Aluminio es al 0,1%, ya que muestra una mayor estabilidad conforme se varía el flujo másico de entrada en la sección del condensador y presenta un valor máximo de transferencia de calor de 1067,42 W, lo cual es 1,036 veces superior al agua destilada con un valor de 1030,56 W; 1,003 veces superior al 0,5% de concentración de nanopartícula de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con un valor de 1064,15 W y 1,018 veces superior en comparación de la menor concentración (1,5%), que presenta 1047,81 W.

**Figura 64**

*Curvas de calor  $Q$  (W) vs Flujo másico para el nanofluido de nanotubos de carbono (NTC) a diferentes concentraciones*



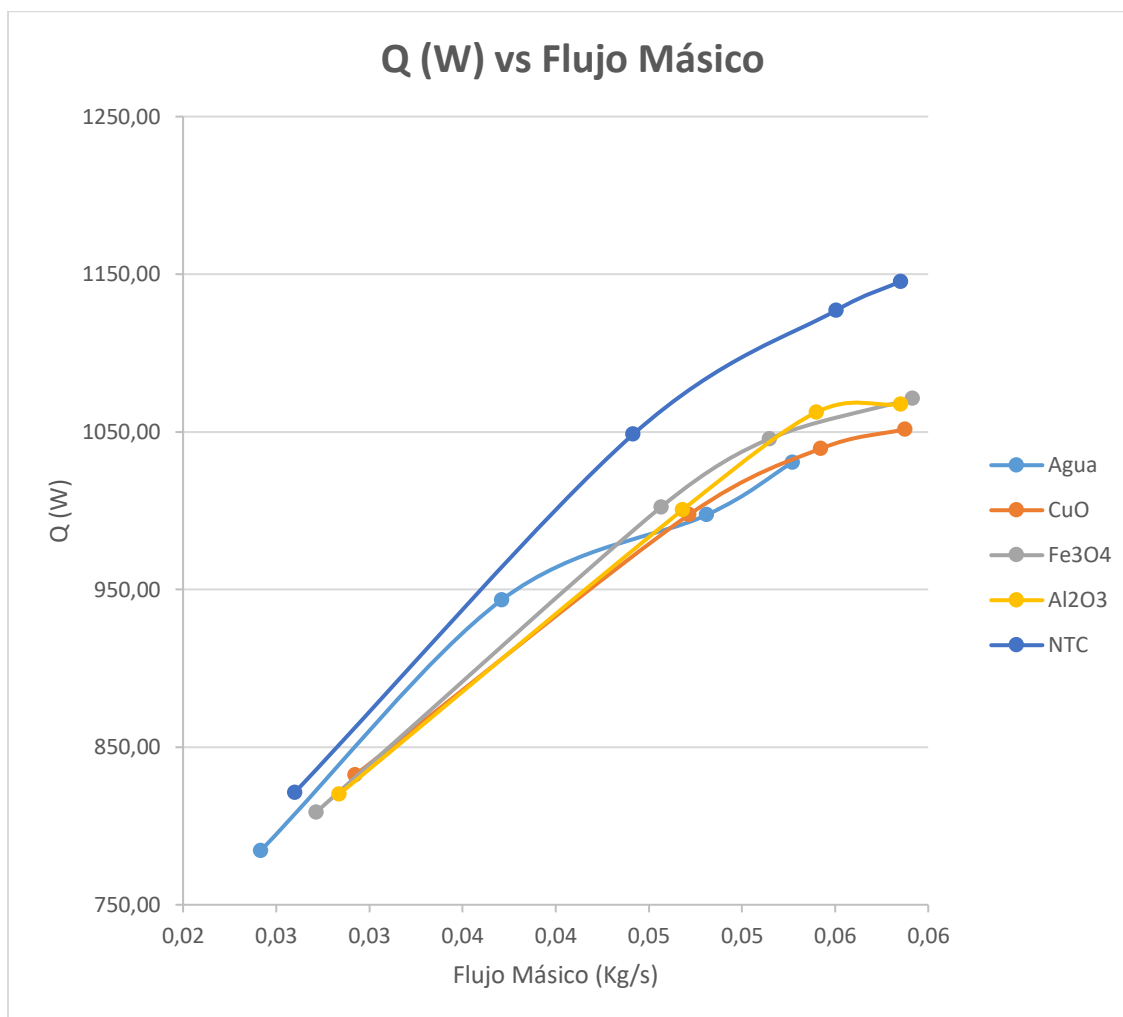
De la **Figura 64**, se puede observar que la mejor concentración para el nanofluido de NTC es al 0,5%, ya que muestra una mayor estabilidad conforme se varía el flujo másico de entrada en la sección del condensador y presenta un valor máximo de transferencia de calor de 1376,52 W, lo cual es 1,33 veces superior al agua destilada con un valor de 1030,56 W; 1,20 veces superior al 0,1% de concentración de nanopartícula de NTC con un valor de 1045,35 W y 1,10 veces superior en comparación de la menor concentración (1,5%), que presenta 1249,76 W.



## Análisis global de transferencia de calor de los nanofluidos en diferentes concentraciones

**Figura 65**

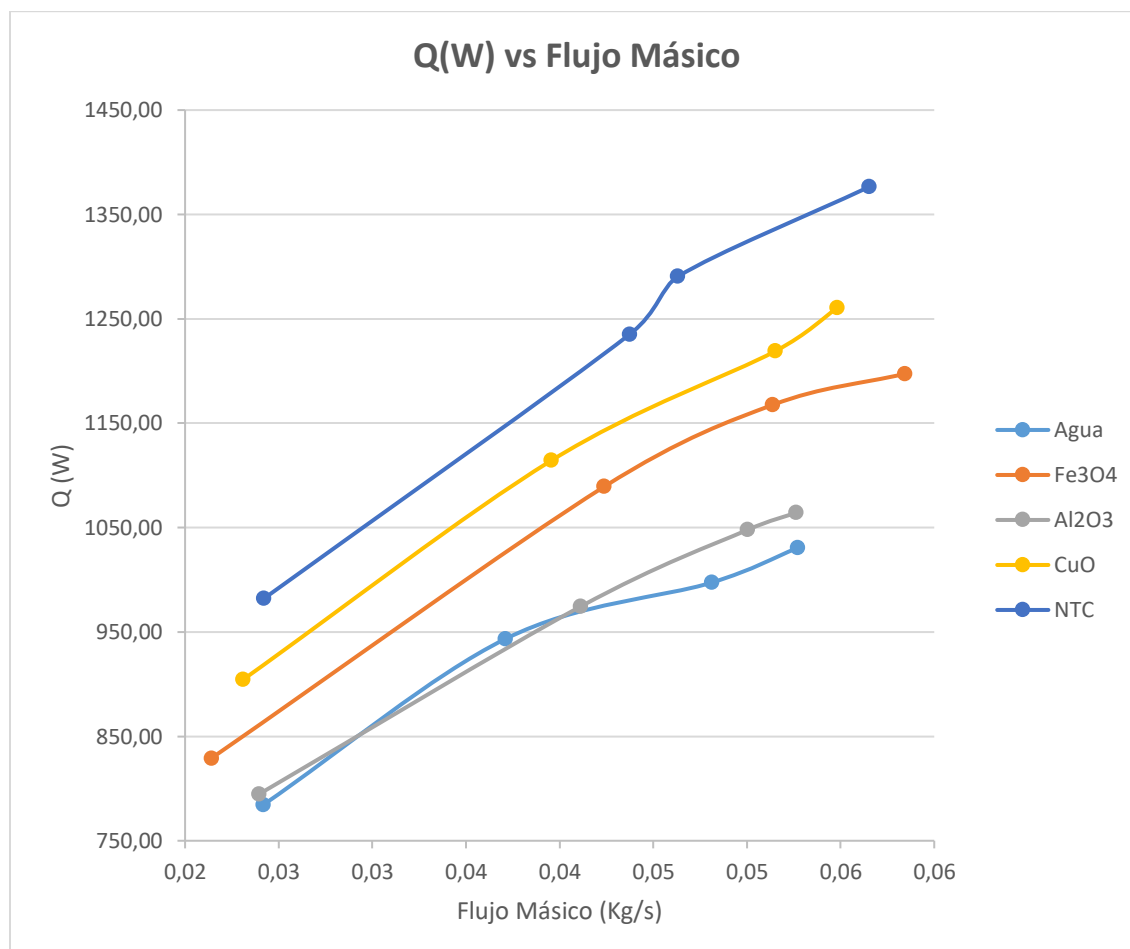
*Curvas de calor Q (W) vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 0,1% de concentración*



De la **Figura 65**, se puede apreciar que el nanofluido que mejor transferencia de calor presenta es el de nanotubos de carbono, el cual muestra valores en su máximo de 1145,35 W, al 0,1% de concentración, lo cual es 1,11 veces más en comparación del agua destilada, que presenta un valor de transferencia de calor de 1030,51 W; 1,08 veces más en comparación al CuO con 1051,70W; 1,07 veces más en comparación al Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> con 1071,10W y 1,07 veces más en comparación al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con 1067,42W; en los diferentes flujos másicos utilizados.

**Figura 66**

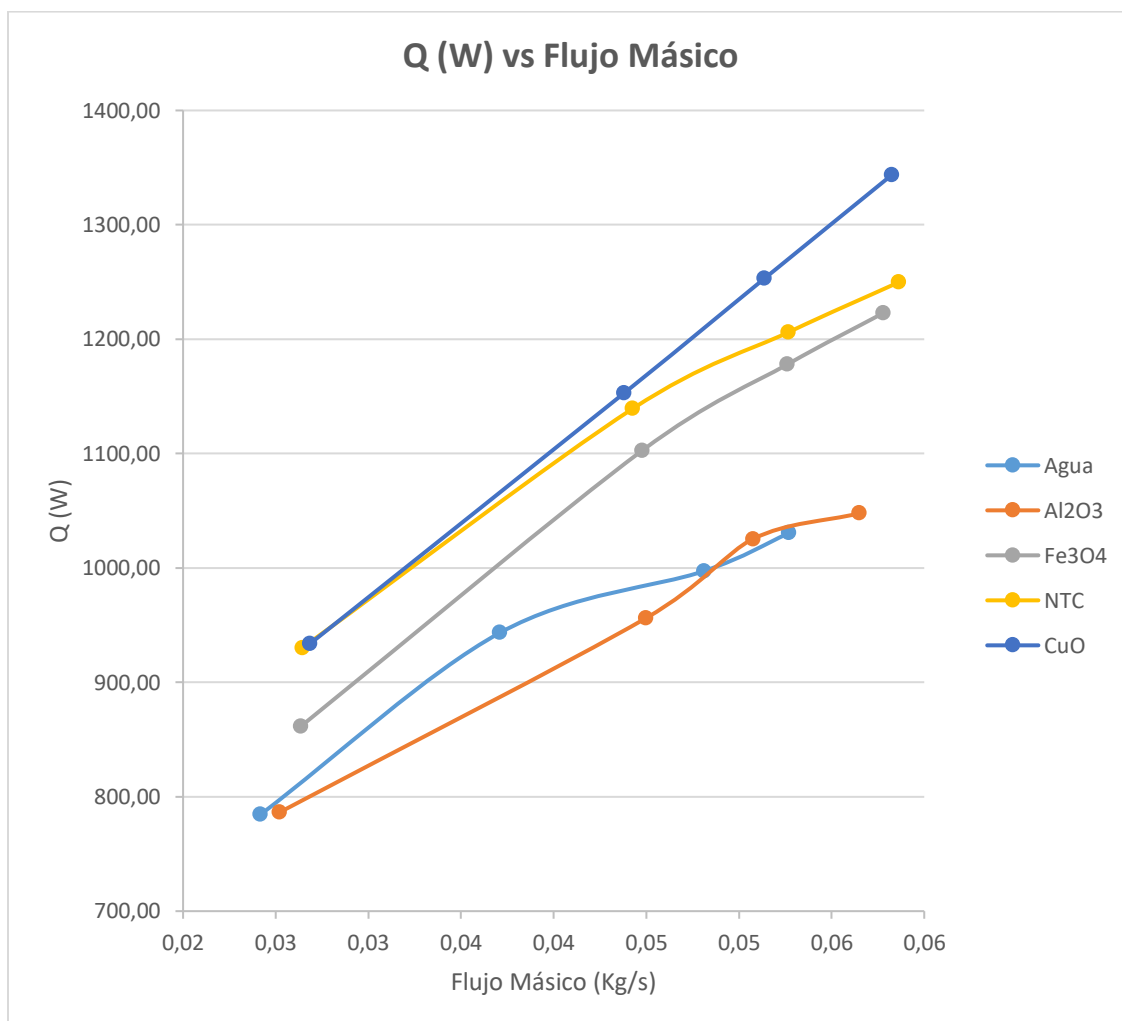
*Curvas de calor  $Q$  (W) vs Flujo másico de caudal para los diferentes nanofluidos al 0,5% de concentración*



De la **Figura 66**, se puede apreciar que el nanofluido que mejor transferencia de calor presenta es el nanotubo de carbono, el cual muestra valores en su máximo de 1376,52 W, al 0,5% de concentración, lo cual es 1,33 veces más en comparación del agua destilada, que presenta un valor de transferencia de calor de 1030,51 W; 1,09 veces más en comparación al CuO con 1260,66W; 1,15 veces más en comparación al Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> con 1197,34W y 1,29 veces más en comparación al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con 1064,15W; en los diferentes flujos másicos utilizados.

**Figura 67**

*Curvas de calor Q (W) vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 1,5% de concentración*



De la **Figura 67**, se puede apreciar que el nanofluido que mejor transferencia de calor presenta es el de Cobre, el cual muestra valores en su máximo de 1343,63 W, al 1,5% de concentración, lo cual es 1,33 veces más en comparación del agua destilada, que presenta un valor de transferencia de calor de 1030,51 W; 1,07 veces más en comparación al NTC con 1249,76W; 1,10 veces más en comparación al Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> con 1222,90W y 1,28 veces más en comparación al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con 1047,81W; en los diferentes flujos másicos utilizados.

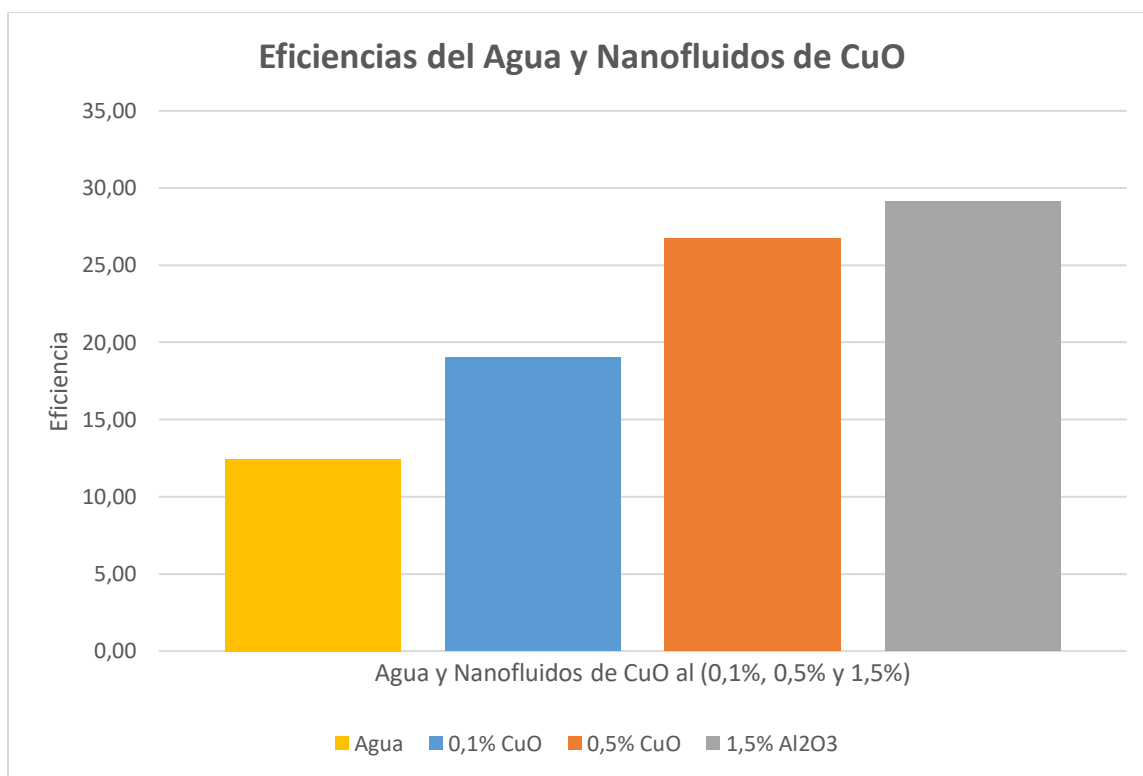
## Eficiencia

A continuación, se muestran las diferentes graficas en las cuales se puede apreciar la eficiencia del termosifón de tubos paralelos vs la variación de apertura de caudal en los diferentes nanofluidos analizados en concentraciones distintas.

### Análisis de Eficiencia individual de los nanofluidos

**Figura 68**

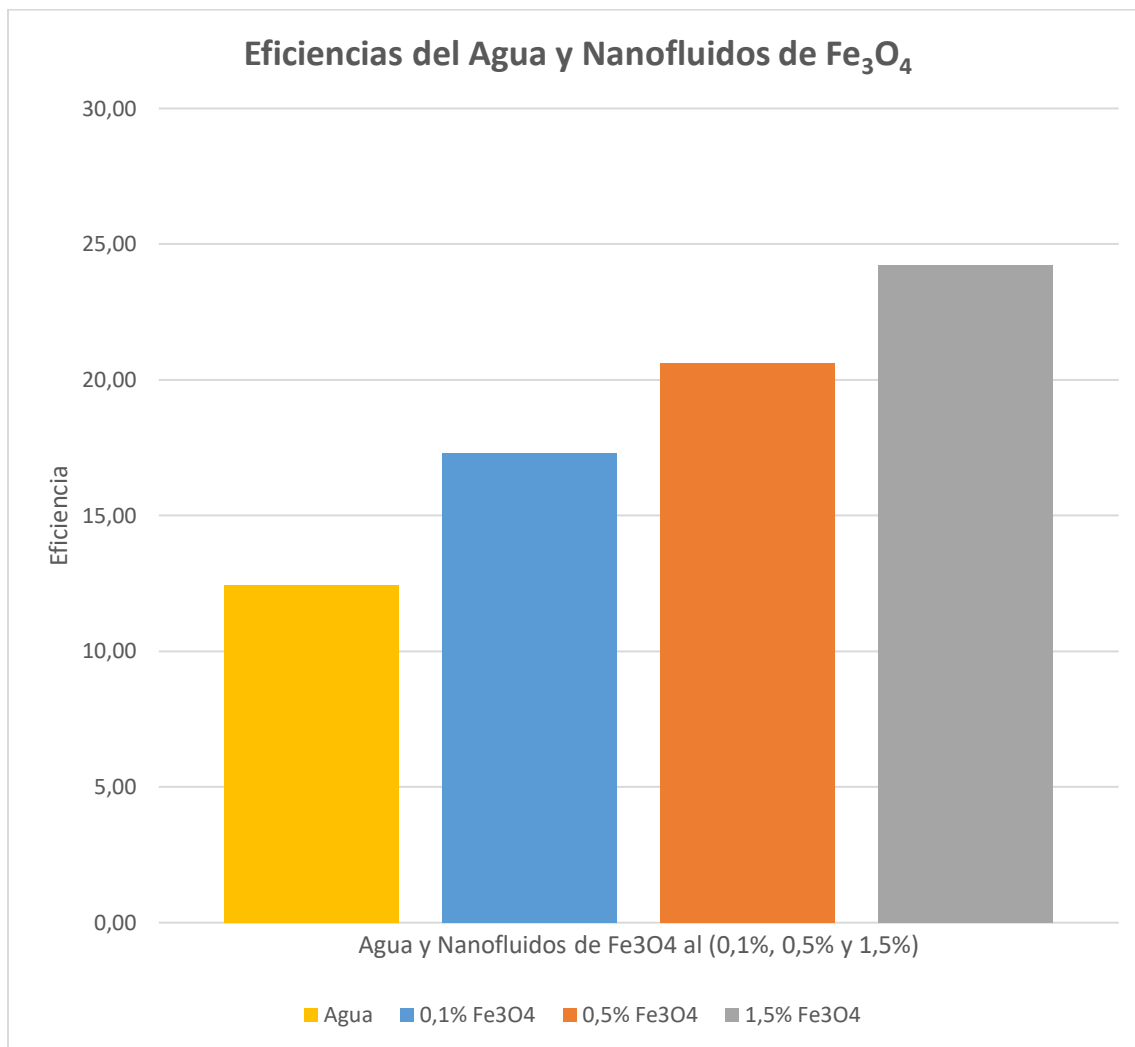
*Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de cobre a diferentes concentraciones*



De la **Figura 68**, se puede observar que la mayor eficiencia del nanofluido de cobre se presenta en la mayor concentración (1,5%), con un valor de 29,1, lo cual es 2,33 veces más en comparación de la eficiencia obtenida en el agua con un valor de eficiencia de 12,46, 1,53 veces más que en el cobre al 0,1% de concentración con un valor de eficiencia de 19,01 y 1,08 veces más que en el cobre al 0,5% de concentración con un valor de eficiencia de 16,73.

**Figura 69**

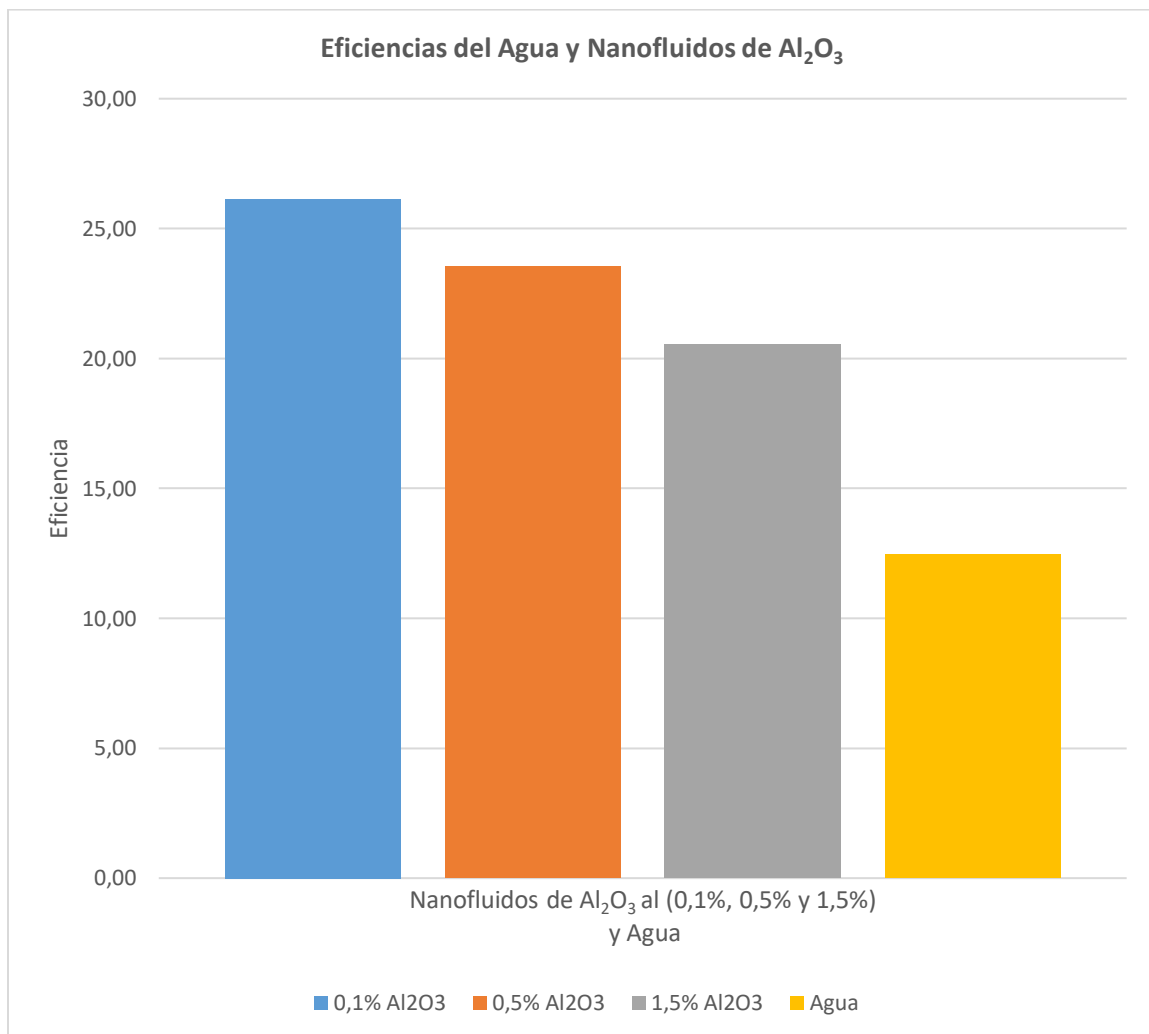
*Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de hierro a diferentes concentraciones*



De la **Figura 69**, se puede observar que la mayor eficiencia del nanofluido de Hierro se presenta en la mayor concentración (1,5%), con un valor de 24,22., lo cual es 1,94 veces más en comparación de la eficiencia obtenida en el agua con un valor de eficiencia de 12,46., 1,40 veces más que en el Hierro al 0,1% de concentración con un valor de eficiencia de 17,30 y 1,17 veces más que en el Hierro al 0,5% de concentración con un valor de eficiencia de 20,63.

**Figura 70**

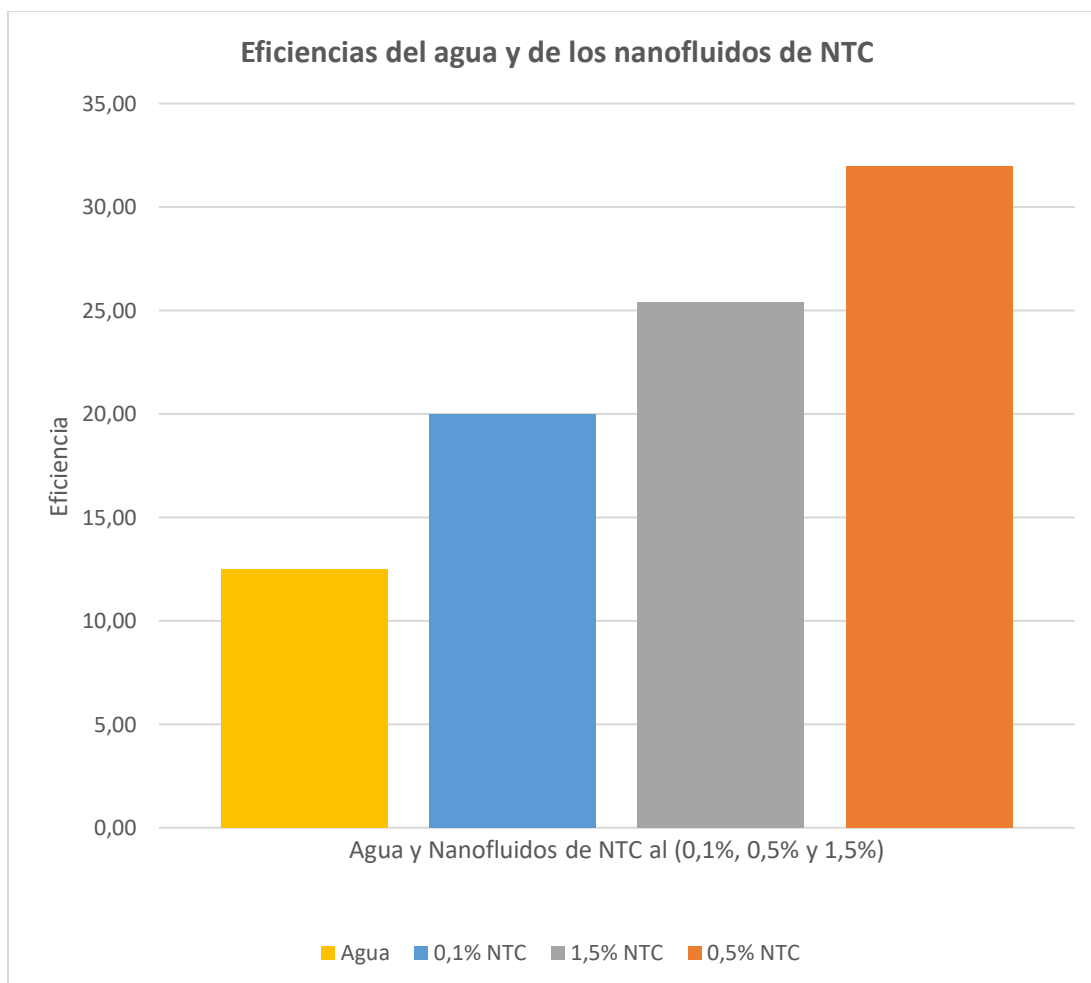
*Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de aluminio a diferentes concentraciones*



De la **Figura 70**, se puede observar que la mayor eficiencia del nanofluido de Aluminio se presenta en la menor concentración (0,1%), con un valor de 26,13., lo cual es 2,09 veces más en comparación de la eficiencia obtenida en el agua con un valor de eficiencia de 12,46., 1,11 veces más que en el Aluminio al 0,5% de concentración con un valor de eficiencia de 23,55 y 1,27 veces más que en el Aluminio al 1,5% de concentración con un valor de eficiencia de 20,56.

**Figura 71**

*Curvas de eficiencia vs Flujo másico para el nanofluido de nanotubos de carbono a diferentes concentraciones*

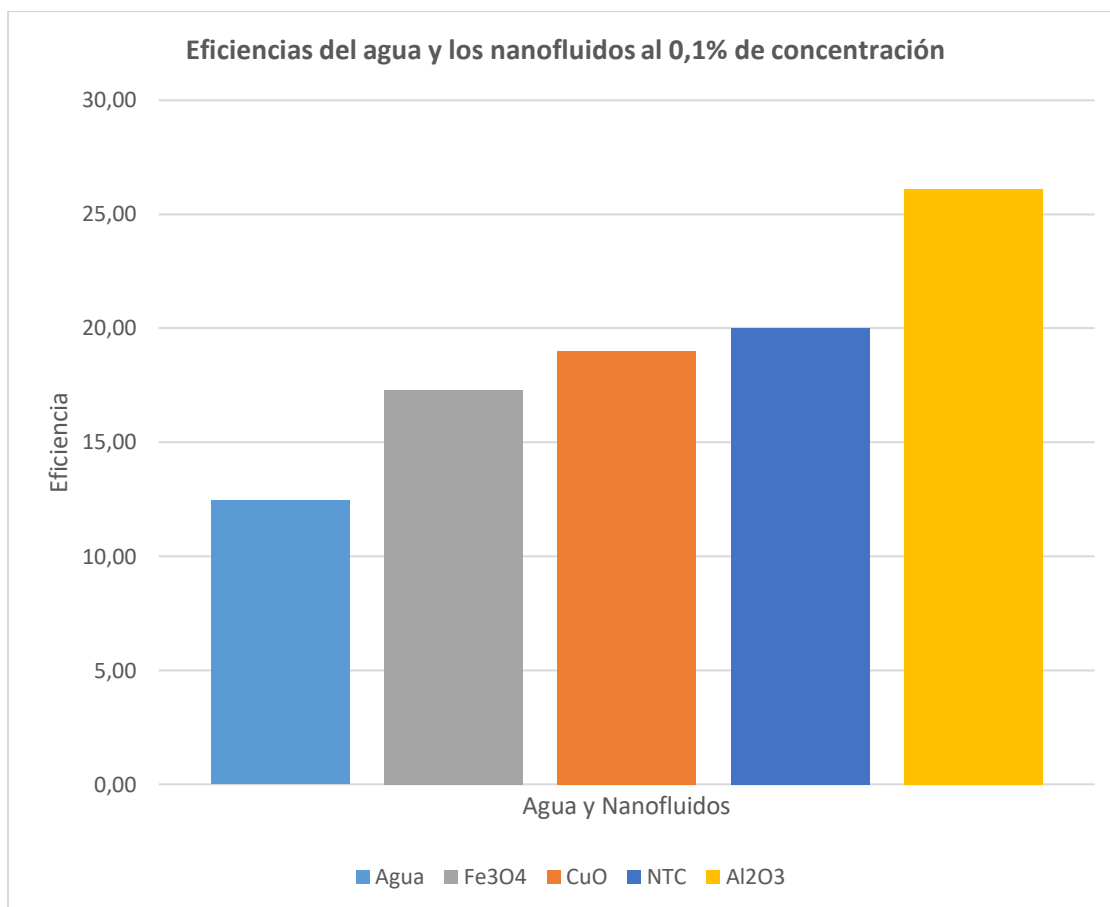


De la **Figura 71**, se puede observar que la mayor eficiencia del nanofluido de Nanotubos de carbono se presenta en la concentración intermedia (0,5%), con un valor de 31,97., lo cual es 2,56 veces más en comparación de la eficiencia obtenida en el agua con un valor de eficiencia de 12,46., 1,59 veces más que en NTC al 0,1% de concentración con un valor de eficiencia de 20,00 y 1,25 veces más que en NTC al 1,5% de concentración con un valor de eficiencia de 25,41.

## Análisis global de eficiencia de los nanofluidos en diferentes concentraciones

**Figura 72**

*Curvas de eficiencia vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 0,1% de concentración*

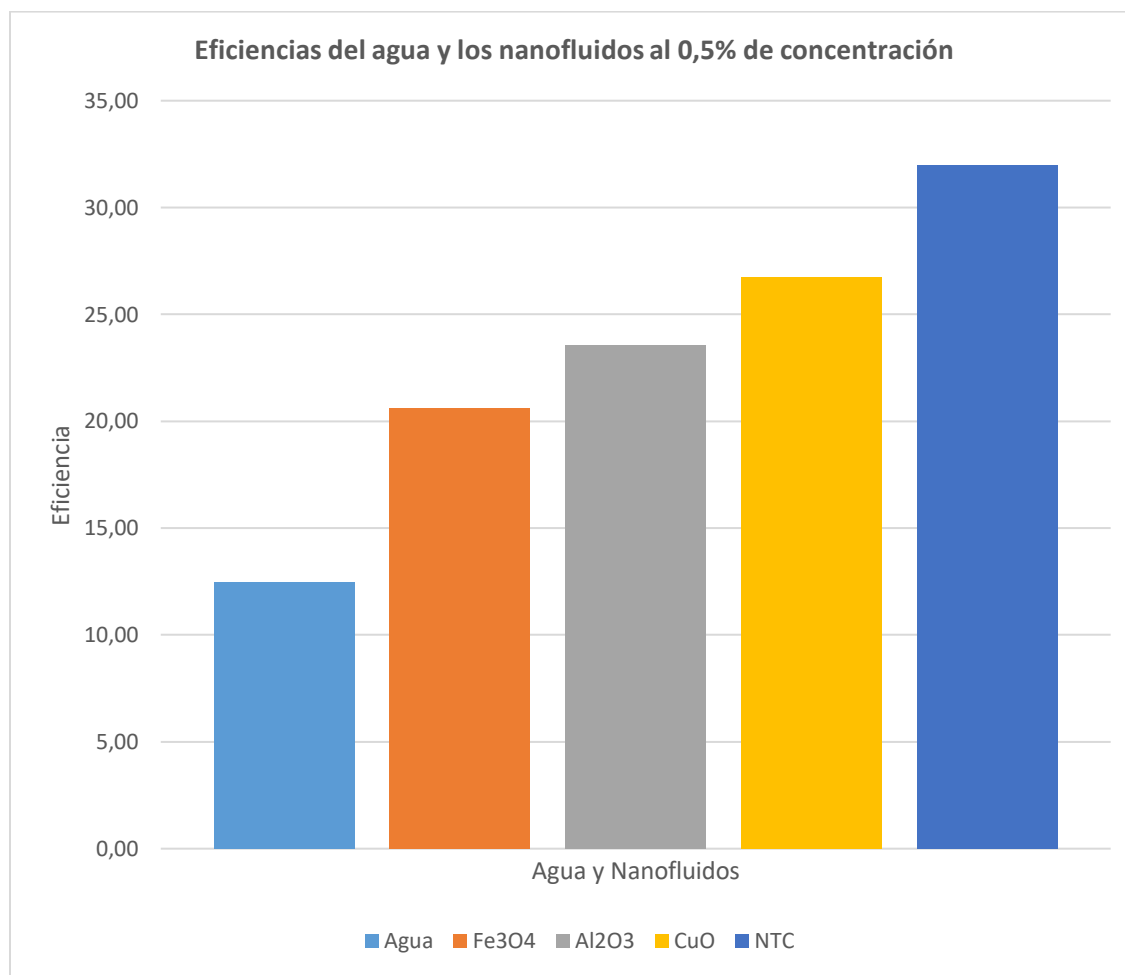


De la **Figura 72**, la mayor eficiencia presentada corresponde al Nanofluido de Aluminio con un valor de 26,13, lo cual es 2,09 veces más en comparación de la eficiencia obtenida en el agua que muestra un valor de 12,46; 1,30 veces más que en NTC al 0,1% de concentración con un valor de eficiencia de 20,00; 1,37 veces más que el Cobre al 0,1% de concentración con un valor de eficiencia de 19,01 y 1,51 veces más que el Hierro al 0,1% de concentración con un valor de eficiencia de 17,30



**Figura 73**

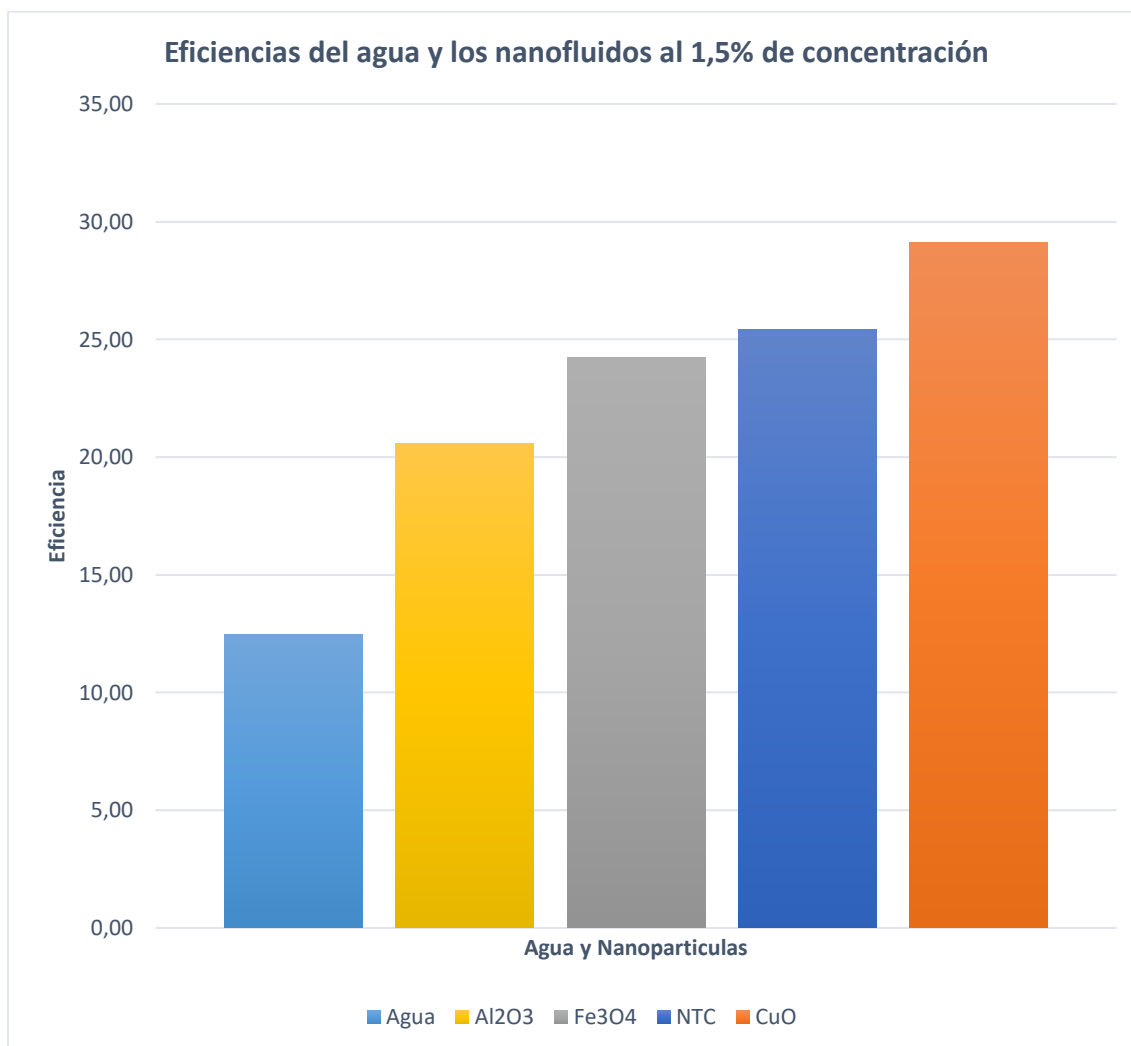
*Curvas de eficiencia vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 0,5% de concentración*



De la **Figura 73**, la mayor eficiencia presentada corresponde al Nanofluido de Nanotubos de carbono con un valor de 31,97, lo cual es 2,56 veces más en comparación de la eficiencia obtenida en el agua que muestra un valor de 12,46; 1,19 veces más que el Cobre al 0,5% de concentración con un valor de eficiencia de 26,73; 1,35 veces más que el Aluminio al 0,5% de concentración con un valor de eficiencia de 23,55 y 1,55 veces más que el Hierro al 0,5% de concentración con un valor de eficiencia de 20,63

**Figura 74**

*Curvas de eficiencia vs Flujo másico para los diferentes nanofluidos al 1,5% de concentración*



De la **Figura 74**, la mayor eficiencia presentada corresponde al Nanofluido de Cobre con un valor de 29,10, lo cual es 2,33 veces más en comparación de la eficiencia obtenida en el agua que muestra un valor de 12,46; 1,14 veces más que los NTC al 1,5% de concentración con un valor de eficiencia de 25,41; 1,20 veces más que el Hierro al 1,5% de concentración con un valor de eficiencia de 24,22 y 1,41 veces más que el Aluminio al 1,5% de concentración con un valor de eficiencia de 20,56.

Con la finalización del proyecto se presenta un análisis financiero dentro del cual se detallarán los valores directos e indirectos que fueron parte del proyecto para la culminación y puesta a punto del mismo.

### Costos Directos

#### Remuneración a Docentes

**Tabla 9**

*Costo de remuneración al docente, tutor y laboratorista.*

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Función</b>	<b>Tiempo (HORAS)</b>	<b>Valor Hora (USD)</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
Ing. Luis Miguel Carrión Matamoros	Director	40	20	800
Lic. Roberto Buenaño	Laboratorista	40	15	600
			<i>Subtotal 1</i>	1400

#### Remuneración a Estudiantes

**Tabla 10**

*Costo de remuneración a los estudiantes, responsables del proyecto.*

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Función</b>	<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Valor Hora</b>	<b>Valor Total</b>
Sr. Fernando Patricio Haro Mora	Responsable del Proyecto	420	2,5	1050
Sr. Juan Carlos Heredia Ramos	Responsable del Proyecto	420	2,5	1050
			<i>Subtotal 2</i>	2100

*Costo de materiales***Tabla 11***Costos de materiales utilizados durante el proyecto.*

<b>Nro.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Valor Unitario (USD)</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
1	Tubería de Cobre Tipo de 1/2" x 6m	2	33,9	67,8
2	Adaptador de Cobre de 1/2" rosca macho	28	1,24	34,72
3	Tapón de Cobre de 1/2"	28	0,47	13,16
4	Varilla de plata al 15%	2	5	10
5	Fundente	1	2	2
6	Espuma de Poliuretano (spray)	1	7,49	7,49
7	Cinta Autofundente 3M	1	12	12
8	Tela Teflón 1m2	1	8,8	8,8
9	Duralón (26x16x1 cm)	2	11,5	23
10	1/2 Varilla de bronce	1	2,5	2,5
11	Fundente para bronce	1	1	1
12	Silicón Gris (alta temperatura)	4	3,25	13
13	Tapón de 1/2" plastigama rosca hembra	28	0,43	12,04

Continúa en la siguiente página

<b>Nro.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Valor Unitario (USD)</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
14	Teflón amarillo	2	0,8	1,6
15	Plancha de Tol galvanizado de 0,5 mm	2	25	50
16	Cartón Prensado (0,1cm)	2	1,25	2,5
17	Madera MDF (100x100x0,4cm)	1	10	10
18	Termopar Tipo K	10	5	50
19	Pernos de 1/4" x 1"	58	0,1	5,8
20	Pernos de carrocería de 1/4" x 3/4"	64	0,12	7,68
21	Pega para suelda fría	1	3,75	3,75
22	Lana de Vidrio 1m2	1	7	7
23	Resistencia Eléctrica de 1000W	5	10	50
24	Empaques de Caucho	1	4	4
25	Ducto de Aluminio flexible	1	12	12
26	Codo de 2" plastigama	1	1	1
27	Bushing de 1/2" a 1/4"	28	1,2	33,6
28	Agua destilada (gl)	2	4,75	9,5

Continúa en la siguiente página

<b>Nro.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Valor Unitario (USD)</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
29	Nanoparticulas (10gr)	4	15	60
30	Etilenglicol (lt)	1	3,6	3,6
31	Pegamento	2	0,5	1
32	Tubo pitot	4	7	28
33	Mangueras de plástico de 1/4" x 8m	1	8	8
34	Franelas	4	0,5	2
35	Amarras	4	0,32	1,28
36	Taipe	2	1,45	2,9
37	Madera Aglomerada (1,5x0,8x0,015m)	1	15	15
38	Broca de 1/4"	1	1,25	1,25
39	Broca de 1/2"	1	1,5	1,5
40	Perno de carrocería de 1/4" x 3"	4	0,5	2
41	Pintura mate negra 1/4	1	3	3
42	Tiner (lt)	1	3,75	3,75
43	Electrodos 6011 (lb)	1	3	3
44	Disco de corte	1	2,7	2,7
45	Disco de desbaste	1	3,1	3,1
			Subtotal 3	598,02

### *Costo de alquiler de máquinas*

Para la construcción del intercambiador tipo termosifón, se requirió el alquiler de las siguientes máquinas y/o equipos

**Tabla 12**

*Costos de alquiler de máquinas durante el proyecto*

<b>Nro.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Horas de Uso</b>	<b>Valor x Hora (USD)</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
1	Soldadura oxiacetilénica	12	12	144
2	Suelda Eléctrica (SMAW)	3	5	15
3	Taladro de pedestal	4	2,5	10
4	Esmeril de banco	1	1	1
5	Amoladora	3	1,5	4,5
6	Adquisición de datos de temperatura	50	1	50
7	Equipo para pintura	1	3	3
8	Corte laser CNC	4	17,5	70
9	Dobladora de tol	5	6	30
10	Cizalla	0,5	3	1,5
			Subtotal 4	329

### Costo de herramientas

**Tabla 13**

*Costos de herramientas utilizadas durante el proyecto.*

<b>Nro.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
1	Cortadora de tubo de cobre	3,5
2	Flexómetro (3m)	3
3	Llave 11	1,25
4	Destornillador estrella	1,5
5	Bisturí	0,8
6	Estilete	1,75
7	Playo	3,5
	Subtotal 5	15,3

### Costos Indirectos

**Tabla 14**

*Costos que influyeron indirectamente en el proyecto*

<b>Nro.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
1	Transporte	150
2	Alimentación	50
3	Servicios Básicos (Luz – Agua - Internet)	30
4	Suministros de Oficina	20
5	Varios	50
	Subtotal 6	300



### Costos Asumidos

**Tabla 15**

*Costos asumidos por los responsables del proyecto y la Universidad.*

<b>Costos Asumidos</b>			
<b>Estudiantes responsables del proyecto</b>		<b>Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor (USD)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor (USD)</b>
Remuneración	2100	Remuneración	1400
estudiantes		docentes	
		Servicios básicos	30
		Soldadura oxiacetilénica	144
		Suelda Eléctrica (SMAW)	15
		Taladro de pedestal	10
		Esmeril de banco	1
		Amoladora	4,5
		Equipo para pintura	3
<b>Total</b>	<b>2100</b>	<b>Total</b>	<b>1607,5</b>

### Costo Total del proyecto

Para calcular el costo total del proyecto, no se toman en cuenta los gastos asumidos por la Universidad (personal, maquinarias, herramientas, servicios básicos u otros) de la **Tabla 15**, se consideran los valores detallados a continuación en la **Tabla 16**.

**Tabla 16***Costo total del Proyecto (Costos Directos e indirectos)*

Descripción	Total
Subtotal 2 - <b>Tabla 9</b>	2100
Subtotal 3 - <b>Tabla 10</b>	598,02
Subtotal 4 - <b>Tabla 11</b>	151,5
Subtotal 5 - <b>Tabla 12</b>	15,3
Subtotal 6 - <b>Tabla 13</b>	300
<b>TOTAL</b>	<b>3164,82</b>

#### Cálculo de retorno de la inversión

Para realizar el análisis de retorno de la inversión se toma en consideración los valores previamente calculados del Calor total transferido (Q) en la sección del condensador, las horas al mes en las cuales funciona el intercambiador de calor tipo termosifón y el valor del Kw/h en el país

Las tarifas promedio de consumo eléctrico por Kw/h en 2021 en Ecuador son de USD 0,1031 para el sector residencial; USD 0,1044 para el comercial; USD 0,799 para el industrial. (El Universo, 2021)

En la **Tabla 17**, se observan los valores recuperados al emplear los mejores resultados obtenidos en las concentraciones de los diferentes nanofluidos, al tomar el valor (USD) del kW/h en el sector industrial.

**Tabla 17**

*Valores mensuales recuperados en los mejores resultados*

<b>Nanofluido</b>	<b>Máx. Q transf. (kW)</b>	<b>Horas/mes</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
<b>Nanofluido de Cobre al 1,5%</b>	1,343	160	171,69
<b>Nanofluido de NTC al 0,5%</b>	1,38	160	175,91
<b>Nanofluido de NTC al 0,1%</b>	1,15	160	146,38

Una vez obtenido el valor mensual recuperado se procede a realizar el cálculo del tiempo en el que se recuperará la inversión al implementar el intercambiador de calor tipo termosifón en los diferentes procesos industriales

$$tiempo\ de\ recuperacion\ de\ capital = \frac{Costo\ Total\ del\ proyecto}{Valor\ recuperado\ mensualmente} \quad (37)$$

**Tabla 18**

*Tiempo de recuperación del costo total del proyecto.*

<b>Nanofluido</b>	<b>Valor Recuperado al mes (USD)</b>	<b>Costo total del proyecto (USD)</b>	<b>Tiempo de recuperación de capital (meses)</b>
Nanofluido de Cobre al 1,5%	171,69	3164,82	19
Nanofluido de NTC al 0,5%	175,91	3164,82	18
Nanofluido de NTC al 0,1%	146,38	3164,82	22

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

- El Equipo diseñado y construido consta de una sección para el calentamiento de aire (evaporador) desde la temperatura ambiente hasta los 104,5 °C, la cual es suficiente para que se produzca el proceso de ebullición en el interior de los tubos del termosifón, y una sección de enfriamiento (condensador), la cual incrementa la velocidad del aire al permitir que el vapor obtenido en el interior de los tubos pueda ser condensado y al mismo tiempo dicho aire pueda absorber este calor y así cumplir la función requerida.
- Para los nanofluidos empleados de:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y Nanotubos de Carbono (NTC), al ser utilizados en el interior de los tubos del termosifón, la capacidad de transferencia de calor incrementa, lo cual representa una opción muy viable para su uso en futuras aplicaciones en intercambiadores de calor de tipo termosifón, esto generaría un ahorro en la industria, ya que al utilizar calor residual se utiliza energía que de otra manera se evacuaría al ambiente.
- En las concentraciones de 0,1 y 0,5% de los nanofluidos el mejor resultado obtenido corresponde al nanofluido de Nanotubos de carbono (NTC), con valores de 1145,35 W y 1376,52 W respectivamente, lo cual representa 1,11 y 1,33 veces más que el agua destilada.
- Se observa que el nanofluido de nanotubos de carbono (NTC) en las concentraciones analizadas, la curva de transferencia de calor presenta una forma acampanada, con un pico máximo al 0,5% y muestra una tendencia decreciente al 1,5%, esto se debe a que en una concentración mayor las nanopartículas tienden a agruparse en lugar de dispersarse en el fluido base, de esta manera la nanopartícula actúa como una resistencia térmica.

- En los nanofluidos de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en las concentraciones analizadas, la curva de transferencia de calor presenta una tendencia decreciente, con un pico máximo al 0,1% y su pico mínimo al 1,5%, esto se debe a que en una concentración mayor las nanopartículas dificultan la transferencia de calor debido a la agrupación de las mismas.
- Los resultados en las nanopartículas de Hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), muestran una estabilidad en la transferencia de calor (creciente), en las concentraciones analizadas, convirtiéndolas en candidatas para su uso en aplicaciones industriales que requieran una mayor cantidad de calor recuperado.
- El nanofluido que presenta una mayor eficiencia es el de nanotubos de carbono (NTC), a una concentración del 0,5%, con un valor de 31,97, esto supera al agua destilada en 2,56 veces, en 1,54 veces al  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y en 1,35 veces al  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- El menor tiempo de recuperación de la inversión en las diferentes concentraciones en peso utilizadas para el presente proyecto y al utilizar el valor de 0,799 USD del kW/h en el país, es de 18 meses, en el caso del nanofluido de NTC al 0,5% de concentración en peso, seguido del nanofluido de Cobre al 1,5% de concentración en peso, con un tiempo de 19 meses y el nanofluido de NTC al 0,1% de concentración en peso, con un tiempo de 22 meses.

### Recomendaciones

- Se recomienda realizar los estudios necesarios de vida útil para cada nanopartícula para que su uso sea aceptado por la industria ya que podría reemplazar determinados fluidos caloportadores los cuales tienen periodos cortos de vida útil y además producen una contaminación considerable para el medio ambiente.

- En la preparación de los nanofluidos de Hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), se recomienda realizar ensayos con concentraciones mayores a la máxima concentración realizada en este experimento (1,5%), ya que aún no se observa un pico máximo de transferencia de calor y en los nanofluidos de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), realizar ensayos con concentraciones menores a la mínima concentración realizada en este experimento (0,1%), ya que se observa una tendencia decreciente en la transferencia de calor.
- Se recomienda conectar un potenciómetro en el banco de resistencias, esto con el fin de estabilizar la potencia y mantener constante la temperatura de entrada en la sección del evaporador del termosifón.
- Ampliar la longitud de los ductos de entrada en la sección del evaporador para verificar su incidencia en la vida útil del equipo, ya que el calor irradiado por el banco de resistencias podría alcanzar al motor de dicha sección y afectar sus componentes.

### Bibliografía

- Aguas, J. (18 de Febrero de 2018). *Portal de la Investigación de la Universidad de la Rioja*. Obtenido de <https://investigacion.unirioja.es/documentos/5c13b1c8c8914b6ed3777642>
- Azad, V. (12 de Enero de 2016). *Infona*. Obtenido de Aplicación de nanofluidos para el diseño óptimo de intercambiadores de calor de carcasa y tubos mediante algoritmo genético: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-90d367d9-1827-300e-850c-a7469dd07b52>
- Berrio, C., Berrio, J., & Hernández, G. (20 de Enero de 2019). *Repositorio ITM*. Obtenido de <https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/422/BerrioBetancurCarlosAlberto2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 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
- CONCEPTODEFINICION. (16 de Marzo de 2020). Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://conceptodefinicion.de/magnetita/>
- Devendiran, D. K., & Amirtham, V. A. (24 de 2 de 2016). *Una revisión sobre la preparación, caracterización, propiedades y aplicaciones de los nanofluidos*. Obtenido de IDEAS: <https://ideas.repec.org/a/eee/reusus/v60y2016icp21-40.html>
- ECURED. (2018). *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)
- El Universo, D. (30 de Junio de 2021). *Ekos Negocios*. Obtenido de [https://www.ekosnegocios.com/articulo/ecuador-tiene-tarifas-electricas-mas-economicas-que-colombia-y-peru#:~:text=Ecuador%20es%20el%20sexto%2C%20de,\(USD%200%2C1643\)](https://www.ekosnegocios.com/articulo/ecuador-tiene-tarifas-electricas-mas-economicas-que-colombia-y-peru#:~:text=Ecuador%20es%20el%20sexto%2C%20de,(USD%200%2C1643))
- Fanjul, C., Martinez, C., & Pelaez, A. (15 de 06 de 2018). *Slideshare*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://es.slideshare.net/cmc11121cgrupo8/los-nanomateriales>
- 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. (15 de 11 de 2010). Fabricación de nanopartículas metálicas para aplicaciones fotovoltaicas y energía. México D.F, Mexico 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>
- 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>
- Hiroyuki, T., & Yoshihiro, K. (19 de Enero de 2018). *Scientific Research An Academic Publisher*. Obtenido de <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=40534>
- 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, W., Hadis, R., Seid, R., & Falsafi, M. (28 de Marzo de 2019). *ScienceDirect*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168365919300781>
- Jouhara, H., Almahmoud, S., Brough, D., & Guichet, V. (11 de Diciembre de 2020). *Researchgate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/347424700\\_Experimental\\_and\\_theoretical\\_investigation\\_of\\_the\\_performance\\_of\\_an\\_air\\_to\\_water\\_multi-pass\\_heat\\_pipe-based\\_heat\\_exchanger](https://www.researchgate.net/publication/347424700_Experimental_and_theoretical_investigation_of_the_performance_of_an_air_to_water_multi-pass_heat_pipe-based_heat_exchanger)
- 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.
- 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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>



- Macias , D. (25 de 11 de 2018). *Slideshare*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://es.slideshare.net/mtrodavidmaciasferrer/alumina>
- 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.
- 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>
- Minea, A. (2 de 1 de 2015). *Fluidos de transferencia de calor nuevos y mejorados por nanopartículas*. Obtenido de Wattco: <https://www.wattco.com/es/2020/12/fluidos-transferencia-nanopartículas/>
- NANOTECNOLOGO. (15 de marzo de 2019). Recuperado el 29 de abril de 2021, de <https://nanotecnologo.com>
- 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>
- RUA. (21 de Enero de 2017). *Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. RUA*. Obtenido de [https://www.google.com/search?q=rua+ua&rlz=1C1GGRV\\_enCO815CO816&oq=rua+ua&aqs=chrome..69i57j0i512j0i22i30l5j69i60.2112j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=rua+ua&rlz=1C1GGRV_enCO815CO816&oq=rua+ua&aqs=chrome..69i57j0i512j0i22i30l5j69i60.2112j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- 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 , H., & Mohamed , C. (20 de Mayo de 2017). *ScienceDirect*. Obtenido de Una revisión sobre las aplicaciones y desafíos de los nanofluidos: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110004041>
- Scherrer, J. (21 de 01 de 2018). *Laboratory for Micro and Nanotechnology En*. Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de <https://www.psi.ch/lmn/about-lmn>

- Scielo. (15 de Febrero de 2018). Recuperado el 01 de Mayo de 2021, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-01952012000300002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952012000300002)
- 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.
- 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>
- 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: nano-fluidos*. 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>
- 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 2011). Metodologías para la síntesis de nanopartículas controlando forma y tamaño. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 5(1), 12. 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](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992014000100001)
- Zhaohui, J., Zhang, J., Chen, H., & Fan, J. (2018). *Advances in heterogenous material mechanics*. Shanghai: DEStech Publications, Inc.