



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECÁNICA

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NANO FLUIDO HO/CUO EN LOS
INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CONTRAFLUJO MEDIANTE
SOFTWARE ESPECIALIZADO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de: **INGENIERO MECÁNICO**

AUTOR: ANDRÉS PAÚL VILLAVICENCIO BÁEZ

TUTOR: TOMÁS ISAÍAS IBUJÉS VILLACÍS

Quito – Ecuador

2024

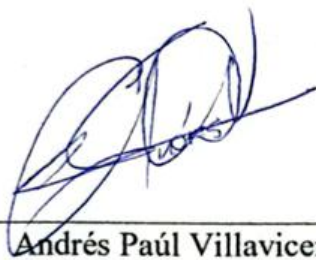
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Andrés Paúl Villavicencio Báez, con documento de identificación N° 1723438840; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo y autorizo a que, sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de marzo del año 2024

Atentamente,



Andrés Paúl Villavicencio Báez

1723438840

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Andrés Paúl Villavicencio Báez con documento de identificación No. 1723438840, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: “Estudio de la influencia del nano fluido HO/CUO en los intercambiadores de calor de contraflujo mediante software especializado”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de marzo del año 2024

Atentamente,



Andrés Paúl Villavicencio Báez
1723438840

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Tomás Isaías Ibujés Villacís con documento de identificación N° 0500904743, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NANO FLUIDO HO/CUO EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CONTRAFLUJO MEDIANTE SOFTWARE ESPECIALIZADO, realizado por Andrés Paúl Villavicencio Báez con documento de identificación N° 1723438840, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de marzo del año 2024

Atentamente,



Ing. Tomás Isaías Ibujés Villacís Msc
0500904743

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a Dios porque gracias a él he logrado concluir mi carrera, a mi familia, amigos y demás seres queridos que me brindaron su apoyo incondicional durante todo este proceso. A la ciudad de Quevedo y al barrio donde crecí por forjarme como persona.

A mis abuelitos, que desde el cielo deben estar orgullosos porque he dado lo mejor de mí.

También quiero dedicar este trabajo a mis docentes y compañeros de clase; sin su ayuda y enseñanzas, no hubiera podido llegar tan lejos. Muchas gracias.

Andrés Villavicencio

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme la oportunidad de forjarme como profesional en mi vida, estoy seguro de que él nunca me abandono en las situaciones más difíciles en las cuales estuve sumergido.

A mis padres por haberme brindado su apoyo incondicional desde que inicié mi carrera como profesional, sin ellos no sería la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

Quiero brindar mis agradecimientos a Tomás Ibujés, por su paciencia, perseverancia y constante apoyo durante la realización de este proyecto.

Y a todas las personas que, de uno u otra forma me apoyaron en la realización de este trabajo.

Andrés Villavicencio

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	4
CAPÍTULO I	5
ANTECEDENTES Y ESTUDIO DEL ARTE	5
1.1 Antecedentes	5
1.2 Dispositivos de intercambio de calor	6
1.2.1 Tipos de dispositivos de intercambio de calor	6
1.2.1.1 Dispositivo de intercambio de calor de doble tubo	6
1.2.1.2 Dispositivo de intercambio de calor que opera bajo condición de flujo cruzado... 7	
1.2.1.3 Dispositivo de intercambio de energía de casco y tubos	7
1.2.2 Aplicaciones de dispositivos de intercambio de calor de contraflujo	8
1.3 Nanofluidos	9
1.3.1 Síntesis de nanofluidos	10
1.3.2 Estabilidad de los nanofluidos	11
1.4 Simulador Ansys	12
1.4.1 Proceso de simulación en Ansys	12
1.4.1.2 Proceso	12
1.4.1.3 Post-proceso	12
1.5 Ansys Fluent	12
1.6 Nanopartículas	13

1.6.1 Aplicaciones de nanopartículas	13
CAPÍTULO II	15
ANÁLISIS DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL H ₂ O Y DEL NANOFLUIDO H ₂ O/CuO	15
2.1 Proceso de transferencia de calor	15
2.1.1 Transferencia por conducción	15
2.1.2 Transferencia por radiación	15
2.1.3 Transferencia por convección	16
2.2 Análisis en intercambiadores	16
2.2.1 Modelo de cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD)	17
2.3 Análisis de transferencia en intercambiadores de contraflujo	17
2.3.1 Dispositivos de intercambio de calor de flujo cruzado y de varios pasos	18
CAPÍTULO III	19
IDENTIFICACIÓN Y CÁLCULO DE PROPIEDADES TERMO FÍSICAS Y VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE H ₂ O	19
3.1 Definición del tipo de intercambiador a utilizar	19
3.2 Planteamiento del problema	19
3.2.1 Materiales y geometría del intercambiador	20
3.2.2 Cálculo de área de circulación de flujo caliente y frío	22
3.2.3 Cálculo de resistencia térmica a la conducción de tubería de cobre tipo K	23
3.3 Coeficiente de transferencia de calor global	24
3.3.1 Propiedades termofísicas de H ₂ O	24
3.3.2 Coeficiente de convección agua caliente	24
3.3.2.1 Número de Reynolds – agua caliente.	25
3.3.2.2 Número de Prandtl – agua caliente.	25
3.3.2.3 Número de Nusselt – agua caliente.	26

3.3.2.4 Cálculo coeficiente convectivo agua caliente.....	26
3.3.3 Coeficiente convectivo agua fría.....	26
3.3.3.1 Número de Reynolds – agua fría.....	27
3.3.3.2 Número de Prandtl – agua fría.:.....	27
3.3.3.3 Número de Nusselt – agua fría. V.....	27
3.3.3.4 Cálculo coeficiente de convección agua fría.....	28
3.4 Determinación de coeficiente de transferencia global de calor.....	28
3.5 Temperatura con la que abandona el intercambiador el fluido caliente.....	29
3.6 Cálculo de temperatura media logarítmica del intercambiador de calor.....	29
3.7 Cálculo de velocidad o tasa de transferencia.....	30
3.8 Cálculo de área efectiva de transferencia.....	30
3.9 Identificación de correlaciones y cálculo de propiedades termofísicas del nanofluido H ₂ O/CuO.....	31
3.9.1 Conductividad térmica del nanofluido.....	31
3.9.2 Viscosidad del nano fluido.....	32
3.9.3 Densidad y calor específico del nano fluido.....	33
3.10 Identificación de correlaciones y cálculo de Prandtl, Nusselt y Reynolds del nanofluido.....	33
3.11 Cálculo de variables que influyen en el proceso de transferencia en el intercambiador de calor de contraflujo al trabajar con nano fluido H ₂ OCuO.....	35
3.11.1 Identificación de coeficiente convectivo de nanofluido H ₂ OCuO.....	35
3.11.2 Cálculo de coeficiente de transferencia global de calor de H ₂ OCuO.....	35
3.11.3 Cálculo de temperatura con la que abandona el intercambiador de fluido caliente al trabajar con nano fluido H ₂ OCuO.....	36
3.11.4 Cálculo de temperatura media logarítmica del intercambiador de calor al trabajar con nano fluido H ₂ OCuO.....	37

3.11.5 Cálculo de tasa de transferencia de calor al trabajar con nano fluido H ₂ OCuO	37
3.12 Tabla comparativa	38
CAPÍTULO IV	39
SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL ANOFLUIDO H ₂ O/CuO, MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE ANSYS	39
4.1 Métodos de cálculo de Ansys Fluent	39
4.1.1 Método de fase discreta enfoque Euler-Lagrange	39
4.1.1.1 Movimiento de las partículas dispersas.	41
4.1.1.2 Ecuaciones de cambio de posición de las partículas dispersas sobre el fluido.	41
4.1.2 Condiciones iniciales de la partícula	43
4.1.3 Modelo multifásico enfoque euleriano	44
4.1.3.1 Ecuación de conservación de masa.	44
4.1.3.2 Ecuación de conservación de momento.	45
4.2 Generación de geometría de intercambiador	45
4.3 Simulación de proceso de transferencia de calor usando Ansys – Fluent	47
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de nanopartículas	13
Tabla 2. Presión de trabajo tubería de cobre tipo K.....	20
Tabla 3. Características geométricas y valor de conductividad térmica	21
Tabla 4. Propiedades termofísicas del agua 50 °C.....	24
Tabla 5. Propiedades de las nanopartículas de CuO.	31
Tabla 6. Comparación propiedades físicas y variables entre agua fría y nano fluido H ₂ O /CuO	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intercambiadores de tipo tubo doble circulando de forma paralela y contraflujo	7
Figura 2. Dispositivo de intercambio de calor de tubos y coraza	8
Figura 3. Dispositivo de intercambio de calor de un paso a través de la coraza y dos pasos por los tubos	8
Figura 4. Aplicaciones del intercambiador de calor	9
Figura 5. Síntesis de nanofluidos por dos pasos	11
Figura 6. Proceso de obtención de nanofluidos por un paso	11
Figura 7. Resultados de la simulación de variación de temperatura en una tubería T – Ansys Fluent	13
Figura 8. Dispositivo de intercambio de calor contraflujo	18
Figura 9. Intercambiador de calor contraflujo propuesto para el estudio	22
Figura 10. Área de circulación de agua caliente y fría.....	22
Figura 11. Esquema de los tipos de rebote.....	44
Figura 12. Sección del intercambiador de calor realizado utilizando el software SolidWorks	46
Figura 13. Vista axial de intercambiador de contraflujo propuesto	46
Figura 14. Vista radial de intercambiador de contra flujo propuesto	47
Figura 15. Área de entrada de agua caliente. Software Ansys	47
Figura 16. Área de entrada de nano fluido H ₂ O-CuO. Software Ansys	48
Figura 17. Frontera de proceso de transferencia de calor.	48
Figura 18. Frontera exterior – condición adiabática	49
Figura 19. Malla generada en intercambiador de calor. Software Ansys.	49
Figura 20. Condiciones de modelo euleriano establecidas para realizar la simulación.	50

Figura 21. Distribución de tamaño de nano partículas de óxido de cobre.	50
Figura 22. Valor de error vs número de iteraciones – Ansys Fluent	51
Figura 23. Resultados de simulación de intercambiador de calor – Ansys Fluent.	51
Figura 24. Distribución de temperaturas en la salida del intercambiador de contraflujo obtenido mediante Ansys Fluent.	52
Figura 25. Distribución de temperaturas en la entrada del intercambiador de contraflujo obtenido mediante Ansys Fluent.	52

RESUMEN

El presente estudio corresponde al análisis de la transferencia de calor en un intercambiador de contraflujo; el mismo que opera con agua a la cual se añaden nano partículas de óxido de cobre con el fin de mejorar sus propiedades termofísicas y aumentar la efectividad en dicho proceso.

Para llevar a cabo el estudio, primero se determina el estado actual del arte referente a intercambiadores de calor de contraflujo, así como sus tipos y sus aplicaciones industriales más comunes. Además, se investiga temas relacionados a los nanofluidos, como la forma en la que estos se obtienen y los distintos tipos que existen. Se hace un énfasis especial en las nano partículas de óxido de cobre, ya que estas son utilizadas para desarrollar el trabajo.

Posteriormente, se establece la geometría del intercambiador propuesto y se determinan todas sus características y variables que permiten después realizar una comparación de como estas varían cuando se reemplaza el fluido de trabajo por el nano fluido H_2O/CuO .

Finalmente, se establecen conclusiones y recomendaciones basadas en los objetivos marcados. Una de las conclusiones más relevante con el presente estudio, es que las propiedades termofísicas del nano fluido H_2O/CuO varían en promedio un 15 % con respecto a las propiedades del fluido base.

Palabras clave: nano fluido H_2O/CuO , intercambiador de calor, eficiencia térmica.

ABSTRACT

Analyzing the heat transfer process in a concentric tube counterflow exchanger, which uses water as a working fluid to which copper oxide nanoparticles were added with the objective of increasing its thermophysical properties and increasing efficiency in the energy transfer process.

To carry out this project, first the art regarding counterflow heat exchangers is determined, as well as their types and most common industrial applications. In addition, topics related to nanofluids are investigated, such as the methods for obtaining the different types that exist. A special emphasis is placed on copper oxide nanoparticles, since these are used to carry out the work.

Subsequently, a geometry of a counterflow concentric tube heat exchanger is established and all its characteristics and variables that intervene in the heat transfer process are determined, after making a comparison of how these vary when the fluid is replaced. work by the nanofluid H_2O/CuO .

Finally, conclusions and recommendations are presented in function on the stated objectives. One of most relevant conclusions is that thermophysical properties about H_2O/CuO nanofluid varies on average by 15%.

Keywords: H_2O/CuO nanofluid, heat exchanger, thermal efficiency.

INTRODUCCIÓN

El incremento de la necesidad energética mundial ha generado en la industria y en la comunidad tecnológica, la necesidad de identificar métodos más eficientes de transformación de energía; que se ajusten a las regulaciones medioambientales actuales y que permitan a las empresas generar ahorros. Uno de los instrumentos más utilizados en la industria se denominan intercambiadores de calor [1].

Estos aparatos mecánicos permiten continuamente intercambiar calor de un medio a otro, típicamente utilizando fluidos como agentes de almacenamiento y transferencia de calor. Son indispensables en muchas áreas en las que se requieran procesos de refrigeración o acondicionamiento. Entre los mecanismos de transferencia de calor que se pueden apreciar en procesos industriales, los más comunes son los denominados intercambiadores de contraflujo, los mismos que presentan el inconveniente de una baja eficiencia térmica con respecto a otros intercambiadores [2].

Para incrementar la eficiencia en la transferencia energía que ocurre en intercambiadores de contraflujo se realizan diseños personalizados de acuerdo con necesidades específicas, sin embargo, esto genera aumentos significativos en costos y en tiempos de entrega. Otro método para mejorar la eficiencia térmica es trabajar con fluidos que presenten una capacidad elevada de transferencia de calor [3].

El presente estudio propone evaluar el efecto del intercambio de calor en un dispositivo de contraflujo, añadiendo nano partículas dispersas sólidas sobre el fluido base; ya que se ha demostrado que este proceso permite incrementar de forma significativa la eficiencia de este. Se propone el uso de nanopartículas de CuO, las mismas que se añaden sobre una base acuosa H₂O/CuO [4].

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la influencia del nano fluido H₂O/CuO en las propiedades térmicas de los intercambiadores de calor de contraflujo mediante software especializado.

Objetivos específicos

- Establecer el estudio actual del nano fluido H_2O/CuO en la influencia de los intercambiadores de calor de contraflujo.
- Analizar el impacto de la concentración de nanopartículas de CuO en la transferencia de energía en intercambiadores de contraflujo mediante software especializado.
- Evaluar cómo influye la densidad en la transferencia de calor mediante software especializado.
- Determinar las condiciones termo físicas del nano fluido H_2O/CuO en la transferencia de calor.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los dispositivos de transferencia de energía térmica de contraflujo son mecanismos que facilitan el proceso de transición de energía de un medio a otro. Para mejorar la transferencia de energía entre los medios se puede reemplazar el fluido de trabajo por uno que presenta una capacidad de transferencia de calor mayor [4].

El uso de nano fluidos como agentes que optimizan la transmisión se ha visto en incremento, especialmente el caso de aquellos que presentan valores elevados de conductividad térmicas, como es el caso de las nanopartículas de CuO . El uso de los softwares de simulación permite analizar el cambio de propiedades térmicas y la eficiencia de la transmisión de temperatura al añadir nano partículas sobre una base de agua o aceite [5].

El presente estudio muestra el análisis realizado en el mecanismo de transmisión de energía, en dispositivos de intercambio térmico de contraflujo al añadir partículas de CuO sobre una base de agua mediante el software Ansys Fluent. Para el trabajo se investiga el estudio del arte, después se establece la metodología para establecer los parámetros que permiten realizar las simulaciones. Finalmente, se formulan conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados alcanzados.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y ESTUDIO DEL ARTE

En este capítulo se describen antecedentes de investigaciones sobre cómo varían las características de transmisión térmica de un fluido, al que se añaden nano partículas. También se realiza una revisión teórica de distintos factores que participan en el mecanismo de conducción en intercambiadores de calor, así como los tipos de intercambiadores que existen y aplicaciones de estos.

1.1 Antecedentes

El estudio realizado por Caiza & Caiza [6] , indica que las propiedades térmicas del refrigerante 600a aumentan en un 5 % al combinarse con nanopartículas de cobre en cantidades de 1 % a 5 %.

El trabajo realizado por Valencia et al. [7], indica que al agregar nano partículas de grafito de distintos tamaños (5, 20 y 30 nm) en una base de agua se obtiene una mejora en las propiedades termo físicas. Para llevar a cabo el estudio primero se realizó un análisis de las propiedades del nano fluido, posteriormente se determina la eficiencia de acuerdo con el tamaño de las partículas de grafito agregadas y finalmente se realiza la evaluación del área de captación solar.

El estudio realizado por Razak [8], presenta la evaluación de la eficiencia térmica, al trabajar con nano partículas de CuO y ZnO en una base de agua. El experimento se lleva a cabo bajo condiciones de convección forzada al variar la cantidad de flujo de ambos nano fluidos. El estudio indica que al agregar mayor porcentaje en volumen de los nano fluidos, se observa un incremento sustancial en la eficiencia del colector de placa plana. El trabajo de Parveez & Hanief [9], muestra el análisis de transferencia de energía en intercambiadores al agregar nano fluidos de óxido de aluminio y óxido de cobre. Se determinan las variables densidad y conductividad térmica de ambos nano fluidos, ya que de estas dependen en gran parte la eficiencia térmica. Los resultados indican que para iguales cantidades de flujo, la eficiencia en el proceso se incrementa en un 3.8 %.

1.2 Dispositivos de intercambio de calor

Se refieren a aquellos que posibilitan el intercambio de calor entre distintos flujos que no se mezclan y que se encuentran a distintas temperaturas. Dichos dispositivos, se pueden encontrar en aplicaciones domésticas y aplicaciones relacionadas a la industria. Se diferencian de las cámaras de mezclado porque para esta última los fluidos de trabajo si están en contacto [10].

En estos dispositivos, el intercambio de energía se da mediante fenómenos convectivos en los fluidos de trabajo y conductivos en la pared que divide a ambos fluidos. La tasa o velocidad de transferencia en un intercambiador depende del lugar del dispositivo donde se analice, ya que se encuentra relacionada directamente con la diferencia de temperaturas local de los flujos de trabajo, la misma que varía durante todo el trayecto del flujo que circula por el intercambiador. Por eso, es común usar un valor promedio para todo el intercambiador, el mismo que considera la característica exponencial por el proceso [10].

1.2.1 Tipos de dispositivos de intercambio de calor

En la actualidad, debido al uso extenso que presentan los dispositivos de intercambio de calor en procesos industriales, existen varios diseños y propuestas que se muestran en normas y estándares que detallan los materiales a utilizar, métodos de fabricación y dimensiones de los distintos equipos.

1.2.1.1 Dispositivo de intercambio de calor de doble tubo. Este dispositivo se conforma por dos tubos que presentan distintos diámetros, acoplados de tal forma que uno quede en el interior del otro. El fluido que tiene mayor temperatura transita por la parte interna del tubo y el fluido frío lo hace a través del área comprendida entre el tubo externo e interno. De acuerdo con la dirección de circulación se dividen en dos tipos: flujo paralelo y contraflujo.

En la figura 1 se muestra como las temperaturas cambian vs la longitud del intercambiador en los tipos de flujo mencionados [10].

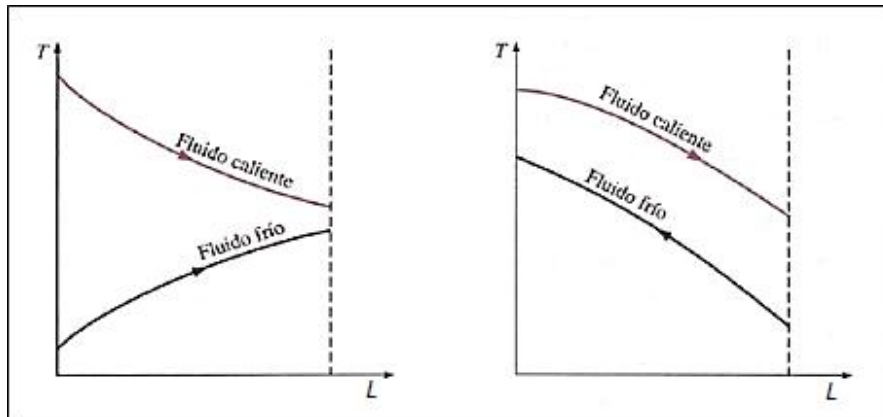


Figura 1. Intercambiadores de tipo tubo doble circulando de forma paralela y contraflujo [10].

Nota: El esquema izquierdo corresponde al intercambiador de circulación paralelo y el derecho al intercambiador de contraflujo.

1.2.1.2 Dispositivo de intercambio de calor que opera bajo flujo cruzado. Se diseña para obtener un área de transferencia de energía mayor; para conseguirlo se ubican superficies extendidas sobre paredes de los tubos por las cuales circulan los fluidos. Encuentran su aplicación destacada en la industria automotriz e industria aeronáutica, ya que permite alcanzar elevadas velocidades de disipación de calor en espacios reducidos. Los fluidos en estos intercambiadores se mueven de forma perpendicular entre sí [10].

1.2.1.3 Dispositivo de intercambio de energía de casco y tubos. Se compone de cientos de tubos ubicados en cascos de forma paralela. El proceso de disipación de calor ocurre cuando un fluido circula por la parte interna de la tubería y el otro transita por la coraza. Estos dispositivos son los más adecuados para uso en aplicaciones automovilísticas o aeronáutica. Los intercambiadores de casco y tubos presentan zonas de alto flujo, denominadas cabezales, donde se acumula el fluido que circula por la coraza antes del ingreso y al egreso de este. En la figura 2 se puede observar un ejemplo de este dispositivo [10].

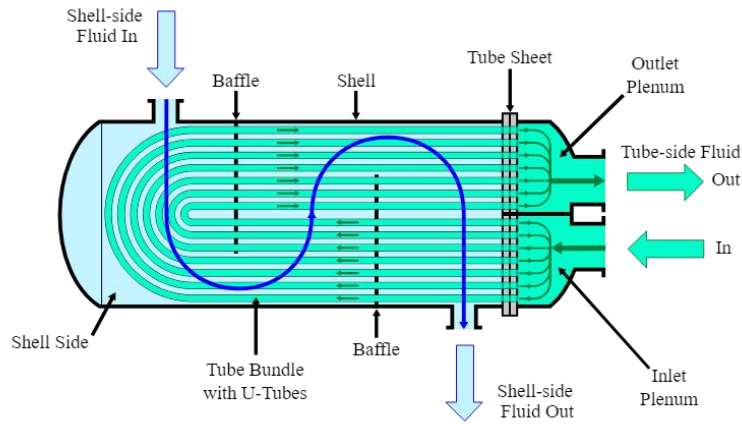


Figura 2. Dispositivo de intercambio de calor de tubos y coraza [10].

Dichos dispositivos se identifican por la cantidad de veces que circulan por los tubos y por el casco. Por ejemplo, se puede observar el intercambiador en el cual los tubos forman una U que se puede presentar en la figura 3 [10].

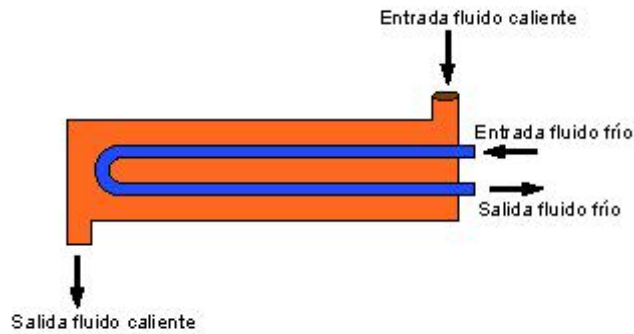


Figura 3. Dispositivo de intercambio de calor de un paso por la coraza y dos por los tubos [10].

1.2.2 Aplicaciones de dispositivos de intercambio de calor de contraflujo

Sus aplicaciones se pueden encontrar en un sinfín de procesos industriales como: condensar gases mediante el uso de fluidos fríos, refrigerar un fluido mediante el uso de otro fluido con menor temperatura, ebullicionar un determinado fluido mediante la condensación de otro más caliente, etc. En la figura 4 se exponen las aplicaciones principales del intercambiador de calor de contraflujo [12].

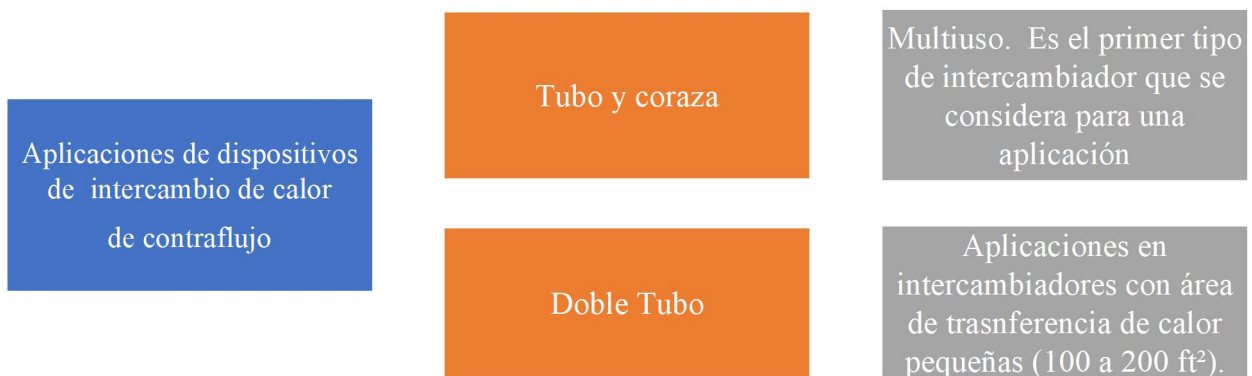


Figura 4. Aplicaciones del intercambiador de calor [12].

1.3 Nanofluidos

El área de nanotecnología permite estudiar fenómenos atómicos y moleculares, considerando que los materiales a escalas atómicas presentan propiedades superiores a compararlos con materiales en escala normal [13].

La problemática de mejorar las propiedades termofísicas en fluidos usados comúnmente en dispositivos de intercambio de calor, propició el desarrollo del estudio en el campo de nanofluidos. En un principio, se utilizaban suspensiones coloidales estables de nanomateriales que presentaban un tamaño promedio de 100 nm, las mismas que se ubicaban sobre un fluido base [13].

Los nanomateriales que se utilizan pueden ser orgánicos, cerámicos y metálicos. Entre los materiales orgánicos usados están nanotubos de carbono, fullereno y grafeno. Por el lado de los materiales cerámicos se puede mencionar la sílice, alúmina, carburos de magnesio y magnetita. Por parte de los materiales metálicos se encuentra el cobre, tungsteno, oro, plata, hierro y aluminio [13].

Hay varios fluidos que se usan como base y sobre la que se añaden nanomateriales para crear nano moléculas. Entre los fluidos más utilizados se encuentran el agua, alcoholes, glicerol, queroseno, lubricantes, aceites, materiales que se encuentran en cambio de fase y recientemente se ha visto el aumento el uso de sales como fluido base [13].

La estabilidad que se obtiene al agregar nanopartículas sobre fluidos base es mucho mayor en comparación con los solventes tradicionales que se dopaban con partículas de tamaño micrométrico. Se usan pocas nanopartículas dispersas en los fluidos base, del orden del 2 %

en peso. Sin embargo, con respecto a fluidos base y mezclas tradicionales utilizando micropartículas, se aprecia un incremento significativo en las propiedades termo-físicas al utilizar este tipo de nanopartículas [13].

Los nanofluidos como tal, de acuerdo con el tipo de fluido que se usa como base, pueden ser utilizados tanto a bajas como a elevadas temperaturas. En aplicaciones de baja temperatura se suele usar agua, mientras que en aplicaciones de altas temperaturas suelen usar sales fundidas como base [13].

1.3.1 Síntesis de nanofluidos

Para la obtención de nanofluidos, existen 4 parámetros que influyen directamente en las propiedades que se obtienen del mismo: correcta dispersión sobre el fluido base, estabilidad térmica, manipulación sencilla y compatibilidad química adecuada. Los métodos para obtener estas moléculas se clasifican en dos grupos: obtención por dos pasos y obtención por un paso [13].

Uno de los métodos que presenta frecuencia en su uso para la síntesis de nanofluidos es el denominado proceso de dos pasos. Para este método, primero se producen las nanopartículas mediante procesos físicos y químicos, y luego se añaden las nanopartículas obtenidas sobre el fluido base. La ventaja para destacar de este método es la elevada producción a un costo menor; sin embargo, presenta el inconveniente de que las partículas se aglomeran rápidamente antes de dispersarse, lo que ocasiona que las propiedades no sean homogéneas a lo largo del nanofluido. En la figura 5 se puede apreciar el método de síntesis utilizando el método de dos pasos [13].



Figura 5. Síntesis de nanofluidos por dos pasos [13].

Por otra parte, para sintetizar nano partículas mediante un solo paso se tiene generar las nanopartículas “in situ”, es decir que dichas nano partículas aparecen por el uso de agentes de precursores que se combinan en el fluido base, de tal forma que, el proceso de síntesis ocurre a la vez que el proceso de dispersión. Este método presenta la ventaja de reducir las aglomeraciones en las nanopartículas; sin embargo, pequeños cambios en las variables de operación podrían ocasionar cambios sustanciales en las propiedades de los nanofluidos sintetizados [13].

Adicionalmente, el método de un solo paso presenta altos costos de producción debido a que requiere procesos complejos para la sintetización de nanofluidos. En la figura 6, se puede apreciar un ejemplo del método de síntesis de estas moléculas de un solo paso y los procesos comúnmente aplicados.



Figura 6. Proceso de obtención de nanofluidos por un paso [13].

1.3.2 Estabilidad de los nanofluidos

Uno de los factores de mayor importancia en los nanofluidos, es la estabilidad que estos tienen en el tiempo. Las aglomeraciones de las nanopartículas o la precipitación de estas durante el proceso de sintetización, ocasiona que esté presente una variación en sus propiedades [13].

La estabilidad del nanofluido es una de las principales barreras de comercialización que afronta la tecnología actual, esto es debido a que las propiedades termofísicas del fluido afectan la vida útil del mismo y al existir inestabilidad del nanofluido en el tiempo, se

generaría un cambio en dichas propiedades; lo que podría reducir su tiempo de vida útil y afectar a los elementos que presenten dependencia [13].

1.4 Simulador Ansys

Ansys es un software de simulación para aplicaciones ingenieriles. Su funcionamiento se fundamenta en propiedades y aplicaciones de teoría de elementos y volúmenes finitos. Este simulador permite realizar estudios en el área de análisis de estructural, electromagnetismo, fluidodinámica y multifísica. Esta última herramienta en particular permite combinar propiedades térmicas, mecánicas, fluidodinámicas y eléctricas en una sola interfaz para lograr un estudio completo [14].

1.4.1 Proceso de simulación en Ansys

El software Ansys se compone de tres módulos principales: preprocesador, procesador y post procesador. El proceso de simulación se divide en tres subprocesos que se presentan a continuación [14].

1.4.1.1 Preprocesamiento. En esta etapa se desarrollan tres actividades principales, establecimiento del modelo, asignación de material y generación de malla. Establecer el modelo se refiere a definir la geometría de este por medio de la interfaz gráfica y herramientas que brinda el software Ansys o este puede ser importado desde otro software. Generar la malla es dividir el modelo en un número de finito de elementos sobre los cuales se aplican las ecuaciones correspondientes.

1.4.1.2 Proceso. En esta etapa se deben indicar las restricciones y las condiciones de borde en los nodos. Se pueden aplicar cargas térmicas, cargas estructurales, cargas eléctricas, cargas fluidodinámicas y la combinación de estas.

1.4.1.3 Post-proceso. En la etapa del postproceso se identifican los valores resultantes del proceso de simulación de acuerdo con las condiciones establecidas. Los resultados pueden presentarse de forma gráfica o listados en tablas.

1.5 Ansys Fluent

Es un software complementario utilizado para modelar, simular mecanismos de transferencia e intercambio de energía y masa, reacciones químicas, etc. El software Fluent se comunica

con el usuario por medio de interfaces modernas con gráfico de alto rendimiento que facilitan la obtención y apreciación de resultados. A manera de ejemplo, se presenta la simulación de aumento y disminución de temperatura en una tubería T obtenidos en Ansys Fluent.

En la figura 7 se exponen los resultados de la simulación de variación de temperatura en una tubería T – Ansys Fluent [15].

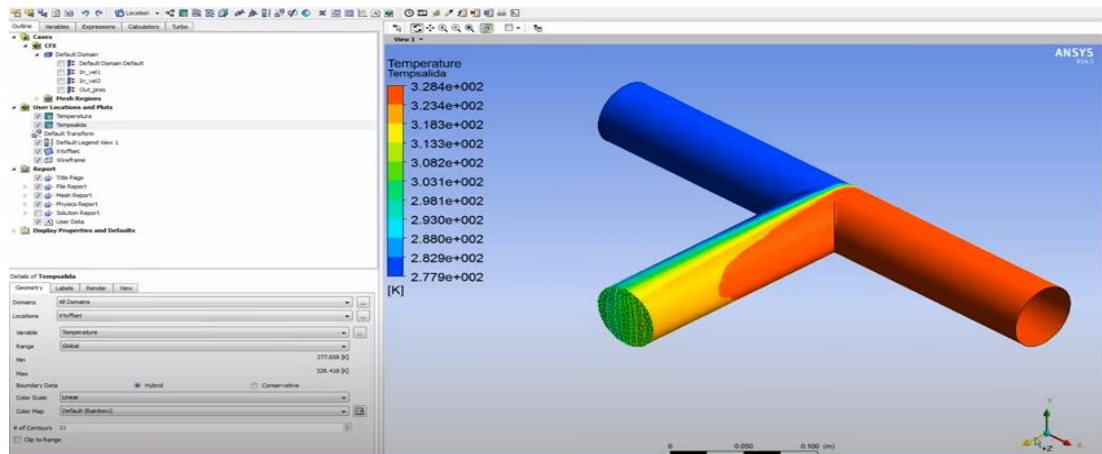


Figura 7. Resultados de la simulación de variación de temperatura en una tubería T – Ansys Fluent [15].

Nota: Simulación de transferencia de calor de agua caliente (328 K – lado rojo) que se mezcla con agua fría (277 K – lado azul) en una tubería tipo T.

1.6 Nanopartículas

El término nanopartículas hace referencia a objetos de tamaño nanométrico, sus dimensiones se encuentran a lo sumo en el orden de las decenas de nanómetros. Los materiales que se fabrican a partir de nanopartículas presentan propiedades distintas con respecto a los materiales de tamaño volumétrico e incluso difieren con respecto a materiales de tamaño micrométrico (milésima parte de un milímetro). Las nanopartículas se sintetizan y se usan con el objetivo de mejorar el desempeño, eficiencia, sustentabilidad y velocidad en procesos tecnológicos ya existentes.

1.6.1 Aplicaciones de nanopartículas

En la tabla 1 se describen las aplicaciones de distintas nanopartículas en los diferentes campos industriales.

Tabla 1. Aplicaciones de nanopartículas [16]

Tipo	Ejemplo	Aplicaciones	Descripción
Nanopartículas basadas en carbono	Nanotubos de carbono	Utilizada en aplicaciones de refuerzo estructural	Son 100 veces más resistentes que el acero.
	Fulereo	Aplicaciones en fabricación de elementos electrónicos	Fabricación de sensores, biosensores, baterías y otros medios de almacenamiento de energía.
Nanopartículas de cerámica	Nanopartícula de bentonita	Aplicaciones médicas	Se han utilizado eficazmente como sistema de administración de medicamentos para varias enfermedades como infecciones bacterianas, glaucoma y cáncer.
	Oro	Aplicaciones en electrónica	Se utilizan nanopartículas de oro para recubrir la muestra antes del análisis, obteniendo imágenes de microscopía electrónica de alta calidad.
Nanopartículas metálicas	Cobre	Aplicaciones en procesos de transferencia de calor	El cobre a escala nanométrica presenta un aumento considerable en su conductividad térmica.
	Plata	Aplicaciones médicas	Presenta efectos bactericidas y fungicidas contra patógenos como Escherichia Coli.
Nanopartículas semiconductoras	ZnO	Aplicaciones en fabricación de dispositivos electrónicos.	Fabricación de dispositivos modernos como computadoras, teléfonos, televisiones contienen nanopartículas semiconductoras.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL H₂O Y DEL NANOFLUIDO H₂O/CuO

2.1 Proceso de transferencia de calor

Ocurre cuando dos cuerpos no se encuentran a la misma temperatura. El cuerpo que se encuentra a mayor temperatura, se dice que tiene energía de mejor calidad, mientras que el cuerpo de menor temperatura presenta energía de menor calidad. Este tipo de proceso es unidireccional, la energía de mejor calidad se transforma en energía de menor calidad, de forma que, la energía que se encuentra contenida en el cuerpo caliente inicia su proceso de transferencia hacia el cuerpo frío [10].

Debido a la transferencia de energía, el cuerpo caliente empieza a enfriarse y el cuerpo frío empieza a calentarse. Este proceso ocurre hasta que los dos cuerpos tienen temperatura similar, en este caso se dice que alcanzan el equilibrio térmico. Se conocen tres mecanismos de transmisión de calor: transferencia por conducción, convección y radiación [10].

2.1.1 *Transferencia por conducción*

Ocurre cuando dos puntos se encuentran a diferente temperatura y no existe movimiento relativo entre ellos. La ecuación que describe dicho mecanismo es:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

La ecuación establece que el calor transferido varía proporcionalmente con: la temperatura, al área involucrada en el proceso de transferencia y un valor constante. Además, varía inversamente con la distancia que separa ambos puntos que se encuentran a distinta temperatura [10].

2.1.2 *Transferencia por radiación*

Las estrellas y fuentes de energía del universo transmiten su calor al resto de los cuerpos. La característica principal es que no es necesario un medio para que este proceso ocurra, ya que esta ocurre en el vacío [10].

2.1.3 Transferencia por convección

Ocurre si dos puntos se encuentran a distinta temperatura, pero con la particularidad de que existe movimiento relativo entre ellos. Este mecanismo de transferencia es típico en aplicaciones que trabajen con fluidos o con gases que se encuentran en movimiento. La ecuación que permite calcular el calor transferido por convección es:

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

La ecuación indica que el calor transferido por convección varía de forma directa con el área involucrada, con la diferencia de temperaturas y con una constante denominada coeficiente de convección [10].

Se dice que es proceso de convección natural cuando no se utilizan agentes externos que modifiquen el comportamiento del fluido, es decir el movimiento ocurre por procesos naturales. Mientras que, hablamos de convección forzada cuando se utilizan elementos que modifican el comportamiento del fluido como su velocidad [10].

2.2 Análisis en intercambiadores

La operación de los intercambiadores es continua en el tiempo, por este motivo se la considera como aparato de flujo estable. Esta consideración implica que el fluido que circula por las tuberías junto con sus propiedades es inalterable en el tiempo. Otra consideración aplicada para el análisis es considerar que las líneas de corriente de los fluidos no varían su velocidad ni cambian su posición [10].

La propiedad calor específico en un determinado fluido varía según su temperatura; a su vez, para un rango específico es posible determinar un valor promedio de temperatura sin perder mucha exactitud. Además, debido a que la conducción axial de calor suele ser insignificante, esta se puede despreciar. Finalmente, se considera que el dispositivo es adiabático [10].

La velocidad o tasa de transferencia de los fluidos se calcula al multiplicar el flujo másico por la capacidad calórica del fluido y por la variación de temperaturas exhibida por el fluido bajo análisis [10].

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C p_c (T_{c, salida} - T_{c, entrada})$$

(3)

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h, salida} - T_{h, entrada})$$

A menudo, se expresa la multiplicación del flujo másico y la capacidad calorífica en estudio como una variable denominada razón de capacidad calorífica [10].

2.2.1 Modelo de cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD)

Es un procedimiento que permite calcular la velocidad o tasa de transferencia, tomando en cuenta que las temperaturas en ambos fluidos varían de forma exponencial durante su trayecto a lo largo del dispositivo. La tasa promedio de calor transferido es:

$$\dot{Q} = UA\Delta T_m \quad (4)$$

Donde

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

ΔT_1 y ΔT_2 representan respectivamente el cambio de temperaturas tanto en la entrada como en la salida del dispositivo. El valor se calcula al seguir la trayectoria real de característica exponencial que presentan los valores de temperatura de ambos fluidos durante su recorrido [10].

2.3 Análisis de transferencia en intercambiadores de contraflujo

En la figura 8 se pueden observar cambios en la temperatura del fluido de trabajo, a lo largo del dispositivo de intercambio de contra flujo. Este intercambiador presenta la característica de que los fluidos de trabajo ingresan por extremos opuestos [10].

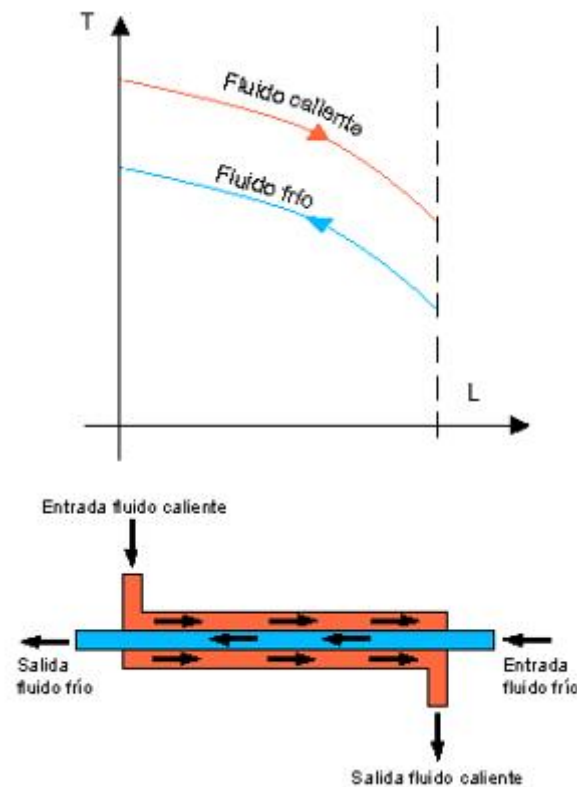


Figura 8. Dispositivo de intercambio de calor contraflujo [10].

La relación de temperaturas logarítmica explicada anteriormente, es también aplicable para intercambiadores en contraflujo. Si se compara con uno de flujo paralelo, es mayor en un intercambiador en contraflujo, esto permite deducir que es necesaria una menor área al trabajar en contraflujo para alcanzar una misma tasa. Por este motivo, se observa una mayor presencia del equipo de intercambio de calor de contraflujo en diversas aplicaciones.

2.3.1 Dispositivos de intercambio de calor de flujo cruzado y de varios pasos

Los equipos de transferencia de calor de flujo cruzado con múltiples pasos presentan ecuaciones muy complejas debido a las condiciones del flujo. Es muy útil implementar un factor F según las características geométricas del intercambiador.

$$\Delta T_m = F \Delta T_{mCF} \quad (5)$$

CAPÍTULO III

IDENTIFICACIÓN DE CÁLCULOS Y RESULTADOS

En el siguiente apartado, se determinan las propiedades físicas y características geométricas de la tubería por la cual circulan los fluidos. De igual manera, se identifican las propiedades físico químicas de agua pura. Posteriormente, se calculan variables adimensionales que permiten definir el coeficiente de convección interno y externo.

3.1 Definición del tipo de intercambiador a utilizar

Para llevar a cabo el estudio, es importante considerar ciertas apreciaciones que se presentan más adelante: la geometría y los materiales que conforman el intercambiador de calor en base a catálogos disponibles de distribuidores en el mercado local; la velocidad de ambos flujos se determina de acuerdo a recomendaciones provistas por literatura especializada; el flujo másico se define según el tipo de tubería utilizada, ya que dicho valor depende del área de circulación de los fluidos, de la velocidad y densidad de los mismos; se asignan las temperaturas de ingreso de ambos fluidos con el objetivo de realizar el estudio; se emplea un intercambiador que consta de tubos concéntricos, es decir un tubo se inserta en el interior de otro de mayor diámetro; el fluido caliente fluye a través del interior del tubo de diámetro más pequeño; el frío lo hace por el espacio comprendido entre la parte exterior del tubo de menor diámetro y la parte interior del tubo de mayor diámetro; se determinan mediante cálculos, los coeficientes de convección del agua caliente y el coeficiente de convección del agua fría, los mismos que determinan el coeficiente de transferencia global del sistema; los cálculos de los fluidos puros, así como sus parámetros, se realizan con el objetivo de posteriormente comparar estos valores con aquellos obtenidos al añadir nano partículas y obtener nano fluidos.

3.2 Planteamiento del problema

En un intercambiador de calor de contraflujo de doble tubo por un paso, se dispone que ingrese agua a 90 °C por la tubería tipo K de cobre, con un flujo másico de 0.17 kg/s, mientras que el fluido frío (agua) ingresa a una temperatura de 30 °C y abandonó el dispositivo con una temperatura de 71 °C, con un flujo másico de 0.19 kg/s; con una velocidad recomendada para

ambos fluidos viscosos de 2 m/s. Debido a limitaciones de espacio obtenido de catálogo comercial, la longitud del tubo no debe superar los 6.4 m de longitud.

A continuación, se calcula otros parámetros que se utilizarán para realizar la simulación de este proceso y así determinar las características en la salida del intercambiador de calor y demás propiedades.

3.2.1 Materiales y geometría del intercambiador

Para estudiar el proceso hay que escoger un tipo de tubería, se selecciona la tubería de cobre tipo K, utilizada en aplicaciones industriales en transporte de fluidos a elevadas presiones y temperaturas. La tabla 2 indica la presión y temperatura de trabajo de la tubería tipo K para distintos diámetros que varían desde 1/4" hasta 8".

Presión de trabajo tubería de cobre tipo K

Tabla 2. Presión de trabajo tubería de cobre tipo K [17]

TYPE K		RATED WORKING PRESSURE (PSIG)				
NOM. DIA.	WT/FT	FT/BNDL	150°F	200°F	300°F	400°F
1/4	0.145	500	913	860	842	537
3/8	0.269	500	960	904	885	565
1/2	0.344	500	758	713	698	446
5/8	0.418	200	626	589	577	368
3/4	0.641	200	724	682	668	426
1	0.839	100	557	524	513	327
1 1/4	1.04	100	452	425	416	266
1 1/2	1.36	100	420	396	387	247
2	2.06	–	370	348	341	217
2 1/2	2.93	–	338	319	312	199
3	4.00	–	328	308	302	193
3 1/2	5.12	–	311	293	286	183
4	6.51	–	306	288	282	180
5	9.67	–	293	276	270	172
6	13.90	–	295	277	271	173
8	25.90	–	314	295	289	184

El presente estudio propone trabajar con tubería de diámetro 1/2" con una presión de 713 psi, la misma que se recomienda utilizar a una temperatura 200 F (93.3 °C). La tabla 3 presenta las características geométricas y el valor de conductividad térmica que posee la tubería de cobre tipo K seleccionada.

Tabla 3. Características geométricas y valor de conductividad térmica [10] [17]

Tubería de Cu - K ½"	
Diámetro exterior	12.7 mm
Diámetro interior	10.922 mm
Espesor	0.889 mm
Conductividad térmica	$358.2 \frac{W}{mK}$

Se propone utilizar un dispositivo de intercambio de calor de tubo doble por un solo paso, el mismo que se compone de un tubo de cobre tipo K por el cual circula agua caliente, la misma que se refrigera externamente mediante el uso de agua fría. Se propone que el valor de longitud sea de máximo 6.4 m ya que este es el valor de longitud en tubería de cobre disponible en el mercado.

El área de circulación del agua fría depende directamente del espacio que existe entre la tubería interna y el tubo externo que conforman el intercambiador, se propone que el área de circulación de agua fría se encuentra comprendida entre el tubo interno de ½" seleccionado y un tubo externo de $\frac{5}{8}$.

McCabe indica que, para fluidos de baja viscosidad, es recomendable seleccionar velocidades entre 1.2 m/s y 2.4 m/s, debido a esto se selecciona la velocidad 2 m/s para ambos fluidos. La figura 9 muestra el intercambiador de contraflujo propuesto junto con sus características.

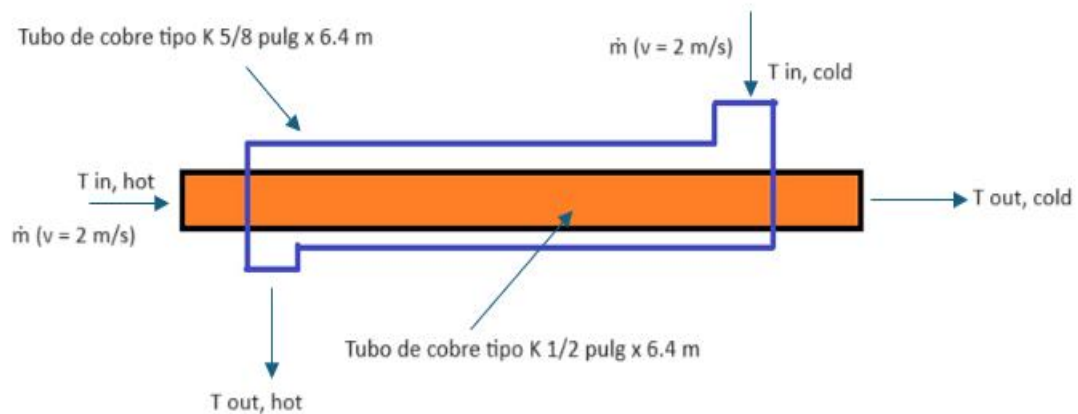


Figura 9. Intercambiador de calor contraflujo propuesto para el estudio [17]

3.2.2 Cálculo de área de circulación de flujo caliente y frío

Para determinar el área de circulación de ambos fluidos, se toma en cuenta la figura 10; en la que se indica el espacio geométrico por donde circula el agua fría y el agua caliente respectivamente.



Figura 10. Área de circulación de agua caliente y fría. [17]

$$A_{Cir_{Hot}} = \frac{\pi d \frac{1}{2} int^2}{4}$$

$$A_{cir_{hot}} = \frac{\pi d \frac{5''}{8} ext^2}{4} - \frac{\pi d \frac{1''}{2} ext^2}{4}$$

Donde:

$d_{\frac{1}{2}}\text{-int}$ = Diámetro interno de tubo de material Cu - K de ½" por el cual circula agua caliente.

$d_{\frac{1}{2}}\text{-ext}$ = Diámetro externo de tubo de material Cu - K de ½" por el cual circula agua caliente.

$d_{\frac{5}{8}}\text{-ext}$ = Diámetro externo de tubo de material Cu - K de 5/8" por el cual circula agua fría.

$$A_{Cir_{Hot}} = \frac{\pi(0.010922m)^2}{4}$$

$$A_{Cir_{Hot}} = 0.00009369 m^2$$

$$A_{Cir_{Cold}} = \frac{\pi(0.015875m)^2}{4} - \frac{\pi(0.0127)^2}{4}$$

$$A_{Cir_{Cold}} = 0.0000713 m^2$$

3.2.3 Cálculo de resistencia térmica a la conducción de tubería de cobre tipo K

El valor de la resistencia conductiva mencionada depende del espesor de la tubería, del área de transferencia y de la conductividad del cobre. Para calcular la resistencia térmica se utilizan las características geométricas y conductividad térmica de la tubería de cobre tipo K presentadas en la tabla 3, por medio de la siguiente ecuación:

$$R_{conducción} = \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2\pi k_{Cu} L}$$

$$R_{conducción} = \frac{\ln\left(\frac{12.7 mm}{10.922 mm}\right)}{2\pi\left(358.2 \frac{W}{mK}\right)(10 m)}$$

$$R_{Conducción} = 0.000006701 \frac{K}{W}$$

La resistencia a la conducción que se obtiene es muy cercana a 0, por lo que es común que no se considere su efecto en el análisis.

3.3 Coeficiente de transferencia de calor global

Es función de valores de resistencia conductiva de la tubería y de la resistencia convectiva de ambos flujos. Para determinar las resistencias de convección del agua fría y del agua caliente es necesario identificar las propiedades termofísicas del agua, que permiten calcular posteriormente distintos valores, que afectan directamente el valor del coeficiente convectivo del fluido y este a su vez influye en la resistencia térmica de convección.

3.3.1 Propiedades termofísicas de H₂O

Anteriormente, se propuso que el flujo frío ingresa con una temperatura de 30 °C y abandona el intercambiador a 71 °C. Para determinar las propiedades termofísicas del agua, se obtiene una temperatura promedio y se identifican las propiedades termofísicas mediante el uso de tablas. La tabla 4 muestra las propiedades termofísicas del agua evaluada a 50 °C [10].

Tabla 4. Propiedades termofísicas del agua a 50 °C [10]

Propiedades termofísicas del agua	
Temperatura K	333
Calor específico $\frac{KJ}{kg.K}$	4.186
Densidad $\frac{kg}{m^3}$	982.31
Conductividad térmica $\frac{W}{mK}$	0.656
Viscosidad dinámica $\frac{N.s}{m^2}$	0.000453

3.3.2 Coeficiente de convección agua caliente

Se identifican las condiciones del fluido que circula por la tubería de cobre tipo K, para ello se calcula números adimensionales como se presenta a continuación:

3.3.2.1 Número de Reynolds – agua caliente. Este valor permite identificar si se trata de flujo tipo laminar, turbulento o si se encuentra en transición. Reynolds depende de la velocidad, densidad, forma y viscosidad del elemento, en el caso de estudio el parámetro de forma es el diámetro interno. La expresión que se muestra permite determinar el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho_{Agua} v_m d_{int}}{\mu}$$

$$Re = \frac{982.31 \frac{kg}{m^3} * 2 \frac{m}{s} * 0.010922 m}{0.000453 \frac{kg \cdot s}{m}}$$

$$Re = 47367.7255$$

Se considera que el flujo es laminar para valores de Reynolds menores a 2000; para valores entre 2000 y 3000 es transitorio y para valores de Reynolds superiores a 3000 es turbulento [10]. Por eso, el flujo que circula por el tubo interior es turbulento desarrollado.

3.3.2.2 Número de Prandtl – agua caliente. Prandtl es un número que se obtiene al dividir el efecto de la tasa de difusión de momentum con la capacidad de conducción de calor del fluido. Es directamente proporcional a la capacidad calorífica y viscosidad del fluido e inversamente proporcional a su conductividad térmica, la ecuación que se presenta a continuación permite determinarlo [10].

$$Pr = \frac{Cp * \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{4186 \frac{J}{kg} K * 0.000453 \frac{kg \cdot s}{m}}{0.656 \frac{W}{mK}}$$

$$Pr = 2.89$$

3.3.2.3 Número de Nusselt – agua caliente. Este valor indica la proporción entre la energía térmica convectiva en comparación a la energía térmica conductiva en un determinado fluido. El valor de Nusselt de un fluido de trabajo completamente desarrollado varía directamente con los valores de Prandtl y Reynolds; para determinar Nusselt se emplea la siguiente ecuación denominada ecuación de Colburn [10].

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{1/3} \quad \left(\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re > 10000 \end{array} \right)$$

$$Nu = 0.023(47367)^{0.8}$$

$$Nu = 180.19$$

3.3.2.4 Cálculo coeficiente convectivo del agua caliente. El coeficiente de convección varía de manera proporcional con el número de Nusselt y la conductividad térmica del flujo, mientras que varía de forma inversa con el diámetro de la tubería por donde circula el flujo. La ecuación presentada a continuación permite determinar el coeficiente de convección interna [10].

$$h_{int} = \frac{Nu * k_{Agua}}{d_{int}}$$

$$h_{int} = \frac{180 * 0.656 \frac{W}{mK}}{0.010922 m}$$

$$h_{int} = 10811.2 \frac{W}{m^2K}$$

3.3.3 Coeficiente convectivo del agua fría

Para determinar el coeficiente convectivo del agua fría es necesario identificar las condiciones del flujo que transita por el interior de la tubería de cobre tipo K, por lo que se determina parámetros como los números de Nusselt, Reynolds y Prandtl.

3.3.3.1 Número de Reynolds – agua fría. Reynolds, de igual forma, depende de la velocidad, densidad, forma y viscosidad del elemento que se encuentra en el fluido; el parámetro de forma es el diámetro de la tubería.

$$Re = \frac{\rho_{Agua} v_m d_{ext}}{\mu}$$

$$Re = \frac{982.31 \frac{kg}{m^3} * 2 \frac{m}{s} * 0.0127 m}{0.000453 \frac{kg \cdot s}{m}}$$

$$Re = 55078.75$$

El valor de Reynolds es superior a 3000, lo que implica que se trata de un flujo de agua turbulento totalmente desarrollado.

3.3.3.2 Número de Prandtl – agua fría. Para determinar el número de Prandtl del agua fría que circula por el exterior de la tubería, se utiliza la siguiente relación:

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k_{Agua}}$$

$$Pr = \frac{4186 \frac{J}{kg} K * 0.000453 \frac{kg \cdot s}{m}}{0.656 \frac{W}{mK}}$$

$$Pr = 2.89$$

3.3.3.3 Número de Nusselt – agua fría. Varía de forma directa con los números de Prandtl y Reynolds. Para condiciones de flujo externo, Nusselt se lo calcula por medio de la siguiente expresión algebraica [10].

$$Nu = 0.332 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad \left(\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re > 10000 \end{array} \right)$$

$$Nu = 0.332(55078.75)^{1/2}(2.89)^{1/3}$$

$$Nu = 110.98$$

3.3.3.4 Cálculo de convección del agua fría. El valor del coeficiente varía directamente con el número de Nusselt y con la conductividad térmica del fluido, mientras que varía de forma inversa con el diámetro de la tubería. La expresión algebraica que se presenta a continuación permite calcular el coeficiente convectivo externo [10].

$$h_{ext} = \frac{Nu * k_{Agua}}{d_{ext}}$$

$$h_{ext} = \frac{110.98 * 0.656 \frac{W}{mK}}{0.0127 m}$$

$$h_{ext} = 5732.51 \frac{W}{m^2K}$$

3.4 Determinación de coeficiente de transferencia global de calor

El valor es función de las resistencias convectivas de ambos fluidos y de la resistencia convectiva del espesor de la pared. Para determinar su valor se emplea la siguiente expresión algebraica:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{A_{int} h_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2\pi k_{Cu} L} + \frac{1}{A_{ext} h_{ext}}}$$

Donde:

U = Coeficiente de transferencia global. $\frac{W}{m^2K}$

A_{int} = Área por la que transita agua caliente. m^2

A_{ext} = Área por la que transita agua fría. m^2

h_{int} = Coeficiente convectivo - agua caliente. $\frac{W}{m^2K}$

h_{ext} = Coeficiente convectivo - agua fría. $\frac{W}{m^2K}$

k_{Cu} = Conductividad térmica. $\frac{W}{mK}$

d_{ext} = Diámetro externo de tubo Cu de 1/2" tipo K .m

d_{int} = Diámetro interior de tubo Cu de 1/2" tipo K .m

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_{int} L h_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2\pi k_{Cu} L} + \frac{1}{\pi d_{ext} L h_{ext}}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\pi(0.010922m)(6.4m)\left(10811.2\frac{W}{m^2K}\right)} + \frac{\ln\left(\frac{10.922mm}{12.7mm}\right)}{2\pi\left(358.2\frac{W}{mK}\right)(6.4m)} + \frac{1}{\pi(0.0127m)(6.4m)\left(5732.51\frac{W}{m^2K}\right)}}$$

$$U = 914.16 \frac{W}{m^2K}$$

3.5 Temperatura con la que abandona el intercambiador el fluido caliente

Al calcular la temperatura de salida del flujo caliente, se tiene en cuenta que la energía del fluido caliente se transmite hacia el fluido frío, que el sistema se encuentra bien aislado y que la resistencia por conducción en las paredes de la tubería se puede despreciar ya que presenta un valor muy cercano a 0 ($0.000006701\frac{K}{W}$). De esta forma, las ecuaciones en el intercambiador son:

$$\dot{Q} = m_{Hot} Cp (Th_{in} - Th_{out}) = m_{cold} Cp (Tc_{out} - Tc_{in})$$

$$\left(0.184 \frac{kg}{s}\right) (90^\circ C - Th_{out}) = \left(0.14 \frac{kg}{s}\right) (71^\circ C - 30^\circ C)$$

$$Th_{out} = 58.8^\circ C$$

Donde:

$$\dot{Q} = \text{tasa de transferencia. } \frac{W}{s}$$

$$m_{Hot} = \text{flujo másico de agua caliente. } \frac{kg}{s}$$

$$m_{Cold} = \text{flujo másico de agua fría. } \frac{kg}{s}$$

$$Cp = \text{calor específico del agua. } \frac{J}{kg.K}$$

3.6 Cálculo de temperatura media logarítmica del intercambiador de calor

Este valor depende de las temperaturas con las que ingresan y abandonan el intercambiador los flujos determinados. Para identificar el valor de dicha temperatura, se emplea la siguiente expresión.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln \left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2} \right)}$$

Donde:

$\Delta T1$ = Variación de temperatura que ocurre en la entrada del intercambiador. °C

$\Delta T2$ = Variación de temperatura que ocurre en la salida del intercambiador. °C

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(Th_{in} - Tc_{out}) - (Th_{out} - Tc_{in})}{\ln \left(\frac{Th_{in} - Tc_{out}}{Th_{out} - Tc_{in}} \right)}$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(90^{\circ}C - 71^{\circ}C) - (58.8^{\circ}C - 30^{\circ}C)}{\ln \left(\frac{90^{\circ}C - 71^{\circ}C}{58.8^{\circ}C - 30^{\circ}C} \right)}$$

$$\Delta T_{LMTD} = 23.56^{\circ}C$$

3.7 Cálculo de velocidad o tasa de transferencia

Para determinar el valor de la tasa se considera adiabático al intercambiador, es decir que no existe pérdida de energía hacia el exterior. Las temperaturas se expresan en grados Kelvin ($T_{c,out} = 344K, T_{c,\epsilon} = 303K$.)

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_p$$

$$\dot{Q} = \left(0.14 \frac{kg}{s} \right) \left(4186 \frac{J}{kgK} \right) (344K - 303K)$$

$$\dot{Q} = 24027.64 W$$

3.8 Cálculo de área efectiva de transferencia

A continuación, se proporciona el procedimiento de cálculo del área efectiva de transferencia de calor.

$$\dot{Q} = UA \Delta T_{LMTD}$$

$$24027.64W = \left(914.16 \frac{W}{m^2K} \right) A (296.56K)$$

$$A = 0.088 m^2$$

3.9 Identificación de correlaciones y cálculo de propiedades termofísicas del nanofluido H₂O/CuO

La eficiencia mejora al trabajar con nano fluidos, principalmente debido a dos causas, la primera es que las nano partículas que se agregan incrementan la propiedad de conducción térmica del fluido base, mientras que la segunda tiene que ver con el movimiento turbulento de las nano partículas que incrementan la velocidad de intercambio de calor.

El porcentaje volumétrico de nanopartículas que se agregan sobre el fluido base es un factor que afecta sus propiedades, la revisión bibliográfica indica que se obtienen variaciones significativas al agregar porcentajes volumétricos de nano partículas comprendidas entre 4 % y 6 %. Por este motivo, se propone trabajar con una fracción volumétrica de 5 %. Algunas propiedades que presentan las nanopartículas de CuO se muestran por medio de la tabla 5 [18].

Tabla 5. Propiedades de las nanopartículas de CuO [18].

Nanopartículas CuO	
Masa molar $\frac{g}{mol}$	79.55
Calor específico $\frac{J}{kg.K}$	550.5
Densidad $\frac{kg}{m^3}$	6320
Conductividad térmica $\frac{W}{mK}$	32.9
Diámetro nm	40

3.9.1 Conductividad térmica del nanofluido

Esta propiedad depende de parámetros de forma, tamaño y material de las nano partículas y características del fluido base como el agrupamiento, la homogeneidad, la temperatura, la acidez, etc. [18].

El modelo empleado que permite determinar la conductividad térmica del nanofluido fue propuesto por Maxwell, dicho modelo fue desarrollado tomando en cuenta pequeñas concentraciones de partículas dispersas en un fluido homogéneo isotrópico continuo. La ecuación que permite determinar dicha propiedad es: [18].

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

Donde, k_{nf} es el valor de conductividad del nano fluido, k_{fb} es el valor conductividad del fluido base, β es la relación entre la conductividad térmica de las nano partículas y del nano fluido $\beta = \frac{k_{np}}{k_{fb}}$ y ϕ es la fracción volumétrica de nano partículas.

Al reemplazar las variables con sus valores correspondientes y realizar los cálculos, se obtiene la conductividad térmica del nano fluido.

$$\beta = \frac{k_{np}}{k_{fb}} = \frac{32.9}{0.656} = 50.15$$

$$\frac{k_{nf}}{0.656 \frac{W}{mK}} = 1 + \frac{3(50.15 - 1)(0.05)}{(50.15 + 2) - (50.15 - 1)(0.05)}$$

$$k_{nf} = 0.753 \frac{W}{mK}$$

3.9.2 Viscosidad del nano fluido

La viscosidad del nano fluido es una propiedad termo física que varía con respecto a la viscosidad del fluido base principalmente porque las nano partículas que se agregan se encuentran muy próximas entre ellas. Uno de los primeros modelos desarrollados que permiten determinar la viscosidad del nano fluido fue propuesto por Einstein: [18].

$$u_{nf} = u_{fb}(1 + 2.5\phi)$$

A partir del modelo de Einstein, se desarrollaron varios modelos que permiten determinar la viscosidad del nano fluido, entre los cuales destaca el modelo de Bachelor: [18].

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

Al reemplazar las variables con sus respectivos valores y realizar los cálculos, se determina la viscosidad dinámica del nano fluido.

$$u_{nf} = \left(0.000453 \frac{N \cdot s}{m^2}\right) (1 + 2.5(0.05) + 6.5(0.05)^2)$$

$$u_{nf} = 0.000517 \frac{N \cdot s}{m^2}$$

3.9.3 Densidad y calor específico del nano fluido

Son características termofísicas que tienen un impacto directo en la velocidad de transferencia. El valor de densidad afecta parámetros como el número de Reynolds, Nusselt, factor de rozamiento y el cambio en la presión de los fluidos. Adicional a eso, la densidad del nanofluido varía linealmente respecto a la fracción de volumen de las nano partículas y disminuye de manera no lineal con las variaciones de temperatura en los fluidos. Con el objetivo de calcular la densidad del nanofluido se emplea la ecuación propuesta por Dehaj y Mohiabadi, mientras que para identificar la capacidad calorífica del nano fluido se emplea la expresión algebraica propuesta por Zhou [18].

$$d_{nf} = d_{np}\phi + d_{fb}(1 - \phi)$$

$$C_{p,nf} = (1 - \phi)C_{p,fb} + \phi C_{p,np}$$

Donde, d_{nf} corresponde al valor de densidad del nanofluido, d_{np} es el valor de densidad de la nano partícula, d_{fb} es la densidad del fluido base, $C_{p,nf}$ es el valor de capacidad calorífica del nano fluido, $C_{p,fb}$ es el valor de capacidad calorífica del fluido base y $C_{p,np}$ es la capacidad calorífica de las nano partículas.

Al reemplazar las variables con sus respectivos valores y realizar los cálculos, se obtiene el valor de la densidad y el valor de la capacidad calorífica del nano fluido.

$$d_{nf} = \left(6320 \frac{kg}{m^3}\right)(0.05) + \left(982.31 \frac{kg}{m^3}\right)(1 - 0.05)$$

$$d_{nf} = 1249.1945 \frac{kg}{m^3}$$

$$C_{p,nf} = (1 - 0.05) \left(4186 \frac{J}{kg.K}\right) + (0.05) \left(550.5 \frac{J}{kg.K}\right)$$

$$C_{p,nf} = 4004.25 \frac{J}{kg.K}$$

3.10 Identificación de correlaciones y cálculo de Prandlt, Nusselt y Reynolds del nanofluido

Para calcular dichos parámetros se utilizan las siguientes ecuaciones [18].

$$Re_{nf} = \frac{v_m D}{u_{nf}}$$

$$Pr_{nf} = \frac{u_{nf}}{\alpha_{nf}}$$

$$Pe_{np} = \frac{v_m dp}{\alpha_{nf}}$$

$$Nu_{nf} = 0.0059(1 + 7.6286\phi^{0.6886}Pe_{np}^{0.001})Re_{nf}^{0.9238}Pr_{nf}^{0.4}$$

Donde, Re_{nf} es el número de Reynolds del nano fluido, v_m es la velocidad media, D es el diámetro de tubería por donde circula el nanofluido y u_{nf} es la viscosidad cinemática del nanofluido que se determina como la comparación entre el valor de la viscosidad dinámica y el valor de la densidad. Con respecto a la segunda ecuación, Pr_{nf} es el número de Prandtl y α_{nf} es la difusividad térmica). El número de Peclet Pe_{np} , depende de la velocidad promedio del nanofluido v_m , del diámetro de las nanopartículas dp y de la difusividad térmica α_{nf} .

Al reemplazar las variables con sus valores correspondientes y realizar los cálculos, se obtiene el valor del número de Reynolds, Prandtl y Peclet.

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{d_{nf}Cp_{nf}} = \frac{0.753 \frac{W}{mK}}{\left(1249.1945 \frac{kg}{m^3}\right) \left(4004.25 \frac{J}{kg \cdot K}\right)}$$

$$\alpha_{nf} = 1.5 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$Re_{nf} = \frac{d_{nf}v_m D}{u_{nf}} = \frac{\left(1249.1945 \frac{kg}{m^3}\right) \left(2 \frac{m}{s}\right) (0.010922m)}{0.000517 \frac{N \cdot s}{m^2}}$$

$$Re_{nf} = 52780.28$$

$$Pr_{nf} = \frac{u_{cnf}}{\alpha_{nf}} = \frac{4.1 \times 10^{-7}}{1.5 \times 10^{-7}}$$

$$Pr_{nf} = 2.73$$

$$Pe_{np} = \frac{v_m dp}{\alpha_{nf}} = \frac{\left(2 \frac{m}{s}\right) (40 \times 10^{-9} m)}{1.5 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}}$$

$$Pe_{np} = 0.533$$

$$Nu_{nf} = 0.0059(1 + 7.6286 \emptyset^{0.6886} Pe_{np}^{0.001}) Re_{nf}^{0.9238} Pr_{nf}^{0.4}$$

$$Nu_{nf} = 0.0059(1 + 7.6286(0.05)^{0.6886} (0.533)^{0.001}) 52780.28^{0.9238} 2.73^{0.4}$$

$$Nu_{nf} = 240.68$$

3.11 Cálculo de variables que influyen en el proceso de transferencia en el intercambiador de calor de contraflujo al trabajar con nano fluido H₂O/CuO

Para realizar el análisis, se emplea el mismo modelo de intercambiador de contraflujo propuesto en el capítulo anterior, con la particularidad de que se reemplaza el fluido frío por el nano fluido H₂O/CuO. Esta consideración implica una variación en el coeficiente de convección externo y esta, a su vez, afecta el coeficiente de transferencia de calor global.

3.11.1 Identificación de coeficiente convectivo del nanofluido H₂O/CuO

El coeficiente de convección externo de transferencia varía de forma de proporcional con el Nusselt del nano fluido, la conductividad térmica del nano fluido y el diámetro externo de la tubería de ½". Por medio de la siguiente expresión algebraica se identifica el coeficiente convectivo externo del nano fluido [10].

$$h_{ext_{nf}} = \frac{Nu_{nf} * k_{nf}}{d_{ext}}$$

$$h_{ext_{nf}} = \frac{240.68 * 0.753 \frac{W}{mK}}{0.0127m}$$

$$h_{ext_{nf}} = 14270.24 \frac{W}{m^2K}$$

3.11.2 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor global de H₂O/CuO

El coeficiente de transferencia de calor global varía debido a que el coeficiente convectivo externo presenta una variación.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{A_{int} h_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2\pi k_{Cu} L} + \frac{1}{A_{ext_nf} h_{ext_nf}}}$$

Donde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor. $\frac{W}{m^2 K}$

A_{int} = Área interior de las paredes de la tubería de cobre tipo K por la cual circula agua caliente. m^2

A_{ext} = Área exterior de las paredes de la tubería de cobre tipo K por la cual circula agua caliente. m^2

h_{int} = Coeficiente de convección del agua caliente. $\frac{W}{m^2 K}$

h_{ext_nf} = Coeficiente de convección del nano fluido. $\frac{W}{m^2 K}$

k_{Cu} = Conductividad térmica de tubería de cobre tipo K. $\frac{W}{mK}$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\pi(0.010922 m)(6.4 m)\left(10811.2 \frac{W}{m^2 K}\right)} + \frac{\ln\left(\frac{10.922 mm}{12.7 mm}\right)}{2\pi\left(358.2 \frac{W}{mK}\right)(6.4 m)} + \frac{1}{\pi(0.0127 m)(6.4 m)\left(14270.24 \frac{W}{m^2 K}\right)}}$$

$$U = 1459.49 \frac{W}{m^2 K}$$

3.11.3 Cálculo de temperatura con la que abandona el intercambiador de fluido caliente al trabajar con nano fluido H_2O/CuO

De igual forma, para calcular la temperatura con la que abandona el agua caliente se toma en cuenta que la transición energética ocurre únicamente entre el agua caliente y el nano fluido H_2O/CuO , es decir el intercambiador de calor es adiabático.

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C p_{Agua} (Th_{in} - Th_{out}) = \dot{m}_{nf} C p_{nf} (Tc_{out} - Tc_{in})$$

$$\left(0.184 \frac{kg}{s}\right) \left(4186 \frac{J}{kg \cdot K}\right) (90^\circ C - Th_{out}) = \left(0.18 \frac{kg}{s}\right) \left(4004.25 \frac{J}{kg \cdot K}\right) (71^\circ C - 30^\circ C)$$

$$Th_{out} = 51.63^\circ C$$

Donde:

\dot{Q} = tasa de transferencia de calor. $\frac{W}{s}$

m_{Hot} = flujo masico de agua caliente. $\frac{kg}{s}$

m_{nf} = flujo masico de nano fluido H_2O/CuO . $\frac{kg}{s}$

Cp = calor específico del agua. $\frac{J}{kg.K}$

Cp_{nf} = calor específico de nano fluido H_2O/CuO . $\frac{J}{kg.K}$

3.11.4 Cálculo de temperatura media logarítmica del intercambiador de calor al trabajar con nano fluido H_2O/CuO

El valor de temperatura media logarítmica depende de las temperaturas de ingreso y salida del fluido caliente y del nano fluido H_2O/CuO , para determinar su valor, se utiliza la siguiente expresión.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(Th_{in} - Tc_{out}) - (Th_{out} - Tc_{in})}{\ln\left(\frac{Th_{in} - Tc_{out}}{Th_{out} - Tc_{in}}\right)}$$
$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(90\text{ }^\circ\text{C} - 71\text{ }^\circ\text{C}) - (51.63\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{90\text{ }^\circ\text{C} - 71\text{ }^\circ\text{C}}{51.63\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}}\right)}$$
$$\Delta T_{LMTD} = 20.28\text{ }^\circ\text{C}$$

3.11.5 Cálculo de tasa de transferencia de calor al trabajar con nano fluido H_2O/CuO

Para determinar el calor transferido de mayor temperatura hacia el nanofluido se considera que no existe pérdida de energía hacia el exterior. Las temperaturas se expresan en grados Kelvin

$$(Tc_{out} = 344\text{ K}, Tc_{in} = 303\text{ K})$$
$$\dot{Q} = m_{nf} Cp_{nf} (Tc_{out} - Tc_{in})$$
$$\dot{Q} = \left(0.18\frac{kg}{s}\right) \left(4004.25\frac{J}{kg.K}\right) (71\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C})$$
$$\dot{Q} = 29551.665\text{ W}$$

3.12 Tabla comparativa

En la tabla 6 se contrastan propiedades físicas y factores que impactan en el fenómeno de transferencia de calor, al trabajar con agua fría y con nano fluido H₂O/CuO en el intercambiador de calor de contraflujo determinado para el estudio.

Tabla 6. Comparación propiedades físicas y variables entre agua fría y nano fluido H₂O/CuO

Propiedad / Variable	Agua fría	H ₂ O/CuO	Porcentaje
Conductividad térmica $\frac{W}{mK}$	0.656	0.753	14.7 % incremento
Densidad $\frac{kg}{m^3}$	982.31	1249.19	27 % incremento
Viscosidad dinámica $\frac{N.s}{m^2}$	0.000453	0.000517	14.1 % incremento
Calor específico $\frac{J}{kg.K}$	4186	4004.25	4.3 % reducción
Coefficiente de convección $\frac{W}{m^2K}$	5732.51	14270.24	148.9 % incremento
Temperatura con la que abandona el fluido caliente. °C	58.8	51.63	12.2 % reducción
Flujo másico $\frac{kg}{s}$	0.14	0.18	28 % incremento
Diferencia de temperatura media logarítmica. °C	23.56	20.28	13.92 % reducción
Coefficiente global de transferencia de calor. $\frac{W}{m^2K}$	914.16	1459.48	59.7 % incremento
Calor transferido. W	24027.64	29551.665	23 % incremento

CAPÍTULO IV

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL NANOFUIDO H₂O/CuO, MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE ANSYS

Las herramientas tecnológicas orientadas al desarrollo del software perfeccionado permiten analizar el comportamiento de varios elementos en distintas situaciones, sin recurrir a métodos experimentales. Uno de los softwares que presentan mayor uso en la actualidad es el denominado Ansys, el mismo que contiene varios paquetes que permiten simular respuestas de sistemas estructurales y sistemas de fluidos tomando en cuenta distintos escenarios de operación. Entre los paquetes de simulación que contiene Ansys se encuentra Ansys Fluent, el mismo que permite modelar el comportamiento de fluidos cuando estos son sometidos a distintas cargas térmicas y cargas dinámicas.

El presente capítulo muestra los parámetros que se toman en cuenta para modelar, mediante el uso de Ansys Fluent, el comportamiento de un fluido en un intercambiador de contra flujo, cuando a este se le añaden nano partículas de CuO.

4.1 Métodos de cálculo de Ansys Fluent

En mecánica de fluidos computacional se presentan dos modelos predominantes, a partir de los cuales el software Ansys Fluent realiza los cálculos correspondientes: modelo de fase discreta o enfoque de Euler - Lagrange y modelo multifásico también conocido como enfoque Euler – Euler.

A continuación, se exponen los parámetros y ecuaciones con los que trabaja el software Ansys Fluent para llevar a cabo las distintas simulaciones. Cabe mencionar que esos elementos se presentan para entender cómo funciona el programa internamente; más no para demostrar resultados obtenidos de estos.

4.1.1 Método de fase discreta enfoque Euler-Lagrange

En el método de enfoque Euler – Lagrange, el número de partículas que se agregan sobre el fluido continuo se determina previamente. En este enfoque, el tamaño de las partículas de forma esférica se determina según el radio de la misma y a la posición en la que se liberan, y se considera que la interacción entre partícula y partícula se puede despreciar.

Las partículas que se agregan interactúan con los límites de la pared y con el flujo de fluido base. Sin embargo, estas no interfieren con la geometría de dicho flujo, esta consideración implica que el software considera que una partícula de un tamaño determinado puede ingresar en un espacio que presente un tamaño menor a la partícula mencionada.

Otra consideración importante en este tipo de enfoque es que no existe transferencia de masa ni de calor entre las partículas agregadas y el flujo del fluido. Esta última consideración explica porque este método no es recomendable cuando se desea modelar mezclas de distintos fluidos y transferencia entre estos.

De acuerdo con las condiciones mencionadas, se imprime un conjunto de ecuaciones diferenciales según la posición y velocidad de cada partícula. Dichas ecuaciones posteriormente se integran para determinar la respuesta de cada partícula conforme atraviesan el flujo. En este caso las partículas siguen el enfoque del modelo Euler – Lagrange.

Según este enfoque, se resuelve el sistema de ecuaciones considerando dos consideraciones principales: el flujo continuo se modela y soluciona mediante Navier Stokes y el teorema de continuidad; y para la fase discreta, se soluciona mediante la trayectoria de cada partícula. La cantidad de partículas que se agregan y el volumen que estas ocupan se excluyen para el cálculo del flujo del fluido continuo.

El software permite definir dos tipos de partículas que se agregan sobre el fluido: partículas sin masa y con masa. Las partículas que se definen como sin masa (Massless) siguen su trayectoria de acuerdo con las líneas de que genera el fluido de flujo continuo, en este caso el radio de la partícula que determina su tamaño no afecta al flujo o a las partículas con las que interactúa, es decir se presentan solo para visualización.

En el caso de partículas definidas como con masa (Hassmass), esta se determina tomando en cuenta el diámetro o radio de las partículas y la densidad de estas. Se consideran dos fuerzas actuantes cuando se trabaja con partículas con masa, las mismas que definen el movimiento de las partículas, estas son: fuerza de inercia o arrastre entre la partícula, el fluido de flujo continuo y la fuerza de gravedad.

Este modelo no toma en cuenta las fuerzas de dispersión ocasionadas por la turbulencia que se genera al agregar las partículas sobre el fluido base. Además, la fuerza de arrastre generada entre la partícula y la naturaleza del fluido principal cambia en función del tamaño de las partículas que se incorporan. Con respecto al intercambio de momento que ocurre al trabajar

con partículas con masa entre el fluido base y dichas partículas, se tienen dos tipos de modelos.

El primer modelo se denomina acoplamiento unidireccional y hace referencia a que el movimiento de las partículas dentro del flujo sí afecta al mismo, pero el movimiento del fluido base no se ve influenciado por el movimiento de las partículas. Por otra parte, se tiene el acoplamiento bidireccional, que se caracteriza porque cualquier cambio de posición de las partículas sí influye en el movimiento del fluido base.

4.1.1.1 Movimiento de las partículas dispersas. En el enfoque Euler – Lagrange o simplemente enfoque lagrangiano, el movimiento de la partícula queda establecido de acuerdo con ecuaciones de equilibrio, según los límites y restricciones que se aplican como condiciones. A partir de estos parámetros, se realiza el proceso de integración que permite definir el comportamiento de la partícula a lo largo del fluido.

4.1.1.2 Ecuaciones de cambio de posición de las partículas dispersas sobre el fluido. En situaciones de partículas individuales en movimiento a través de un fluido, el movimiento que tendrán se determina según la fuerza total neta que se encuentra actuando sobre ellas. De acuerdo con la segunda ley de Newton, se puede establecer el equilibrio dinámico de las distintas partículas por medio de la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_p = m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt}$$

Donde:

m_p = Masa de la partícula. kg

$\frac{d\vec{V}_p}{dt}$ = Variación de la velocidad de la partícula con respecto al tiempo. $\frac{m}{s^2}$

\vec{F}_p = Fuerza total actuante sobre la partícula. N

De acuerdo con el enfoque lagrangiano, la velocidad de la partícula se define según se indica en la siguiente ecuación:

$$\vec{V}_p = U_p \vec{i} + V_p \vec{j} + W_p \vec{k}$$

Donde:

\vec{V}_p = Velocidad total de la partícula.

$U_p \vec{i}$ = Velocidad en la dirección x de la partícula. $\frac{m}{s}$

$V_p \vec{j}$ = Velocidad en la dirección y de la partícula. $\frac{m}{s}$

$W_p \vec{k}$ = Velocidad en la dirección z de la partícula. $\frac{m}{s}$

Al trabajar con partículas de forma esférica que se encuentran ocupando un volumen determinado, con una densidad conocida y con un diámetro establecido, se puede calcular la masa de la partícula mediante el uso de la siguiente expresión algebraica:

$$m_p = \rho_p (vol)_p = \rho_p \frac{1}{6} \pi d_p^3$$

Donde:

m_p = Masa de la partícula. kg

ρ_p = Densidad de la partícula. $\frac{kg}{m^3}$

$(vol)_p$ = Volumen de la partícula. m^3

d_p = Diámetro de la partícula. m

Con respecto al valor de la fuerza neta, se toma en cuenta el aporte de todas las fuerzas actuantes, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_p = \vec{F}_D + \vec{F}_G + \vec{F}_R + \vec{F}_{Ext}$$

Donde:

\vec{F}_p = Fuerza total actuante sobre la partícula. N

\vec{F}_D = Fuerza de arrastre. N

\vec{F}_G = Fuerza de gravedad. N

\vec{F}_R = Fuerza causada por rotación (centrípeta y Coriolis). N

\vec{F}_{Ext} = Fuerzas especificadas por el usuario.

La fuerza de arrastre depende directamente de la velocidad de desplazamiento en el flujo del fluido. Para determinar dicha fuerza, se puede recurrir a la siguiente expresión:

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_p |\vec{V} - \vec{V}_p| (\vec{V} - \vec{V}_p)$$

Donde:

C_D = Coeficiente de arrastre.

ρ = densidad del fluido de flujo continuo. $\frac{kg}{m^3}$

A_p = Área de la partícula que se proyecta sobre dirección del flujo. m^2

\vec{V} = Velocidad del fluido. $\frac{m}{s}$

El valor del coeficiente de arrastre se calcula de acuerdo al número de Reynolds relativo de la partícula:

$$Re_p = \frac{\rho |\vec{V} - \vec{V}_p| d_p}{u}$$

Donde:

u = Viscosidad dinámica del fluido base. Pa.s

4.1.2 Condiciones iniciales de la partícula

En el enfoque Euler – Lagrange, las partículas que siguen una determinada ruta, lo hacen bajo un régimen transitorio. Por este motivo, es necesario indicar condiciones iniciales de las partículas que permiten determinar su trayectoria. Las condiciones iniciales se refieren a la posición donde las partículas se liberan, la velocidad, la frecuencia, posición en la que se liberan, etc.

En el método discreto se considera que las partículas no presentan variaciones con respecto a su forma, tamaño y material a lo largo de su trayectoria en el fluido de flujo continuo. Además, al trabajar con partículas con una masa determinada, que colisionan con las paredes de la tubería donde circulan, estas intercambian momento mediante tres formas que se establecen en las condiciones del límite. Los tres tipos de intercambio de momento son rebote perfecto, rebote parcial y rebote de adherencia.

Se dice que es rebote perfecto, cuando la energía y momento que tiene la partícula antes de la colisión no varía cuando esta ha ocurrido; el ángulo de incidencia y reflexión presentan el mismo valor, lo que presenta cambio es el signo de la velocidad perpendicular al contorno

antes y después del choque. Se dice que es adherencia, cuando toda la energía y momento que posee la partícula se transfiere a la pared, lo que ocasiona que dicha partícula quede adherida. Finalmente, se habla de rebote parcial cuando la energía cinética y momento que llevan las partículas se disipa parcialmente, en este caso el ángulo de llegada o incidencia varía con respecto al ángulo de salida o reflexión. En la figura 11 presenta un esquema de los tres tipos de rebote.

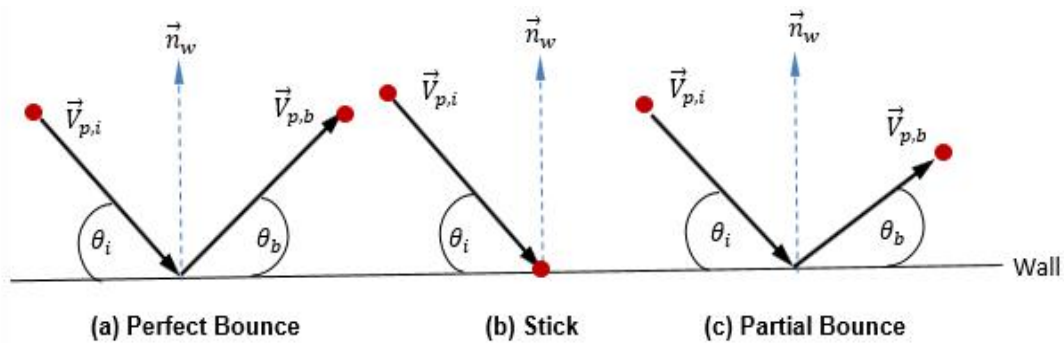


Figura 11. Esquema de los tipos de rebote. [17]

4.1.3 Modelo multifásico enfoque euleriano

De acuerdo con este enfoque, mediante el uso del software Ansys Fluent, se pueden modelar distintas fases que se encuentran separadas pero que tienen influencia entre ellas. Las fases pueden corresponder a fase sólida, líquida o gas. En contraste con el método lagrangiano, en el enfoque euleriano se utiliza un método distinto para cada fase.

El enfoque euleriano considera que la presión es la misma para todas las fases y que las nano partículas se mezclan en fluido base y este se convierte en un fluido continuo. Las soluciones se determinan numéricamente, considerando las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía.

4.1.3.1 Ecuación de conservación de masa.

La ecuación que se utiliza y hace referencia a la continuidad del flujo es:

$$\nabla * (\varphi_q \rho_q \vec{V}_q) = 0$$

Donde:

q = expresa las distintas fases y ρ_q es la densidad del fluido que se encuentra en una determinada fase. Además, $\vec{V}_q = \int \varphi_q dV$, $\sum_{q=1}^n \varphi_q = 1$

4.1.3.2 Ecuación de conservación de momento. La ecuación de conservación de momento es:

$$\begin{aligned} & \nabla * (\varphi_q \rho_q \vec{V}_q \vec{V}_q) \\ = & -\varphi_q \nabla P + \varphi_q u_q \nabla^2 \vec{V} + \varphi_q \nabla * \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k v_k \right) + \varphi_q \rho_q \vec{g} + \sum_{k=1}^n \vec{R}_{pq} + \vec{F}_{Col} \\ & + \vec{F}_{Lift,q} + \vec{F}_{vm,q} \end{aligned}$$

Donde n representa el número de etapas.

\vec{F}_{Col} = Fuerza de colisión en el cuerpo. N

$\vec{F}_{Lift,q}$ = Fuerza de sustentación en cada fase. N

$\vec{F}_{vm,q}$ = Fuerza de masa virtual en cada fase. N

P = Presión compartida por todas las fases. Pa

\vec{R}_{pq} = Fuerza de interacción entre distintas fases. N

u_q = Viscosidad dinámica de la fase q. Pa.s

Al trabajar con nano fluidos, se puede considerar despreciable la fuerza de masa virtual ya que la densidad de las nano partículas es mucho mayor que la densidad del fluido base. Además, la interacción entre partículas no genera variaciones en el número de Nusselt, por lo que también puede considerarse despreciable. Esta última consideración se aplica únicamente para nano partículas debido al tamaño que presentan, lo que implica que su interacción genera una fuerza mínima.

4.2 Generación de geometría de intercambiador

Siguiendo con las pautas establecidas para la geometría del intercambiador de contraflujo y considerando el material utilizado, se realiza el diseño con el software computacional SolidWorks. En la figura 12 se puede apreciar una sección del intercambiador que se realiza utilizando el software SolidWorks.

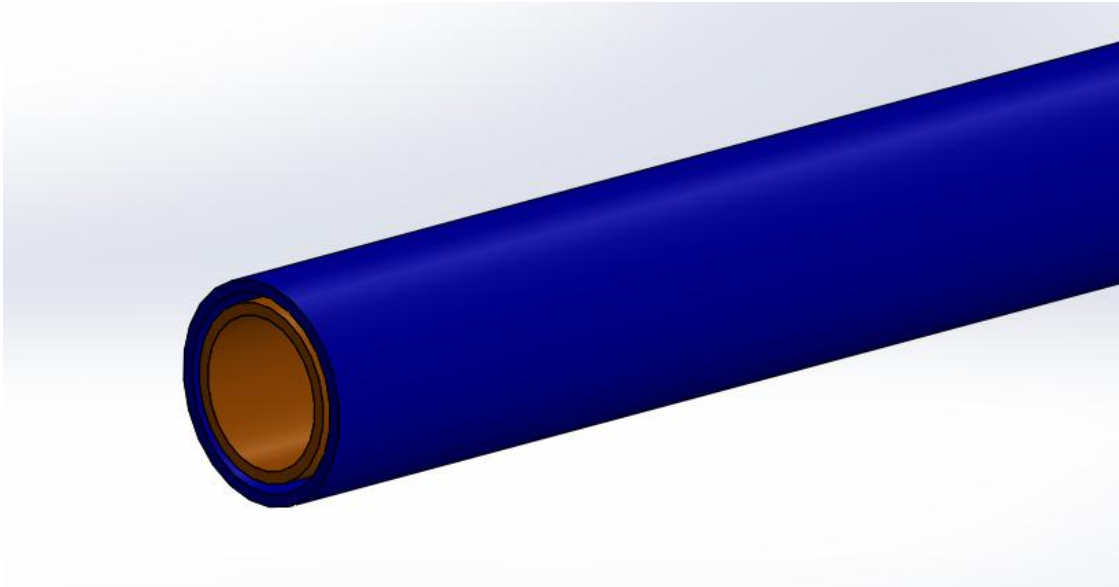


Figura 12. Sección del intercambiador de calor realizado utilizando el software SolidWorks

Nota: Por el área interna de la tubería de color naranja transita el fluido caliente, mientras que por el espacio comprendido entre la tubería naranja y la tubería azul circula el nanofluido H_2O/CuO . La dirección de circulación de ambos flujos es opuesta (contra flujo).

En la figura 13 y 14 se puede apreciar las dimensiones del intercambiador de contraflujo propuesto en su vista axial y radial respectivamente.

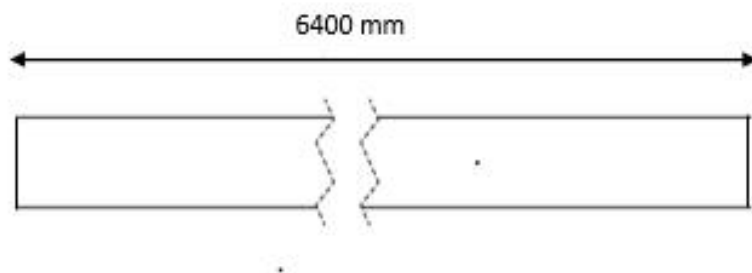


Figura 13. Vista axial de intercambiador de contraflujo propuesto

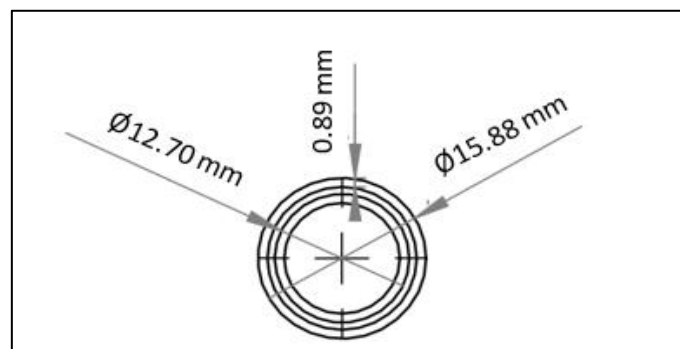


Figura 14. Vista radial de intercambiador de contra flujo propuesto

4.3 Simulación de proceso de transferencia de calor usando Ansys – Fluent

En este apartado se describe las consideraciones y métodos utilizados para realizar la simulación utilizando el software Ansys Fluent. Para llevar a cabo dicho proceso se utiliza análisis de 2 dimensiones en lugar de 3, esta consideración se debe a que sería necesario una gran cantidad de memoria y recursos computacionales, lo que significa que la simulación tardaría mucho tiempo o no se completaría; ya que si el equipo no es de gran capacidad este procedería a colgarse. Seleccionar un análisis 2D no genera muchos cambios en resultados, ya que la transferencia ocurre principalmente en dirección radial del intercambiador de calor, siendo insignificante en la dirección axial.

El primer paso para la simulación es importar la geometría generada en el software SolidWorks. Posteriormente, mediante el uso de la herramienta Meshing, se establecen las superficies por las cuales ingresarán los distintos fluidos de trabajo. En las figuras 15 y 16 se muestran las superficies por las cuales ingresará el agua caliente y el nanofluido H₂O/CuO respectivamente.

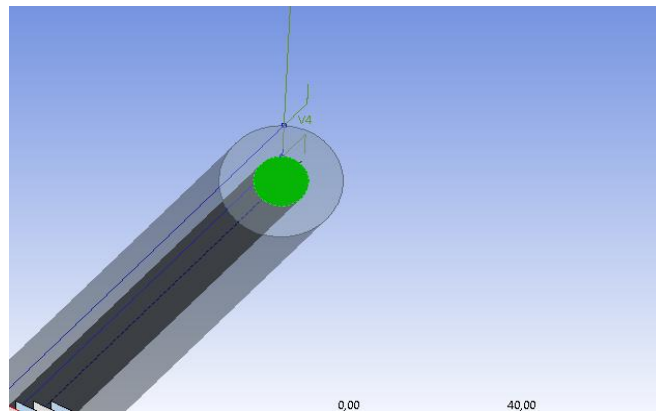


Figura 15. Área de entrada de agua caliente. Software Ansys

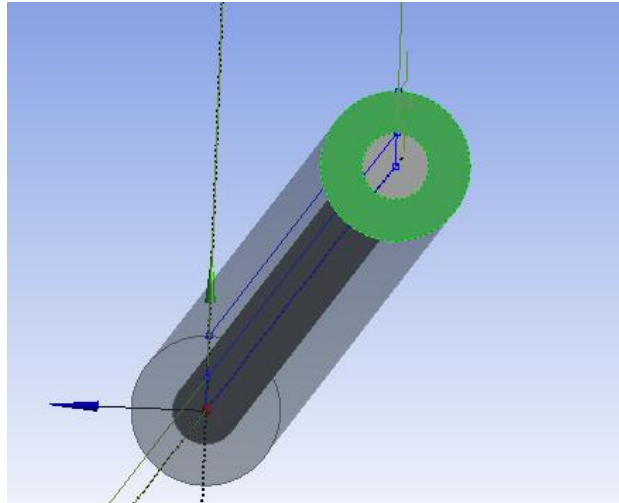


Figura 16. Área de entrada de nano fluido H₂O/CuO. Software Ansys

A continuación, se definen condiciones de frontera necesarias para que el software Ansys realice los cálculos correspondientes. Esas condiciones se aplican sobre la pared que separa ambos fluidos, por la que existe el proceso de transferencia y a la pared en el exterior de la tubería aislada, es decir adiabática. Ver figuras 17 y 18.

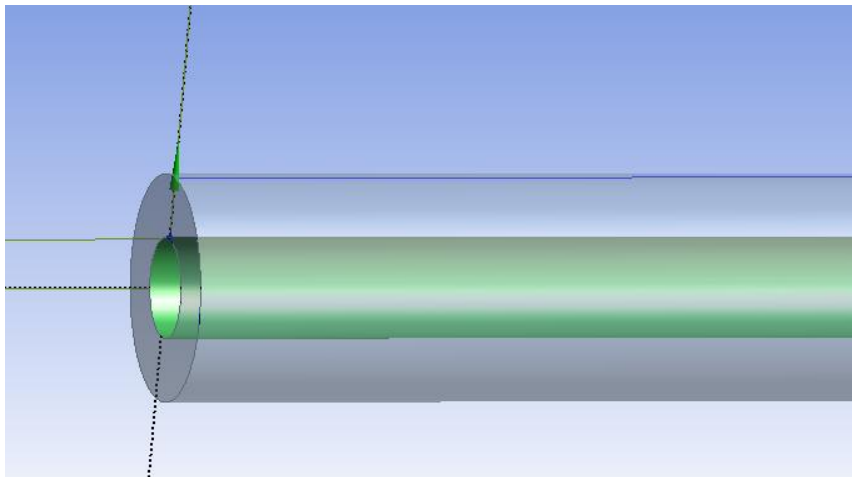


Figura 17. Frontera de proceso de transferencia de calor.

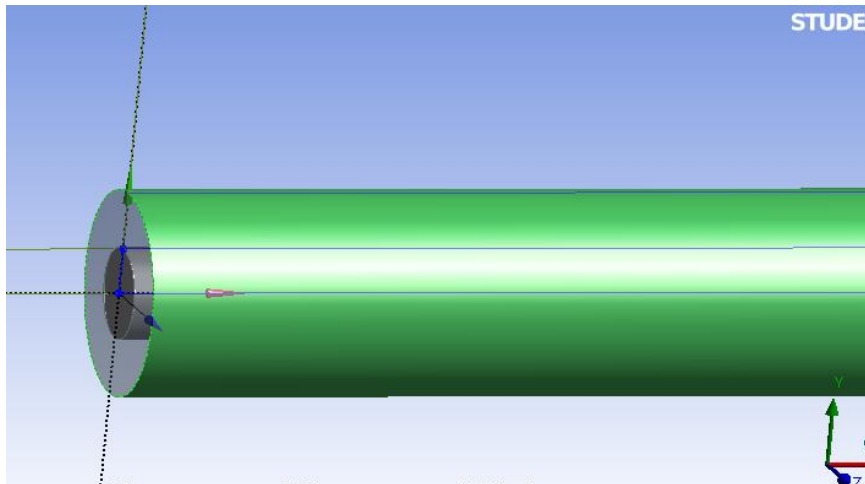


Figura 18. Frontera exterior – condición adiabática

Posteriormente, se realiza el proceso de mallado sobre la geometría del intercambiador. El software utilizado Ansys indica que se crearon 968200 elementos y 329665 nodos. Para evaluar la calidad de la malla se utiliza la herramienta “Ortogonal Quality”, la misma que indica que la malla generada es adecuada. La figura 19 muestra la malla generada en el intercambiador.

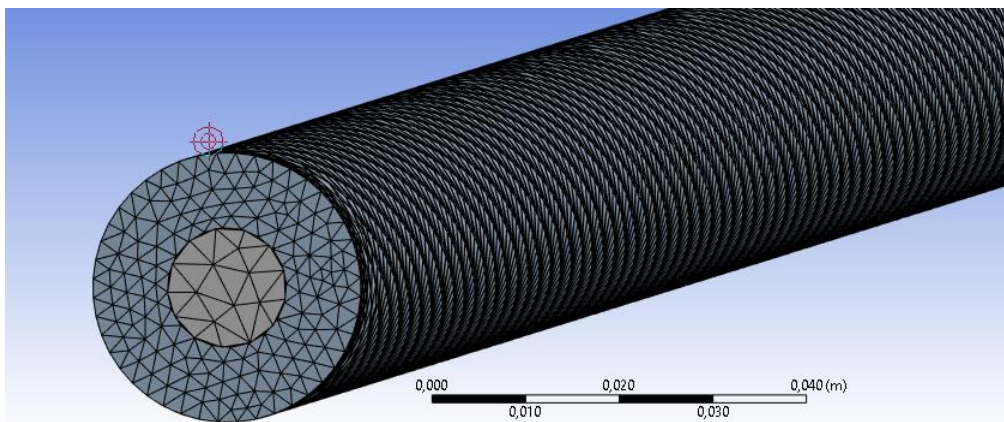


Figura 19. Malla generada en intercambiador de calor. Software Ansys.

Una vez generada la malla se procede a iniciar el software Fluent, en el cual se establecen restricciones de la simulación como un estudio de tipo transitorio y que toma en cuenta el valor de la gravedad. En esta sección se establece el tipo de modelo, que corresponde a un modelo euleriano para el agua y uno de fase discreta para las nano partículas añadidas. La figura 20 presenta el cuadro en el que se especifica el modelo a utilizar.

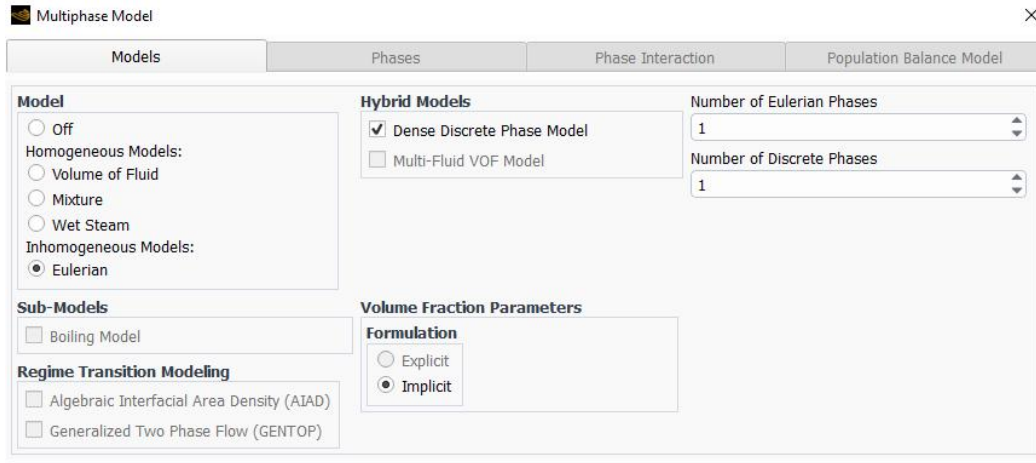


Figura 20. Condiciones de modelo euleriano establecidas para realizar la simulación.

Posteriormente se establecen las características geométricas, el tipo de partículas y el lugar de inyección de estas. La figura 21 que se presenta a continuación, indica la distribución del tamaño de partículas de óxido de cobre que se establece en el software. Se trabajó con un valor promedio de 40 nm.

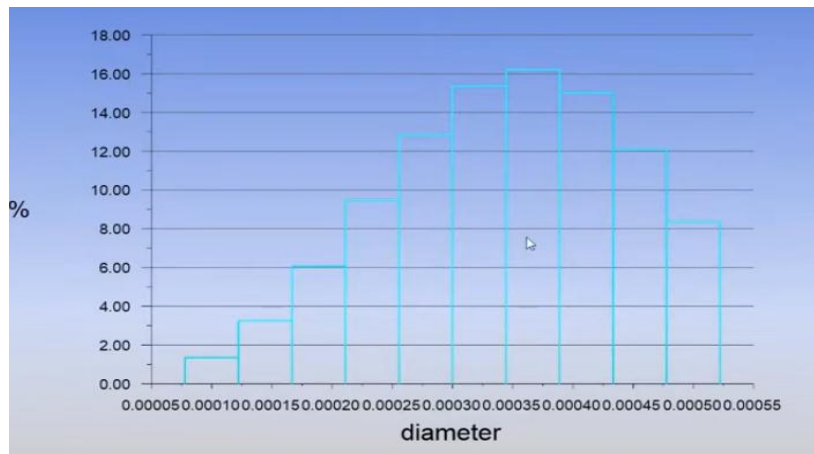


Figura 21. Distribución de tamaño de nano partículas de óxido de cobre.

En el presente estudio las variables de entrada son las temperaturas de ambos fluidos mencionadas anteriormente, y la velocidad del flujo de estos. Resaltar que, se establecen condiciones iniciales; luego, se procede a realizar la simulación con 40 iteraciones. La figura 22 indica que los valores de error disminuyen conforme aumentan el número de iteraciones y tienden a un valor en específico.

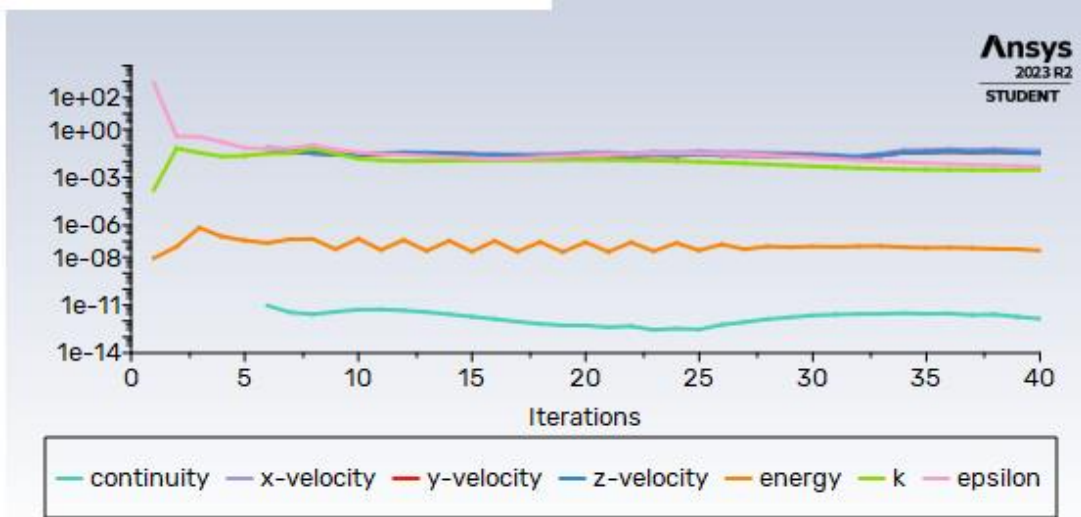


Figura 22. Valor de error vs número de iteraciones – Ansys Fluent

Después de completar la simulación, se presentan los resultados obtenidos.

En la figura 21 se representa la variación de temperaturas a lo largo del intercambiador de calor y las iteraciones que se generaron durante la simulación del intercambiador. La franja de colores de esta tiende a variar en los extremos de la figura tomados tonos diferentes, ya sea de un incremento o de un decremento de la temperatura de ambos fluidos.

En las figuras 23 y 24 se muestra el incremento que se da en el interior del tubo en el que se aprecia la entrada y salida de los fluidos caliente y frío respectivamente, a partir de los cuales se procede a realizar el análisis correspondiente.

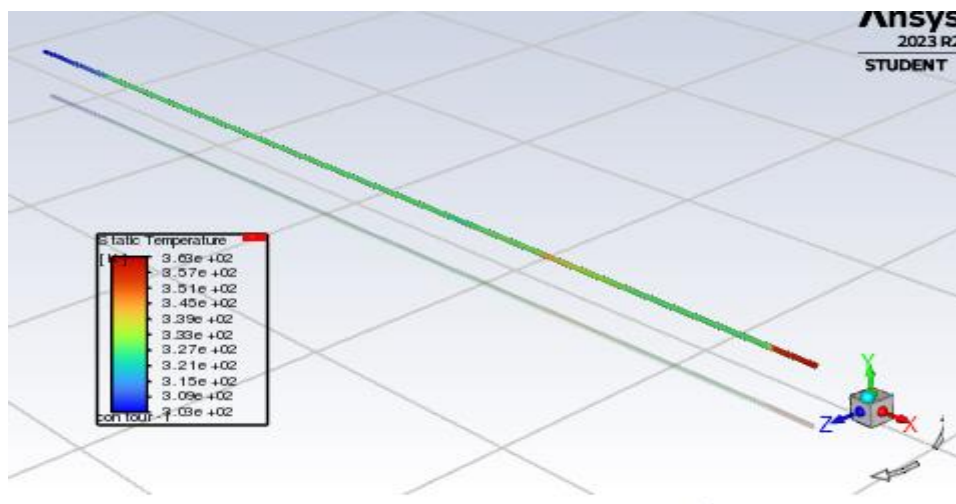


Figura 23. Resultados de simulación de intercambiador de calor – Ansys Fluent.

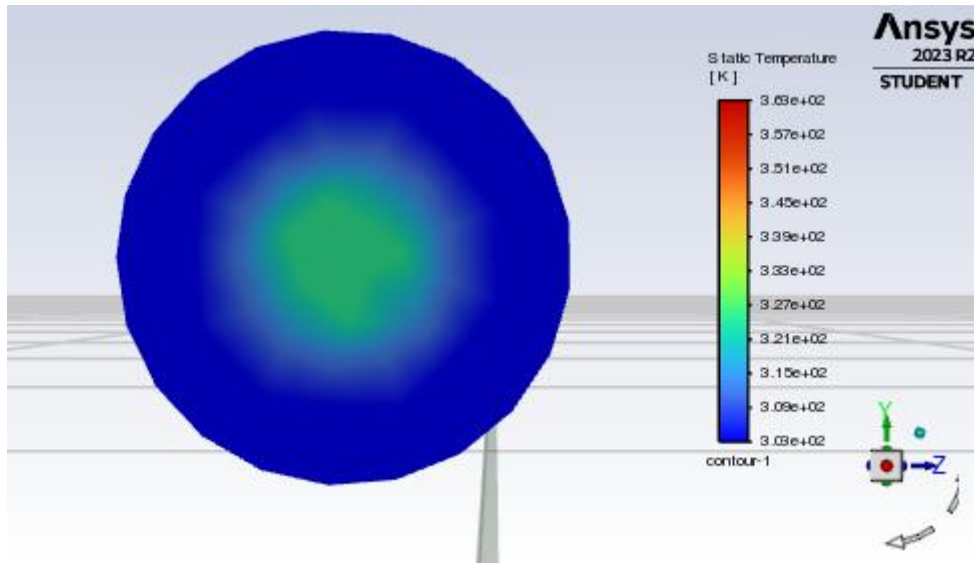


Figura 24. Distribución de temperaturas en la salida del intercambiador de contraflujo obtenido mediante Ansys Fluent.

En la figura 25 se puede apreciar que hubo un cambio en la temperatura de salida del fluido caliente; ya que es de aproximadamente 324 K, lo que señala que existió un cambio de temperatura en relación con la entrada, pues este disminuyó en el intercambiador que se generó por la interacción con el otro fluido, aseverando un cambio en energía de estos dos en el interior de los tubos.

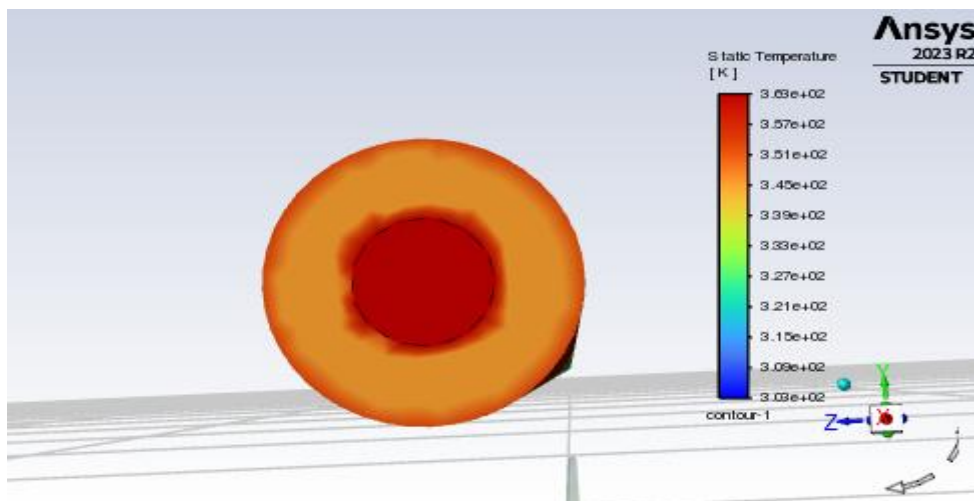


Figura 25. Distribución de temperaturas en la entrada del intercambiador de contraflujo obtenido mediante Ansys Fluent.

En el análisis, se identifican las temperaturas desconocidas, que son la temperatura de salida del agua fría que contiene nanopartículas de óxido de cobre y la temperatura de salida del agua caliente.,

Mientras que en la figura 25, se indica que la temperatura de salida del fluido frío es de 345 K; lo que indica que se produjo un incremento en la temperatura de este, que se dio por el contacto con el fluido caliente en el interior del intercambiador de calor, demostrando que en la simulación se obtuvo el resultado que se esperaba, el de demostrar los valores que podría adquirir el fluido después de este proceso.

A continuación, se presenta el cálculo de error porcentual entre los valores obtenidos analíticamente y los valores obtenidos mediante simulación.

$$Error_{Hot_{out}} = \frac{52 - 51.6}{51.6} * 100$$

$$Error_{Hot_{out}} = 0.77 \%$$

$$Error_{Cold_{out}} = \frac{72 - 71.3}{71.3} * 100$$

$$Error_{Cold_{out}} = 0.98 \%$$

Los valores de error que se obtienen son inferiores al 1 %, por lo que se considera que el método euleriano utilizado para la simulación es válido.

CONCLUSIONES

Se determinó mediante la investigación que, el uso de nano partículas de CuO como agente que mejora las propiedades de los fluidos está en auge y en continuo crecimiento. Sin embargo, presenta la desventaja de que para obtener nano partículas de características homogéneas se requieren procesos complejos y costosos. Adicionalmente, se presentan variaciones en sus propiedades con respecto al tiempo, por lo que no es común su comercialización en la actualidad.

Se demostró en las imágenes mostradas que hay un incremento en la temperatura de salida del agua y de nano fluido respectivamente. Siendo la temperatura del primero 324 K, es decir 50.85 °C; mientras que la temperatura del segundo es de 345 K, es decir 71.81 °C. Analizando el porcentaje de error, entre valor de la simulación y el calculado que fue de 0.77 % en la salida de fluido caliente, se concluye que el método euleriano fue el apropiado.

Se concluye que, en la simulación las nano partículas de óxido de cobre dispersas en un fluido mejoran significativamente las propiedades que permiten el proceso transferencia de calor. El trabajar con un nano fluido al 5 % de concentración de nano partículas de CuO, permitió reducir la temperatura del fluido caliente de trabajo a 6 °C menos, si se lo compara con el fluido base.

Se ha demostrado mediante el estudio que, la densidad del nanofluido H₂O/CuO presenta un valor 23 % mayor si se lo compara con la densidad del fluido base. Este hecho implica una variación en el flujo másico del flujo, que a su vez repercute en un valor mayor de calor transferido.

Se definió que, las propiedades termofísicas de las nano partículas de CuO con un 5 % de concentración, presentan un aumento significativo con respecto a las propiedades del fluido base. Los valores de dichas propiedades son: $k_{nf} = 0.753 \frac{W}{mK}$, $u_{nf} = 0.000517 \frac{Ns}{m^2}$, $d_{nf} = 1249.1945 \frac{kg}{m^3}$ y $C_p = 0.753 \frac{J}{kgK}$.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el estudio de un intercambiador de varios pasos y varias etapas, utilizando el software Ansys Fluent. Logrando así determinar si el error con respecto al cálculo analítico varía; ya que en este caso el proceso de transferencia se lo realiza por medio de la implementación de un factor que se obtiene de tablas. Por lo que se esperaría que se presente un valor de error considerable.

Se sugiere realizar el mismo estudio, bajo los mismos parámetros, pero trabajando con un intercambiador de flujo paralelo y realizar una comparación con los resultados obtenidos.

Según los estudios realizados, se sugiere realizar un número de iteraciones adecuadas, ya que caso contrario la simulación podría llevar horas e incluso días.

Se debe utilizar una malla con elementos de tamaño 4 mm, ya que al trabajar con esta se obtuvieron resultados acordes con los cálculos analíticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sánchez A and Góngora E, “Determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor comparando los métodos DTML y ε -NUT,” *Ingeniería Energética*, vol. XXXIX, no. no 3, pp. 203–212, 2019.
- [2] A. Vargas, “Modelado, simulación numérica y optimización de un intercambiador de calor aire-agua de flujo cruzado con nanofluidos,” *Researchgate*, 2023.
- [3] Sánchez, Camaraz, Retirado, and Góngora, “Incremento de la termotransferencia en un sistema de enfriadores enchaquetados, optimizando los flujos de agua.,” *Enfoque UTE*, 2020.
- [4] P. Hulse, J. Ascanio, and L. Betancur, “Investigación numérica de un intercambiador de calor compacto tipo circuito,” *Unidades Tecnológicas de Santander*, 2022.
- [5] R. Kumar, G. Singh, and S. Singh, “A numerical study on the performance of water based copper oxide nanofluids in compact channel,” *Mater Today Proc*, 2020.
- [6] A. Caiza and L. Caiza, “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN MEDIANTE FLUENT DE ANSYS DEL PROCESO DE EVAPORACIÓN DE LA MEZCLA DE REFRIGERANTE 600a Y NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE COBRE EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO RECTO,” *Universidad Politécnica Salesiana*, 2019, Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17617/1/UPS%20-%20ST004211.pdf>
- [7] A. Valencia, A. Zacarías, E. Eduardo, J. De Jesús, C. Jiménez, and J. Gustavo, “Tema A4 Termofluidos ‘ Evaluación numérica del rendimiento de un colector solar de absorción directa usando nanopartículas de grafito ,”” *Congreso SOMIM*, 2021.
- [8] Razak Abdul, “Effect of CuO-H₂O and ZnO-H₂O nanofluids on the Performance of Solar Flat Plate Collector,” *International Journal of Advanced Thermofluid Research*, vol. 5, no. 1, 2019, doi: 10.51141/ijatr.2019.5.1.2.
- [9] M. Parveez and M. Hanief, “Enhancement of heat transfer in helical coil heat exchangers using nano-fluids,” *Chemical and Process Engineering - Inzynieria Chemiczna i Procesowa*, vol. 43, no. 2, 2022, doi: 10.24425/cpe.2022.140832.
- [10] Y. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, McGrawHill., vol. 4ta Edición. 2006. Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/38408494/Transferencia_De_Calor_y_Masa_4ta_ed_Cengel_Mc_Graw_Hill
- [11] P. Fernández Díez, “XV.- Intercambiadores de calor método de la (LMTD),” in *Intercambiadores de calor*, 2021.
- [12] D. González, “Intercambiadores de Calor: Tipos, Generales y Aplicaciones ,” *Universidad Simón Bolívar*, Accessed: Nov. 19, 2023. [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34280679/intercambiadores-de-calor-tipos-generales-y-aplicaciones-libre.pdf?1406186726=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGUIA_DE_INTERCAMBIADORES_DE_CALOR_TIPOS.pdf&Expires=1700486149&Signature=NbhwXmzRL3zLhWcbIBFs1V2hrXRZTKdu811jxMHZr7Yru4tNsQDfHY8~wI4UVTZxykxtY3g5JXpLTu7nGJ2fY00GjGpk0x1F6nXoMv6

aanFO7BYa97HefRNzm4zvsz3hxNKCCs3hQVwg3s-ETBMwJLFVg69-5O-a6sS2-
vsj9LqCxpky1VR143GWXRWaU5UK75cehPg75KcsBUJHEXwWydWJ0sKVAKjsbAFkNp
~wdaaGgyY0qCQq6TB9HxOBGDp1kq84KSY8KSVyLkOB2X1u19q944bPoeDyHCmWP
Wh9aJ7uQrsHEXR9HhWAJsDs~2XwTJUaoq11WJb99qmuYRtRQ__&Key-Pair-
Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- [13] L. Baena, A. Tamayo, and A. Benítez, “Nanofluidos: la nueva generación de fluidos.,” *Manufactura y Gestión de Ciclo de Vida del Producto*, 2022, Accessed: Nov. 19, 2023. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=NVGMEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA154&dq=nanofluidos&ots=OeMc2dhT6a&sig=hIaVaoSvdRIKbDEHi5o_Yf-I0MA#v=onepage&q=nanofluidos&f=false
- [14] J. Matsson, “An Introduction to Ansys Fluent 2023,” Google Books. Accessed: Nov. 22, 2023. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=XLTFEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=ansys+fluent&ots=9wTHjpYHKz&sig=EtWL_IWoxmaqyLsx28rlew-BHQU#v=onepage&q=ansys%20fluent&f=false
- [15] N. Linares, *ANSYS CFD (CFX y Fluent)*, (2018). Accessed: Nov. 22, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=DCRS72Kb3yk>
- [16] S. Moore, “What Are the Different Types of Nanoparticles?,” *Editorial Feature*, 2018, Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4938>
- [17] StreamLine, “Copper tube for plumbing and mechanical applications,” 2023, Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://silvertubos.com/wp-content/uploads/2019/11/Copper-Tube-for-Plumbing-and-Mechanical-Applications.pdf>
- [18] A. Caiza and E. Caiza, “Análisis y simulación mediante fluent de ansys del proceso de evaporación de la mezcla de refrigerante 600a y nanopartículas de óxido de cobre en un intercambiador de calor tipo tubo recto,” *Universidad Politécnica Salesiana*, 2019, Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17617/1/UPS%20-%20ST004211.pdf>