



Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un intercambiador de calor de tipo tubos pulsantes, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono.

Defaz Vilema, Jefferson Enrique y Soria Soria, Henry Paúl

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Carrión Matamoros, Luis Miguel

08 de agosto del 2022



PROYECTO DE TITULACIÓN_DEFAZ VILEMA JEFFERSON ...

Scanned on: 16:52 August 10, 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



Website | Education | Businesses

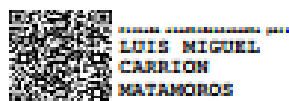


Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular, "**Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un intercambiador de calor de tipo tubos pulsantes, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono**" fue realizado por los señores Defaz Vilema, Jefferson Enrique y Soria Soria, Henry Paúl, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de agosto del 2022



LOIS MIGUEL
CARRION
MATAMOROS

.....
Ing. Carrión Matamoros Luis Miguel

C. C.: 1103574677



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Defaz Vilema, Jefferson Enrique y Soria Soria, Henry Paúl**, con cédulas de ciudadanía n° 1725678781 y 1753527827, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un intercambiador de calor de tipo tubos pulsantes, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 08 de agosto del 2022

.....
Defaz Vilema, Jefferson Enrique

C. C.: 1725678781

.....
Soria Soria, Henry Paúl

C. C.: 1753527827



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Defaz Vilema, Jefferson Enrique y Soria Soria, Henry Paúl**, con cédulas de ciudadanía n° 1725678781 y 1753527827, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: "**Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un intercambiador de calor de tipo tubos pulsantes, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y nanotubos de carbono**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 08 de agosto del 2022

.....
Defaz Vilema, Jefferson Enrique

C. C.: 1725678781

.....
Soria Soria, Henry Paúl

C. C.: 1753527827

Dedicatoria

El presente trabajo de titulación está dedicado a Dios, a mi querida madre, a mi padre, hermano, familia, novia y amigos, por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria ya que sin ellos mi sueño de obtener un título de tercer nivel no hubiera sido posible. En especial para mi querido hermano Steven, para el cual espero ser un gran ejemplo y guía en su camino. A mis primas y primos que me han considerado un ejemplo a seguir y a todas aquellas personas que confiaron y creyeron en que llegaría a cumplir esta meta.

Jefferson E. Defaz V.

Está dedicado a Dios, a mis padres y hermanos las cuales son las personas más importantes en vida y me han dado su apoyo incondicional, a mi familia y amigos que mediante sus consejos y motivación han aportado para que se haga posible alcanzar esta meta.

Henry P. Soria S.

Agradecimiento

A Dios, al Divino Niño Jesús por la vida y las bendiciones que me ha brindado para cumplir este objetivo.

A mi madre, padre, hermano y familia, gracias por su apoyo incondicional para seguir mis estudios y ser ejemplos a seguir de esfuerzo, sacrificio y dedicación.

A mi novia, por todo el apoyo en los momentos más difíciles de mi vida y por todo su amor, gracias por alentarme y no permitir rendirme, gracias por ser parte de mi vida.

Al personal docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, gracias por compartir sus conocimientos y experiencias, en especial al Ing. Luis Carrión por la guía y confianza en la realización de este trabajo de titulación.

Jefferson E. Defaz V.

A Dios y al Santo Niño de Isinche por darme la sabiduría, fuerzas y oportunidad para poder alcanzar una meta más en mi vida.

A mis padres por hacer de mí una persona con valores y mediante sus ejemplos, esfuerzos y sacrificios, me han dado su apoyo en cada decisión que haya tomada y en todos los momentos de mi vida.

A todos los docentes que en el transcurso de mi carrera universitaria tuve la oportunidad de conocer y me brindaron de sus conocimientos y experiencia para formar al profesional en el cual me estoy convirtiendo, con una mención especial al Ing. Luis Carrión por darnos su apoyo y confianza durante todo el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Henry P. Soria S.

Tabla de Contenido

Reporte Copyleaks	2
Certificación	3
Responsabilidad de auditoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de Contenido	8
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	11
Resumen	18
Abstract	19
Capítulo I: Generalidades	20
Introducción	20
Antecedentes	24
Definición del problema.....	25
Objetivos.....	26
Objetivo General	26
Objetivos Específicos	26
Justificación	27
Alcance	27
Capítulo II: Marco Teórico	28
Intercambiadores de calor.....	28
Tipos de intercambiadores de calor	28
Transferencia de calor	29
Conductividad térmica.....	29
Mecanismos de transferencia de calor.....	30
Conducción	30
Convección	31
Balance de energía.....	32
Energía almacenada (E_{alm}).....	33
Energía generada (E_g)	33
Sistemas radiales.....	34
Capa límite.....	35

Flujo laminar y flujo turbulento	36
Flujo interno y flujo externo	37
Flujo sobre bancos de tubos	38
Número de Nusselt	39
Número de Prandtl	40
Número de Reynolds	41
Correlación de Zukauskas	42
Tubos de calor	46
Tipos de tubos de calor	46
Tubos de Calor Pulsante (TCP)	47
Restricciones en el diseño de un Tubo de Calor Pulsante	48
Volumen de Control de un TCP	49
Resistencias Térmicas	50
Cálculo de la eficiencia (ϵ)	53
Nanociencia y Nanotecnología	54
Nanomateriales y Nanopartículas	55
Generación de nanopartículas	56
Top-Down	57
Bottom-Up	58
Aplicaciones de la nanotecnología	58
Nanopartículas de estudio	59
Magnetita - Fe_3O_4	59
Tenorita - CuO	60
Nanotubos de Carbono - NTC	61
Alúmina - Al_2O_3	62
Métodos para dispersar nanopartículas en el fluido base.	63
Capítulo III: Diseño, construcción, calibración del equipo y preparación	64
Diseño del intercambiador de calor de tubos pulsantes.	64
Proceso de construcción	65
Verificación de fugas	72
Instalación de los tubos pulsantes dentro de la coraza	72
Construcción de mesa para el montaje de equipos	74
Diseño, construcción y montaje de la fuente de aire caliente.	75
Diseño, construcción y montaje de la fuente de aire frío.	77

Montaje y puesta a punto de todos los elementos del sistema	78
Parámetros establecidos.....	81
Lado caliente.....	81
Lado frío.....	81
Datos recolectados	82
Ensayos de funcionamiento	83
Preparación de los nanofluidos	84
Concentración al 0,1%	84
Concentración al 0,5%	85
Concentración al 1,5%	85
Preparación del nanofluido	86
Ejemplo cálculo del agua destilada base para una concentración al 0,1 % de nanopartículas.....	86
Mezcla de los elementos que componen el nanofluido	88
Agitación mediante ultrasonido	89
Procedimiento para el uso de los equipos que conforman el sistema.....	90
Ejemplo de tablas que se utilizarán para la toma de datos en la experimentación.....	91
Capítulo IV: Experimentación	93
Análisis de transferencia de calor	93
Coeficiente de convección (h) y resistencia térmica.....	93
Análisis individual de transferencia de calor por nanofluido en diferentes concentraciones.	94
Análisis global de transferencia de calor para agua destilada y nanofluidos en diferentes concentraciones.....	98
Eficiencia térmica.....	102
Análisis global de la eficiencia del equipo con cada nanofluido en las diferentes concentraciones.	102
Análisis individual de la eficiencia del equipo con nanofluidos en las diferentes concentraciones.	105
Capítulo V: Análisis Económico	109
Costos indirectos	109
Costos directos	109
Costos finales del proyecto de titulación	114
Cálculo de retorno de la inversión.....	114

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.....	116
Conclusiones	116
Recomendaciones	117
Bibliografía.....	119

Índice de Tablas

Tabla 1 Rangos típicos de números de Prandtl para fluidos comunes.....	41
Tabla 2 Propiedades termo físicas del aire - Presión atmosférica.....	44
Tabla 3 Varios tipos de tubo de calor.....	46
Tabla 4 Aplicaciones de las nanopartículas en diferentes campos.....	59
Tabla 5 Tabla de adquisición de datos de presiones.....	91
Tabla 6 Tabla de valores para velocidad del aire en los ductos.....	91
Tabla 7 Tabla para valores de temperatura del aire, adquiridos por termocuplas.....	92
Tabla 8 Costos indirectos que intervinieron en el proyecto de titulación.....	109
Tabla 9 Costo de materiales.....	109
Tabla 10 Costo de alquiler de máquinas en la ejecución del proyecto de titulación.....	112
Tabla 11 Costo herramientas usadas en el proyecto de titulación.....	112
Tabla 12 Remuneración docente (tutor) y laboratorista.....	113
Tabla 13 Remuneración a los estudiantes responsables del proyecto de titulación.....	113
Tabla 14 Costos totales del proyecto de titulación (directos e indirectos).....	114
Tabla 15 Mejores resultados recuperados en el lapso de un mes.....	115
Tabla 16 Retorno de inversión del proyecto de titulación.....	115

Índice de Figuras

Figura 1 Mecanismo de transporte.....	20
Figura 2 Operaciones de transporte en cada celda unitaria. estructura compleja.....	21
Figura 3 Intercambiador de calor de tubos pulsantes.....	22
Figura 4 Esquemas de calor transferido: a) Conducción, b) Convección, c) Radiación.....	30
Figura 5 Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección.....	31
Figura 6 Circuito térmico proporcional utilizado en cilindros huecos.....	34
Figura 7 Capa límite de velocidad o hidrodinámica en una placa plana.....	36
Figura 8 Comportamiento de un fluido: a) Flujo laminar, b) Flujo turbulento.....	37

Figura 9 Desarrollo de perfiles de velocidad y cambios de presión.....	37
Figura 10 Configuración en un banco de tubos alineados o escalonados.	38
Figura 11 Valores de la Ec. N° 21, en flujo cruzado para banco de tubos.....	43
Figura 12 Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado.	44
Figura 13 Factor de corrección F que debe usarse en $Nu_{(D, N_L < 16)} = F Nu_D$ para $N_L > 16$	45
Figura 14 Tubo de calor pulsante de circuito cerrado.	48
Figura 15 Configuraciones posibles de un tubo de calor pulsante.	49
Figura 16 Representación volúmenes de control.	50
Figura 17 Analogía resistencias eléctrica térmicas del ICTP.	51
Figura 18 Escala nanométrica.	55
Figura 19 Clasificación de nanomateriales: a) 0-D, Nanopartícula de Oro, b) 1-D, Fibras poliméricas, c) 2-D. Películas poliméricas y d) 3-D, Autoensamblaje de nanopartícula de Oro.	56
Figura 20 Desarrollo síntesis de nanopartículas (Métodos Top-Down y Bottom-Up).	57
Figura 21 Técnicas de síntesis de nanopartículas.	58
Figura 22 Nanopartícula Magnetita - Fe_3O_4	60
Figura 23 Nanopartícula Tenorita - CuO	61
Figura 24 Nanotubos de Carbono - NTC.	62
Figura 25 Nanopartícula Alúmina - Al_2O_3	62
Figura 26 Tipos de estabilidad coloidal.	64
Figura 27 Prediseño del intercambiador de calor de tubos pulsantes en SolidWorks 2021.	64
Figura 28 Tubería fabricada bajo los estándares ASTM B280.	65
Figura 29 Secciones de 10 cm y 36 cm tubería de cobre con diámetro externo de 3/16".	66
Figura 30 Doblado en U de 38 secciones de tubería.	66
Figura 31 Tubería abocinada en los dos extremos y herramienta de abocinamiento.....	67
Figura 32 Maquinado de placas de duralón.	68
Figura 33 Tubos de cobre introducidos en la placa maquinada de duralón.	68
Figura 34 Formación de fila de tubos interconectados, unidos mediante soldadura oxiacetilénica.	69
Figura 35 Cinta auto fundente colocada en la superficie de los tubos que se encuentran en la sección adiabática.	69
Figura 36 Filas de tubos completas (4) del intercambiador de calor de tubos pulsantes.	70
Figura 37 Zonas donde se ubicaron las termocuplas tipo K.....	71
Figura 38 Colocación del aislante térmico (espuma de poliuretano).	71

Figura 39 Instalación de manómetro entre los equipos y colocación de espuma en la superficie de las uniones soldadas.	72
Figura 40 Colocación de un accesorio tipo T adicional en cada fila de tubos serpenteantes.	72
Figura 41 Empernado de coraza y ductos de aire caliente y frío acoplados a la misma coraza.	73
Figura 42 Intercambiador de calor sellado herméticamente con silicona roja y gris.	74
Figura 43 Proceso de construcción de la mesa para el montaje de equipos.	74
Figura 44 Colocación de 5 resistencias de 1000 W dentro del ducto metálico que son controlados individualmente.	75
Figura 45 Conexión del ventilador tubular a los ductos mediante transiciones.	76
Figura 46 Fuente de calor de aire montado sobre la mesa.	77
Figura 47 Ventilador de álabes curvos adelantados LT-53 E conectado al ducto de entrada de aire frío.	77
Figura 48 Fuentes de aire frío y caliente conectados a los ductos del ICTP.	78
Figura 49 Placa de adquisición de datos con 10 entradas analógicas, conectadas en cada entrada una termocupla.	79
Figura 50 Termómetro de cinta bimetálica mostrando la temperatura de salida (100 °C) del ducto de aire caliente.	80
Figura 51 Temperatura de salida de aire frío (31,3 °C) medido con un termómetro digital.	80
Figura 52 Compuerta reguladora de caudal colocado en el ducto de entrada de aire frío.	81
Figura 53 Manómetro multitubos (mide presión estática y dinámica) conectados a tubos Pitot por medio de mangueras flexibles transparentes.	82
Figura 54 Colocación del fluido en los tubos pulsantes y sellado para realizar los ensayos.	83
Figura 55 Intercambiador de calor de tubos pulsantes acoplado a las fuentes de aire frío y caliente, conectado a los instrumentos de medición y adquisición de datos.	83
Figura 56 Pesaje de 37,75 gr de agua destilada para una concentración de 1,5%.	87
Figura 57 Adición de 2,01 gr de etilenglicol al agua destilada para formar el fluido base.	87
Figura 58 Pesaje de 0,60 gr de nanopartículas (Nanotubos de Carbono - NTC) para una concentración al 1,5%.	87
Figura 59 Agitación de la mezcla del fluido base y nanopartículas (Nanotubos de Carbono - NTC).	88
Figura 60 Equipo Ultrasonic Cleaners.	89
Figura 61 Nanofluidos preparados a una concentración al 0,5% en peso.	89

Figura 62 Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico intercambiador de calor utilizando los diferentes nanofluidos en una concentración al 0,1%.....	94
Figura 63 Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico en los diferentes nanofluidos en una concentración al 0,5%.	96
Figura 64 Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico en los diferentes nanofluidos en una concentración al 1,5%.	97
Figura 65 Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico del intercambiador de calor cuando se utiliza agua destilada y nanofluido de NTC en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.	98
Figura 66 Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico en el agua destilada y nanofluido de nanopartículas de CuO en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.	99
Figura 67 Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico del intercambiador de calor cuando se utiliza agua destilada y nanofluido de nanopartículas de Fe ₃ O ₄ en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.	100
Figura 68 Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico del intercambiador de calor cuando se utiliza agua destilada y nanofluido de nanopartículas de Al ₂ O ₃ en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.	101
Figura 69 Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y los 4 nanofluidos en una concentración al 0,1%.	102
Figura 70 Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y los 4 nanofluidos en una concentración al 0,5%.	103
Figura 71 Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y los 4 nanofluidos en una concentración al 1,5%.	104
Figura 72 Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de NTC en sus 3 concentraciones.	105
Figura 73 Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de CuO en sus 3 concentraciones.	106
Figura 74 Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de Fe ₃ O ₄ en sus 3 concentraciones.	107
Figura 75 Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de Al ₂ O ₃ en sus 3 concentraciones.	108

Nomenclatura

ICTP	:	Intercambiador de Calor de Tubos Pulsantes.
TCP	:	Tubos de calor pulsante.
Fe_3O_4	:	Óxido de hierro.
Al_2O_3	:	Óxido de aluminio.
NTC	:	Nanotubos de Carbono.
CuO	:	Óxido de cobre.
np	:	Nanopartícula.
q	:	Calor.
nf	:	Nanofluido.
k	:	Conductividad térmica.
μ	:	Viscosidad.
m	:	Masa.
T	:	Temperatura.
ΔT	:	Variación de temperatura.
C_p	:	Capacidad calorífica específica.
P	:	Presión.
ΔP	:	Variación de presión.
D	:	Diámetro.
r	:	Radio.

dT/dx	:	Gradiente de temperatura.
h	:	Coefficiente de transferencia de calor.
L	:	Longitud.
\varnothing_e	:	Diámetro exterior.
\varnothing_i	:	Diámetro interior.
A	:	Área.
B_o	:	Número de Bond.
%w	:	Concentración en peso.
\dot{m}	:	Flujo másico.
ε	:	Eficiencia.
n	:	Número de tubos.
q''_x	:	Flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área.
T_s	:	Temperatura de superficie.
T_∞	:	Temperatura del fluido.
ρ	:	Densidad del material.
R	:	Resistencia Térmica total.
$R_{(c, cond)}$:	Resistencia de conducción del condensador.
$R_{(e, cond)}$:	Resistencia de conducción del evaporador.
F	:	Factor de corrección.
V	:	Volumen.

$dT/d\theta$:	Diferencial de temperatura en función del tiempo.
g	:	Tasa de generación por unidad de volumen.
δ	:	Espesor de capa límite específico.
ΔT_{LM}	:	Variación de la temperatura media logarítmica.
Pr_s	:	Número de Prandtl en la superficie.
S_T	:	Paso transversal.
S_L	:	Paso longitudinal.
S_D	:	Paso diagonal.
L_c	:	Longitud característica.
ν	:	Viscosidad cinemática.
α	:	Difusividad térmica.
Nu	:	Número de Nusselt.
Re	:	Número de Reynolds.
i	:	Entalpía.
\bar{Q}	:	Razón de transferencia de calor real.
f	:	Factor de fricción.
r.p.m.	:	Revoluciones por minuto.

Resumen

En el presente trabajo de titulación se realiza un estudio teórico y experimental del calor trasferido en un intercambiador de calor de tubos pulsantes construido en los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para determinar el cambio que existe de la eficiencia térmica al utilizar agua destilada en estado puro y nanofluidos compuestos por una mezcla de etilenglicol al 5%, agua destilada y cuatro nanopartículas: Al_2O_3 (Alúmina), Fe_3O_4 (Magnetita), CuO (Tenorita) y Nanotubos de Carbono (NTC), considerando un porcentaje en peso (%w) de: 0,1%, 0,5% y 1,5% respectivamente.

Mediante ensayos realizados en el intercambiador de calor de tubos pulsantes se recolectan datos de temperaturas, velocidades del fluido (aire frío y caliente) tomados en los ductos de entrada y salida, con estos datos se realiza el análisis considerando una configuración de flujo cruzado y los resultados se presentan de manera gráfica con variables como el flujo másico (\dot{m}), eficiencia (ϵ) y el calor transferido (Q).

Los resultados muestran que el equipo alcanza su eficiencia máxima en los ensayos realizados con nanofluidos de CuO (Tenorita) y Nanotubos de Carbono (NTC), con una concentración al 1,5%, que representan una eficiencia del 48% y 47% más en comparación al fluido base (agua destilada). De la misma manera, se muestra una mayor cantidad de calor transferido con el nanofluido de CuO (Tenorita), con una concentración al 1,5%, que en comparación con el fluido base aumenta en un 14% más.

Palabras clave: transferencia de calor, intercambiador de calor, nanofluido, eficiencia térmica.

Abstract

In the present work, a theoretical and experimental study of the heat transferred in a pulsed tube heat exchanger built in the laboratories of the University of the Armed Forces, to determine the change in thermal efficiency when using distilled water in pure state and nanofluids composed of a mixture of 5% ethylene glycol, distilled water and four nanoparticles: Al_2O_3 (Alumina), Fe_3O_4 (Magnetite), CuO (Tenorite) and Carbon Nanotubes (NTC), considering a weight percentage (%w) of: 0.1%, 0.5% and 1.5% respectively.

By means of tests performed in the pulsating tube heat exchanger, data of temperatures, fluid velocities (cold and hot air) taken in the inlet and outlet ducts are collected, with these data the analysis is performed considering a cross flow configuration and the results are presented graphically with variables such as mass flow (\dot{m}), efficiency (ϵ) and heat transferred (Q).

The results show that the equipment reaches its maximum efficiency in the tests performed with CuO nanofluids (Tenorite) and Carbon Nanotubes (NTC), with a concentration at 1.5%, which represent an efficiency of 48% and 47% more compared to the base fluid (distilled water). In the same way, a greater amount of heat transferred is shown with the CuO nanofluid (Tenorite), with a concentration of 1.5%, which in comparison with the base fluid increases by 14% more.

keywords: heat transfer, heat exchanger, nanofluid, thermal efficiency.

Capítulo I: Generalidades

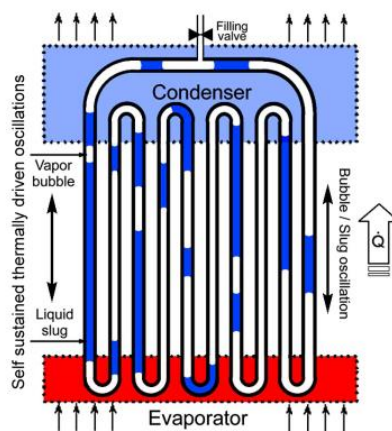
Introducción

Los intercambiadores de calor de tipo tubo pulsante son dispositivos innovadores utilizados para aprovechar la energía (calor) de diversos procesos industriales. Los tubos de calor pulsantes (TCP) tienen una estructura compleja, efectiva y moderna, utilizados para eliminar flujos de calor altamente elevados, constan de tubos capilares sinusoidales que no están sujetos al límite capilar. Los diámetros interiores (\emptyset_i) del tubo son lo suficientemente pequeños como para que domine la tensión superficial y se conserve el flujo del líquido capilar, su diseño de circuito cerrado admite de manera adecuada la circulación del flujo del líquido capilar, a diferencia del circuito abierto.

Su funcionamiento se desarrolla en la oscilación del fluido de trabajo atraído por fenómenos de cambio de fase en su interior (**Ver Figura 1**). La operación pasiva, el manejo de alto flujo de calor, la facilidad de fabricación y el interesante transporte bifásico termofluídico desde un punto de vista académico, son algunas de las características más llamativas de esta clase de tubos de calor (Khandekar, 2004).

Figura 1

Mecanismo de transporte.



Nota. Tomado de (Khandekar, 2010).

En la **Figura 2** se puede observar y comprender los principales procesos de transporte que se producen en el interior de los tubos de calor pulsantes (TCP), las diversas fuerzas que actúan en el fluido, abarcando los procesos de calor transferido y masa que interactúan de manera progresiva en el interior de una celda unitaria en un sistema típico de líquido – vapor – burbuja.

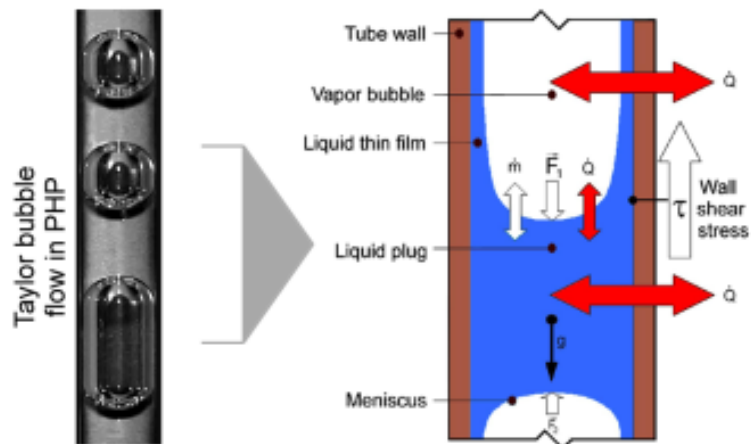
El patrón de flujo en los TCP se puede calificar en términos frecuentes como flujo capilar. Este tipo de flujo se distingue por:

- a) El patrón de flujo es regularmente axisimétrico, aunque solo sea en flujos verticales, en flujos horizontales existirá alguna asimetría dependiendo del Número de Bond (B_o).
- b) La velocidad de las burbujas de vapor son más rápidas en relación del fluido (Angeli & Gavriilidis, 2008).

Conforme a las dimensiones capilares de los TCP, se desarrolla un tren de gotas de líquido y burbujas de vapor que contienen meniscos en sus extremos producto de las fuerzas de tensión superficial. La notable diferencia de presión entre las regiones de calentamiento y enfriamiento producen un fluido pulsado en los TCP que permite que sea impulsado térmicamente (Zufar M. , Gunnasegaran, Kumar, & Ng, 2019).

Figura 2

Operaciones de transporte en cada celda unitaria. estructura compleja



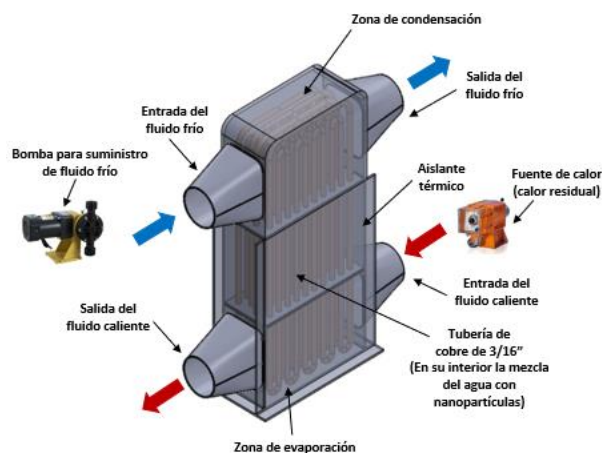
Nota. Tomado de (Khandekar, 2010).

Los tubos de calor pulsante son sistemas cerrados integrados de dos fases, aptos para transportar calor sin ninguna entrada adicional, se diferencian de los tubos de calor convencionales debido a su alto rendimiento en el calor transferido (Zhang & Faghri, 2008).

Para efectuar el estudio teórico y experimental en el cual se espera mejorar el rendimiento en el calor transferido, se realizó el diseño y construcción de un intercambiador de calor de tipo tubos pulsantes. En la **Figura 3** se puede observar un modelo de su configuración serpenteante.

Figura 3

Intercambiador de calor de tubos pulsantes.



Los tubos de calor pulsantes están compuestos de un tubo de cobre doblado en diversas vueltas para constituir pasajes paralelos. Se utilizan diámetros reducidos que se encuentran directamente influenciados por el fluido de trabajo que se seleccione (Zhang & Faghri, 2002). Los tapones de vapor generados por la evaporación del líquido impulsan las oscilaciones de líquido hacia la sección de condensación y este movimiento provoca oscilaciones de flujo que guían el funcionamiento del intercambiador de calor.

Considerando las secciones del ICTP, éste presenta una sección de evaporación donde ingresa el aire caliente de una fuente, traspasa el banco conformado por tubos de cobre serpenteantes, que en su parte interna contienen los nanofluidos, de esta manera el calor es transferido para que inicie el proceso de calentamiento hasta llegar a su punto de evaporación.

En el ICTP se diseñó una sección adiabática con material aislante con el fin de evitar que el calor transferido por convección y radiación circulen en dirección al ambiente, provocando que el vapor obtenido se condense de manera acelerada.

El ICTP cuenta con su última sección que es la de condensación, donde se produce el calor transferido debido a que el vapor contenido en el interior de los tubos de calor pulsantes cede su energía al fluido (aire) que pasa por esta zona e inicia un proceso de condensación, esta acción permite que el fluido frío gane energía y aumente su temperatura.

Para verificar el incremento del calor transferido se involucra la utilización de agua destilada, etilenglicol al 5% y cuatro soluciones diversas de nanofluidos, que operarán como fluido caloportador. La acción pulsante es la fuerza de movimiento para los TCP, que se encuentra directamente influenciada por el diámetro del tubo interno. Los componentes que influyen en la formación de tapones en diámetros reducidos deben ser considerados para esta aplicación, tales como la correcta sección por donde circula el fluido de trabajo, la tensión

superficial y los efectos del esfuerzo cortante (Lutfor , Sumaiya, Rasel, Fariha, & Mohammad, 2015).

Antecedentes

La utilización de la transferencia de calor tiene gran importancia en el mundo, debido a su aplicación en la alimentación del hogar y de igual manera en los procesos industriales, ya que permiten generar mayor productividad en sus procesos, sin embargo, debido a los avances en paquetes electrónicos de alto rendimiento, existe la necesidad de una mejor gestión térmica para mejorar su calidad.

En los últimos años, los nanofluidos se han utilizado ampliamente como fluidos de trabajo alternativo para diversas aplicaciones, como la refrigeración electrónica, intercambiadores de calor, así como en los diversos tipos de tubos de calor.

Los nanofluidos son muy prometedores ya que muestran propiedades superiores, como una mayor conductividad térmica y un alto coeficiente en el calor transferido en comparación con el fluido base. Se han llevado a cabo estudios sobre nanofluidos durante la última década que demostraron un gran potencial relacionado al calor transferido. Por ejemplo, Riehl & Dos Santos realizaron un estudio experimental en TCP utilizando nanofluidos de cobre como fluido de trabajo. Informaron que al añadir nanopartículas de cobre en el agua, el número de sitios de nucleación aumentaría, lo cual era beneficioso para la formación de burbujas. Se puede generar una mayor pulsación con más formación de burbujas, mejorando así el rendimiento térmico general de los TCP.

Además, Xing, Yu y Wang en sus investigaciones acerca de las nanopartículas NTC determinaron que sus propiedades mejoraron en la experimentación y se evidenció un incremento significativo en el rendimiento térmico de un TCP, cuando la concentración en peso del nanofluido de carbono de paredes múltiples fue inferior a 0,3%. Los autores concluyeron

que en los TCP al utilizar una concentración en peso del 0,1%, el nanofluido mostró la resistencia térmica más baja a comparación de otras concentraciones en peso de nanotubos de carbono de paredes múltiples. A una mayor concentración en peso, el nanofluido es más viscoso, esto es desfavorable porque el tiempo de arranque puede prolongarse.

De esta manera se ha demostrado que la concentración en peso afecta la mejora general del calor transferido de los TCP. Entre mayor sea la concentración en peso, empeoraría el rendimiento térmico de los TCP debido a una mayor resistencia a los fluidos caloportadores. Varios investigadores encontraron que el rendimiento térmico más alto podría lograrse al dispersar una concentración de nanopartículas del 0,1% en peso en el fluido base (Zufar M. , Gunnasegaran, Kumar, & Ng, 2019).

Definición del problema

Mejorar la reducción de emisiones de gases contaminantes hacia la atmósfera es una de las principales preocupaciones alrededor del mundo, la reutilización de calor residual en las industrias permite mejorar los sistemas que causan estas emisiones y con esto reducir su efecto en nuestro planeta Tierra.

La producción de energía y los sistemas de transferencia de energía térmica son las principales fuentes de contaminación, esto es causado por la actividad humana, ya que, cada año millones de toneladas de contaminantes son liberados a la atmósfera como vehículos, fábricas, plantas de generación eléctrica, entre otros (OECD/IEA, 2016).

En los intercambiadores de calor, se utilizan agua, etilenglicol, keroseno, como medio para transferir el calor (Huminic & Huminic, 2018). Sin embargo, dichos fluidos tienen la desventaja de poseer baja conductividad térmica y por lo tanto producen procesos industriales ineficientes (Kumar, Sonawane, & Sonawane, 2018).

Debido a que el 70% de la energía usada en el mundo es energía térmica, los tubos de calor nacen como una de las tecnologías más aceptadas para el aumento en la eficiencia en el uso energético, puesto que, pueden ser implementados en sistemas de recuperación de calor transferido y almacenamiento de energía en forma de calor (Bai, Zhang , He , & Wen Dongsheng, 2015).

Los intercambiadores de calor de tubos tipo pulsantes tienen varias ventajas sobre los sistemas de tuberías de calor convencionales con muchas aplicaciones y ventajas en su diseño (Groll, Khandekar, & Dollinger, 2003). En consecuencia, se pretende utilizar nanopartículas para la formación de nanofluidos, los cuales se utilizarán en tubos de calor pulsantes, con la intención de mejorar el rendimiento térmico en los procesos que intervienen los intercambiadores de calor de tubos.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar teórica y experimentalmente la eficiencia térmica de un intercambiador de calor de tipo tubos pulsantes, utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Alúmina (Al_2O_3), Tenorita (CuO), Magnetita (Fe_3O_4) y Nanotubos de Carbono (NTC).

Objetivos Específicos

- Diseñar y construir los tubos de calor pulsantes mediante especificaciones a detalle.
- Generar una mezcla homogénea de nanofluidos mediante la utilización métodos como la agitación magnética y vibraciones ultrasónicas.
- Registrar datos de la experimentación utilizando una mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas de Alúmina (Al_2O_3), Tenorita (CuO), Magnetita (Fe_3O_4) y Nanotubos de Carbono (NTC), con cuatro diferentes caudales la entrada de aire frío.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos con el fin de determinar el calor transferido y la eficiencia térmica del intercambiador de calor de tubos pulsantes.

Justificación

Los intercambiadores de calor de tipo tubo pulsantes son dispositivos muy poco desarrollados en el campo industrial debido a la poca información que se encuentra respecto al uso de nuevas tecnologías y a la manera de implementarlas dentro de la industria, de esta manera en el presente trabajo de integración curricular se realizará el estudio teórico y experimental en este tipo de intercambiador de calor para analizar el incremento de la eficiencia térmica.

La mezcla de agua con etilenglicol y nanopartículas se ha introducido como un fluido de trabajo en los intercambiadores de calor debido al mejoramiento significativo de su eficiencia térmica según estudios realizados, sin embargo, la información del uso de nanofluidos en intercambiadores de calor de tipo tubos pulsantes es escasa.

De esta manera el uso de nanofluidos tiene gran importancia en el campo industrial, ya que permite mejorar significativamente la eficiencia térmica, permitiendo que los procesos industriales sean productivos y beneficiando a las industrias, ya que se utilizan fuentes de energía que antes eran desechadas en procesos industriales y estos se verán reflejados en la disminución de pérdidas económicas y mejora en la industria térmica.

Alcance

El presente proyecto de titulación está enfocado en verificar el incremento del calor transferido mediante la utilización de cuatro diferentes nanofluidos, se construirá un intercambiador de calor de tipo tubos pulsantes, con dimensiones totales (2200x100x400mm), el cual utilizará un arreglo de tubos de cobre de diámetro 3/16" (4,7625mm), con una configuración de cuatro filas de forma serpenteante, introduciendo en cada configuración agua con etilenglicol (al 5% de concentración) y cuatro tipos de nanopartículas a una concentración en peso al 0,1%, 0,5% y 1,5%, para formar nanofluidos que sean caloportadores, de esta manera, cada configuración de tubos serpenteantes está compuesta por:

- Agua destilada – Etilenglicol al 5% - Partícula de cobre (CuO)
- Agua destilada – Etilenglicol al 5% - Partícula de aluminio (Al_2O_3)
- Agua destilada – Etilenglicol al 5% - Partícula de hierro (Fe_3O_4)
- Agua destilada – Etilenglicol al 5% - Partícula de nanotubos de carbono (NTC)

Se realizarán ensayos con estos cuatro tipos de nanofluidos, posteriormente se registran en tablas para analizar los resultados y se pueda comprobar la variación de eficiencias térmicas en el intercambiador de calor de tubos tipo pulsantes.

Mediante la recolección de datos de la experimentación podremos obtener gráficas comparativas (Q vs. \dot{m} y ϵ vs. \dot{m}), se analizará los resultados conseguidos y se determinará el nanofluido con la mayor cantidad de calor transferido y mejor eficiencia térmica.

Capítulo II: Marco Teórico

Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un equipo que transfiere energía térmica a través de una fuente o un fluido que se encuentra a alta temperatura hacia un fluido que se encuentra a baja temperatura de tal manera que los fluidos estén desplazándose en el interior del equipo.

En la actualidad existen varios criterios para estimar el funcionamiento de los intercambiadores de calor. De tal manera, el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor en el transcurso del tiempo se considera un parámetro estable para obtener con qué rapidez se deterioran las condiciones que favorecen el intercambio térmico (Friebel, Haber, & Schmitz, 2017).

Tipos de intercambiadores de calor

Con el avance tecnológico existen diversos tipos de intercambiadores de calor, sin embargo, los más utilizados en la industria se clasifican de acuerdo a su composición y de acuerdo a su ejecución.

De acuerdo con su composición:

- Intercambiadores de Calor (I.C.) de Tubos y Carcaza.
- Intercambiadores de Calor (I.C.) de Tubos Tipo Concéntricos.
- Intercambiadores de Calor (I.C.) de Platos o Placas.

De acuerdo con su ejecución:

- Intercambiadores de Calor (I.C.) con Flujo Tipo Cruzado.
- Intercambiadores de Calor (I.C.) con Flujo Tipo Paralelo.
- Intercambiadores de Calor (I.C.) de Contraflujo.
- Intercambiadores de Calor (I.C.) de paso simple (un solo paso) y de pasos múltiples.
- Intercambiadores de Calor (I.C.) en espiral (SHE).

Transferencia de calor

La transferencia de calor es un proceso en el cual se intercambia energía calórica entre diferentes cuerpos, o distintas partes de un mismo cuerpo que se encuentran a diferente temperatura. En el uso de la transferencia de calor intervienen fenómenos físicos como la convección y conducción, el análisis de la transferencia de calor, es usual tener interés únicamente en las formas de energía que se pueden transferir como resultado de una diferencia de temperatura (Cengel & Boles, 2014).

Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material se le denomina a la razón de transferencia de calor mediante un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. Se debe considerar que los metales puros tienen altas conductividades térmicas pero una aleación de dos metales suele tener una conductividad térmica baja (Cengel & Boles, 2012).

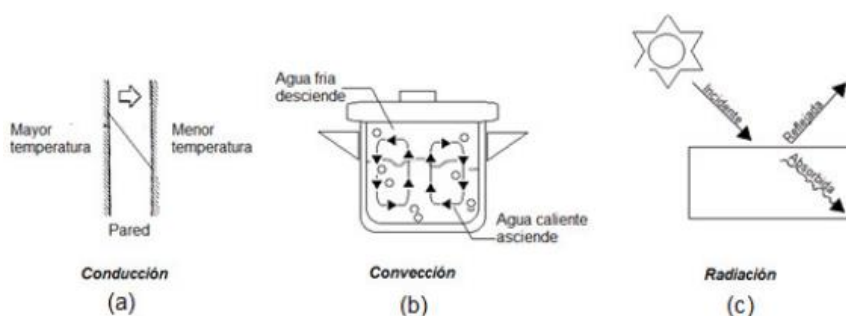
Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor se encuentra relacionada directamente con el intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos los cuales se denominan fuente y receptor. Existen tres diferentes maneras en que el calor pasa de la fuente al receptor. Varias de las aplicaciones en los tratamientos térmicos convencionales son combinaciones de estos, conducción, convección y radiación (Kern, 2001).

En la **Figura 4** se muestran los esquemas que ilustran el calor transferido bajo los distintos mecanismos.

Figura 4

Esquemas de calor transferido: a) Conducción, b) Convección, c) Radiación.



Nota. Tomado de (Kern, 2001).

Conducción

La conducción se define como la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas que muestran el resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción en los gases y líquidos se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas que se producen durante su movimiento aleatorio. En los sólidos surge bajo el efecto de la mezcla de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres (Incropera & De Witt, 1999).

Estos mecanismos de transferencia de calor se producen cuando en las diversas partes de un cuerpo a distinta temperatura la agitación térmica se transfiere de molécula a molécula hasta que se unifiquen. La rapidez de la conducción de calor mediante un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material del que se encuentra compuesto, además de la diferencia de temperatura a través de él (Cengel & Boles, 2012). La ecuación se define como:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. N}^\circ 1$$

Donde:

q''_x : Flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área.

k : Conductividad térmica.

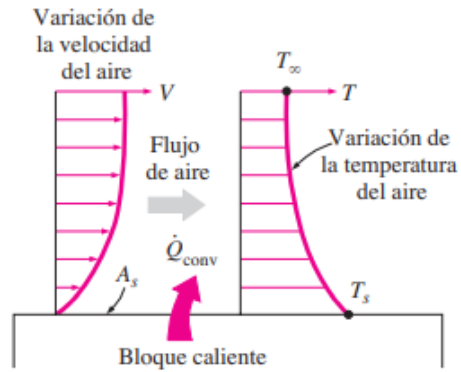
$\frac{dT}{dx}$: Diferencial de temperaturas.

Convección

El mecanismo de transferencia de calor por convección se efectúa entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento. En la **Figura 5** se puede observar el enfriamiento de un bloque caliente al soplar aire frío sobre su superficie superior. La energía se transporta primero a la capa de aire adyacente al bloque, por el mecanismo de transferencia de calor por convección (Cengel & Boles, 2012).

Figura 5

Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección.



Nota. Tomado de (Cengel & Boles, 2012).

La ecuación del mecanismo de transferencia de calor por convección es:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad \text{Ec. N}^\circ 2$$

Donde:

q'' : Flujo de calor por convección.

T_s : Temperatura de superficie.

T_∞ : Temperatura del fluido.

Balance de energía

Para realizar el análisis de balance de energía debemos establecer al igual que en termodinámica el volumen de control, la primera ley se aplica una vez determinado e identificado el volumen de control, una región del espacio limitado por una superficie de control a través de la cual pueden pasar la energía y la materia (Cengel & Boles, 2012).

La ecuación que demuestra la conservación de energía al volumen de control es:

$$E_{entra} + E_g - E_{sale} = \frac{dE_{alm}}{dt} = \Delta E_{alm} \quad \text{Ec. N}^\circ 3$$

Energía almacenada (E_{alm})

Este tipo de energía se almacena dentro del sistema cuando la temperatura en su interior se incrementa o decrecienta con el tiempo.

$$E_{alm} = \rho * V * C_p * \frac{dT}{d\theta} \quad \text{Ec. N° 4}$$

Donde:

E_{alm} : Energía almacenada.

ρ : Densidad del material.

V : Volumen.

C_p : Capacidad calorífica.

$\frac{dT}{d\theta}$: Diferencial de temperatura en relación al tiempo.

Energía generada (E_g)

La energía generada se obtiene cuando otras formas de energía en el interior del sistema se transforman en energía térmica.

$$E_g = g * V \quad \text{Ec. N° 5}$$

Donde:

g : Tasa de generación por unidad de volumen.

V : Volumen.

Ejemplos de energías generadas son: la fricción, electricidad (resistencia), etc.

En nuestro trabajo de integración curricular 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, en este caso, se presenta en las siguientes ecuaciones (Cengel & Boles, 2012).

$$E_{entra} - E_{sale} = 0 \quad \text{Ec. N}^\circ 6$$

$$q''_{cond} - q''_{cov} - q''_{rad} = 0 \quad \text{Ec. N}^\circ 7$$

Sistemas radiales

Los sistemas cilíndricos y esféricos normalmente experimentan gradientes de temperatura en una sola dirección radial, y por tal razón, se presentan como unidimensionales. Asimismo, estos sistemas se estudian con el método estándar bajo condiciones de estado estable sin generación interna de calor, que inicia con la forma adecuada de la ecuación de calor, o aplicando el método alternativo, considerando que empieza con la forma apropiada de la Ley de Fourier (Incropera & De Witt, 1999).

En la **Figura 6** se puede observar el análisis de un cilindro hueco, dichas superficies externa e interna se muestran a fluidos con diversas temperaturas, considerando condiciones de estado estable sin generación de calor, se puede expresar la ecuación de la siguiente manera:

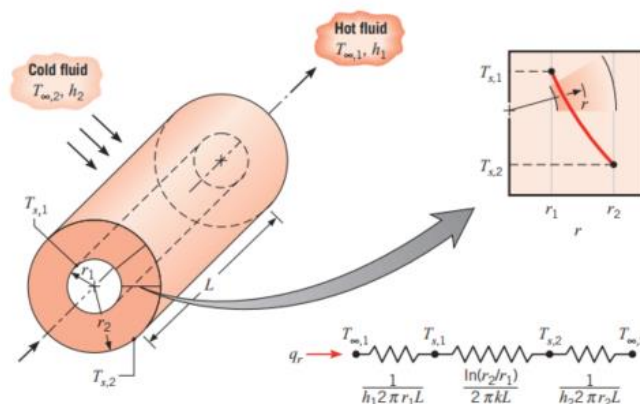
$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad \text{Ec. N}^\circ 8$$

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

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad \text{Ec. N}^\circ 9$$

Figura 6

Circuito térmico proporcional utilizado en cilindros huecos.



Nota. Tomado de (Incropera & De Witt, 1999).

La fórmula general para la conducción de superficies cilíndricas se puede expresar como:

$$q_r = -2(\pi L k) \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad \text{Ec. N}^\circ 10$$

La fórmula general para la resistencia térmica por conducción en superficies cilíndricas se puede expresar como:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k} \quad \text{Ec. N}^\circ 11$$

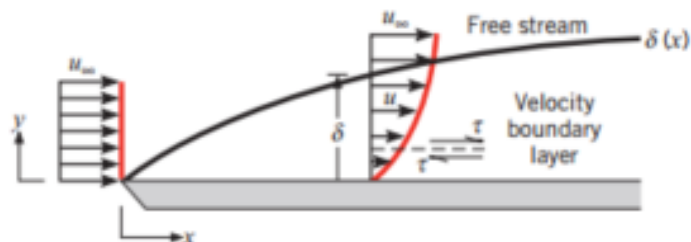
Capa límite

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. Dichas partículas interactúan para retrasar el movimiento de partículas en la capa contigua del fluido, de esta forma operan para retrasar el movimiento de las partículas a la capa siguiente y así de manera continua hasta un recorrido $y = \delta$ de la superficie, para que sea insignificante su efecto (Incropera & De Witt, 1999).

En la **Figura 7** se puede identificar que el perfil de velocidad de la capa límite se relaciona a la manera en que u varía con y a través de una capa límite. Por tal motivo, el flujo del fluido se determina por dos regiones diferentes, una capa delgada fluida denominada capa límite en la cual los gradientes de velocidades y los esfuerzos cortantes son grandes y otra región que está fuera de la capa delgada fluida en la que los gradientes de velocidad y los esfuerzos cortante no tienen un valor significativo (Incropera & De Witt, 1999).

Figura 7

Capa límite de velocidad o hidrodinámica en una placa plana.



Nota. Tomado de (Incropera & De Witt, 1999).

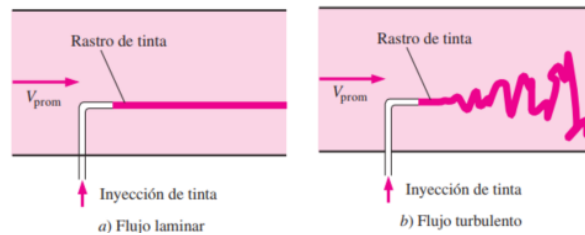
Flujo laminar y flujo turbulento

Se denomina flujos o corrientes laminares cuando el movimiento de un fluido es regular u ordenado y cada partícula alcanza una trayectoria suave denominada línea de corriente. Por otro lado, denominamos flujo turbulento cuando el movimiento de un fluido es irregular o desordenado, el fluido no se prolonga en láminas paralelas, la mezcla lateral es muy alta y existe un obstáculo en las capas (Cengel & Boles, 2014).

En la **Figura 8** se puede observar un experimento en el cual mediante una inspección minuciosa del flujo en un tubo se identificó que el flujo del fluido sigue líneas de corriente suaves a velocidades bajas (Flujo laminar), pero se vuelve incontrolable al aumentar la velocidad por encima de un valor crítico (Flujo turbulento).

Figura 8

Comportamiento de un fluido: a) Flujo laminar, b) Flujo turbulento



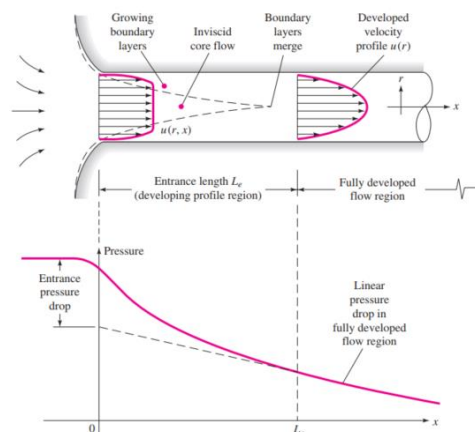
Nota. Tomado de (Cengel & Boles, 2012).

Flujo interno y flujo externo

Se denomina flujo interno al flujo que está caracterizado por una superficie, estos términos son importantes en ingeniería debido a que las tuberías circulares pueden soportar altas presiones y, por ende, se usan para trasladar fluidos, tal como se puede observar en la **Figura 9**. Por otro lado, el flujo externo es un flujo que está caracterizado en que las capas límite se desenvuelven libremente, sin restricciones aplicadas por las superficies adyacentes (Cengel & Boles, 2014).

Figura 9

Desarrollo de perfiles de velocidad y cambios de presión.



Nota. Tomado de (White, 2011).

Flujo sobre bancos de tubos

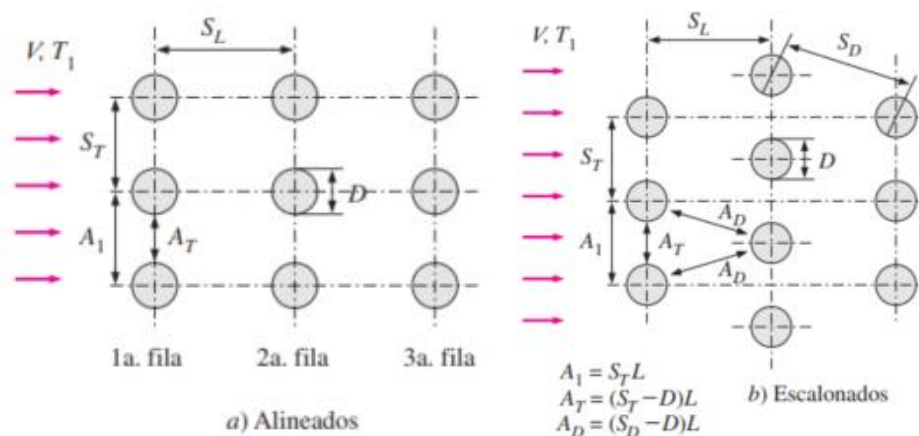
Los tubos en un banco se pueden configurarse de manera alineados o escalonados en la dirección del flujo, como se puede observar en la **Figura 10**, se toma longitud característica al diámetro exterior D , la disposición de los tubos en el banco se especifica por el paso transversal S_T , el paso longitudinal S_L y el paso diagonal S_D que se encuentra en el medio de los tubos. De esta manera el paso diagonal se expresa con la siguiente ecuación: (Cengel & Boles, 2012)

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} \quad \text{Ec. N}^\circ 12$$

Una vez que el fluido entra en el banco, reduce el área de $A_1 = S_T L$ hasta $A_T = (S_T - D)L$ entre los tubos, de esta manera la velocidad del flujo se incrementa.

Figura 10

Configuración en un banco de tubos alineados o escalonados.



Nota. Tomado de (Cengel & Boles, 2012).

En la región diagonal si la fila de tubos está próxima entre ellos, la velocidad puede incrementar con una configuración escalonada. En los bancos de tubos la particularidad del flujo es expresadas por la velocidad máxima ($V_{\text{máx}}$), por ende, el número de Reynolds se

expresa a manera de ecuación sobre la base de la velocidad máxima de la siguiente manera: (Cengel & Boles, 2012)

$$Re_D = \frac{\rho V_{m\acute{a}x} D}{\mu} = \frac{V_{m\acute{a}x} D}{\nu} \quad \text{Ec. N}^\circ 13$$

Con la velocidad máxima se establece con fundamento en el requisito de conservación de la masa para el flujo incomprensible estacionario. La **Ec. N° 14** está determinada para una configuración alineada, en la que la velocidad máxima cuenta con un área mínima de flujo entre los tubos y se puede observar en la **Figura 10**, de esta manera se expresa $\rho V A_1 = \rho V_{m\acute{a}x} A_T$, o de esta manera, $V S_T = V_{m\acute{a}x} (S_T - D)$, entonces la ecuación en términos de velocidad máxima se formula así: (Cengel & Boles, 2012)

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad \text{Ec. N}^\circ 14$$

La **Ec. N° 15** está determinada para una configuración escalonada, ya que el fluido se acerca mediante el área A_1 , pasa por el área A_T y, después, por el área $2A_D$, acorde se va desarrollando en el contorno del tubo de la fila continua. Si $2A_D > A_T$, aún la velocidad máxima sucede en A_T entre los tubos, y, por ende, la analogía $V_{m\acute{a}x}$ de la Ec. N° 14 se puede utilizar para bancos de tubos escalonados. Por otro lado, si $2A_D < A_T$, es decir, si $2(S_D - D) < (S_D - D)$, se mantendrá la velocidad máxima en las secciones transversales diagonales y, por ende, la velocidad máxima en términos de ecuación es: (Cengel & Boles, 2014)

$$\text{Escalonada y } S_D < \frac{(S_T + D)}{2}: \quad V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad \text{Ec. N}^\circ 15$$

De tal forma que, $\rho V A_1 = \rho V_{m\acute{a}x} (2A_D)$, o de igual manera $V S_T = 2V_{m\acute{a}x} (S_D - D)$ (Cengel & Boles, 2012).

Número de Nusselt

El número de Nusselt o denominado como el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección, se caracteriza por ser un número adimensional, denominado así en

memoria de su inventor el Ingeniero alemán Wilhelm Nusselt, está relacionado directamente con el número de Péclet. Este número es similar al gradiente de temperatura ya que son adimensionales en la superficie, y, por ende, suministra una medida de la transferencia de calor por convección que se produce en la superficie. Además, es normal quitar las dimensiones del coeficiente de transferencia de calor h respecto al número de Nusselt, se expresan en forma de ecuación de esta manera: (Cengel & Boles, 2012)

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad \text{Ec. N}^\circ 16$$

Donde:

k : Conductividad Térmica del fluido.

L_c : Longitud característica.

En el caso de tubos se sustituye por el diámetro (D). La **Ec. N° 16** se puede aplicar para encontrar h si se conocen los datos relacionados de la ecuación expresada.

Número de Prandtl

El número de Prandtl se caracteriza por ser adimensional, permite representar el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica, denominado así en memoria de inventor el Ingeniero alemán Ludwig Prandtl, quién también estudió la capa límite, está definido como la relación de difusividad impulso a la difusividad térmica. El número de Prandtl no depende de la geometría de un objeto a ser estudiado, ya que depende fundamentalmente del fluido y su estado, la ecuación se expresa de la siguiente manera: (Cengel & Boles, 2012)

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad \text{Ec. N}^\circ 17$$

Donde:

v : Viscosidad cinemática.

α	:	Difusividad térmica.
C_p	:	Capacidad calorífica (presión constante).
μ	:	Viscosidad dinámica específica.
k	:	Conductividad térmica.

En la **Tabla 1** se puede observar los números de Prandtl de los fluidos que son desde menos de 0,01 para metales líquidos, y llegan hasta más de 100000 considerando aceites pesados. Una clase especial de fluidos con valores muy bajos son los metales líquidos, esto se debe a la alta conductividad térmica de dichos fluidos.

Tabla 1

Rangos típicos de números de Prandtl para fluidos comunes.

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

Nota. Tomado de (Incropera & De Witt, 1999).

Número de Reynolds

El Número de Reynolds se caracteriza por ser una cantidad adimensional, denominado así en memoria del Ingeniero Osborne Reynolds, está definido en función de la relación de la fuerza de inercia a fuerzas viscosas, por lo que es un criterio para pronosticar si una condición de flujo se presenta como laminar o turbulento. Por lo tanto, si las fuerzas de inercia dominan

sobre las fuerzas viscosas el flujo se presenta como turbulento, de esa manera la ecuación se expresa de la siguiente manera: (Incropera & De Witt, 1999)

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\propto \text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL_C}{\nu} = \frac{\rho VL_C}{\mu} \quad \text{Ec. N° 18}$$

Donde:

L_C : Longitud característica. (Caso de tubos es el diámetro D).

V : Velocidad corriente del fluido.

μ : Viscosidad dinámica.

ν : Viscosidad cinemática del fluido.

La fórmula de Reynolds se simplifica si reemplazamos la velocidad del fluido:

$$V = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} \rho D^2} \quad \text{Ec. N° 19}$$

De esta manera la fórmula de Reynolds reducida se expresa así:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad \text{Ec. N° 20}$$

Correlación de Zukauskas

El Dr. Zukauskas gracias a sus múltiples experimentos, permiten correlacionar las ecuaciones antes mencionadas, enfocadas en datos experimentales para calcular el número de Nusselt promedio en el caso de flujo cruzado para bancos de tubos. (Cengel & Boles, 2012).

De esta manera se ha planteado una correlación cuya ecuación general es:

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C Re_{D,máx}^m Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad \text{Ec. N° 21}$$

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

En la **Figura 11** se encuentran las constantes de la **Ec. N° 21**, en la que todas las propiedades menos P_{rs} se establecen en la media aritmética de las temperaturas de entrada y salida del fluido, además de los valores que corresponden a C y m (Cengel & Boles, 2012).

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad \text{Ec. N° 22}$$

Donde:

T_i : Temperatura del fluido en la admisión

T_o : Temperatura del fluido en la salida del banco de tubos.

Figura 11

Valores de la Ec. N° 21, en flujo cruzado para banco de tubos.

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 ($S_T/S_L > 0.7$) ^a	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.27	0.63
Escalonado ($S_T/S_L < 2$)	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
Escalonado ($S_T/S_L > 2$)	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.40	0.60
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

^aPara $S_T/S_L < 0.7$, la transferencia de calor es ineficiente y los tubos alineados no se deben usar.

Nota. Tomado de (Incropera & De Witt, 1999)

En la **Tabla 2** podemos observar valores relacionados con las propiedades termo físicas del aire a presión atmosférica, los cuales necesitamos para analizar los resultados a futuro.

Tabla 2

Propiedades termo físicas del aire - Presión atmosférica.

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

Nota. Tomado de (Incropera & De Witt, 1999).

En la **Figura 12**, podemos observar las correlaciones del número de Nusselt promedio para bancos de tubos con 16 o más filas. De igual manera, se utiliza esas correlaciones para el caso de bancos de tubos con $N_L < 16$.

$$Nu_{D, N_L < 16} = F Nu_D \quad \text{Ec. N° 23}$$

Donde:

F : Factor de corrección, donde sus valores se muestran en la **Figura 12**. Para $Re_D > 1000$, su valor es independiente del número del Reynolds.

Figura 12

Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado.

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 × 10 ⁵	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	2 × 10 ⁵ -2 × 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 × 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 × 10 ⁵ -2 × 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 (Cengel & Boles, 2012).

De tal manera, cuando se conoce el número de Nusselt, y, por ende, el coeficiente de transferencia de calor promedio establecido para el banco de tubos completo, podemos obtener la razón de la transferencia de calor en base de la Ley de Newton de enfriamiento, por medio de un diferencial de temperaturas (ΔT) acordes (Cengel & Boles, 2012).

Figura 13

Factor de corrección F que debe usarse en $Nu_{(D, NL < 16)} = F Nu_D$ para $N_L > 16$.

Factor de corrección F que debe usarse en $Nu_{(D, NL < 16)} = F Nu_D$ para $N_L > 16$ y $Re_D > 1 000$ (tomado de Zukauskas, 1987)

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 (Cengel & Boles, 2014).

Previamente se piensa utilizar $\Delta T = T_s - T_{prom} = T_s - (T_i + T_e) / 2$ pero, de forma frecuente se presupone la razón de la transferencia de calor en exceso, el diferencial de temperaturas adecuada para el flujo interno (el flujo que ejerce sobre de los tubos se estima como interno debido a que fluye en el interior de la coraza) es la diferencia media logarítmica de

temperaturas, simbolizado como ΔT_{ML} (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020). Por consiguiente, se puede expresar de manera general en la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{aire\ entra,LC} - T_{aire\ sale,LF}) - (T_{aire\ sale,LC} - T_{aire\ entra,LF})}{\ln\left(\frac{(T_{aire\ entra,LC} - T_{aire\ sale,LF})}{(T_{aire\ sale,LC} - T_{aire\ entra,LF})}\right)} \quad Ec. N^{\circ} 24$$

Donde:

LC : Referencia evaporador.

LF : Referencia al condensador.

Tubos de calor

Los tubos de calor son dispositivos que transfieren elevadas cantidades de energía con una pequeña caída de presión, estos trabajan entre dos fases (Kole & Dey, 2012). La presión capilar se produce por el movimiento del fluido, ya que se produce al momento que entra en contacto el fluido condensado con el material capilar, esto permite que se provoque un diferencial de presión en la interfase del fluido. En estos dispositivos la presión de bombeo capilar debe ser más grande que las pérdidas de presión ocasionado por los fenómenos considerables como la caída de presión debido a la fuerza gravitacional y la caída de presión del flujo en ambas fases (líquida y gaseosa) (Mishkinis & Ochterbeck, 2003).

Tipos de tubos de calor

Los tipos de tubos de calor se clasifican acorde su aplicación, acción capilar del tubo de calor, su posición y diferencial de presión (Reay, Kew, & McGlen, 2014). En la **Tabla 3** se puede observar algunos tipos de tubo de calor, los cuales son más utilizados en experimentos prácticos para mejorar su transferencia de calor.

Tabla 3

Varios tipos de tubo de calor.

Tipo de tubo de calor	¿Cuenta con membrana?	Modo de retorno del líquido
Tubos de calor convencionales	Si	Acción capilar
Tubos de calor de conductancia variable	Si	Acción capilar
Diodos térmicos o termosifones	No	Gravedad
Microtubos de calor de forma no circular	No es necesaria	Acción capilar
Tubos de calor de lazo cerrado	Tiene membrana primaria y secundaria	Acción capilar
Tubos de calor pulsante	No es necesaria	Acción capilar y diferencial de presión
Tubos de calor de sorción	Si	Acción capilar y sorción
Tubos de calor giratorio	No es necesaria	Fuerza centrípeta

Nota. Obtenido de (Chan, Siqueiros, Ling.Chin, Royapoor, & Roskilly, 2015)

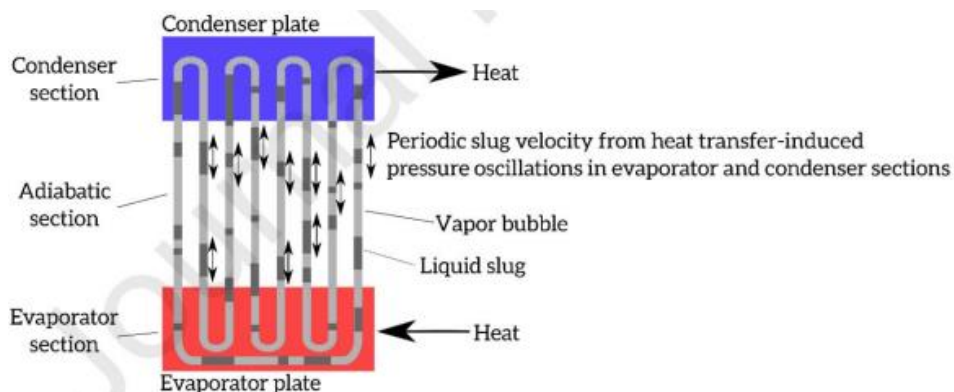
Tubos de Calor Pulsante (TCP)

Los tubos de calor pulsante al igual que los tubos de calor son dispositivos que están diseñados de un tubo serpenteante de paso múltiple, lleno de un fluido de dos fases, y de esta manera acoplan térmica y estructuralmente dos placas (Holley & Faghri, 2005). En la actualidad no existen variedad de investigaciones científicas que brinden más información acerca de los TCP, sin embargo, en la **Figura 14**, se puede observar que el diseño de bucle cerrado muestra mejores oscilaciones de fluido y de calor. Los circuitos de fluidos de circuito cerrado son los utilizados a comparación de los circuitos abiertos debido a que se desarrolla una circulación

global neta, esto ocasiona un mejor transporte de energía superior en medio de las placas (Khandekar, Dollinger, & Groll, 2003).

Figura 14

Tubo de calor pulsante de circuito cerrado.



Nota. Obtenido de (Khandekar, 2010).

Restricciones en el diseño de un Tubo de Calor Pulsante

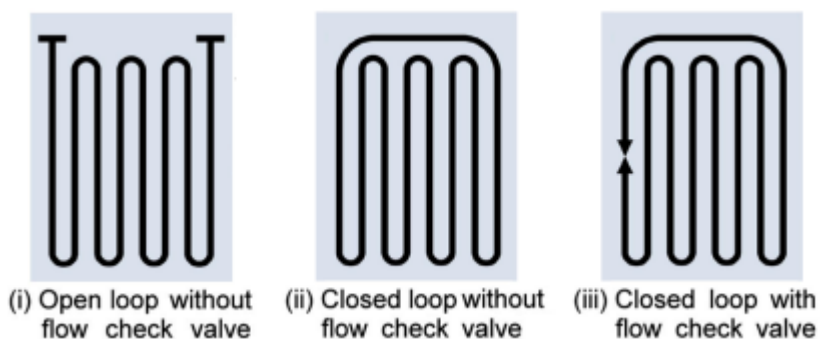
Para el diseño de un tubo de calor pulsante se consideran dos restricciones fundamentales, el primero se caracteriza por el diámetro del tubo de cobre ya que debe ser lo suficientemente pequeño para que las fuerzas de tensión superficial sometan la dinámica de fluidos para permitir tanto los tapones de líquido y vapor contengan toda la sección transversal del tubo (Khandekar, 2004). El diámetro del tubo, así como la fuerza de tensión superficial dependen estrictamente del fluido de trabajo como la temperatura de saturación, de tal manera que la identificación de oscilaciones de líquido que abordan la sección transversal proporciona una resistencia de flujo crucial que mejora la acumulación de gradientes de presión fundamentales para impulsar el flujo periódico (Mueller, Pfothenauer, & Miller, 2021).

La segunda restricción para considerar es el área total de la sección transversal del tubo de cobre de los tubos paralelos ya que deben ser suficientemente grandes de tal manera que pueda encajar la carga térmica máxima del diseño realizado al evaporador del TCP. Las

cargas de calor que sobrepasen esta carga crítica de diseño incrementan la temperatura media general del TCP lo que producen secado, dejando al TCP sin líquido y formando de depósitos de líquido en los tubos. Esto impide el almacenamiento de gradientes de presión impulsores y, por ende, restringe el mecanismo dominante para el flujo de energía entre las placas del evaporador y del condensador (Mueller, Pfothenauer, & Miller, 2021).

Figura 15

Configuraciones posibles de un tubo de calor pulsante.



Nota. Obtenido de (Khandekar, 2004).

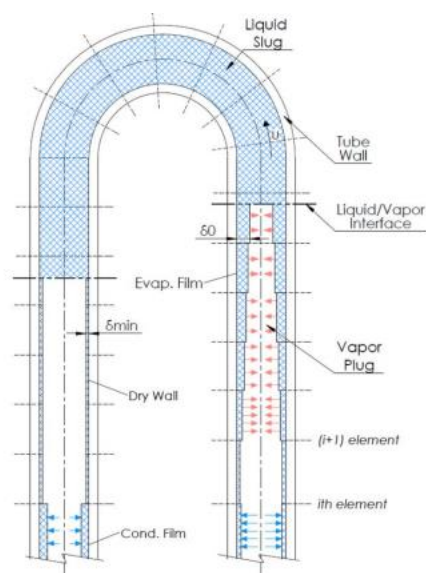
Volumen de Control de un TCP

Para comprender de mejor manera un volumen de control de un TCP los científicos D'Entremont B. P. y Thome J.R. estudiaron su comportamiento, y el modelo numérico mejorado se refleja en la **Figura 16**, todo el bucle del TCP se discretiza en partes de igual tamaño que abarcan una pared, líquido, película líquida y vapor. Un componente situado en una parte líquida solo tendrá un elemento líquido, pero si un componente está situado en un tapón de vapor tendrá elementos de película de ambas formas (líquidas y vapor), por otro lado, un componente que introduzca una interfaz de burbuja en su parte interior obtendrá ambos elementos (líquido y vapor) (Mueller, Pfothenauer, & Miller, 2021).

Las gotas de líquido y las burbujas de vapor experimentan una disipación viscosa interna, así como un esfuerzo cortante en la pared a medida que se mueven en el tubo de PHP. Los tapones de líquido y las burbujas de vapor pueden recibir calor, rechazar calor o moverse sin transferencia externa de calor, dependiendo de su ubicación en el evaporador, el condensador o la sección adiabática, respectivamente. La mayor parte del transporte térmico ocurre a través de la película delgada y su dinámica juega un papel crucial en el transporte térmico general (Mueller, Pfothenauer, & Miller, 2021).

Figura 16

Representación volúmenes de control.



Nota. Obtenido de (Aubin, y otros, 2019).

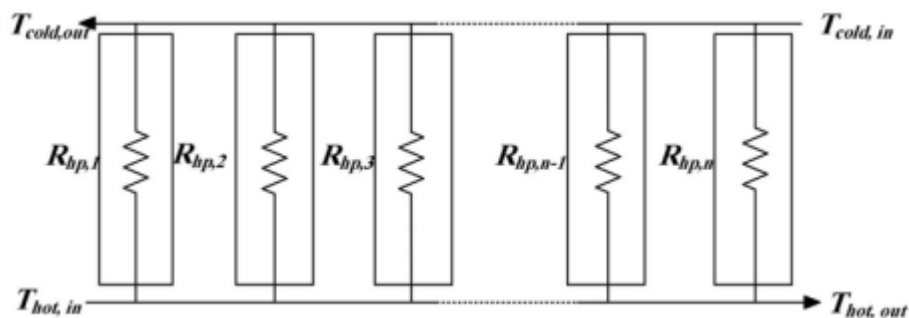
Resistencias Térmicas

El Intercambiador de calor basado en tubos de calor pulsante (HPHE) consta de varios tubos de cobres conectados en paralelo ya que cada sección de tubo se diseñó con una posición independiente y de esta forma se transfiere calor a la sección de evaporación, de

modo que tiene contacto con el flujo de aire frío. En la **Figura 17** se puede observar la analogía eléctrica.

Figura 17

Analogía resistencias eléctrica térmicas del ICTP.



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

Se puede expresar la resistencia térmica total R_{HPHE} del $HPHE$ mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{R_{HPHE}} = \frac{1}{R_{hp,1}} + \frac{1}{R_{hp,2}} + \dots + \frac{1}{R_{hp,n-1}} + \frac{1}{R_{hp,n}} \quad \text{Ec. N}^\circ 25$$

Donde

R : Resistencia térmica.

Subíndice hp : Tubo de calor.

n : Número de tubos de calor en el I.C.

Si se deduce que la resistencia de un tubo del TCP, es similar para todos los demás tubos del IC, la resistencia térmica total se considera como R_{HPHE} del ICTP, se puede definir como: (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020)

$$R_{HPHE} = \frac{R_{hp}}{n} \quad \text{Ec. N}^\circ 26$$

Donde

R_{hp} : Resistencia media de un T.C.P.

n : Número de tubos de calor en el I.C.

$$R_{hp} = R_{e,out} + R_{e,cond} + R_{c,cond} + R_{c,out} \quad \text{Ec. N}^\circ 27$$

Donde:

$R_{e,out}$ y $R_{ce,out}$: Resistencia a la transferencia de calor (convección) que se produce en la fase de evaporación y condensador.

$R_{e,cond}$ y $R_{c,cond}$: Resistencia a la conducción que se produce en la pared del tubo de cobre en la fase de evaporación y condensador (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020).

$$R = \frac{1}{hA} \quad \text{Ec. N}^\circ 28$$

Donde:

R : Resistencia térmica total.

h : Coeficiente de transferencia de calor determinado.

A : Área de transferencia de calor.

Para el análisis de las temperaturas tanto de entrada como salida al TCP se considera la transferencia de calor despreciable entre el intercambiador de calor de tubos pulsantes y el medio ambiente, para finalizar obteniendo resultados de las variaciones en el potencial y la energía cinética, de tal forma que se puede expresar de forma matemática así: (Incropera & De Witt, 1999)

$$q = \dot{m}_h(i_{h,i} - i_{h,o}) \quad \text{Ec. N}^\circ 29$$

$$q = \dot{m}_c(i_{c,i} - i_{c,o}) \quad \text{Ec. N}^\circ 30$$

Donde:

i : Entalpía.

Subíndices h y c : Caliente (hot) y Frío (cold).

Subíndices i y o : Entrada (input) y Salida (Output).

Si los fluidos no tienen variación de fase y los calores son constantes, se puede simplificar a la siguiente ecuación: (Incropera & De Witt, 1999)

$$q_h = \dot{m}_{h,c} C_{ph,pc} (T_{h,c,i} - T_{h,c,o}) \quad \text{Ec. N}^\circ 31$$

Para obtener valores del calor transferido existe otra manera, se trata de usar los valores de la temperatura media logarítmica junto con la resistencia térmica total del *HPHE* (Jouhara, Almahmoud, Brough, & Guichet, 2020).

$$Q = \frac{\Delta T_{ML}}{R_{HPHE}} \quad \text{Ec. N}^\circ 32$$

Sin embargo, se puede definir la ecuación de otra forma, aplicando la relación de transferencia de calor total q y el diferencial de temperaturas ΔT , en los dos fluidos (caliente y frío), expresada en la siguiente ecuación: (Incropera & De Witt, 1999)

$$\Delta T = T_h - T_c \quad \text{Ec. N}^\circ 33$$

Cálculo de la eficiencia (ϵ)

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. En 1995, Kays y London queriendo eliminar las

iteraciones mostraron un procedimiento denominado método de la efectividad-NTU, que permitió facilitar el análisis de los intercambiadores de calor (Cengel & Boles, 2012).

El método se caracteriza en un parámetro adimensional, denominado efectividad de la transferencia de calor ε detallado de forma de ecuación como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{m\acute{a}x}} = \frac{\text{Razón de la transferencia de calor real}}{\text{Razón máxima posible de la transferencia de calor}} \quad \text{Ec. N}^\circ 34$$

Con base en un balance de energía en los fluidos caliente y frío se puede determinar la razón de la transferencia de calor real de un intercambiador de calor, de esta manera se puede expresar como: (Cengel & Boles, 2012)

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,sal} - T_{c,ent}) = C_h(T_{h,ent} - T_{h,sal}) \quad \text{Ec. N}^\circ 35$$

Donde:

$$C_c = \dot{m}_c c_{pc} \quad : \quad \text{Razón capacidad calorífica de fluido frío.}$$

$$c_h = \dot{m}_c c_{ph} \quad : \quad \text{Razones de capacidad calorífica de fluido caliente.}$$

Para alcanzar los valores se consideran las siguientes ecuaciones:

$$\text{Sí } C_{m\acute{i}n} = C_c \quad \varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{m\acute{a}x}} = \frac{C_c(T_{c,sal} - T_{c,ent})}{C_c(T_{h,ent} - T_{h,sal})} = \quad \text{Ec. N}^\circ 36$$

$$\text{Sí } C_{m\acute{i}n} = C_c \quad \varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{m\acute{a}x}} = \frac{C_h(T_{c,sal} - T_{c,ent})}{C_h(T_{h,ent} - T_{h,sal})} = \quad \text{Ec. N}^\circ 37$$

Nanociencia y Nanotecnología

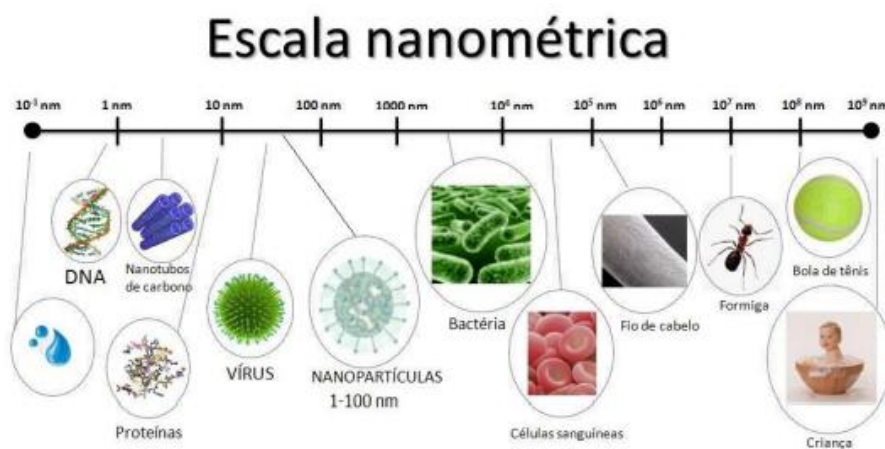
La nanociencia es ciencia básica y nanotecnología ciencia aplicada, tienen gran importancia en el estudio de los fenómenos ocasionados en la nanoescala y fundamentalmente en los nanomateriales, esto ha permitido conformar un nuevo predominio científico que ha emergido para la construcción, diseño, modelado y aplicación de nanoestructuras, permitiendo

comprender la relación que existe entre las propiedades físicas, químicas y dimensionales de los elementos (materiales) (Guozhong, 2004).

El término nanotecnología se originó en una conferencia realizada por el físico teórico Richard Feynman en el año de 1959, denominada “There’s Plenty of Room at the Bottom” traducida al español significa “Hay mucho espacio al fondo”, de esta manera surge una nueva forma de utilizar esta tecnología. De esta manera son medidas extremadamente pequeñas en la escala “nanos”, logrando manejar tanto estructuras moleculares como átomos (Pal, Jana, Manna, Mohanta, & Manavalan, 2011).

Figura 18

Escala nanométrica.



Nota. Obtenido de (Ouahid, 2016).

Nanomateriales y Nanopartículas

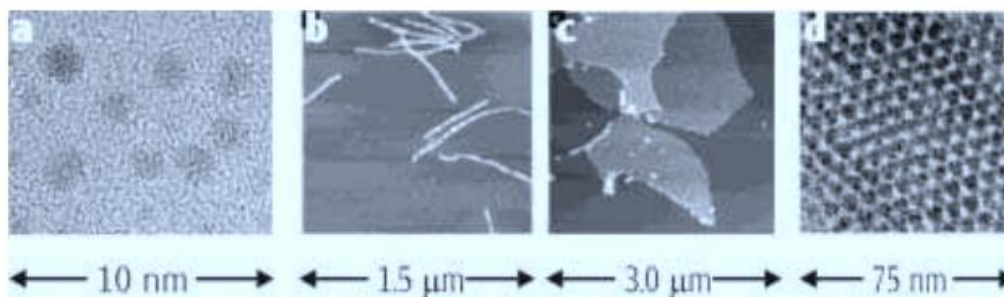
Cuando se habla de nanomateriales se refieren a una moderna clase de materiales sean estos: metales, polímeros, cerámicos, semiconductores, o una mezcla de los mencionados, se caracterizan ya que al menos una de sus dimensiones se ubica en un rango de 1 y 100 nm. Son materiales con dimensiones sólidas volumétricas, ya que interpretan una transición de moléculas y átomos (Gutiérrez, 2006). En la **Figura 19** se observa una

clasificación de acuerdo con el número de dimensiones que se encuentra en el régimen nanométrico, de esta manera se pueden clasificar de esta manera:

- a) *Materiales de dimensión cero*: según su categoría si corresponden a nanopartículas.
- b) *Una dimensión*: se caracterizan por tener una longitud variable, por ejemplo, nanoalambre y nanotubos.
- c) *Dos dimensiones*: se caracterizan por tener áreas de tamaño indefinido, por ejemplo, películas delgadas.
- d) *Tres dimensiones*: se caracterizan por ser sólidos tridimensionales que están compuestos por unidades nanométricas.

Figura 19

Clasificación de nanomateriales: a) 0-D, Nanopartícula de Oro, b) 1-D, Fibras poliméricas, c) 2-D. Películas poliméricas y d) 3-D, Autoensamblaje de nanopartícula de Oro.



Nota. Obtenido de (Gutiérrez, 2006).

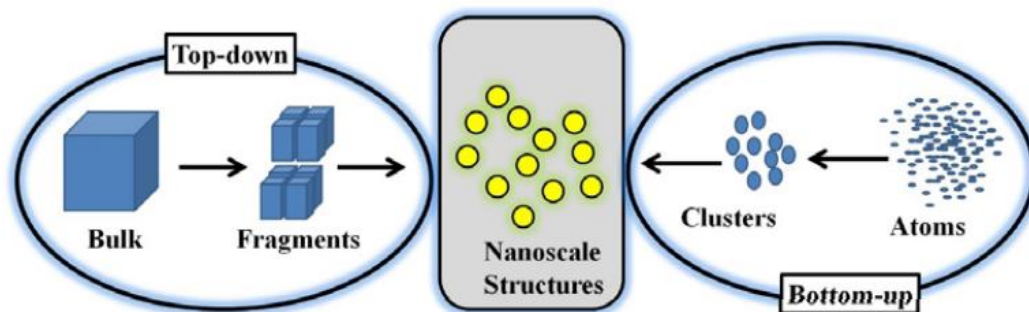
Generación de nanopartículas

Para obtener una nanopartícula existen procesos de síntesis que al parecer son fáciles de comprender, sin embargo, son muy complejos de realizarlos. En la actualidad existen dos direcciones opuestas para obtener nanoestructuras. El primer método denominado Top-Down, se relaciona directamente de materiales con mayores dimensiones, los cuales fragmenta usando técnicas de litografía (impresión) para lograr partículas de dimensiones requeridas. Por

otro lado, el segundo método denominado Bottom-Up, se caracteriza por tomar moléculas y átomos por separado, se acoplan para conseguir las nanopartículas (Márquez, Hernández, Míguez, Soler, & Pérez, 2021).

Figura 20

Desarrollo síntesis de nanopartículas (Métodos Top-Down y Bottom-Up).



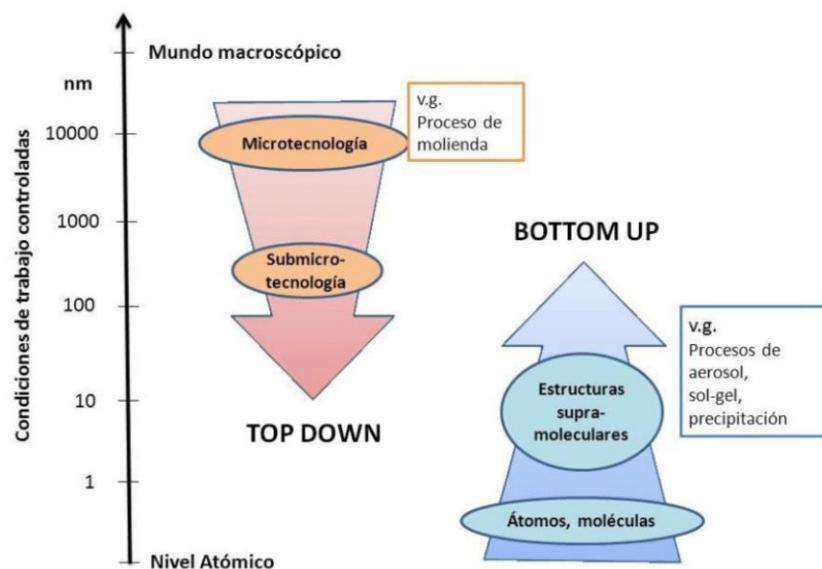
Nota. Obtenido de (Neto, 2019).

Top-Down

Se refiere a los métodos en los que se comienza con una cantidad grande de material y se lo reduce para obtener objetos más pequeños. Las cantidades de material de partida son aquellas que se pueden observar al microscopio o a escala humana. Un árbol podría ser un material de partida, y escarba-dientes son ejemplos de estructuras más pequeñas manufacturadas a partir de él. La subdivisión de molienda húmeda utiliza un molino que lleva cargado diminutas esferas y se activa con el accionamiento de un eje agitador que opera a velocidades altas para producir un corte hidráulico mecánico para de esta manera beneficiar el impacto de las partículas. Por otro lado, la subdivisión de molienda seca se caracteriza porque la energía superficial en los procesos de refinado de granos aumenta, esto permite que se aumente la adición de partículas (Márquez, Hernández, Míguez, Soler, & Pérez, 2021). En la **Figura 21** se puede observar este método de forma ilustrada, el cual consiste en la subdivisión de materiales macroscópicos hasta obtener materiales nanométricos.

Figura 21

Técnicas de síntesis de nanopartículas.



Nota. Obtenido de (Huamán, 2014).

Bottom-Up

El método Bottom-up o también denominado técnica ascendente se caracteriza por el uso de moléculas y átomos diminutas, por ejemplo, bloques de construcción de estructuras de diversos niveles que ejecutan varias operaciones, de esta manera se puede presidir que no tengan productos de desecho, así como materiales que no se usen. Esta técnica se encuentra subdividida en dos fases, una gaseosa que implica una deposición química en fase de vapor y otra fase líquida que implica una deposición de partículas evaporadas (Horikoshi & Serpone, 2013).

Aplicaciones de la nanotecnología

La evolución de la nanotecnología ha surgido rápidamente con un amplio dominio de productos ya que presenta oportunidades para un desarrollo de los materiales, en la **Tabla 4** se detallan diferentes campos para la aplicación de la nanotecnología.

Tabla 4

Aplicaciones de las nanopartículas en diferentes campos.

Campo de aplicación	Aplicación
Nanomedicinas	Nanofármacos, dispositivos médicos, tejido ingeniería de tejidos.
Química y cosmética	Productos químicos y compuestos a nanoescala, pinturas recubrimientos, etc.
Materiales	Nanopartículas, nanotubos de carbono, biopolímeros, puntos, revestimientos.
Ciencias de la alimentación	Procesamiento, alimentos, nutraceuticos, nanocápsulas.
Medio ambiente y energía	Filtros de purificación de agua y aire, pilas de combustible, fotovoltaica.
Militar y Energía	Biosensores, armas, mejora sensorial.
Electrónica	Chips semiconductores, almacenamiento de memoria, fotónica, optoelectrónica.
Agricultura	Microscopio de fuerza atómica y de barrido de túnel.

Nota. Obtenido de (Pangi, Beletsi, & Evangelatos, 2003).

Nanopartículas de estudio

Magnetita - Fe₃O₄

La nanopartícula óxido de hierro o también denominada magnetita (Fe₃O₄), al ser una nueva tecnología son ampliamente requeridas en investigaciones científicas y experimental, su importancia incremento debido a que se relaciona directamente con los procesos de producción y que exhiben una excelente actividad catalítica, de tal manera que pueda ser modificada por el

anclaje de sustancias químicas y gracias a sus propiedades ferromagnéticas que favorecen la división de medios de reacción a través de campos magnéticos de intensidad adecuada (Carriazo, 2017).

La magnetita cuenta con propiedades que permiten una mejor aplicación industrial, entre las principales tenemos: Pureza: 99,8%; Punto de fusión: 1534,93 °C; Densidad: 5,286 g/cm³; Masa molar: 231,53 g/mol; Tamaño: 40 – 100 nm; Estructura cristalina: Corindón; Calor específico (C_p): 0,6194 J/(g K) (CONCEPTODEFINICION, 2022).

Figura 22

Nanopartícula Magnetita - Fe₃O₄.



Nota. Obtenido de (CONCEPTODEFINICION, 2022).

Tenorita - CuO

La nanopartícula óxido de cobre o también denominada tenorita (CuO), al ser una nueva tecnología tienen un amplio interés gracias a sus singulares propiedades, gran potencial para aplicaciones catalíticas, en sensores de gas, conservación de energía solar, dispositivos fotovoltaicos, tratamiento de desechos, conservación de alimentos, entre otras aplicaciones. El meollo del éxito de estas nanopartículas se fundamenta en la generación de polvos formados de manera ultrafinos y de alta calidad, considerando características específicas de pureza, morfología, tamaño, etc., por ende, reunidas todas estas características establecen los

rendimientos de los productos finales capaces de experimentar resultados que mejoren su eficiencia (Ríos, y otros, 2015).

La tenorita tiene propiedades que permiten una mejor aplicación industrial, entre las principales tenemos: Punto de fusión: 12,10 °C (285,1 K), Pureza: 99%, Densidad: 6,291 g/cm³, Masa molar: 79,605 g/mol, Tamaño: 20-30 nm (ECURED, 2022).

Figura 23

Nanopartícula Tenorita - CuO.



Nota. Obtenido de (ECURED, 2022).

Nanotubos de Carbono - NTC

La nanopartícula nanotubos de carbono o por sus siglas NTC, son ampliamente requeridas en investigaciones debido a sus diferentes propiedades que posee, entre las principales consideramos su alta dureza, esta nanopartícula presenta un arreglo estructural que permite constituir hexágonos y pentágonos mediante sus átomos de carbono en estructuras herméticas tridimensionales. Poseen alta conductividad térmica y eléctrica, debido a su resistencia mecánica opera como metal o semiconductor conforme su geometría.

Considerando la posibilidad de dispersión de los nanotubos de carbono se utilizan de manera

directa para trabajar con fluidos, de esta manera diversos estudios han demostrado que son resistentes y rígidos, pero considerablemente flexibles (Cornelio, y otros, 2016).

Figura 24

Nanotubos de Carbono - NTC.



Nota. Obtenido de (Andrade, López, & Sáenz, 2012).

Alúmina - Al_2O_3

La nanopartícula Alúmina es ampliamente requerida en investigaciones científicas y experimentales, es fundamental al utilizarlo como aluminio metálico debido a su dureza y por su alto punto de fusión actúa como material refractario. Se presenta como un polvo blanco que tiene una dureza alta y su resistencia es media, la forma de conseguir esta partícula es mediante la bauxita, se puede observar en la naturaleza de manera de corindón (Gusman, 2014).

La Alúmina cuenta con propiedades que permiten una mejor aplicación industrial, entre las principales tenemos: Punto de fusión: 2072 °C (2345,15 K); Densidad: 3,961 g/cm³; Masa molar: 101,96 g/mol; Tamaño: 30 nm; Índice de refracción: 1,768-1,760 (Macias, 2021).

Figura 25

Nanopartícula Alúmina - Al_2O_3 .



Nota. Obtenido de (Macias, 2021).

Métodos para dispersar nanopartículas en el fluido base.

Los métodos mecánicos para dispersar y desaglomerar nanopartículas en fluidos está relacionado con la intensidad de la energía que se usa para dispersión y la variable del tiempo de ejecución (Segarra, 2020).

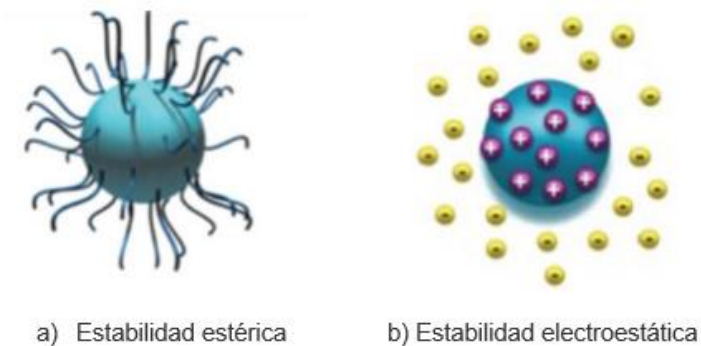
De esta manera las nanopartículas se juntan o se añaden por varias situaciones, entre las más principales:

- **Coagulación:** Se caracteriza por unión de partículas en grupo compactadas en la que su fracción se incrementa en relación de su suspensión original.
- **Floculación:** Se caracteriza por la combinación de partículas a través de puentes creados por un medio floculante creando una estructura abierta y voluminosa.
- **Gelificación:** Se caracteriza por la formación de una red acorde a las partículas que se encuentran en todo el volumen, y por mecanismos de capilaridad que se encargan de detener el líquido.

En la **Figura 26** se puede observar las fuerzas repulsivas que se producen de interacciones estéricas o electroestáticas, éstas son fundamentales en sistemas acuosos, ya que las interacciones estéricas son de gran utilidad en sistemas no acuosos (Segarra, 2020).

Figura 26

Tipos de estabilidad coloidal.



Nota. Obtenido de (Segarra, 2020).

Capítulo III: Diseño, construcción, calibración del equipo y preparación

Diseño del intercambiador de calor de tubos pulsantes.

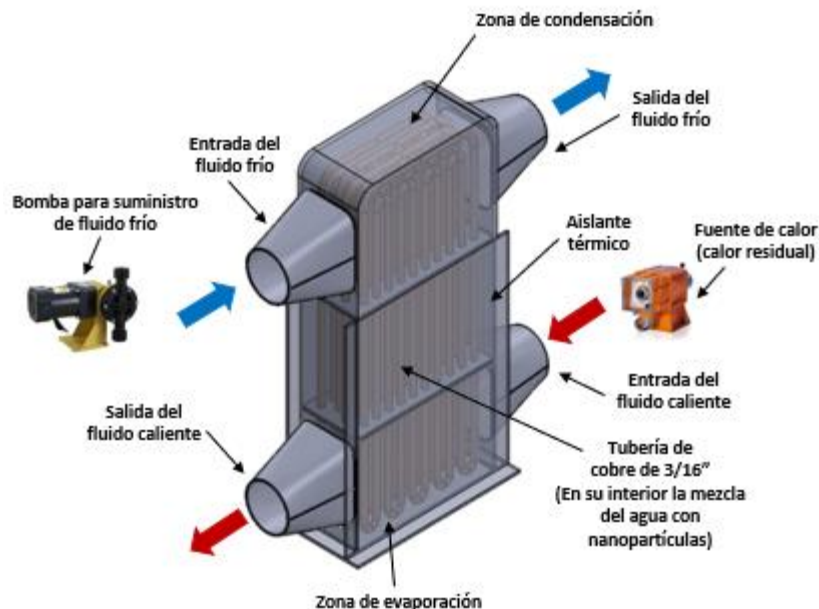
Dimensiones generales 220x100x400 mm.

Para el diseño de los tubos de calor pulsantes se estableció dimensiones comerciales que se encuentran en el mercado (\varnothing 3/16"), para obtener un primer diseño con un número determinado de filas de tubos como se observa en la **Figura 27** y se determinó las dimensiones adecuadas para su posterior construcción.

Los materiales seleccionados para la configuración de tubos serpenteantes fueron cañería de cobre y para la carcasa, tapas y ductos de acero inoxidable.

Figura 27

Prediseño del intercambiador de calor de tubos pulsantes en SolidWorks 2021.



Las dimensiones del diseño final de las partes que componen el intercambiador de calor de tubos pulsantes como su carcasa, ductos de aire caliente (entrada y salida) y ductos de aire frío (entrada y salida), los cuales se encuentran en los planos realizados en AUTOCAD 2021.

Ver **Anexo del 1 al 5**.

Proceso de construcción

- 1) De acuerdo a las dimensiones de los planos obtenidos en el diseño final, se desenrolla y se prepara un rollo comercial de 15 m de tubería de cobre con diámetro externo de 3/16" y diámetro interno de 1/8" (tubería fabricada bajo los estándares establecidos por la norma internacional ASTM B280) ver **Figura 28**, se corta 32 secciones de 36 cm de largo, 8 secciones de 55 cm y 36 secciones de 10 cm, como se observa en la **Figura 29**.

Figura 28

Tubería fabricada bajo los estándares ASTM B280.



Figura 29

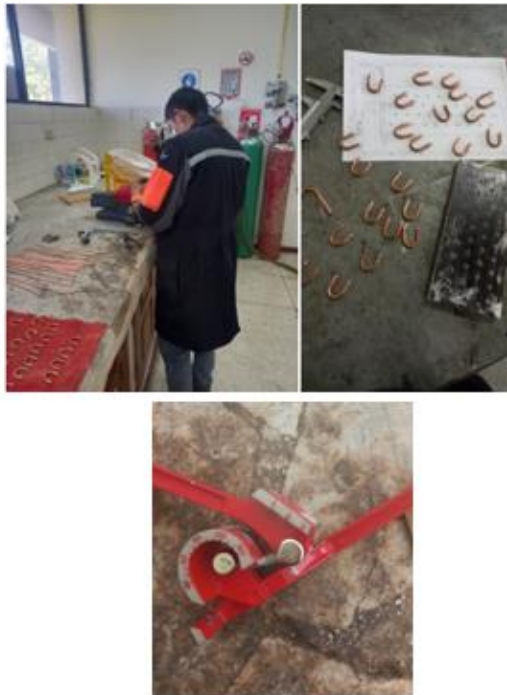
Secciones de 10 cm y 36 cm tubería de cobre con diámetro externo de 3/16”.



- 2) En las secciones cortadas de 10 cm de tubería de cobre se realizó un doblado a 180° en una matriz con un diámetro de 2,5 cm, para darle una forma de U como se observa en la **Figura 30**, de la misma manera se realiza un doblado del extremo a 90° de la sección de tubería de 55 cm en una matriz con un diámetro de 4 cm.

Figura 30

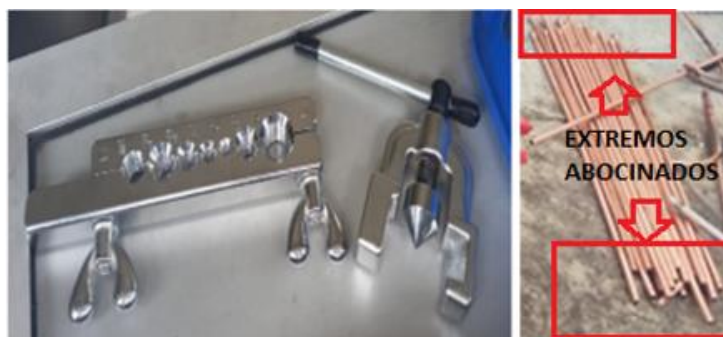
Doblado en U de 38 secciones de tubería.



- 3) En las 32 secciones de 36 cm y las 8 secciones de 55 cm, con la ayuda de una herramienta se realiza el abocinado en los 2 extremos, se expanden los diámetros para facilitar las conexiones con los tubos en forma de U, de esta manera la soldadura será de mejor calidad y aseguramos que no existan fugas.

Figura 31

Tubería abocinada en los dos extremos y herramienta de abocinamiento.



- 4) Se maquinó dos placas de duralón de dimensiones de 22 x 10 x 1 cm con un proceso de fresado, para posteriormente hacer 40 perforaciones en la placa con separaciones

mostradas en el plano (**Ver Anexo 6**), las placas se las cubrió con tela teflón para garantizar un trabajo adecuado en altas temperaturas. Estas placas cumplieron la función de fijar a los tubos de cobre y separar la parte de condensación, adiabática y evaporización del intercambiador de calor de tubos Pulsantes.

Figura 32

Maquinado de placas de duralón.



- 5) En el intercambiador de calor de tubos pulsantes se construyó 4 filas de tubos, cada fila está compuesta por 10 tubos (8 tubos de 36 cm y 2 de 55 cm), los cuales se los introdujo en los agujeros de las placas maquinadas de duralón, para posteriormente conectarlos por tubos en forma de U y de esta manera se forma una fila de tubos.

Figura 33

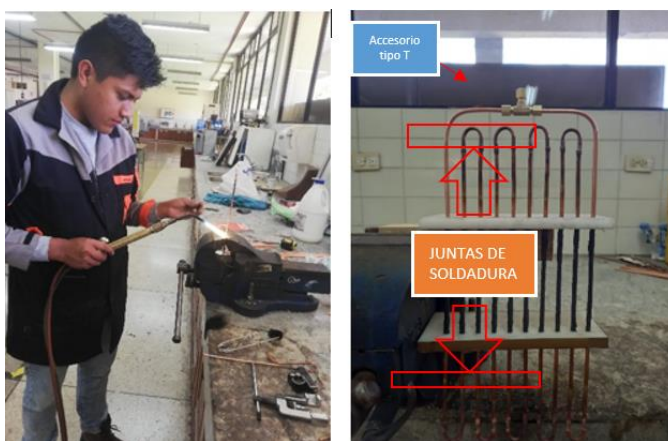
Tubos de cobre introducidos en la placa maquinada de duralón.



- 6) Los tubos ya colocados en las placas se los interconecto con los tubos en forma de U, cada conexión entre tubos se los fijo mediante una junta de soldadura oxiacetilénica, utilizando varilla de plata al 15% con fundente. Para finalizar la interconexión de tubos en los extremos de la fila de tubos se unió mediante un accesorio de bronce tipo T como se observa en la **Figura 34**.

Figura 34

Formación de fila de tubos interconectados, unidos mediante soldadura oxiacetilénica.



- 7) Se colocó alrededor de toda la superficie de los tubos que se encuentra entre las dos placas una cinta autofundente como se observa en la **Figura 35**, para aumentar la resistencia térmica en los mismos y de esta manera garantizar un proceso adiabático en la sección designada.

Figura 35

Cinta auto fundente colocada en la superficie de los tubos que se encuentran en la sección adiabática.



- 8) Se repitió los pasos 5, 6 y 7 hasta que se formó las 4 filas de tubos del intercambiador de calor de tubos pulsantes, como se observa en la **Figura 36**.

Figura 36

Filas de tubos completas (4) del intercambiador de calor de tubos pulsantes.



- 9) Se colocó termocuplas tipo K distribuidas en 6 partes de manera uniforme, 3 en la sección de condensación y 3 en la sección evaporización, las cuales se unieron de manera fija en las superficie de los tubos con soldadura oxiacetilénica.

Figura 37

Zonas donde se ubicaron las termocuplas tipo K.



10) Se preparó un molde en la sección adiabática para colocar de una manera correcta espuma de poliuretano, la cual servirá como aislante térmico y evitará que exista intercambio de calor hacia las otras zonas.

Figura 38

Colocación del aislante térmico (espuma de poliuretano).

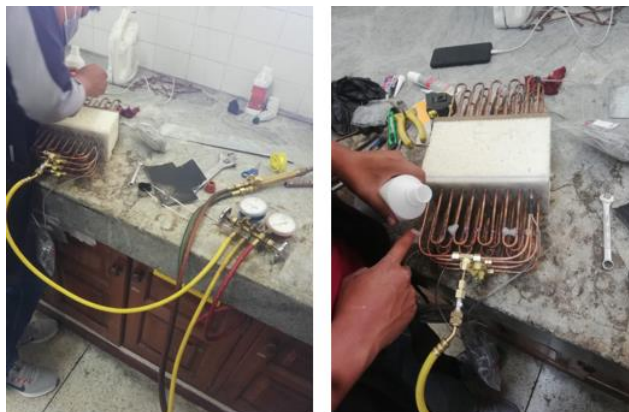


Verificación de fugas

Se verificó que no existan alguna grieta o perforación que cause fugas en las uniones soldadas de los tubos de cobre, para lo cual se utilizó un manómetro múltiple y se conectó la manguera de servicio a un tanque de nitrógeno y la manguera de baja presión al accesorio tipo T de la configuración de tubos, para introducir nitrógeno dentro de los tubos, de esta manera generar presión en su interior y con la ayuda de la espuma colocada en la superficie exterior de las uniones soldadas evitamos posibles fugas, si existiera movimiento anormal de la espuma, serian visibles las fugas presentes.

Figura 39

Instalación de manómetro entre los equipos y colocación de espuma en la superficie de las uniones soldadas.



Instalación de los tubos pulsantes dentro de la coraza

Para realizar la instalación de los tubos pulsantes dentro de la Coraza, se vio la necesidad de colocar un accesorio tipo T adicional al ya colocado anteriormente como se puede observar en la **Figura 40**, los cuales facilitarían la carga y descarga de los nanofluidos.

Figura 40

Colocación de un accesorio tipo T adicional en cada fila de tubos serpenteantes.



Posteriormente se instaló los tubos pulsantes dentro de la coraza de tol galvanizado de 0.5 mm de espesor que fue previamente diseñada con las medidas que se pueden encontrar en los planos del **Anexo 1**, la cual fue cortada a láser. Se realizó un empernado de la coraza, de la misma manera los ductos de aire frío y caliente que servirán de acoples con los equipos, y el intercambiador de calor de tubos pulsantes.

Figura 41

Empernado de coraza y ductos de aire caliente y frío acoplados a la misma coraza.



Después se aplicó silicona roja (mantiene sus propiedades hasta temperaturas de 250 °C y para exposición ocasional de hasta 300 °C) formando un sello entre los accesorios tipos T y la tapa de la coraza. Se aplicó silicona gris (mantiene sus propiedades hasta temperaturas de 275 °C y para exposición ocasional de hasta 350 °C) para formar un sello entre la tapa y la coraza, para finalmente colocar las tapas de 3/16" en los 8 accesorios tipo T, de esta manera se garantiza que exista un sello hermético, evitando fugas de aire frío o caliente.

Figura 42

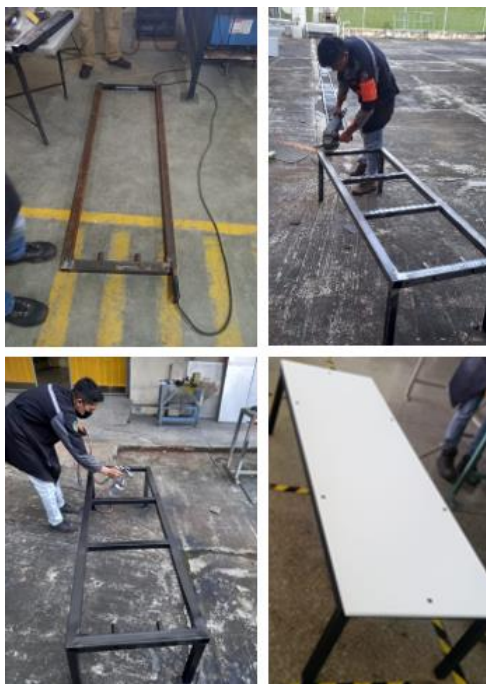
Intercambiador de calor sellado herméticamente con silicona roja y gris.

**Construcción de mesa para el montaje de equipos**

Para el montaje de la fuente de aire caliente y el intercambiador de calor de tubos pulsantes con sus respectivos ductos, se construyó una mesa con base metálica de tubo cuadrado de 40 mm, mediante procesos de corte, desbaste y pulido, para las juntas soldadas se utilizó soldadura SMAW y para darle un acabado se realizó un proceso de pintura.

Figura 43

Proceso de construcción de la mesa para el montaje de equipos.



Diseño, construcción y montaje de la fuente de aire caliente.

Se construyó un ducto metálico de tol galvanizado con dimensiones que se puede ver en los planos del **Anexo 4** mediante corte láser y doblado para posteriormente ser empernado, en el cual se colocó 5 resistencias eléctricas cada una de 1000 W, controladas individualmente como se observa en la **Figura 44**, con estas resistencias se garantizará que el aire salga a una temperatura mayor a los 100 °C (110 °C medidos a la entrada con el termómetro).

Figura 44

Colocación de 5 resistencias de 1000 W dentro del ducto metálico que son controlados individualmente.



Se utilizó un ventilador tubular AEROFOIL FAN, Woods de 220 V el cual se acopló mediante una transición al ducto que contiene las 5 resistencias, de la misma manera se acopló una segunda transición para conectar el ducto que finalmente se conectará a la entrada de la zona de evaporización del intercambiador de calor de tubos pulsantes.

Figura 45

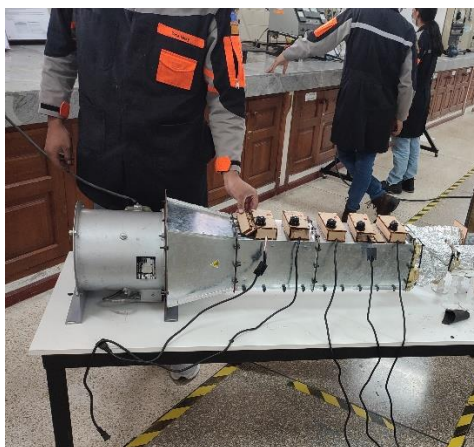
Conexión del ventilador tubular a los ductos mediante transiciones.



La última sección del ducto se cubrió toda su superficie con lana de vidrio para evitar pérdidas de calor y de esta manera mantener la temperatura del aire superior a los 100 °C en la entrada de la zona de evaporización y finalmente todo este sistema se montó sobre la mesa ya construida.

Figura 46

Fuente de calor de aire montado sobre la mesa.



Diseño, construcción y montaje de la fuente de aire frío.

Se construyó un ducto metálico de tol galvanizado y una transición de tol galvanizado con dimensiones que se puede ver en los planos del **Anexo 3**, mediante corte láser y doblado, los cuales fueron unido a una transición mediante juntas pernadas a un ventilador de álabes curvos adelantados LT-53 E de 110 V, como se puede observar en la **Figura 47**, el ducto será el que se conectara en la entrada de aire frío de la zona de evaporización del intercambiador de calor de tubos pulsantes.

Figura 47

Ventilador de álabes curvos adelantados LT-53 E conectado al ducto de entrada de aire frío.



Montaje y puesta a punto de todos los elementos del sistema

Se unió en serie los ductos de las fuentes de aire frío con el intercambiador de calor de tubos pulsantes y la fuente de aire caliente como se muestra en la **Figura 48**, mediante juntas empernadas colocando en medio de los ductos empaques (caucho y cartón prensado), formando un sellado hermético, para que de esta manera se garantice que no exista fugas de aire en las uniones empernadas, de la misma manera se conectó al intercambiador de calor el ducto de salida de aire frío y un ducto unido a una manga flexible de aluminio a la salida del aire caliente.

Figura 48

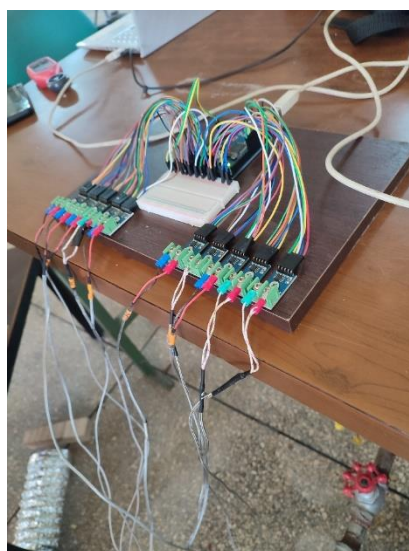
Fuentes de aire frío y caliente conectados a los ductos del ICTP.



Las termocuplas del intercambiador de calor de tubos pulsantes (6), de los ductos entrada y salida de aire frío (2) y aire caliente (2) se conectaron a la placa de adquisición de datos, la cual tomará datos de temperatura en cada una de las 10 termocuplas que fueron colocadas en el sistema, los datos se podrán visualizar mediante su interfaz y se los almacenará.

Figura 49

Placa de adquisición de datos con 10 entradas analógicas, conectadas en cada entrada una termocupla.



Para la verificación y puesta a punto de todos los elementos del sistema se realizó la prueba de funcionamiento del sistema, para esto se colocó 40,36 ml agua destilada (1/3 del volumen total de la configuración de los tubos pulsantes) dentro de cada una de las filas de los tubos de cobre y se encendió el ventilador de la fuente de aire caliente en conjunto con sus 5 resistencias y la fuente de aire frío, posteriormente se toma datos de velocidad y presión de aire dentro de los ductos de aire caliente y frío (ductos de entrada y salida), se conectó la placa de adquisición de datos al computador y de esta manera se comprobó que cada una de las entradas de la placa dio una señal de salida de temperatura correcta, alcanzando 145 °C en la

entrada y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (utilizando termómetro de cinta bimetalica) en la salida de aire caliente, tal como se puede observar en la **Figura 50**.

Figura 50

Termómetro de cinta bimetalica mostrando la temperatura de salida ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) del ducto de aire caliente.



Posteriormente se tomó el dato de la temperatura de salida del aire frío que en comparación a su entrada (temperatura ambiente $23\text{ }^{\circ}\text{C}$) se incrementó a una temperatura de $31,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, tal como se puede observar en la **Ver Figura 51**.

Figura 51

Temperatura de salida de aire frío ($31,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) medido con un termómetro digital.



Parámetros establecidos

Las variables establecidas que se tomarán en cuenta para la recolección de datos en los ensayos y posteriormente servirán para un análisis y comparación de resultados son la velocidad, temperatura, caudal y presión.

Lado caliente

- Velocidad y caudal de aire frío en la entrada será constante.
- Velocidad y caudal de aire frío en la salida será constante.

Lado frío

Velocidad y caudal de aire frío en la entrada será variable de 25%, 50%, 75% y 100% de caudal que pasa por el ducto controlado por una compuerta, como se muestra en la **Figura 52**.

Figura 52

Compuerta reguladora de caudal colocado en el ducto de entrada de aire frío.



Los datos recolectados se realizarán en la entrada y salida de aire frío y caliente, hasta llegar a una temperatura estable.

Datos recolectados

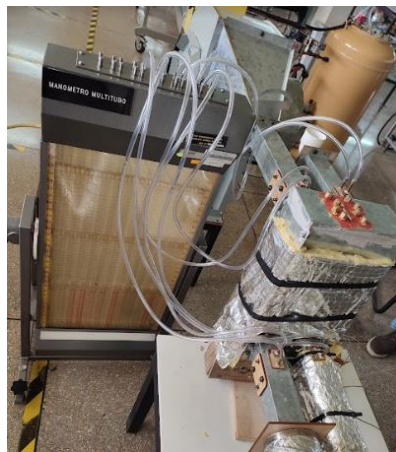
- Temperatura de entrada y salida de aire frío en los ductos.
- Temperatura en los 3 puntos establecidos de la zona de condensación.
- Temperatura en los 3 puntos establecidos de la zona de vaporización.
- Temperatura de entrada y salida de aire frío en los ductos.
- Presión estática y dinámica en los ductos de aire frío y caliente (entrada y salida).

Para ello se utilizó tubos Pitot, los cuales fueron colocados en los ductos de entrada y salida del aire frío (uno en cada ducto) y de la misma manera en los ductos de aire caliente, los cuales fueron conectados por medio de mangueras a un manómetro multitubos perteneciente al laboratorio de fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas como se muestra en la

Figura 53.

Figura 53

Manómetro multitubos (mide presión estática y dinámica) conectados a tubos Pitot por medio de mangueras flexibles transparentes.



Ensayos de funcionamiento

Se tomó en cuenta los parámetros establecidos anteriormente y se verificó que los datos de las 10 termocuplas adquiridos mediante la placa de adquisición de datos y conectado a un computador sean los correctos y no exista ninguna interferencia.

Se introdujo agua destilada (10 ml) mediante una jeringuilla en las cuatro filas de tubos pulsantes y se cubrió con teflón la rosca del accesorio tipo T para posteriormente colocar las tapas y así evitar que existan fugas del fluido durante los ensayos.

Figura 54

Colocación del fluido en los tubos pulsantes y sellado para realizar los ensayos.



Figura 55

Intercambiador de calor de tubos pulsantes acoplado a las fuentes de aire frío y caliente, conectado a los instrumentos de medición y adquisición de datos.



Preparación de los nanofluidos

Se realiza el siguiente cálculo para determinar el peso en porcentaje (%w) de todas las nanopartículas que se utilizarán en el ensayo (Al_2O_3 , CuO , Fe_3O_4 y NTC), para concentraciones del 0,1%, 0,5% y 1,5% que se mezclara con el fluido base (agua destilada y etilenglicol al 5%), para formar el nanofluido.

Utilizando la tercera parte del volumen total de una fila de tubos pulsante. Con el dato inicial de 10,09 gr (tercera parte del peso total contenido en una fila de tubos) se tiene:

Concentración al 0,1%

$$10,09 \text{ gr} \text{ ---> } 100 \%$$

$$X \text{ ---> } 0,1 \%$$

$$X = \frac{10,09 \text{ gr} \times 0,1\%}{100\%} = 0,01 \text{ gr}$$

$$\%w = 0,01 \text{ gr} * 4 \text{ (filas de tubos)} = 0,04 \text{ gr}$$

Para la concentración al 0,1% se obtiene 0,01 gr para una fila de tubos y 0,04 gr que se necesita para las 4 filas de tubos.

Concentración al 0,5%

$$10,09 \text{ gr} \text{ ---} \rightarrow 100 \%$$

$$X \text{ ---} \rightarrow 0,5 \%$$

$$X = \frac{10,09 \text{ gr} \times 0,5\%}{100\%} = 0,05 \text{ gr}$$

$$\%w = 0,05 \text{ gr} * 4 \text{ (filas de tubos)} = 0,20 \text{ gr}$$

Para la concentración al 0,5% se obtiene 0,05 gr para una fila de tubos y 0,20 gr que se necesita para las 4 filas de tubos.

Concentración al 1,5%

$$10,09 \text{ gr} \text{ ---} \rightarrow 100 \%$$

$$X \text{ ---} \rightarrow 1,5 \%$$

$$X = \frac{10,09 \text{ gr} \times 1,5\%}{100\%} = 0,15 \text{ gr}$$

$$\%w = 0,15 \text{ gr} * 4 \text{ (filas de tubos)} = 0,60 \text{ gr}$$

Para la concentración al 1,5% se obtiene 0,15 gr para una fila de tubos y 0,60 gr que se necesita para las 4 filas de tubos.

El fluido base contiene etilenglicol en una concentración al 5% que actúa como medio dispersante de las nanopartículas, calculado de la siguiente manera:

$$10,09 \text{ g} \text{ ---} \rightarrow 100 \%$$

$$X \text{ ---} \rightarrow 5 \%$$

$$X = \frac{10,09 \text{ gr} \times 5\%}{100\%} = 0,504 \text{ gr}$$

$$\%w = 0,504 \text{ gr} * 4 \text{ (filas de tubos)} = 2,01 \text{ gr}$$

Para una concentración del 5% se obtiene 0,50 gr para una fila de tubos y 2,01 gr que se necesita para las 4 filas de tubos de etilenglicol.

Cuando ya se tiene los datos calculados en porcentaje de peso de las nanopartículas y el etilenglicol necesarios se procede a preparar la mezcla y formar el nanofluido.

Preparación del nanofluido

Con el dato inicial de 10,09 gr se multiplica por las cuatro filas de tubos pulsantes y se obtiene un total de 40,36 gr de agua destilada a ser utilizada.

Para realizar la mezcla y formar el nanofluido se tiene que restar el porcentaje en peso de nanopartículas en las tres concentraciones (0,1%, 0,5%, 1,5%), y etilenglicol del total del agua destilada de la siguiente manera:

$$\text{Agua destilada}_{\text{Base}} = W_{(\text{Agua destilada})} - W\%_{\text{Nanopartícula}} - W\%_{\text{Etilenglicol}}$$

Ejemplo cálculo del agua destilada base para una concentración al 0,1 % de nanopartículas

$$\text{Agua destilada}_{\text{Base}} = 40,36\text{gr} - 0,04\text{gr} - 2,01\text{gr}$$

$$\text{Agua destilada}_{(\text{Base al } 0,1 \%)} = 38,31 \text{ gr}$$

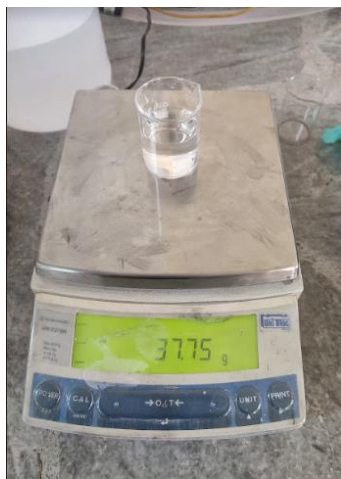
De la misma manera se obtiene los datos para una concentración de 0,5% y 1,5%:

$$\text{Agua destilada}_{(\text{Base al } 0,5 \%)} = 38,15 \text{ gr}$$

$$\text{Agua destilada}_{(\text{Base al } 1,5 \%)} = 37,75 \text{ gr}$$

Figura 56

Pesaje de 37,75 gr de agua destilada para una concentración de 1,5%.

**Figura 57**

Adición de 2,01 gr de etilenglicol al agua destilada para formar el fluido base.

**Figura 58**

Pesaje de 0,60 gr de nanopartículas (Nanotubos de Carbono - NTC) para una concentración al 1,5%.



Mezcla de los elementos que componen el nanofluido

Una vez pesado el fluido base y las nanopartículas para los tres tipos de concentraciones, se procede a mezclar los dos elementos y formar el nanofluido (fluido base + nanopartículas), para tener una mezcla homogénea se coloca el recipiente con la mezcla en un agitador magnético denominado Magnetic Stirrer perteneciente al laboratorio de fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas, calibrando el equipo a una temperatura de 40 °C y una velocidad de rotación de 600 r.p.m. por un tiempo estimado de una hora.

Figura 59

Agitación de la mezcla del fluido base y nanopartículas (Nanotubos de Carbono - NTC).



Agitación mediante ultrasonido

Una vez finalizada la agitación magnética, la mezcla se envasa herméticamente y se coloca dentro de la máquina Ultrasonic Cleaners perteneciente al laboratorio de fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas y se calibra este equipo a una temperatura de 50 °C, como se muestra en la **Figura 60**, se lo enciende por un tiempo estimado de una hora para realizar una agitación mediante ultrasonido y de esta manera se garantiza que el nanofluido se mantendrá homogéneo durante los ensayos.

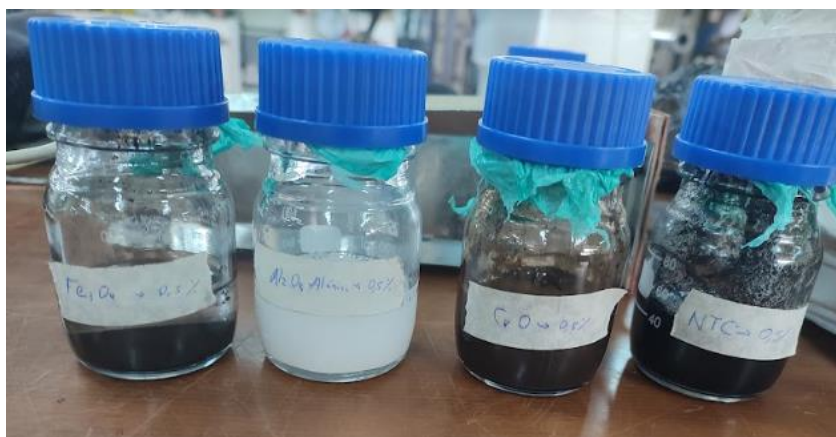
Figura 60

Equipo Ultrasonic Cleaners.



Figura 61

Nanofluidos preparados a una concentración al 0,5% en peso.



Procedimiento para el uso de los equipos que conforman el sistema

1. Acoplamiento de los ductos de entrada de la fuente de aire caliente y frío a los ductos de entrada del intercambiador de calor de tubos pulsantes.
2. Acoplamiento de los ductos de salida de aire caliente y frío a los del intercambiador de calor de tubos pulsantes.
3. Conexión de terminales de las termocuplas a la placa de adquisición de datos, la conexión de esta placa se realiza por medio del cable del Arduino al computador.
4. Conexión de los tubos Pitot al manómetro multitubos mediante mangueras flexibles.
5. Colocación de $10,09 \text{ cm}^3$ de nanofluido en cada una de las cuatro filas de tubos serpenteantes.
6. Colocación de teflón en la superficie de la rosca de los 8 accesorios tipo T, para la colocación de las tapas.
7. Encender el ventilador de la fuente de aire caliente.
8. Encender de manera sucesiva las 5 resistencias de la fuente de aire caliente y esperar que llegue a una temperatura estable, en un tiempo estimado de 20 minutos.
9. Encender el ventilador de la fuente de aire frío y esperar a que llegue a una temperatura estable, en un tiempo estimado de 10 minutos.
10. Toma de medidas de la velocidad del aire en los ductos de aire caliente y frío (entrada y salida) mediante un anemómetro.
11. Toma de medidas de la presión estática y dinámica en los ductos de aire caliente y frío (entrada y salida) mostradas en el manómetro multitubos.
12. Recolección de datos de temperatura en las termocuplas obtenidos mediante la placa de adquisición de datos.
13. Mover la compuerta ubicada en la entrada de aire frío para variar el caudal (25%, 50%, 75% y 100%).

14. Esperar un tiempo estimado de 10 minutos que se estabilice nuevamente la temperatura y repetir los pasos 10, 11, 12 y 13.
15. Apagar las 5 resistencias de la fuente de aire caliente.
16. Apagar los ventiladores 5 minutos después de apagar todas las resistencias para que la temperatura en el sistema baje.
17. Desmontar el intercambiador de calor de tubos pulsantes.
18. Realizar un vaciado de los nanofluidos que están dentro de la tubería de cobre mediante aire comprimido para una limpieza adecuada.

Ejemplo de tablas que se utilizarán para la toma de datos en la experimentación.

Tabla 5

Tabla de adquisición de datos de presiones.

Nanopartícula:										
MANÓMETRO MULTITUBO										
APERTURA	DUCTOS DE AIRE CALIENTE				APERTURA	DUCTOS DE AIRE FRÍO				HORA [hh:mm]
	ENTRADA		SALIDA			ENTRADA		SALIDA		
	ESTÁTICA [mm]	DINÁMICA [mm]	ESTÁTICA [mm]	DINÁMICA [mm]		ESTÁTICA [mm]	DINÁMICA [mm]	ESTÁTICA [mm]	DINÁMICA [mm]	
100%					25%					
100%					50%					
100%					75%					
100%					100%					

Nota. Elaboración propia.

Tabla 6

Tabla de valores para velocidad del aire en los ductos.

Nanopartícula:						
VELOCIDAD (m/s)						
CALIENTE			FRÍO			HORA
APRETURA	ENTRADA	SALIDA	APRETURA	ENTRADA	SALIDA	
100%			25%			_____
100%			50%			_____
100%			75%			_____
100%			100%			_____

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7

Tabla para valores de temperatura del aire, adquiridos por termocuplas.

Nanopartícula:												
TEMPERATURAS DE TERMOCUPLAS												
APERTURA	AIRE CALIENTE					APERTURA	AIRE FRÍO					HORA [hh:mm]
	D. de Entrada	D. de Salida	Zona de evaporación				Zona de condensación			D. de Entrada	D. de Salida	
T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]	T9 [°C]	T10 [°C]			
100%					25%						_____	
100%					50%						_____	
100%					75%						_____	
100%					100%						_____	

Nota. Elaboración propia.

Capítulo IV: Experimentación

Análisis de transferencia de calor

En las gráficas presentadas en este capítulo se puede apreciar mediante curvas de tendencia el calor transferido que se produce desde el fluido en la zona de evaporación (lado de aire caliente) hacia el fluido en la zona de condensación (lado de aire frío) y comienza cuando los diferentes nanofluidos caloportadores contenidos dentro de los tubos pulsantes llegan al punto de ebullición y comienza el proceso (evaporación – condensación) de circular al interior de la configuración de tubos pulsantes que forma parte del intercambiador de calor, con 4 caudales diferentes de aire en la zona de condensación.

Con el uso de hojas de cálculo del software Excel se diseñó una plantilla para cada nanofluido utilizado en los ensayos, en la cual contiene las fórmulas presentadas en el capítulo 3 para poder analizar el calor transferido y la eficiencia térmica en el equipo con todos los nanofluidos en sus diferentes condiciones, de esta manera se obtiene:

Al emplear la **Ec. N° 15** permite lograr la velocidad máxima, considerando los parámetros de configuración S_T , S_L y S_D , además se utiliza la **Ec. N° 22**. Mediante los valores recolectados en la **Tabla 7** y la **Tabla 6** de velocidades correspondientes al capítulo 3 y a través del proceso de interpolación se consiguen las propiedades termofísicas. Empleando la **Ec. N° 13** se logra cuantificar el número de Reynolds máximo.

Coeficiente de convección (h) y resistencia térmica

Con los resultados de la **Ec. N° 22** y **Ec. N° 13** junto a las propiedades termofísicas (T_m), se realiza el cálculo de sus condiciones para determinar el número de Nusselt, en la **Figura 10** se puede observar que la ecuación que cumple con nuestras características es la **Ec. N° 21** del Dr. Zukauskas y los valores que son constantes que tiene relación se consiguen de la **Figura 11**, de esta manera se obtiene el número de Nusselt que permite calcular el coeficiente de convección.

Se utiliza el valor obtenido de la **Ec. N° 21** para calcular las resistencias térmicas, aplicando la **Ec. N° 28** se calcula la resistencia de convección, además, se emplea la **Ec. N° 11** para obtener el resultado de la resistencia a la conducción de la pared de los tubos de cobre, de esta manera se emplea las **Ec. N° 26** y **Ec. N° 27** para **determinar el resultado** de la resistencia total del HPHE.

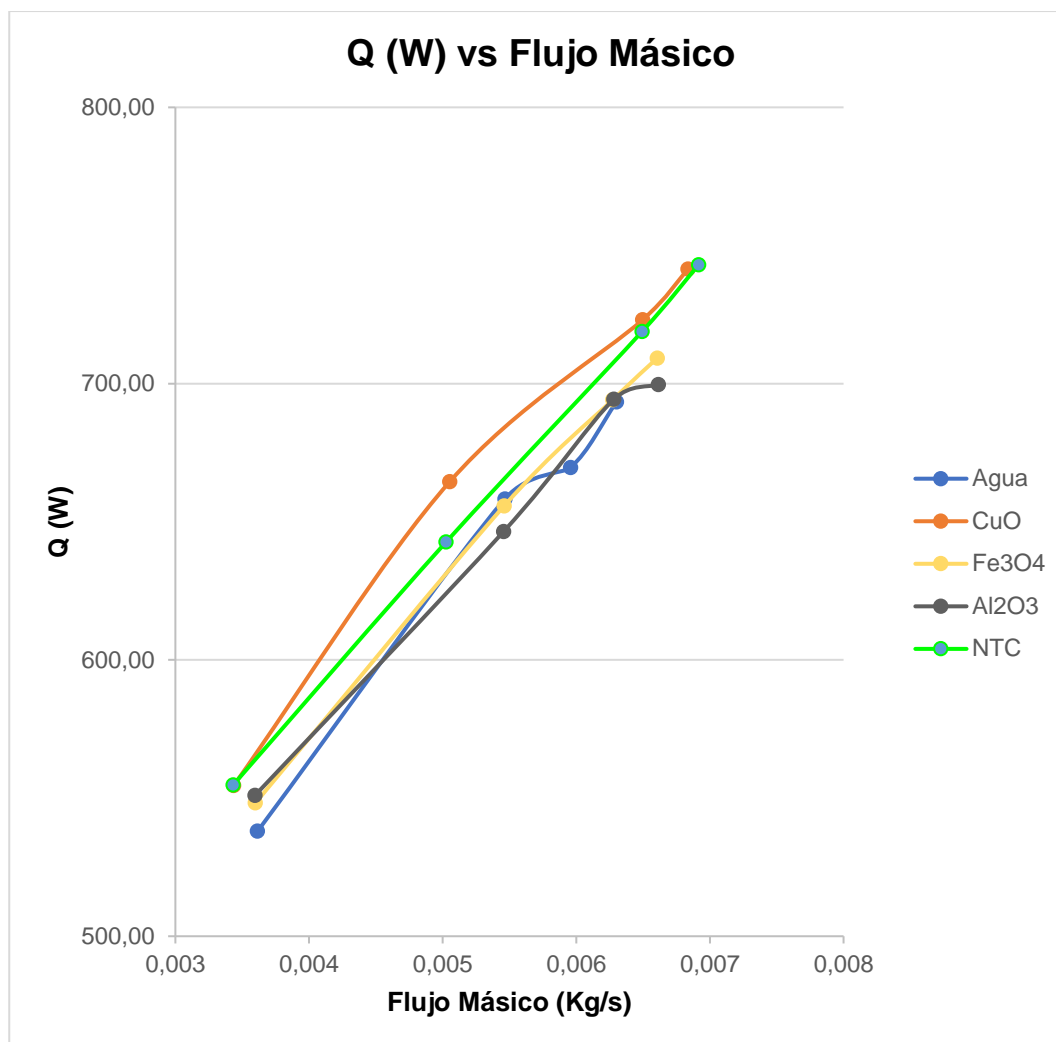
Se calcula la temperatura media logarítmica, aplicando la **Ec. N° 24** junto a los valores de temperatura que se encuentran en la **Tabla 7**, ya que es fundamental para los siguientes cálculos.

El ejemplo de los valores obtenidos en este proceso se puede evidenciar en el **Anexo 7**.

Análisis individual de transferencia de calor por nanofluido en diferentes concentraciones.

Figura 62

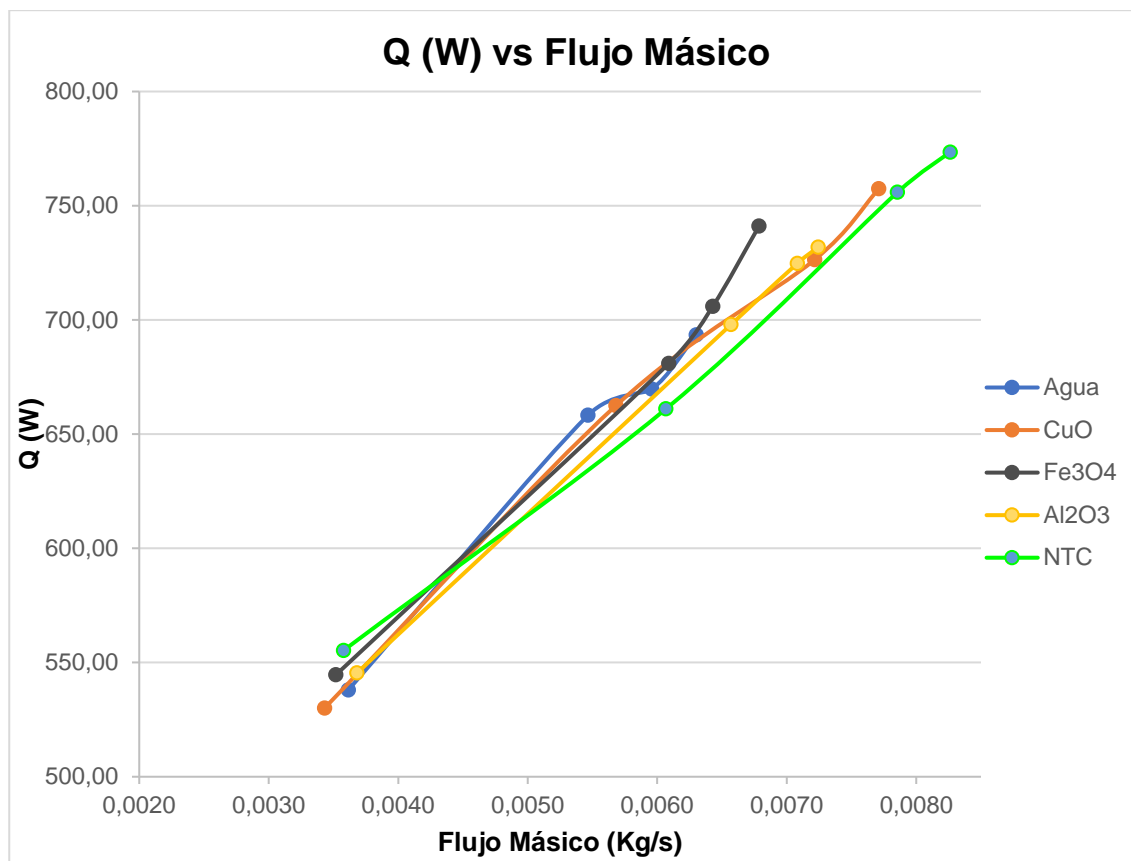
Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico intercambiador de calor utilizando los diferentes nanofluidos en una concentración al 0,1%.



En la **Figura 62**, se observa las diferentes curvas de tendencia y la manera que cambia el calor transferido en el intercambiador de calor cuando se utiliza agua destilada y los 4 nanofluidos que están al 0,1% de concentración en los diferentes flujos másicos, de esta manera se obtiene como resultado un mayor valor del calor transferido en los nanotubos de carbono (NTC) con 739,94 W que representa un incremento del 6,68% en comparación al agua destilada que tiene como resultado un calor transferido de 693,43 W; 5,84% más en comparación al Al₂O₃ con un valor de 699,65 W; 4,55% más en comparación al Fe₃O₄ con un valor de 699,65 W; 0,22% más en comparación al CuO con un valor de 699,65 W.

Figura 63

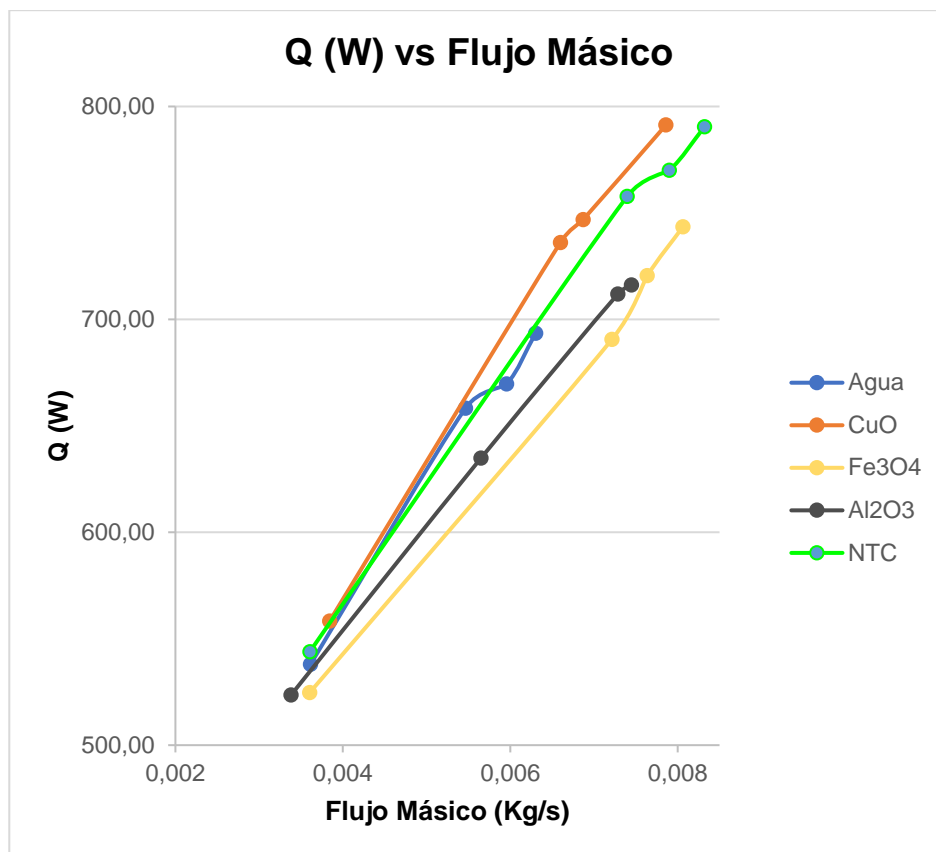
Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico en los diferentes nanofluidos en una concentración al 0,5%.



En la **Figura 63**, se observa las diferentes curvas de tendencia y la manera que cambia el calor transferido en el agua destilada y los 4 nanofluidos que están al 0,5% de concentración en los diferentes flujos másicos, de esta manera se obtiene como resultado un mejor calor transferido en los nanotubos de carbono (NTC) con 773,48 W que representa un incremento del 10,35% en comparación al agua destilada que tiene como resultado un calor transferido de 693,43 W; 5,38% más en comparación al Al₂O₃ con un valor de 731,85 W; 4,18% más en comparación al Fe₃O₄ con un valor de 741,13 W; 2,07% más en comparación al CuO con un valor de 757,45 W.

Figura 64

Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico en los diferentes nanofluidos en una concentración al 1,5%.

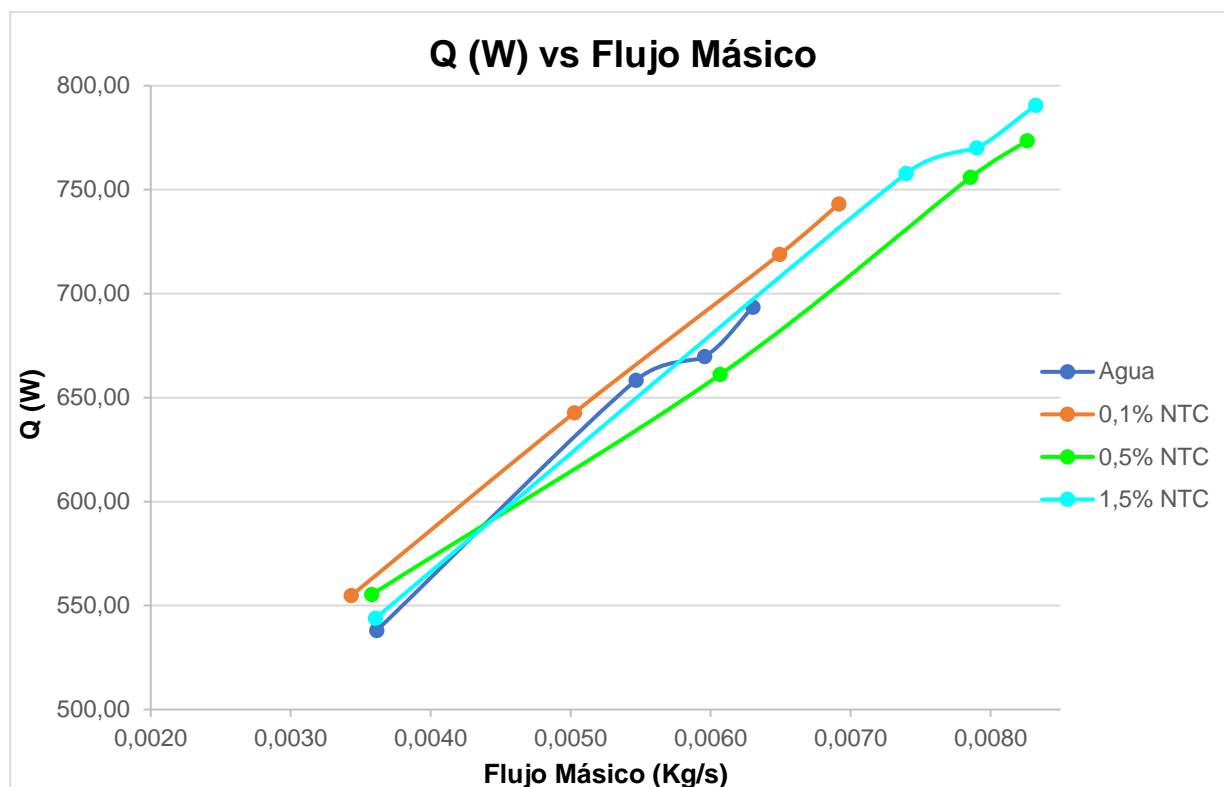


En la **Figura 64**, se observa las diferentes curvas de tendencia y la manera que cambia el calor transferido en el agua destilada y los 4 nanofluidos que están al 1,5% de concentración en los diferentes flujos másicos, de esta manera se obtiene como resultado un mejor calor transferido en el nanofluido de CuO con 791,29 W que representa un incremento del 12,37% en comparación al agua destilada que tiene como resultado un calor transferido de 693,43 W; 9,5% más en comparación al Al₂O₃ con un valor de 716,15 W; 6,05% más en comparación al Fe₃O₄ con un valor de 743,45 W; 0,009% más en comparación al CuO con un valor de 790,51.

Análisis global de transferencia de calor para agua destilada y nanofluidos en diferentes concentraciones.

Figura 65

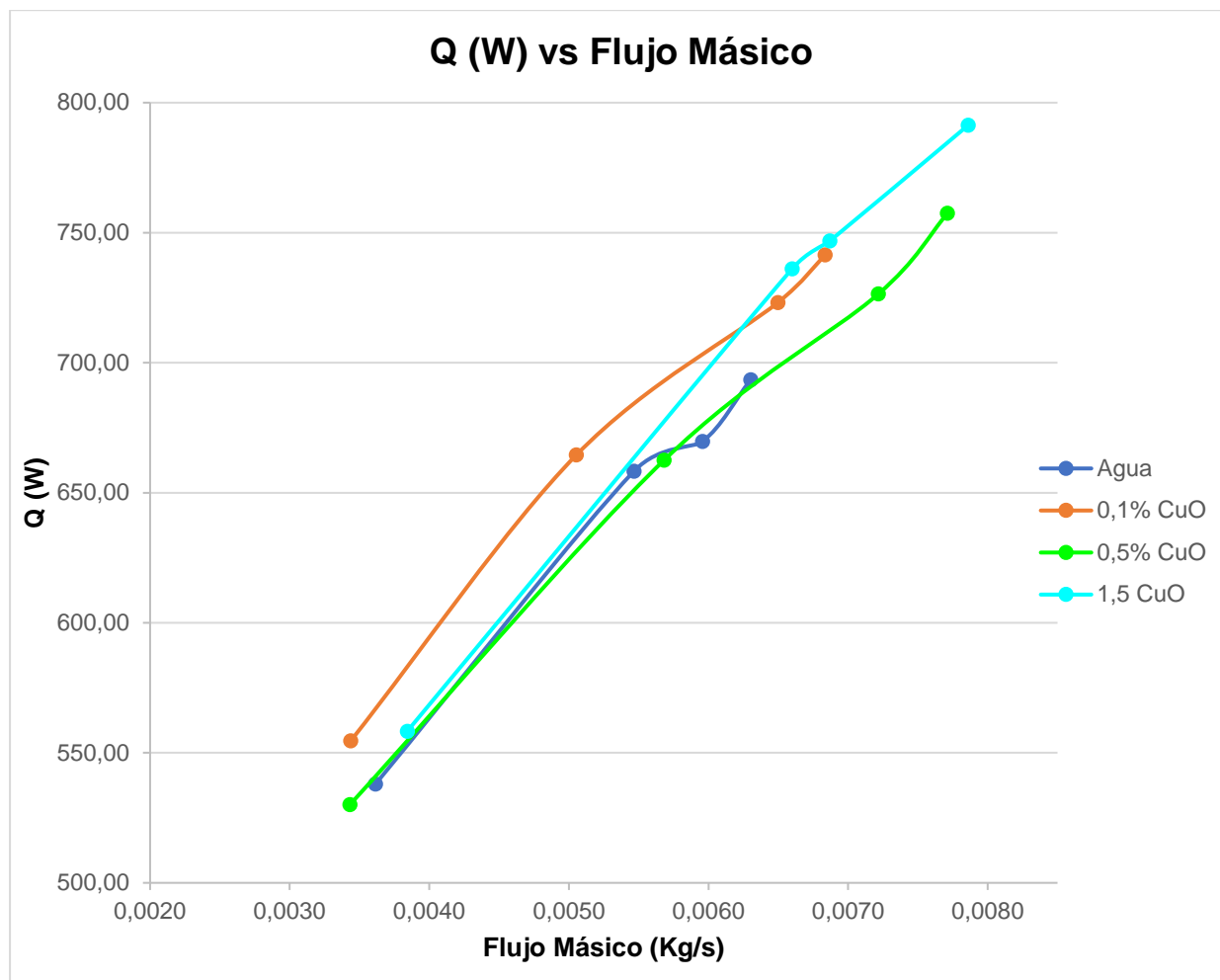
Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico del intercambiador de calor cuando se utiliza agua destilada y nanofluido de NTC en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.



En la **Figura 65**, se puede determinar que a medida que se aumenta las concentraciones (0,1%, 0,5%, 1,5%) en el nanofluido de NTC de la misma manera aumenta el calor transferido, obteniendo como resultado un valor máximo de 790,51 W en la concentración al 1,5% de nanotubos de carbono que representa un incremento del 12,28% en comparación al agua destilada que tiene como resultado un calor transferido de 693,43 W; 6% más en comparación a 743,08 W de la concentración al 0,1% nanotubos de carbono; 2,15% más en comparación a 773,48 W de la concentración al 0,5% nanotubos de carbono.

Figura 66

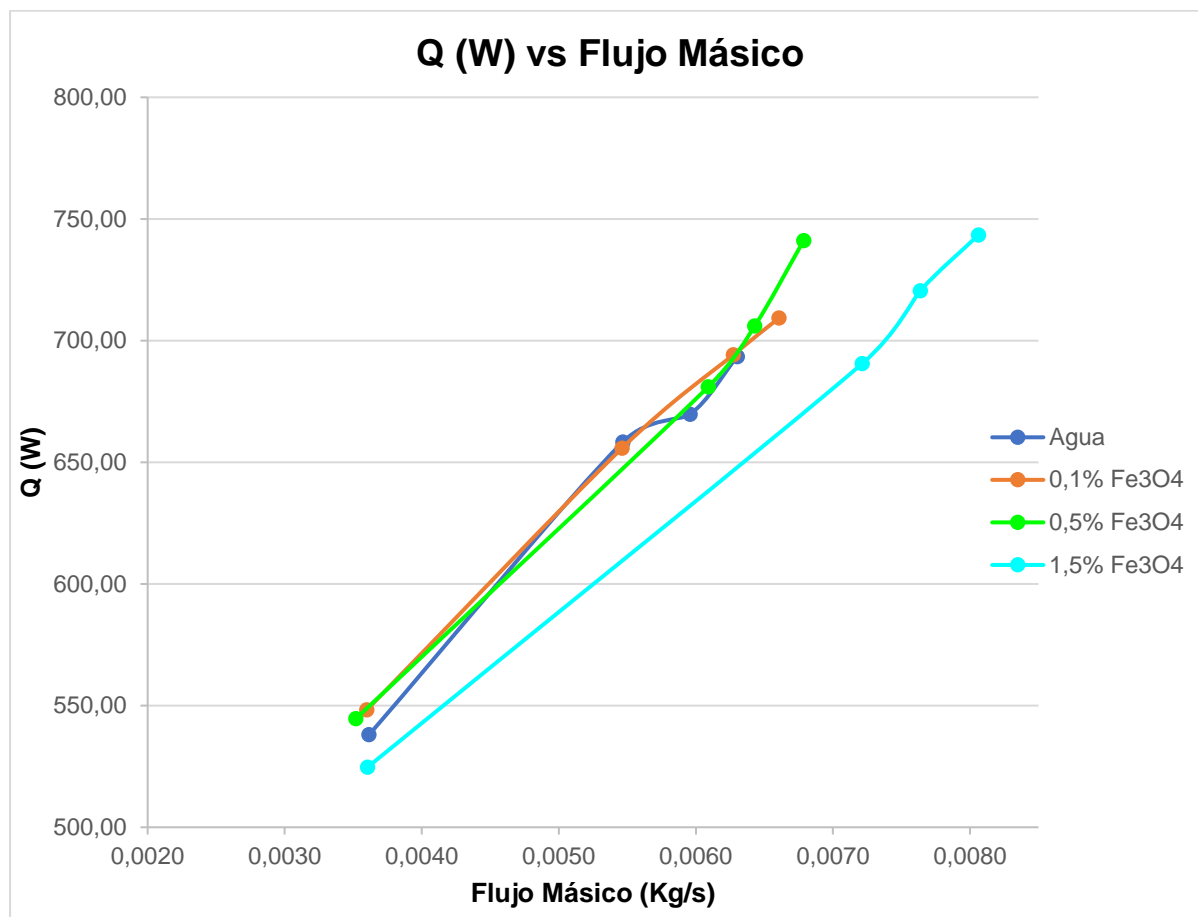
Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico en el agua destilada y nanofluido de nanopartículas de CuO en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.



En la **Figura 66**, se puede determinar que a medida que se aumenta las concentraciones (0,1%, 0,5%, 1,5%) en el nanofluido formado por nanopartículas de CuO de la misma manera aumenta el calor transferido, obteniendo como resultado un valor máximo de 791,29 W en la concentración al 1,5% de CuO que representa un incremento del 12,37% en comparación al agua destilada que tiene como resultado un calor transferido del 693,43 W; 6,30% más en comparación a 741,45 W de la concentración al 0,1% CuO; 4,28% más en comparación a 757,45 W de la concentración al 0,5% CuO.

Figura 67

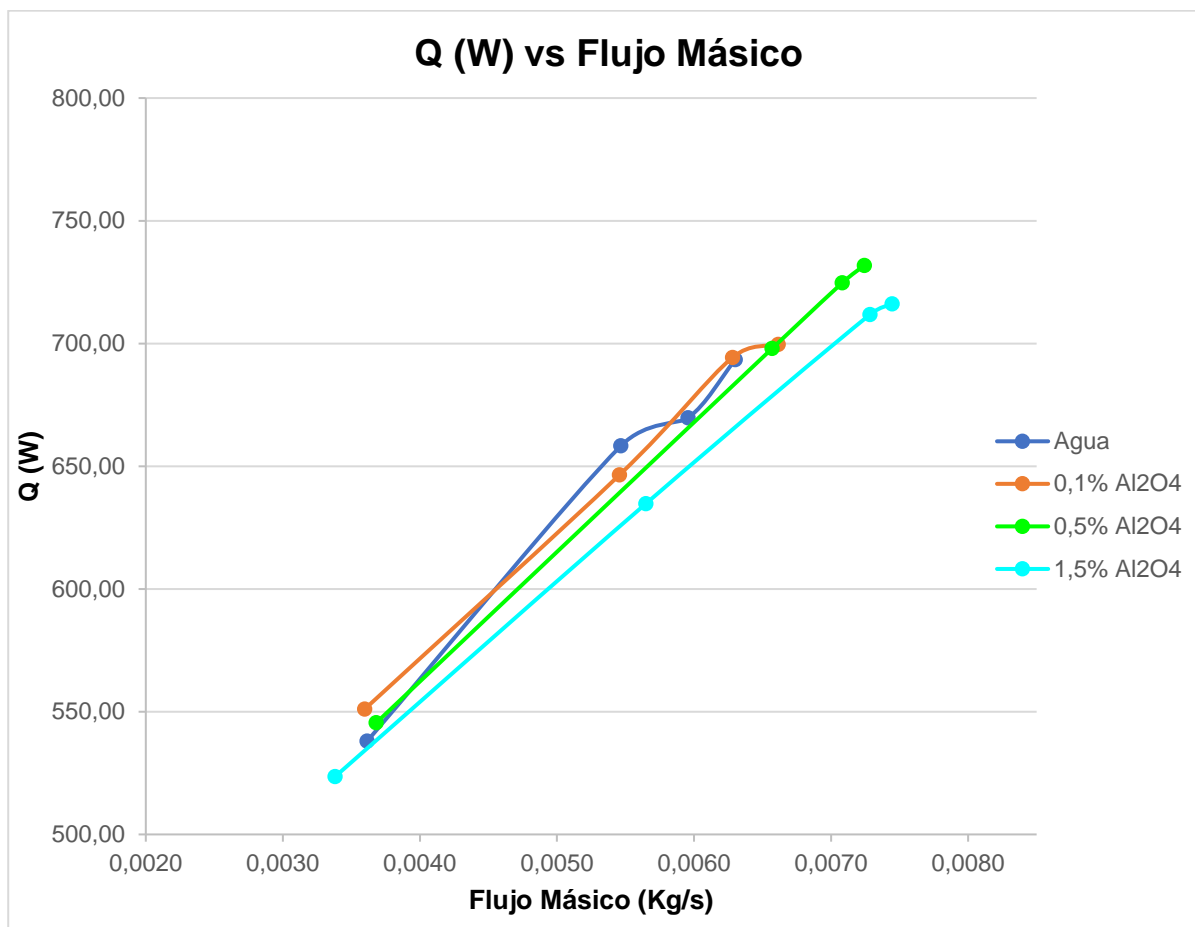
Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico del intercambiador de calor cuando se utiliza agua destilada y nanofluido de nanopartículas de Fe_3O_4 en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.



En la **Figura 67**, se puede determinar que a medida que se aumenta las concentraciones (0,1%, 0,5%, 1,5%) en el nanofluido formado por nanopartículas de Fe_3O_4 de la misma manera aumenta el calor transferido, obteniendo como resultado un valor máximo de 743,45 W en la concentración al 1,5% de Fe_3O_4 que representa un incremento del 6,37% en comparación al agua destilada que tiene como resultado un calor transferido de 693,43 W; 4,60% más en comparación a 709,26 W de la concentración al 0,1% Fe_3O_4 ; 0,31% más en comparación a 741,13 W de la concentración al 0,5% Fe_3O_4 .

Figura 68

Curvas de tendencia de calor trasferido Q (W) vs Flujo Másico del intercambiador de calor cuando se utiliza agua destilada y nanofluido de nanopartículas de Al_2O_3 en una concentración al 0,1%, 0,5% y 1,5%.



En la **Figura 68**, se puede determinar que a medida que se aumenta las concentraciones (0,1%, 0,5%, 1,5%) en el nanofluido formado por nanopartículas de Al_2O_3 de la misma manera aumenta el calor transferido, obteniendo como resultado un valor máximo de 731,85 W en la concentración al 0,5% de Al_2O_3 que representa un incremento del 5,25% en comparación al agua destilada que tiene como resultado un calor transferido de 693,43 W; 4,40% más en comparación a 699,65 W de la concentración al 0,1% Al_2O_3 ; 2,15% más en comparación a 716,15 W de la concentración al 1,5% Al_2O_3 .

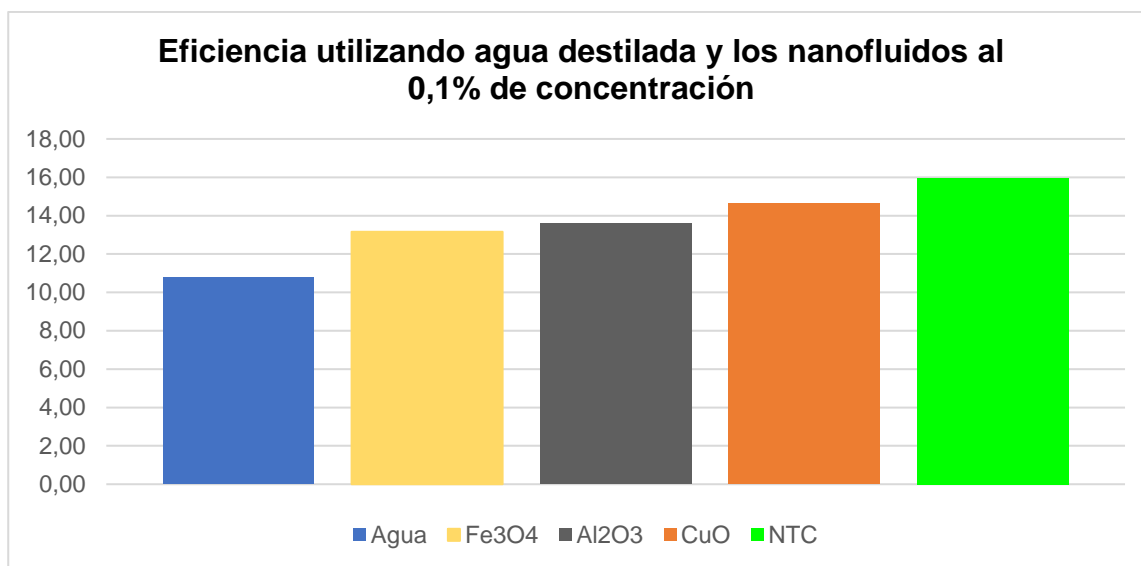
Eficiencia térmica

A continuación, se presenta diferentes diagramas de barras que representan la eficiencia térmica del equipo cuando trabaja a diferentes caudales del fluido (aire frío), en la zona de condensación con el agua destilada y los cuatro nanofluidos en sus diferentes concentraciones.

Análisis global de la eficiencia del equipo con cada nanofluido en las diferentes concentraciones.

Figura 69

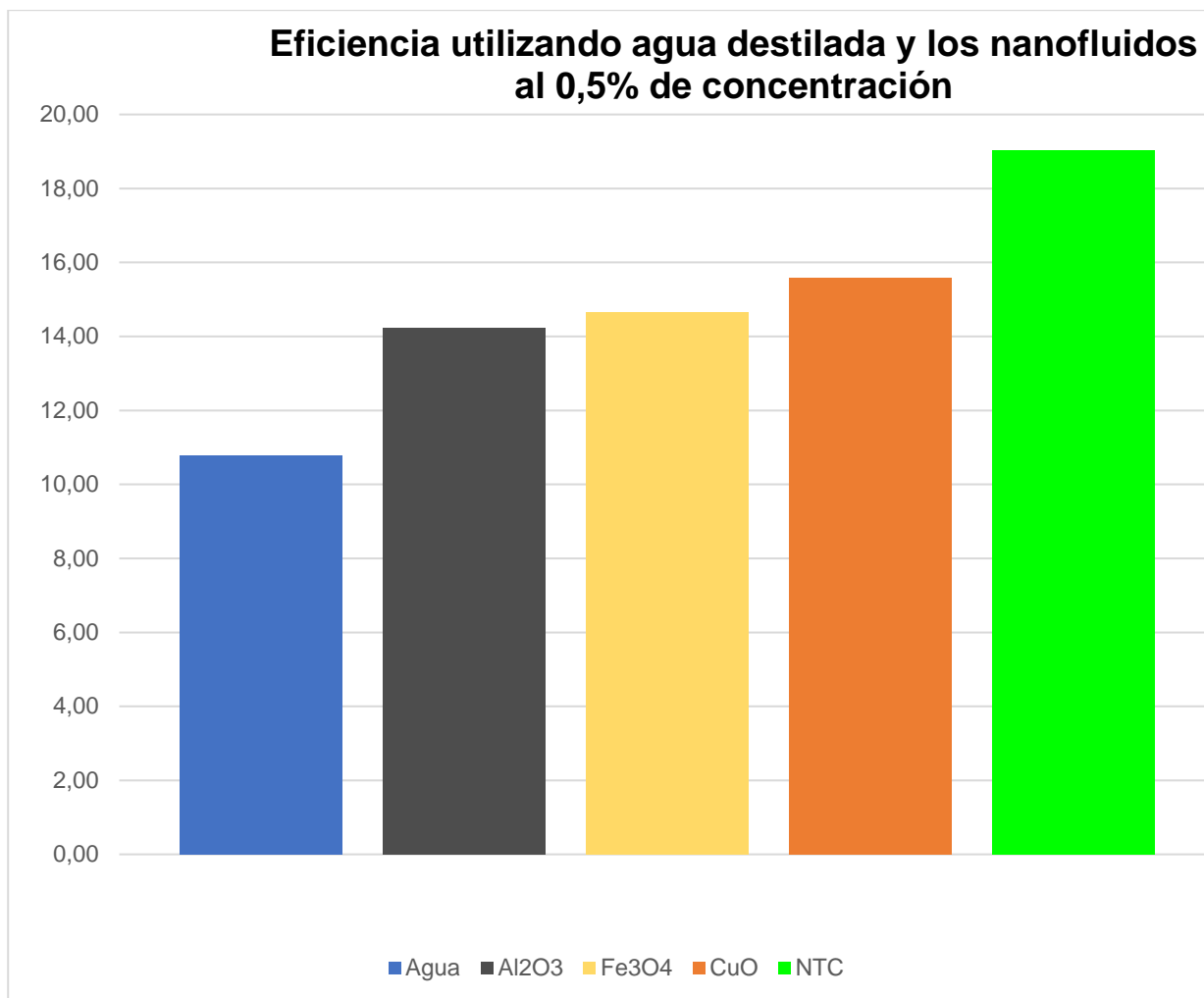
Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y los 4 nanofluidos en una concentración al 0,1%.



De la **Figura 69**, se observa que el equipo tiene una mayor eficiencia térmica cuando trabaja con el nanofluido de nanotubos de carbono con un valor del 15,97%, lo que representa un incremento del 32,55% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 17,63% más en comparación al Fe₃O₄ con una eficiencia del 13,13%; 14,91% más en comparación al Al₂O₃ con una eficiencia del 13,59%; 8,30% más en comparación al CuO con una eficiencia del 14,65%.

Figura 70

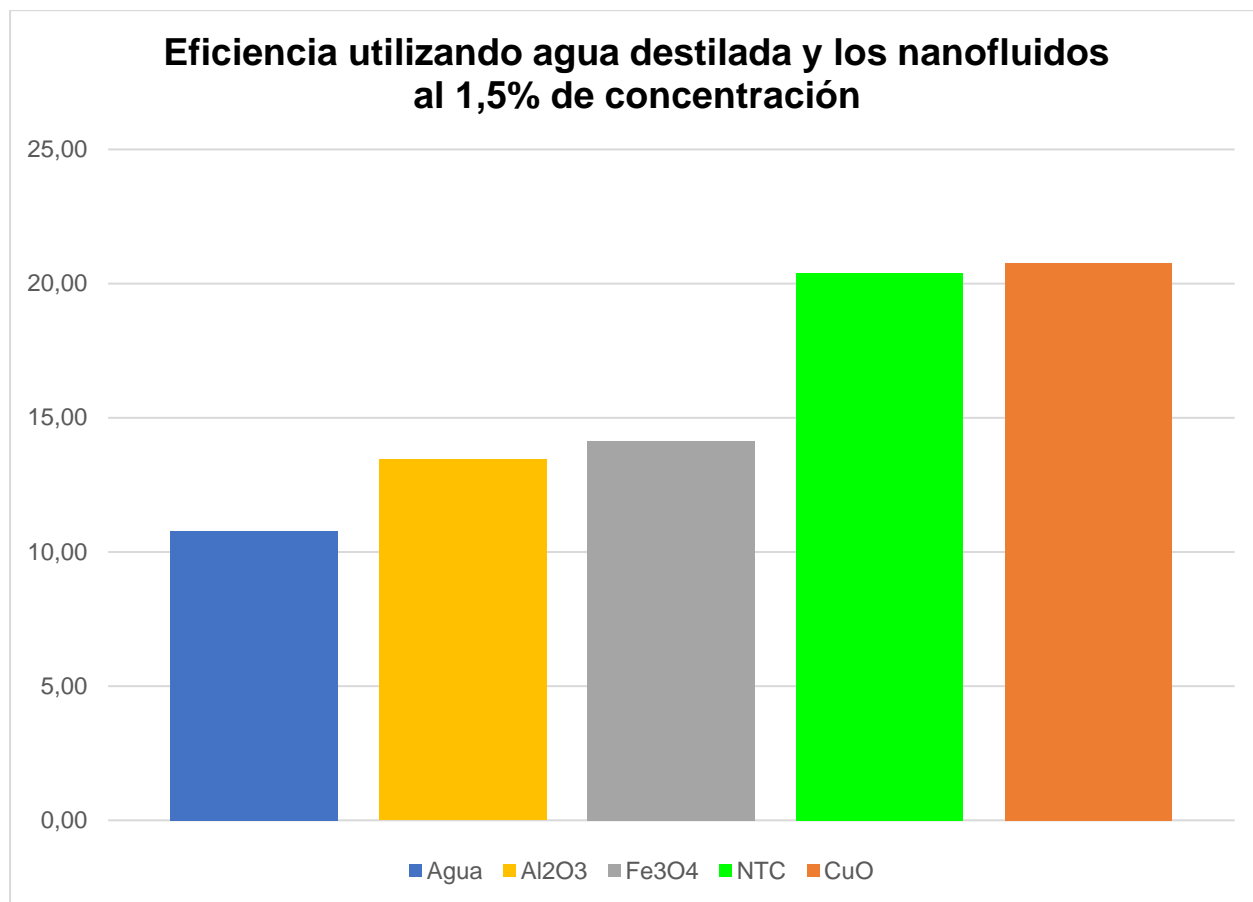
Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y los 4 nanofluidos en una concentración al 0,5%.



De la **Figura 70**, se observa que el equipo tiene una mayor eficiencia térmica cuando trabaja con el nanofluido de nanotubos de carbono con un valor de 19,05%, lo que representa un incremento del 43,43% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 25,25% más en comparación al Al₂O₃ con una eficiencia del 14,24%; 23% más en comparación al Fe₃O₄ con una eficiencia del 14,67%; 18,13% más en comparación al CuO con una eficiencia del 15,59%.

Figura 71

Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y los 4 nanofluidos en una concentración al 1,5%.

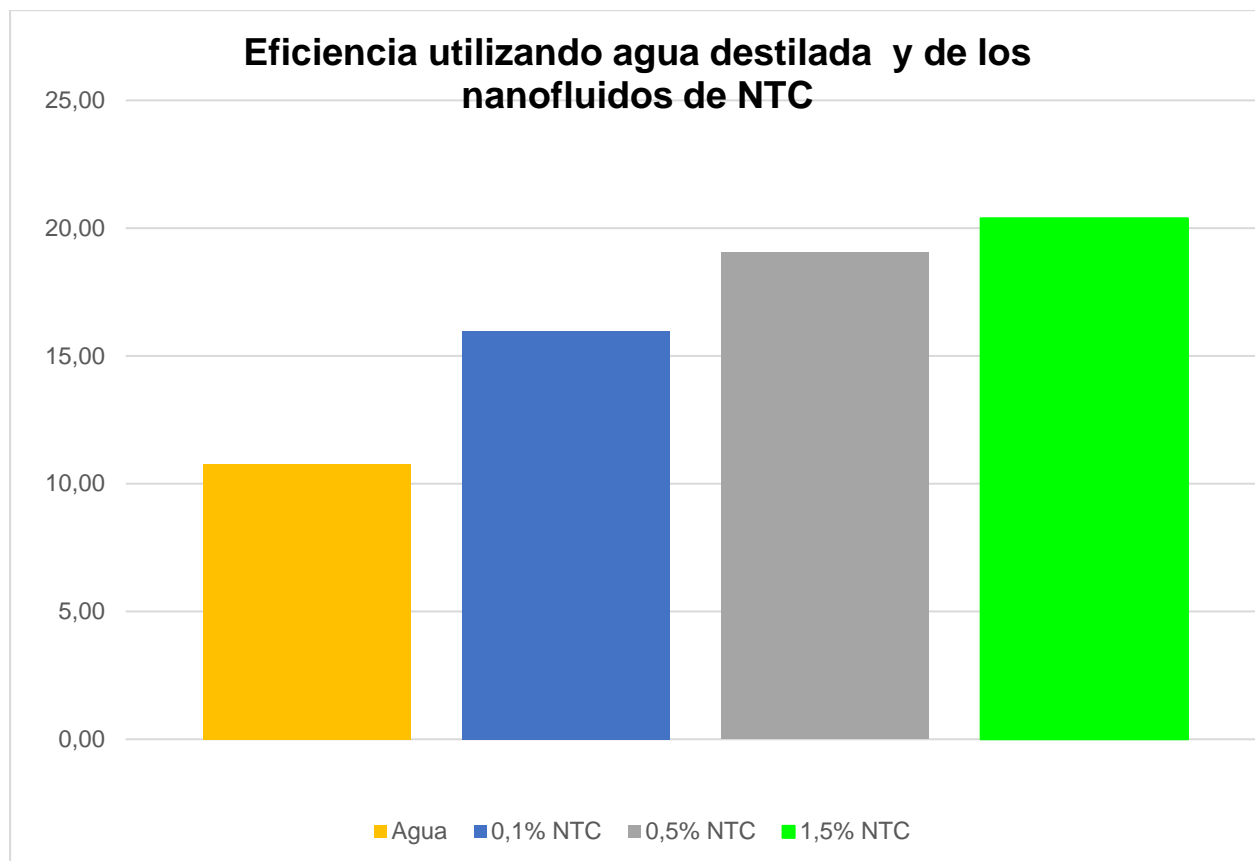


De la **Figura 71**, se observa que el equipo tiene una mayor eficiencia térmica cuando trabaja con el nanofluido de CuO con un valor de 20,78%, lo que representa un incremento del 48,14% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 35,28% más en comparación al Al₂O₃ con una eficiencia del 13,45%; 31,97% más en comparación al Fe₃O₄ con una eficiencia del 14,13%; 1,88% más en comparación a los nanotubos de carbono con una eficiencia del 20,39%.

Análisis individual de la eficiencia del equipo con nanofluidos en las diferentes concentraciones.

Figura 72

Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de NTC en sus 3 concentraciones.



De la **Figura 72**, se observa que el equipo tiene una tendencia a aumentar su eficiencia térmica a medida que aumentan la concentración de la nanopartícula de NTC y se determina que la eficiencia máxima se tiene cuando trabaja con una concentración del 1,5% llegando a una eficiencia del 20,39% lo que representa un incremento del 47,15% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 21,64% más en comparación a la eficiencia del 15,97% con una concentración del 0,1%; 6,57% más en comparación a la eficiencia del 19,05 con una concentración del 0,5%.

Figura 73

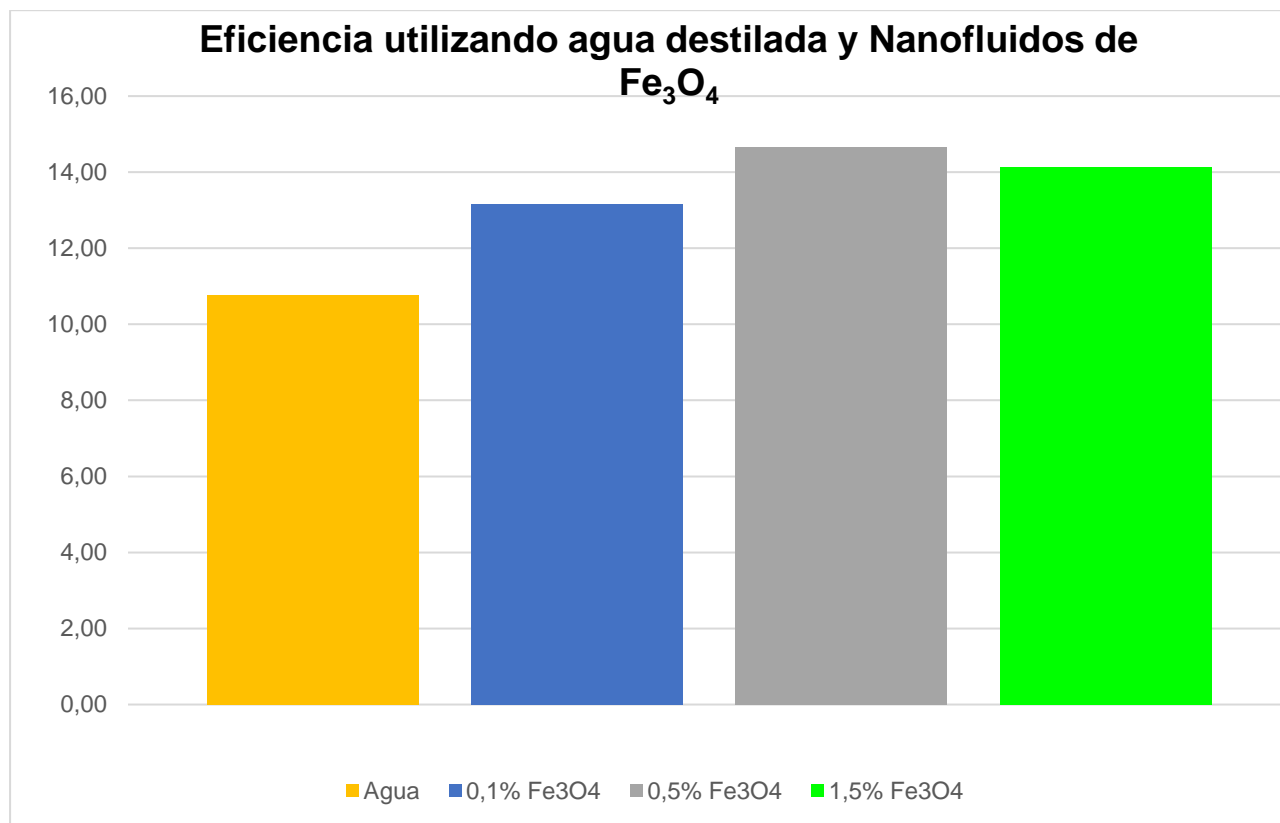
Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de CuO en sus 3 concentraciones.



De la **Figura 73**, se observa que el equipo tiene una tendencia a aumentar su eficiencia térmica a medida que aumentan la concentración de la nanopartícula de CuO y se determina que la eficiencia máxima se tiene cuando trabaja con una concentración del 1,5% llegando a una eficiencia del 20,79% lo que representa un incremento del 48,14% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 29,50% más en comparación a la eficiencia del 14,65% con una concentración del 0,1%; 24,95% más en comparación a la eficiencia del 15,59 con una concentración del 0,5%.

Figura 74

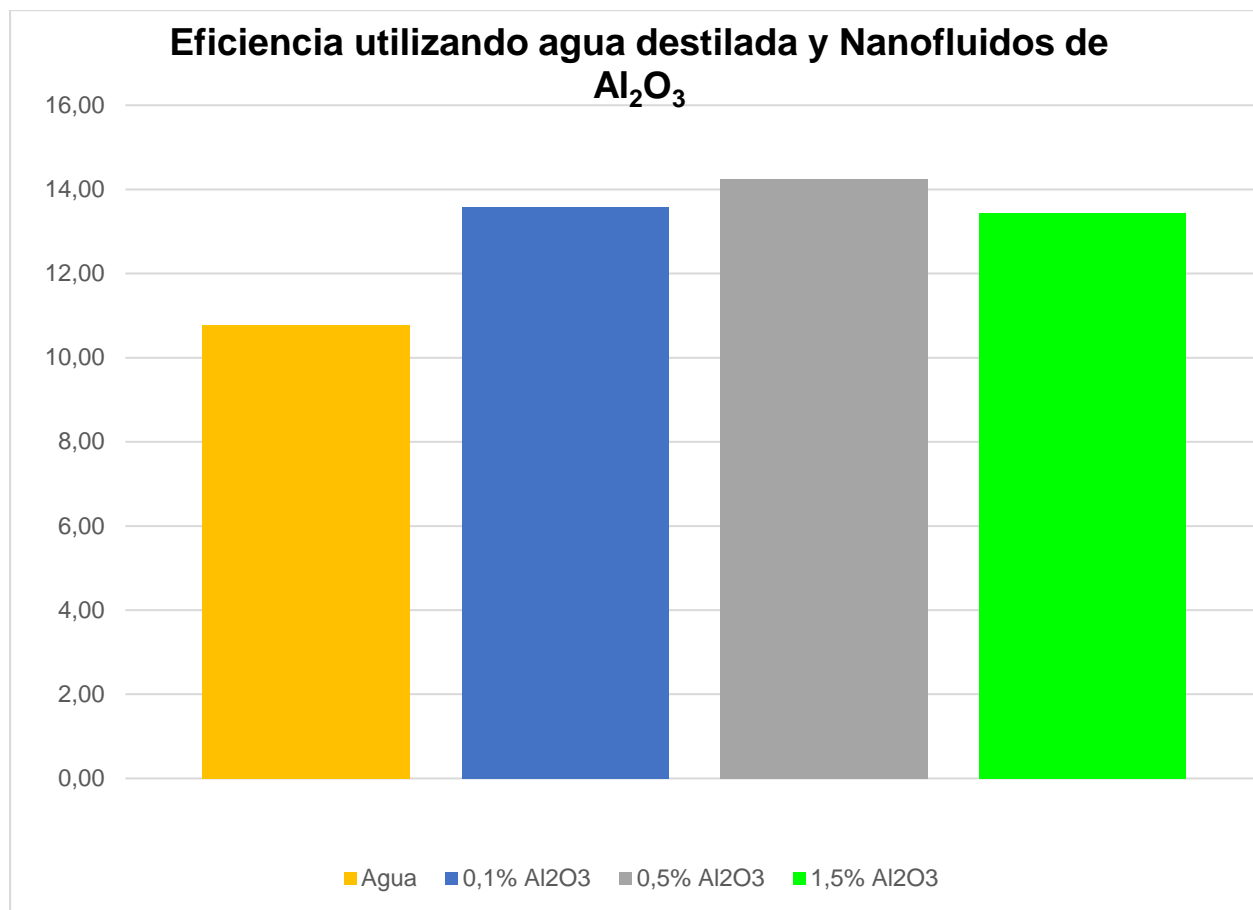
Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de Fe_3O_4 en sus 3 concentraciones.



De la **Figura 74**, se observa que el equipo tiene una tendencia a aumentar su eficiencia térmica a medida que aumentan la concentración de la nanopartícula de Fe_3O_4 y se determina que la eficiencia máxima se tiene cuando trabaja con una concentración del 0,5% llegando a una eficiencia del 14,13% lo que representa un incremento del 26,53% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 10,29% más en comparación a la eficiencia del 13,16% con una concentración del 0,1%; 3,62% más en comparación a la eficiencia del 14,13% con una concentración del 1,5%.

Figura 75

Histograma de eficiencia del equipo con agua destilada y el nanofluido de Al_2O_3 en sus 3 concentraciones.



De la **Figura 75**, se observa que el equipo aumenta su eficiencia térmica pero no es muy significativa la diferencia que existe entre las diferentes concentraciones de la nanopartícula de Al_2O_3 , de esta manera se obtiene que la eficiencia máxima se tiene cuando trabaja con una concentración del 0,5% llegando a una eficiencia del 14,24% lo que representa un incremento del 24,32% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 5,53% más en comparación a la eficiencia del 13,59% con una concentración del 0,1%; 4,53% más en comparación a la eficiencia del 13,45% con una concentración del 1,5%.

Capítulo V: Análisis Económico

Una vez que nuestro proyecto de titulación termino, se realizó un análisis financiero que permite puntualizar los valores directos o indirectos empleados para la finalización y ejecución del mismo. A continuación, la información se detalla en las siguientes tablas:

Costos indirectos

Tabla 8

Costos indirectos que intervinieron en el proyecto de titulación.

Número	Cargo	Valor
	Tiempo (Horas)	Total
1	Alimentación	\$ 60,00
2	Servicios básicos	\$ 40,00
3	Transporte	\$ 160,00
4	Materiales de oficina	\$ 25,00
5	Otros valores	\$ 60,00
Subtotal 1		\$ 345,00

Costos directos

Tabla 9

Costo de materiales.

Número	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Rollo Tubería de Cobre tipo Refrigeradora de ϕ 3/16" x 15 m	2	\$ 29,37	\$ 58,74
2	Accesorios tipo T de cobre ϕ 3/16"	8	\$ 1,45	\$ 11,60
3	Varilla de Plata (Ag) al 15%	2	\$ 4,50	\$ 9,00

Continúa en la siguiente página

4	Cinta Auto fundente 3M (Scotch)	1	\$ 12,00	\$ 12,00
5	Fundente para Plata (Ag)	1	\$ 2,00	\$ 2,00
6	Tela Teflón 1 m ²	1	\$ 8,00	\$ 8,00
7	Espuma de Poliuretano (Spray)	1	\$ 7,50	\$ 7,50
8	Varilla de Bronce al 15%	2	\$ 5,00	\$ 10,00
9	Fundente para Bronce	1	\$ 1,50	\$ 1,50
10	Teflón Amarillo	2	\$ 0,80	\$ 1,60
11	Silicona Roja (Alta Temperatura)	1	\$ 3,00	\$ 3,00
12	Silicona Gris (Alta Temperatura)	4	\$ 3,50	\$ 14,00
13	Plancha de Tol galvanizado de 0,5 mm	2	\$ 25,00	\$ 50,00
14	Madera MDF (100x100x0,4 cm)	1	\$ 10,00	\$ 10,00
15	Pliego de Cartón Prensado de 0,1 cm	2	\$ 1,50	\$ 3,00
16	Pega para suelda fría	1	\$ 3,50	\$ 3,50
17	Pernos de carrocería 1/4" x 3/4"	66	\$ 0,12	\$ 7,92
18	Pernos de 1/4" x 1"	60	\$ 0,10	\$ 6,00
19	Termocuplas Tipo K	10	\$ 5,30	\$ 53,00
20	Empaques de caucho	1	\$ 2,00	\$ 2,00
21	Ducto de Aluminio	1	\$ 12,00	\$ 12,00
22	Lana de Vidrio 1 m ²	1	\$ 6,00	\$ 6,00
23	Codo de 2" (Plastigama)	1	\$ 1,50	\$ 1,50
24	Pegamento	2	\$ 0,50	\$ 1,00
25	Resistencia Eléctrica de 1000 W	5	\$ 10,00	\$ 50,00
26	Nanopartículas (5 gr)	4	\$ 8,00	\$ 32,00
27	Agua Destilada (gl)	1	\$ 4,75	\$ 4,75

Continúa en la siguiente página

28	Etilenglicol (kg)	2	\$ 3,70	\$ 7,40
29	Tubo Pitot	4	\$ 7,00	\$ 28,00
30	Amarras Plásticas	6	\$ 0,33	\$ 1,98
31	Mangueras de Plásticos de 1/4" x 8 m	1	\$ 8,00	\$ 8,00
32	Taipe Negro	2	\$ 0,80	\$ 1,60
33	Cinta Masking	1	\$ 1,00	\$ 1,00
34	Madera Aglomerada (1,5x0,80x0,015m)	1	\$ 15,00	\$ 15,00
35	Pintura Mate Negra ¼"	1	\$ 2,50	\$ 2,50
36	Broca de ¼"	1	\$ 1,00	\$ 1,00
37	Broca de ½"	1	\$ 1,25	\$ 1,25
38	Thinner Laca (lt)	1	\$ 3,00	\$ 3,00
39	Disco de Corte de 6 "	1	\$ 4,25	\$ 4,25
40	Disco de Pulir de 6 "	1	\$ 6,00	\$ 6,00
41	Electrodos E6011 (kg)	1	\$ 4,50	\$ 4,50
42	Abrazadera Metálica	1	\$ 2,00	\$ 2,00
43	Jeringas de 5 ml	8	\$ 0,25	\$ 2,00
44	Interruptor para Extensión	2	\$ 0,50	\$ 1,00
45	Frascos de 100 ml	4	\$ 2,00	\$ 8,00
			Subtotal 2	\$ 480,09

Tabla 10

Costo de alquiler de máquinas en la ejecución del proyecto de titulación.

Número	Descripción	Horas de uso	Valor (Hora)	Valor Total
1	Amoladora	4	\$ 2,50	\$ 10,00
2	Taladro Pedestal	5	\$ 2,50	\$ 12,50
3	Esmeril de Banco	1	\$ 1,00	\$ 1,00
4	Suelda Eléctrica (SMAW)	2	\$ 5,00	\$ 10,00
5	Suelda Oxiacetilénica (OAW)	15	\$ 12,00	\$ 180,00
6	Equipo para Pintura	1	\$ 3,00	\$ 3,00
7	Dobladora de Tol	4	\$ 6,00	\$ 24,00
8	Adquisición de Datos	45	\$ 1,00	\$ 45,00
9	Corte láser	4	\$ 17,50	\$ 70,00
10	Cizalla	1	\$ 3,00	\$ 3,00
11	Fresadora	1	\$ 20,00	\$ 20,00
			Subtotal 3	\$ 378,50

Tabla 11

Costo herramientas usadas en el proyecto de titulación.

Número	Descripción	Valor Total
1	Flexómetro (5 m)	\$ 6,00
2	Destornillador estrella	\$ 1,50
3	Destornillador Plano	\$ 1,50

Continúa en la siguiente página

4	Cortadora de Tubería de Cobre	\$ 4,50
5	Llave N° 11	\$ 1,50
6	Estilete	\$ 2,00
7	Playo Metálico	\$ 4,00
8	Pinzas Metálicas	\$ 3,50
9	Bisturí	\$ 1,50
	Subtotal 4	\$ 26,00

Tabla 12

Remuneración docente (tutor) y laboratorista.

Nombre	Cargo	Tiempo (Horas)	Valor (Hora)	Valor Total
Ing. Luis Carrión Matamoros	Tutor de tesis	42	\$ 20,00	\$ 840,00
Lic. Roberto Buenaño	Laboratorista	40	\$ 15,00	\$ 600,00
			Subtotal 5	\$ 1.440,00

Tabla 13

Remuneración a los estudiantes responsables del proyecto de titulación.

Nombre	Cargo	Tiempo (Horas)	Valor (Hora)	Valor Total
Sr. Jefferson Enrique Defaz Vilema	Tutor de tesis	430	\$ 2,50	\$ 1.075,00
Sr. Henry Paúl Soria Soria	Laboratorista	430	\$ 2,50	\$ 1.075,00
			Subtotal 6	\$ 2.150,00

Costos finales del proyecto de titulación

Se calculó los costos indirectos y costos directos (Materiales, Herramientas y Remuneraciones Estudiantes) que intervinieron en el desarrollo de nuestro proyecto de titulación y se los integra en la **Tabla 14**.

Tabla 14

Costos totales del proyecto de titulación (directos e indirectos).

Descripción	Valor Total
Subtotal 1 – Tabla 8	\$ 345,00
Subtotal 2 – Tabla 9	\$ 480,09
Subtotal 4 – Tabla 11	\$ 26,00
Subtotal 6 – Tabla 13	\$ 2.150,00
TOTAL	\$ 3.001,09

Cálculo de retorno de la inversión

Para realizar el cálculo de retorno de inversión se considera los resultados obtenidos en la experimentación referente al calor total transferido (Q) en la zona de condensación, el costo del consumo eléctrico por kW/h en el país y las horas de funcionamiento del intercambiador de calor de tubos pulsantes.

En el Ecuador, para el año 2021 en función del consumo eléctrico se dispuso la tarifa promedio a un valor de \$ 0,103 por kW/h para el sector residencial, un valor definido para el sector comercial de \$ 0,104 y un valor definido para el sector industrial de \$ 0,799. (El Universo, 2021)

Se considero 8 horas de funcionamiento diarias para analizar los valores recuperados en un mes, tal como se puede observar en la **Tabla 15**, de igual manera los mejores resultados de los diversos nanofluidos con respecto a la tarifa promedio en el sector industrial.

Tabla 15

Mejores resultados recuperados en el lapso de un mes.

NANOFLUIDO	Calor Total Transferido (Q) (kW)	Horas/mes	Valor Total
Nanofluido Cobre (CuO) al 1,5%	0,79129	160	\$ 101,16
Nanofluido NTC al 0,5%	0,77348	160	\$ 98,88
Nanofluido NTC al 0,1%	0,74308	160	\$ 95,00

Para determinar el tiempo de retorno de capital presente proyecto de titulación utilizamos la **Ec. N° 38**, en la que interviene el costo final del proyecto y el valor recuperado anteriormente, de esta manera se puede observar el retorno de inversión en la **Tabla 16**.

$$\text{Tiempo de retorno de capital} = \frac{\text{Valor final del proyecto}}{\text{Valor mensualmente recuperado}} \quad \text{Ec. N° 38}$$

Tabla 16

Retorno de inversión del proyecto de titulación.

NANOFLUIDO	Valor de retorno de inversión	Valor final del proyecto	Tiempo de retorno de capital (meses)
Nanofluido Cobre (CuO) al 1,5%	\$ 101,16	\$ 3.001,09	30

Nanofluido NTC al 0,5%	\$ 98,88	\$ 3.001,09	30
Nanofluido NTC al 0,1%	\$ 95,00	\$ 3.001,09	32

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La fuente de aire caliente construida incrementa la temperatura del fluido (aire) a 105,5 °C obteniendo un valor mayor a los 100 °C y se obtiene la temperatura mínima para que el agua destilada y cualquier nanofluido utilizado en los ensayos realizados alcance su punto de ebullición dentro de la zona de evaporación del ICTP.
- Se determina que en la parte media de la configuración de los tubos pulsantes se ve una mayor concentración en el aumento de temperatura, esto se debe a la manera en cómo está construido dicha configuración de tubos, como se puede evidenciar en el ensayo del nanofluido de NTC el cual tiene en la zona de evaporización una temperatura de entrada de 100,4 °C, en el punto medio 104,2 °C y en la salida 98 °C.
- Los nanofluidos que no muestran un incremento significativo del calor trasferido así estén en diferentes concentraciones fueron los que están formados por nanopartículas del Al_2O_3 con un calor trasferido de 731,85 W en una concentración al 0,5% y Fe_3O_4 con un valor de 743,85 W con una concentración del 1,5% estos representan apenas el 5% y 6% más respectivamente en comparación al agua destilada, esto se debe a su bajo coeficiente de conductividad térmica.
- Los nanofluidos que mostraron un incremento muy significativo para poder considerarlos en futuros estudios son el CuO, con un valor del calor trasferido de 791,29 W en una concentración al 1,5% y los Nanotubos de Carbono (NTC) con un valor de 790,41 W con una concentración al 1,5%, los cuales representan un

incremento del 12,4% y 12,3% más en el calor transferido respectivamente en comparación al agua destilada.

- El equipo presenta una eficiencia térmica máxima cuando trabaja con nanopartículas de CuO en una concentración al 1,5% mostrando una eficiencia del 20,78%, lo que representa un incremento del 48,14% en comparación a la eficiencia del 10,77% cuando trabaja con agua destilada; 35,28% más en comparación al Al_2O_3 con una eficiencia del 13,45%; 31,97% más en comparación al Fe_3O_4 con una eficiencia del 14,13%; 1,88% más en comparación a los nanotubos de carbono (NTC) con una eficiencia del 20,39%, por lo que se considera importante utilizar como prioridad nanopartículas de CuO y NTC cuando se requiera aprovechar al máximo el calor de fluidos que en la mayoría de aplicaciones industriales son desechados y desperdiciados.
- La inversión se recupera en un tiempo menor utilizando las concentraciones en peso descritas en el presente proyecto, considerando el valor de 0,799 USD del kW/h en el país, es de 30 meses, en el caso del nanofluido de NTC al 1,5% de concentración en peso, seguido del nanofluido de Cobre al 1,5% de concentración en peso, con un tiempo de 30 meses y el nanofluido de NTC al 0,1% de concentración en peso, con un tiempo de 32 meses.

Recomendaciones

- Se recomienda conectar un potenciómetro en el banco de resistencias, con el objetivo de estabilizar la potencia y mantener constante la temperatura de entrada en la sección del evaporador.
- Se recomienda no conectar de manera simultánea las 5 resistencias en una sola entrada o línea eléctrica, ya que debido a su alto consumo de energía podría llegar a causar una sobrecarga eléctrica.

- Una vez culminada cada prueba con cada porcentaje de nanofluido, evacuar completamente su contenido de la configuración de tubos serpenteantes con aire comprimido, de esta manera evitamos residuos de nanopartículas que afectan la adquisición de datos.
- Se recomienda obstruir el paso del canal de uno los accesorios tipo T que conecta al otro accesorio y el líquido base o nanofluido solo tenga un solo canal por donde pasar, de esta manera se reduce la presión al interior de los tubos y presentará menos resistencia al momento de ingresar.
- Se recomienda realizar los estudios necesarios de vida útil para cada una de las nanopartículas (Alúmina, Tenorita, Magnetita y NTC) ya que podría reemplazar determinados fluidos caloportadores los cuales tienen periodos cortos de vida útil, lo que permite reducir la contaminación en el medio ambiente.
- Debido a que existen pocos estudios relacionados a los intercambiadores de calor de tubos pulsantes, es necesario realizar un estudio y análisis previo de ecuaciones matemáticas para el cálculo del calor transferido y eficiencia térmica de tal manera que se aproximen a las condiciones presentes en el diseño propuesto.

Bibliografía

- Andrade, M. L., López, L. I., & Sáenz, A. (Septiembre de 2012). *Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952012000300002
- Angeli, P., & Gavriilidis, A. (2008). *Hydrodynamics of Taylor Flow in Small Channels: A Review* (Vol. 222). Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engg. Sci.
- Aubin, P., D'Entremont, B., Cataldo, F., Marcinichen, J., Amalfi, R., & Thome, J. (11 de julio de 2019). Numerical Simulations of Pulsating Heat Pipes, Part 1: Modeling. *Energy Conversion and Management*, 151, 232-242.
- Bai, L., Zhang, L., He, J., & Wen Dongsheng. (Octubre de 2015). Development of cryogenic loop heat pipes: A review and comparative analysis. 89, 180-191. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.010>
- Carriazo, J. (2017). Magnetita (Fe₃O₄): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*, 46, 1-42. Obtenido de <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62831>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Transferencia de calor y masa* (Cuarta edición ed.). McGraw Hill.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). *Transferencia de calor y masa* (Octava edición ed.). Mexico: McGraw-Hill.
- Chan, C., Siqueiros, E., Ling.Chin, J., Royapoor, M., & Roskilly, A. (2015). Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes. *ELSEVIER*, 50, 615-627. Obtenido de Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes
- CONCEPTDEFINICION. (07 de Julio de 2022). *Magnetita*. Obtenido de <https://conceptdefinicion.de/magnetita/>
- Cornelio, J. A., Cuervo, P. A., Ardila, M. I., Orozco, W., Jaramillo, L., Hoyos, L., . . . Toro, A. (2016). Rheological properties of carbon nanotubes as additive in a lubricating fluid. 83, 229-236. Obtenido de <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.54900>
- ECURED. (07 de Junio de 2022). *Óxido de cobre (II)*. Obtenido de [https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_cobre_\(II\)#:~:text=Es%20un%20%C3%B3xido](https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_cobre_(II)#:~:text=Es%20un%20%C3%B3xido)

%20met%20de,Su%20f%20B3rmula%20qu%20ADmca%20es%20CuO.

El Universo. (30 de Junio de 2021). *EKOS: Ecuador tiene tarifas eléctricas más económicas que Colombia y Perú*. Obtenido de <https://www.ekosnegocios.com/articulo/ecuador-tiene-tarifas-electricas-mas-economicas-que-colombia-y-peru#:~:text=Las%20tarifas%20promedio%20de%20consumo,de%20todo%20el%20sector%20el%C3%A9ctrico.>

Friebel, T., Haber, R., & Schmitz, U. (2017). Lifetime estimation of heat exchangers with consideration of on-line cleaning. *18th International Conference on Process Control.*, 434-439. Obtenido de <https://www.uiam.sk/pc11/data/papers/062.pdf>

Gómez, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. 27, págs. 75-80. Obtenido de <https://www.fucsalud.edu.co/sites/default/files/2018-08/Art-1.pdf>

Groll, M., Khandekar, S., & Dollinger, N. (Abril de 2003). Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study. 23, 707-719. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00237-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00237-5)

Guozhong, C. (2004). *Nanostructures and Nanomaterials, Síntesis, Propiedades and Aplicaciones*. Imperial College Press.

Gusman, A. (Mayo de 2014). *Síntesis de nanopartículas de óxido de aluminio mediante la técnica de micro-ondas*. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17333/1/25-1-16734.pdf>

Gutiérrez, C. (2006). Las nanopartículas: pequeñas estructuras con gran potencial. *Contacto Nuclear*, 24-29.

Holley, B., & Faghri, A. (Junio de 2005). Análisis de tubería de calor pulsante con mecha capilar y diámetro de canal variable. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 2635-2651.

Holman, J. (2002). *Heat Transfer*. Mexico: Mc Graw Hill.

Horikoshi, S., & Serpone, N. (24 de Abril de 2013). *Microwaves in Nanoparticle Synthesis: Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley Verlag Chemie, págs. 1-24.

- Huamán, A. (Noviembre de 2014). *PRODUCCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO POR MOLIENDA HÚMEDA: CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN A CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS CON COLORANTE*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/350291267_PRODUCION_DE_NANOPARTICULAS_DE_DIOXIDO_DE_TITANIO_POR_MOLIENDA_HUMEDA_CARACTERIZACION_Y_APLICACION_A_CELDAS_SOLARES_SENSIBILIZADAS_CON_COLORANTE
- Huminic, G., & Huminic, A. (Octubre de 2018). Hybrid nanofluids for heat transfer applications – A state-of-the-art review. *125*, 82-103. Obtenido de [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.059](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.059)
- Incropera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (Cuarta edición ed.). Pearson Education.
- Jouhara, H., Almahmoud, S., Brough, D., & Guichet, V. (11 de Diciembre de 2020). *Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchange*. 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
- Kern, D. (2001). *Procesos de transferencia de calor* (Trigésima primera edición ed.). Mexico: CECSA.
- Khandekar, S. (2004). Obtenido de Thermo-Hydrodynamics of Closed Loop Pulsating Heat Pipes: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/>
- Khandekar, S. (2 de Noviembre de 2010). *PULSATING HEAT PIPE BASED HEAT EXCHANGERS*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Sameer-Khandekar/publication/266608183_PULSATING_HEAT_PIPE_BASED_HEAT_EXCHANGERS/links/56441fbc08ae451880a7017f/PULSATING-HEAT-PIPE-BASED-HEAT-EXCHANGERS.pdf
- Khandekar, S., Dollinger, N., & Groll, M. (2003). Understanding Operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 707-719.

- Kole, M., & Dey, T. (2012). Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 61-70. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.002>
- Kumar, N., Sonawane, S., & Sonawane, S. (Enero de 2018). Experimental study of thermal conductivity, heat transfer and friction factor of Al₂O₃ based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 90, 1-10. Obtenido de [doi:https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.001)
- Lutfor , M., Sumaiya, N., Rasel, S., Fariha, M., & Mohammad, A. (2015). Effect of Fin and Insert on the Performance Characteristics of Close Loop Pulsating Heat Pipe (CLPHP). *ELSEVIER*, 115-112.
- Macias, D. F. (25 de Noviembre de 2021). *Alumina*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/mtrodavidmaciasferrer/alumina>
- Márquez, E., Hernández, D., Míguez, M., Soler, F., & Pérez, M. (2021). *Las nanopartículas y sus aplicaciones biomédicas*. Obtenido de <https://dehesa.unex.es:8443/bitstream/10662/11784/1/978-84-09-25218-3.pdf>
- Mishkinis, D., & Ochterbeck, J. (2003). Homogeneous Nucleation and the Heat-Pipe Boiling Limitation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 76, 813-818.
- Mueller, B., Pfothhauer, J., & Miller, F. (Septiembre de 2021). Performance of nitrogen pulsating heat pipes as a passive thermal switches in a redundant cryocooler application. *ELSEVIER*, 196, 117213. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117213>
- Neto, V. (2019). *Nanoparticle synthesis techniques*. Obtenido de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nanoparticle_synthesis_techniques.jpg.
- OECD/IEA. (2016). *Energy and air pollution*. Obtenido de Francia: International energy agency: www.iea.org/t&c/
- Ouahid, A. (4 de julio de 2016). *Nanotecnología y sus potenciales aplicaciones en microbiología*. Obtenido de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/49173/TFG-V7%20%281%29ouahid%20hessissen%2C%20Amin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pal, S. L., Jana, U., Manna, P., Mohanta, G., & Manavalan, R. (2011). Nanoparticle: An overview of preparation and. *International Research Journal of Pharmacy*, 228-234.

- Pangi, Z., Beletsi, A., & Evangelatos, K. (2003). PEG-ylated nanoparticles for biological and pharmaceutical application. *24*, 403-419.
- Reay, D., Kew, P., & McGlen, R. (2014). Chapter 3 - Heat pipe components and materials. *ERLSEVIER*, 65-94. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098266-3.00003-0>
- Riehl, R., & Dos Santos, N. (Septiembre de 2012). Water-copper nanofluid application in an open loop pulsating heat pipe. *ELSEVIER*, *42*, 6-10.
- Ríos, G., Giannini, C., Siliqi, D., Altamura, D., Sibillano, T., Solís, J., & Gómez, M. (2015). Estudio morfológico y estructural de nanopartículas de Cu O empleando técnicas de dispersión de luz y rayos X. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *81*. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2015000300007
- Segarra, C. (Octubre de 2020). *Estudio de la dispersión de nanopartículas en medio acuoso para su posterior aplicación como fluido térmico*. Obtenido de file:///C:/Users/User/Downloads/2020_Tesis_Segarra%20Ferrando_MCarmen.pdf
- White, F. (2011). *Fluid Mechanics* (Séptima edición ed.). New York: Mc Graw Hill.
- Xing, M., Yu, J., & Wang, R. (Septiembre de 2017). Performance of a vertical closed pulsating heat pipe with hydroxylated MWNTs nanofluid. *ELSEVIER*, *112*, 81-88.
- Zhang, Y., & Faghri, A. (2008). *Advances and Unsolved Issues in Pulsating Heat Pipes*. Missouri: Taylor & Francis.
- Zhang, Y., & Faghri, O. (2002). Heat Transfer in a Pulsating Heat pipe with an Open End. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *45*, 755-764.
- Zufar, M., Gunnasegaran, P., Kumar, H., & Ng, K. (Octubre de 2019). *Numerical and experiemetal investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance*. Malaysia: ELSEVIER.
- Zufar, M., Gunnasegaran, P., Kumar, M., & Ng, K. (12 de Octubre de 2019). Numerical and experimental investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance. *ELSEVIER*, *146*, 2-5.