

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIAL**

**SIMULACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA EL
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA MEDIANTE EL USO
DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE**

**SIMULACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA EL
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA A MEDIA
TEMPERATURA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA**

JENNY DÁMARIS COSTALES ESPINOSA

jenny.costales@epn.edu.ec

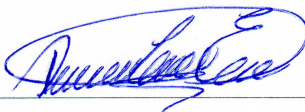
DIRECTOR: MARÍA CRISTINA RIOFRÍO ALMEIDA

maria.riofrio01@epn.edu.ec

DMQ, marzo 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Jenny Costales declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Jenny Costales

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jenny Costales, bajo mi supervisión.



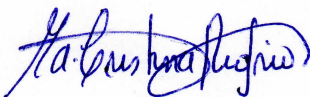
María Cristina Riofrío

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



Jenny Costales



María Cristina Riofrío

AGRADECIMIENTO

El desarrollo del presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y la ayuda por parte de un gran número de profesores, amigos y familiares. Agradezco a la ingeniera Cristina Riofrío por su guía a lo largo del trabajo y por permitirme hacer uso del equipo de cómputo del Laboratorio de Textiles requerido para la etapa final del proyecto. El tiempo de cómputo empleado en todas las simulaciones requirió de semanas razón por la cual sin este recurso no hubiera sido posible concluir el trabajo.

Debo agradecer al ingeniero Freddy Ordóñez quien compartió conmigo sus conocimientos sobre el programa Ansys y fue una guía en etapas importantes del proyecto. También quiero agradecer a todos mis amigos y compañeros con quienes he compartido una gran cantidad de experiencias y momentos que han aportado no solamente a mi formación como profesional, sino también a mi formación como persona.

Agradezco a mi familia que siempre me han apoyado a lo largo de esta travesía universitaria y en cada decisión que he tomado; y me han consolado y animado cada vez que lo he necesitado; les agradezco también por brindarme los recursos necesarios para llevar a cabo mi trabajo. Especialmente quiero agradecer a mi hermano quien ha sido una guía y ejemplo toda mi carrera universitaria, quien siempre me brindó su tiempo para aclararme cualquier duda y enseñarme lo que hiciera falta, quien hacía más de lo necesario para hacerme sobresalir y que me desempeñara correctamente, y quien también supo darme consejos y palabras de aliento para encaminarme y motivarme en la realización de mi trabajo final.

Finalmente quiero agradecer a los lectores del presente trabajo a quienes espero les sirva de fuente de información para futuras simulaciones o para la realización de un futuro trabajo experimental.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.4.1	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA	4
1.4.2	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	7
1.4.3	MODELOS DE TURBULENCIA.....	8
1.4.4	ESTRUCTURA DE UN MODELO CFD.....	9
1.4.5	ECUACIONES GOBERNANTES EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS	10
1.4.6	MALLADO COMPUTACIONAL	11
1.4.7	PROGRAMAS PARA SIMULACIÓN CFD	12
2.	METODOLOGÍA	16
2.1	Pruebas preliminares en COMSOL.....	16
	Primera prueba preliminar en COMSOL	16
	Segunda prueba preliminar en COMSOL.....	17
	Tercera prueba preliminar en COMSOL	18
	Cuarta prueba preliminar en COMSOL	18
	Quinta prueba preliminar en COMSOL	19
2.2	PRUEBAS PRELIMINARES ANSYS	21
	Primera prueba preliminar en Ansys	21
	Segunda prueba preliminar en Ansys	22
	Tercera prueba preliminar en Ansys	23
	Cuarta prueba preliminar en Ansys.....	24
	Quinta prueba preliminar en Ansys	26
	Simulación definitiva en Ansys.....	27
3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
3.1	RESULTADOS	30
	Resultados de las pruebas preliminares en COMSOL	30
	Resultados de las pruebas preliminares en Ansys.....	34
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
5.	ANEXOS.....	48
	CÁLCULOS PARA LAS TRES PRIMERAS PRUEBAS PRELIMINARES EN ANSYS	51
	CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA DE LA CUARTA PRUEBA PRELIMINAR.....	54
	CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA DE LA CUARTA PRUEBA PRELIMINAR.....	60
	IMÁGENES.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Interfaz del programa Ansys.....	13
Figura 3.1. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en pared compuesta.....	31
Figura 3.2. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en una tubería.	31
Figura 3.3. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en una tubería con agua por dentro.	32
Figura 3.4. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en un intercambiador de tubos y coraza de 4 tubos.	33
Figura 3.5. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en un intercambiador de tubos concéntricos.	34
Figura 3.6. Fracción líquida del PCM de la segunda prueba preliminar en Ansys.	35
Figura 3.7. Fracción líquida del PCM de la tercera prueba preliminar en Ansys.	36
Figura 3.8. Geometría del intercambiador de calor completo realizada en SolidWorks. ...	37
Figura 3.9. Intercambiador de calor de tubos y coraza con 50 tubos realizado en Ansys. 38	
Figura 3.10. Fracción de masa líquida del PCM.	40
Figura 3.11. Variación de temperatura en el cuerpo de agua.	40
Figura 3.12. Variación de la presión en el cuerpo de agua.	41
Figura 3.13. Valores residuales de las curvas de energía, velocidad y continuidad para un tiempo de 2400 s.	42
Figura 3.14. Valores residuales de las curvas de energía, velocidad y continuidad para un tiempo de 8 horas.	42
Figura AV.1. Geometría para la primera y segunda prueba preliminar	64
Figura AV.2. Mallado para la primera y segunda prueba preliminar.....	64
Figura AV.3. Geometría para la tercera prueba preliminar en Ansys.....	65
Figura AV.4. Mallado para la tercera prueba preliminar en Ansys	65
Figura AV.5. Convergencia de la tercera prueba preliminar en Ansys.....	66
Figura AV.6. Mallado del intercambiador de calor definitivo de 50 tubos.	66
Figura AV.7. Temperatura de entrada del agua (Simulación definitiva).....	67
Figura AV.8. Temperatura de salida del agua (Simulación definitiva).....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Dimensionamiento del intercambiador de calor de tubos y coraza.	2
Tabla 1.2. Comparación de modelos de turbulencia (Chilvers, 2014).	9
Tabla 2.1. Propiedades de los materiales para la primera prueba preliminar en COMSOL.	16
Tabla 2.2. Propiedades del acero inoxidable para la segunda prueba preliminar en COMSOL.....	17
Tabla 2.3. Propiedades de los materiales para la cuarta prueba preliminar en COMSOL.	19
Tabla 2.4. Propiedades de los materiales para la quinta prueba preliminar en COMSOL.	20
Tabla 2.5. Condiciones de cambio de fase para la quinta prueba preliminar en COMSOL.	20
Tabla 2.6. Características del mallado de la primera prueba preliminar en Ansys Fluent.	21
Tabla 2.7. Propiedades del material sólido para la primera prueba preliminar en Ansys Fluent.	21
Tabla 2.8. Características del mallado de la segunda prueba preliminar en Ansys Fluent.	22
Tabla 2.9. Propiedades del material de cambio de fase para la segunda prueba preliminar en Ansys Fluent.	23
Tabla 2.10. Características del mallado de la tercera prueba preliminar en Ansys Fluent.	24
Tabla 2.11. Características del intercambiador de calor de la cuarta prueba preliminar en Ansys.....	24
Tabla 2.12. Características del mallado de la cuarta prueba preliminar en Ansys Fluent.	25
Tabla 2.13. Características del intercambiador de calor de la quinta prueba preliminar en Ansys.....	26
Tabla 2.14. Características del mallado de la quinta prueba preliminar en Ansys Fluent.	26
Tabla 2.15. Características del intercambiador de calor de la simulación definitiva en Ansys.	27
Tabla 2.16. Características del mallado de la simulación definitiva en Ansys Fluent.....	29
Tabla 3.1. Flujos de calor de las dos primeras pruebas preliminares.	30
Tabla 3.2. Resultados de la segunda prueba preliminar en Ansys.....	35
Tabla 3.3. Resultados de la tercera prueba preliminar en Ansys.	36
Tabla 3.4. Resultados de la cuarta prueba preliminar en Ansys.....	38

Tabla 3.5. Resultados de la simulación definitiva en Ansys.39

RESUMEN

La energía solar es una de las alternativas energéticas más empleadas, sin embargo, el problema de su implementación es la intermitencia entre sus períodos de disponibilidad. Por lo que el almacenamiento de energía es un aspecto clave para su aplicación. Existen tres principales tipos de almacenamiento de energía térmica: por calor sensible, termoquímico o por calor latente, este último involucra el cambio de fase del material. Los sistemas con cambio de fase se pueden estudiar con la dinámica de fluidos computacional (CFD) que emplea métodos numéricos para la resolución de estos problemas. Los programas para realizar simulaciones CFD son Ansys y COMSOL con interfaces gráficas amigables y versiones estudiantiles gratis y OpenFoam con versión gratuita, pero sin interfaz gráfica. Se realizaron 5 pruebas preliminares en COMSOL analizando la transferencia de calor en sólidos y fluidos; y 5 pruebas preliminares en Ansys. Las geometrías se realizaron primero en SolidWorks y en Inventor; sin embargo, la geometría definitiva se generó y se simuló en el programa Ansys. El cambio de fase no fue posible simular en COMSOL razón por la cual se decidió cambiar de programa a Ansys donde todas las pruebas preliminares resultaron exitosas. La simulación del intercambiador de calor definitivo duró 4 horas y se obtuvo una temperatura de salida del agua de 314 K y una fracción líquida final del material de cambio de fase de 0,0586. Las curvas de energía, velocidad y continuidad llegan a converger después de 2400 segundos con un valor de residuales de 1×10^{-3} o inferiores.

PALABRAS CLAVE: intercambiador de calor, material de cambio de fase, calor latente de fusión, simulación CFD, Ansys, COMSOL, calentamiento de agua.

ABSTRACT

Solar energy is one of the most widely used energy alternatives, but there are problems for its use such as the intermittency between its periods of availability. which is why energy storage is a key factor for its application. There are three types of thermal energy storage: sensible heat, thermochemical or latent heat, in which the material changes phase. Phase change systems can be studied with computational fluid dynamics (CFD) that uses numerical methods to solve these problems. There are several CFD simulation programs, some examples are Ansys and COMSOL with friendly graphical interfaces and free student versions and OpenFoam with a free version, but without a graphical interface. 5 preliminary tests were carried out in COMSOL on the transfer of heat in solids and fluids; and 5 preliminary tests in Ansys. The complete initial exchanger geometries were done first in SolidWorks and then in Inventor; however, the final geometry was generated and simulated in the Ansys program. The phase change could not be simulated in COMSOL, which is why it was decided to change the program to Ansys where all the preliminary tests were successful. The final heat exchanger simulation lasted 4 hours and a water outlet temperature of 314 K and a final liquid fraction of the phase change material of 0.0586 were obtained. Convergence of energy, velocity, and continuity curves is achieved after 2400 seconds with a residual value of 1×10^{-3} or less.

KEYWORDS: Heat exchanger, phase changing material, latent fusion heat, Ansys, COMSOL, water heating.

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el presente trabajo se simulará un intercambiador de calor de tubos y coraza que trabaja con cera de parafina como material de cambio de fase para almacenar energía térmica a media temperatura y calentar posteriormente agua sanitaria. Se realizará una simulación dinámica de fluidos computacional conocida como CFD en el programa Ansys, específicamente en la sección Ansys Fluent, para conocer la temperatura que alcanza el fluido de estudio (agua) y el porcentaje de cambio de fase de la cera de parafina. No se contempla la construcción de un prototipo ni la realización de pruebas experimentales.

1.1 Objetivo general

Simular un intercambiador de calor de tubos y coraza, que emplea cera de parafina como material de cambio de fase, para el almacenamiento de energía térmica a media temperatura para el calentamiento de agua de uso doméstico.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica para conocer los simuladores CFD (Computational Fluid Dynamics) que sean adecuados y accesibles para realizar la simulación del intercambiador de calor.
2. Realizar la geometría y mallado del sistema; y seleccionar los materiales de construcción, las propiedades del material de cambio de fase y las condiciones iniciales y de frontera en el simulador.
3. Simular el intercambiador de calor, que emplea cera de parafina como material de cambio de fase y verificar si los resultados de la simulación, como las temperaturas de entrada y de salida, corresponden con los valores calculados en el trabajo de integración curricular 2021-B.

1.3 Alcance

En el presente proyecto se simulará un intercambiador de calor de tubos y coraza que cumpla con el dimensionamiento especificado en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Dimensionamiento del intercambiador de calor de tubos y coraza.

Parámetro	Valor
Masa de PCM necesaria	540,58 kg
Velocidad del agua por la coraza	0,0036 m/s
Caída de presión por el lado de la coraza	$2,03 \times 10^{-5}$ psi
Longitud de los tubos	1,65 m
Diámetro interno de tubos	0,05248 m
Diámetro externo de tubos	0,0603 m
Número de tubos	226
Diámetro de la coraza	1,21 m
Número de deflectores	6s
Segmentación de deflectores	25%
Espaciamiento entre deflectores	0,79347 ft
Coefficiente global de transferencia de calor	5,76 W/m ² K

El sistema emplea cera de parafina como PCM. Para su realización se investigará en bibliografía los simuladores disponibles y se seleccionará el que se encuentre a nuestro alcance por razones de licencias, costos o en función del que sea más amigable con el usuario. Se empleará el simulador elegido para construir la geometría y el mallado del sistema y para verificar que el tiempo del período de descarga, la temperatura de salida del agua de uso doméstico y los perfiles de temperatura tanto del agua como del PCM obtenidos al ingresar las características de los materiales de construcción y los valores del dimensionamiento del intercambiador de calor obtenidos del trabajo de integración

curricular 2021-B realizado por Marbelle Porras, concuerde con los valores calculados en dicho trabajo.

El trabajo propuesto no contempla la construcción de un prototipo ni la realización de pruebas experimentales.

1.4 Marco teórico

Uno de los temas con mayor connotación en el mundo actual es la relación entre la problemática energética y la problemática ambiental. Tradicionalmente son aspectos que se evalúan por separado, sin embargo, ambos se encuentran íntimamente relacionados y al hallar la solución de uno, esta envuelve y da respuesta al otro. Se considera a la energía como un recurso imprescindible en cualquier proceso de producción o transformación, pues, si bien las fuentes energéticas pueden ser sustituidas, su producto, es decir, el fluido energético que se consume es irremplazable, lo que lo convierte en un aspecto clave para el desarrollo de las civilizaciones a través del tiempo. Dentro de este proceso energético se ve involucrado el estado medioambiental, pues desde siempre el ser humano ha estado en busca de recursos y energía para su subsistencia en la naturaleza; por este motivo el hecho de que la humanidad logre desarrollarse, e incluso el simple hecho de su mera existencia implica una transformación de la naturaleza (Estenssoro, y otros, 2011).

Existe un tercer aspecto que se involucra con el desarrollo energético y el impacto medioambiental, que es la economía. La meta de un desarrollo energético sostenible es la renovabilidad de los recursos y que a su vez estos ayuden a mejorar el crecimiento y desarrollo económico para la población presente y futura. Se entiende como crecimiento económico al proceso en el cual incrementan constantemente las actividades económicas; mientras que, el desarrollo económico abarca temas de mayor complejidad como la mejora de la calidad de vida de las personas. Estos procesos demandan una mayor producción de energía lo que se traduce en un mayor deterioro medioambiental, más aún si se emplean fuentes de energía tradicionales como los combustibles fósiles que intensifican la contaminación. Es por esta razón que globalmente ha surgido la necesidad de hallar alternativas que sean capaces de reemplazar a largo plazo los combustibles tradicionales (Pereira, 2015). La energía solar es una de las alternativas energéticas más empleadas, sus aplicaciones se ven reflejadas en muchos aspectos de la vida diaria como el calentamiento de viviendas, suministro de agua caliente sanitaria entre otras (Bravo,

González, & Martínez, 2017). Sin embargo, uno de los principales problemas de su implementación es la intermitencia entre sus períodos de disponibilidad, ya que también se necesita consumirla cuando la radiación solar no está disponible. Por lo que el almacenamiento de energía es un aspecto clave en la aplicabilidad de esta tecnología (Aguas de Hoyos, 2016).

1.4.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

Existen tres principales tipos de almacenamiento de energía térmica que se detallan a continuación.

Almacenamiento por calor sensible

Estos sistemas de almacenamiento se encargan de aumentar la energía del material empleado, sea este sólido o líquido, sin que exista un cambio de fase. El almacenamiento por calor sensible depende principalmente de la cantidad de masa del material, de su calor específico y de la diferencia de temperaturas del proceso, como se representa en la ecuación 1 (Brazo, 2016)

$$Q = m \times cp \times \Delta T \quad [1.1]$$

Donde:

Q = calor transferido [J]

m = masa del material [kg]

cp = capacidad calorífica del material [J/kgK]

ΔT = variación de temperatura [K]

Almacenamiento Termoquímico

Este tipo de almacenamiento se da gracias al calor de reacción, es decir, mediante la energía generada o consumida en una reacción química donde se crean o destruyen los enlaces químicos. Este mecanismo debe ser un proceso reversible y se fundamenta en la alteración de la estructura interna del material. Es decir, cuando el material absorbe calor (reacción endotérmica) se transforma en un nuevo producto que se puede almacenar a

temperatura ambiente; y cuando vuelve a su estado original se desprende energía (reacción exotérmica). Sin embargo, este tipo de almacenamiento presenta varios inconvenientes como su elevado costo, las condiciones elevadas de temperatura y de presión en las cuales se trabaja y el pobre control del proceso pues actualmente aún no es posible predecir la reversibilidad a largo plazo de las reacciones químicas que tienen lugar (Brazo, 2016).

Almacenamiento por calor latente

En el almacenamiento de energía térmica por calor latente se emplean materiales de cambio de fase conocidos como PCM's por sus siglas en inglés (Phase Changing Materials), la temperatura a la que estos materiales pasan de una fase a otra depende del rango de temperaturas de trabajo que puede ser: baja, media o alta temperatura. La energía térmica que se puede almacenar con este mecanismo se calcula con la ecuación 2.

$$Q = m \times [Cp_s \times (T_2 - T_1) + lp + Cp_l \times (T_3 - T_2)] \quad [2]$$

Donde:

Q = calor transferido [J]

m = masa del material [kg]

Cp_s = capacidad calorífica del material en estado sólido [J/kgK]

Cp_l = capacidad calorífica del material en estado líquido [J/kgK]

T_1 = temperatura inicial del material [K]

T_2 = temperatura de cambio de fase del material [K]

T_3 = temperatura final del material [K]

lp = calor latente del material [J/kg]

En este proceso, el factor que almacena mayores cantidades de energía es la entalpía de cambio de fase (Brazo, 2016).

El almacenamiento por calor latente presenta además ciertos beneficios económicos y medioambientales:

- Almacenar energía térmica para calentar o refrigerar instalaciones reduce el uso de energías no renovables y disminuye la huella de carbono.
- Si se almacena la energía durante períodos de baja demanda para usarla cuando la demanda es máxima sirve para ahorrar costos energéticos adicionales (Gómez, Narváez, & Guerrón, 2020).

Materiales de cambio de fase

El almacenamiento de energía térmica en materiales de cambio de fase se ha convertido en un tema de interés en el campo energético. La principal ventaja de este almacenamiento es la gran cantidad de energía que se puede intercambiar entre el PCM y el medio externo; y que se logra almacenar o liberar la energía a temperatura constante o en un intervalo pequeño de temperaturas (Dellicompagni, Castro, & Franco, 2017).

Los PCM's pueden clasificarse en función de su naturaleza como orgánicos e inorgánicos. Los PCM's orgánicos más comunes son las parafinas, ácidos grasos, glicoles, ésteres y alcoholes; por otro lado, entre los PCM's inorgánicos se encuentran los hidratos de sal y aleaciones metálicas. Los PCM's también pueden clasificarse por su tipo de transición de fase, es decir, sólido-líquido, sólido-gas o líquido-gas; el más empleado es el cambio de sólido a líquido pues el volumen ocupado no varía en gran medida de una fase a otra (Rodríguez, 2015).

La selección del material más adecuado es un factor crucial para el diseño y desarrollo de los procesos ingenieriles pues intervienen parámetros económicos, tecnológicos y ambientales que afectan el trabajo. Si la selección del material es inadecuada la productividad y rentabilidad del proyecto se verá afectada negativamente (Méndez, Gómez, Rodríguez, & Nicolalde, 2020).

El cambio de fase de los materiales es un proceso dinámico que involucra la transferencia de calor y el movimiento de fluidos. Para poder resolver y estudiar este sistema se emplean técnicas numéricas para la obtención de resultados de las ecuaciones de flujo de fluidos, el conjunto de estas técnicas se conoce como la dinámica de fluidos computacional (Gómez & Ochoa, 2011).

1.4.2 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

En el campo científico existe un gran número de problemas que involucran fluidos, transferencia de calor y de masa, estos fenómenos son gobernados por modelos matemáticos que se basan en sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. Estos modelos suelen ser complejos y en la mayoría de los casos no es posible una solución analítica, a menos que el caso de estudio sea simple.

En la mecánica de fluidos existe un conjunto de modelos y leyes conservativas para describir el comportamiento de estos. Para poder encontrar una solución a estos problemas se puede optar por la experimentación a pequeña o gran escala; sin embargo, esto involucra una inversión económica elevada, así como de tiempo para poder obtener resultados. Por otro lado, se puede emplear los métodos numéricos, esta técnica es menos costosa comparada con la experimental y los resultados se obtienen en un tiempo más corto (De Loera, 2022). Existen tres principales métodos numéricos que se detallan a continuación.

Método de las diferencias finitas

El método de las diferencias finitas (MDF) es el método preferido de aplicar cuando la geometría sobre la cual se trabaja el problema es simple. Sin embargo, su principal desventaja es que es un método no conservativo, es decir, se debe tener sumo cuidado para que se cumpla la conservación de la masa, caso contrario no lo hará.

El método se basa en una aproximación de derivadas parciales por ecuaciones algebraicas donde los valores que puede adoptar la variable dependiente se encuentran en un limitado número de puntos dentro de la región de estudio (Salgado, 2021).

La discretización del dominio se realiza con elementos diferenciales ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta T, \Delta t$), de cuya intersección surgen los nodos; y un número finito de nodos describen el comportamiento general del fenómeno físico en todo el volumen de control (Hernández, 2019).

Método de volúmenes finitos

Permite resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. La discretización tiene lugar en el espacio físico por lo que no existe la necesidad de una transformación entre el sistema de coordenadas físico y el computacional. Para aplicar este método, en primer lugar, se integran las ecuaciones diferenciales en cada elemento sobre el cual el dominio fue dividido; luego, se transforman las integrales de volumen en integrales de superficie; por último, se convierten en discretas y se las integra numéricamente. Para dos volúmenes de control adyacentes, los puntos de integración se encuentran en la misma cara, esto quiere decir que los flujos que los atraviesan son exactamente iguales y opuestos; en conclusión, no existen cambios en la conservación (Álvarez, 2019).

Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM) es una técnica para la resolución de problemas gobernados por ecuaciones diferenciales parciales. Este método se emplea principalmente en el análisis estructural de sólidos, pero también sirve para el análisis de fluidos. El método de elementos finitos requiere de mayor cuidado para garantizar una solución conservadora. Para la resolución de esta técnica numérica se emplean las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos. El lado negativo de este método es que debe ser formulado con cuidado y precisión para que la solución sea conservadora y que requiere más memoria y mayor tiempo de resolución que con otros métodos; sin embargo, es un método más estable que cuando se emplea el método de volumen finito (Gómez, 2017).

1.4.3 MODELOS DE TURBULENCIA

La relación entre las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido puede resultar en la turbulencia de este. Si la fuerza inercial es pequeña comparada con la viscosidad es posible que los pequeños remolinos formados se amortigüen y el fluido se convierta en laminar, caso contrario los remolinos crecen y aumenta la turbulencia. Con el uso de la CFD se requiere modelar los flujos de la manera más exacta posible; existen diversos modelos de entre los cuales se debe elegir el más adecuado para el caso de estudio. En la tabla 1.2 se presentan los modelos más usados y sus ventajas y desventajas (Álvarez, 2019).

Tabla 1.2. Comparación de modelos de turbulencia (Chilvers, 2014).

Modelo	Ventajas	Desventajas
Longitud Mixta	<ul style="list-style-type: none"> • Corto tiempo computacional requerido. • Bien establecido. • Empleado en capas de flujo delgadas. 	No es válido para flujos con recirculación
Spalart- Allmaras	<ul style="list-style-type: none"> • Recurso computacional económico. • Adecuado para aerodinámica externa 	Limitaciones cuando la geometría es compleja.
Standard $k - \varepsilon$	<ul style="list-style-type: none"> • Buenos resultados para flujos industriales. • Modelo más validado. 	Mal desempeño para flujos con gradiente de presión adverso.
Wilcox $k - \omega$	<ul style="list-style-type: none"> • Predicción de flujo turbulento en las cercanías de las condiciones de frontera. 	La predicción de la separación es excesiva.
SST $k - \omega$	<ul style="list-style-type: none"> • Ideal para flujos con gradientes de presión adversos. 	Mayor complejidad y mayor empleo de recursos computacionales.

1.4.4 ESTRUCTURA DE UN MODELO CFD

La secuencia para resolver un problema mediante CFD es de la siguiente manera: pre-proceso, solución, post procesamiento.

Pre-proceso

Para la simulación CFD en primer lugar, se construye el diseño asistido por computadora, cuyas siglas en inglés son CAD, que se va a estudiar, es decir, la geometría, en un programa de diseño gráfico como lo son SolidWorks, Inventor, Catia, Pro Engineer o bien dentro del mismo programa de simulación si este lo permite. Al construir la geometría no solo se definen los elementos sólidos, sino también el dominio perteneciente al fluido, que es la región por donde este circulará, por ejemplo, para un estudio aerodinámico de un vehículo de carreras, no solo se diseña el carro, sino también se genera un espacio que será por donde circule el aire. Al tener fluidos en movimiento, en el diseño de la geometría también se especifican cuáles serán las entradas y salidas de este (Gómez, 2017).

Una vez se tiene la geometría completamente diseñada, esta se divide en elementos para formar una malla. Cada elemento de la malla consta de caras, aristas y un centro donde se encuentra el nodo. Las propiedades del fluido y de todos los elementos de la geometría se calculan en cada uno de los nodos para al final interpolar el resultado. Al incrementar el número de nodos se logra un resultado más exacto, sin embargo, el costo computacional incrementa. Por esto, se debe encontrar un equilibrio entre la precisión de los resultados y el costo computacional que involucra (Gómez, 2017).

El siguiente paso es especificar los modelos físicos que se desea simular, también se especifican las propiedades físicas de cada uno de los materiales involucrados en la geometría y por último se establecen las condiciones de frontera y condiciones iniciales (De Loera, 2022).

Procesamiento

En la etapa de procesamiento se solucionan las ecuaciones algebraicas necesarias. El tiempo que requiere el programa para calcular depende de varios factores como el número de elementos que conforma la malla, las características del equipo informático empleado, la configuración de la simulación, entre otros. Un factor clave de analizar es la convergencia de los resultados, donde después de un número suficiente de iteraciones o repeticiones los resultados permanecen constantes y se aproximan al valor real (Gómez, 2017).

Post-procesamiento

Se evalúan cuantitativa y cualitativamente los resultados de la simulación. En esta etapa se analizan los resultados gráficos y numéricos obtenidos y se sacan conclusiones (De Loera, 2022).

1.4.5 ECUACIONES GOBERNANTES EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS

La simulación CFD está gobernada por las ecuaciones de Navier-Stokes, que ayudan a predecir el movimiento de los fluidos; se derivan de las leyes de Newton y son ecuaciones parciales no lineales. Se emplean las mismas ecuaciones para el flujo de fluidos en diversas situaciones, lo que las personaliza son las condiciones iniciales y de frontera (Lugmanía &

Cisneros, 2018). Entonces, la solución de la simulación se basa en las siguientes leyes conservativas:

- Ley de la conservación de masa.
- La segunda ley de Newton, que establece que el movimiento de un cuerpo se debe a las fuerzas que actúan sobre él.
- La primera ley de la termodinámica, que establece que el cambio de la energía interna del sistema está dado por la suma de calor en este y por el trabajo que se realice sobre el sistema (De Loera, 2022).

1.4.6 MALLADO COMPUTACIONAL

El mallado computacional sirve para conocer los puntos del dominio donde se realizará la simulación numérica, para las regiones de mayor interés se aplica una mayor resolución. Este mallado es considerado como el cuello de botella en el proceso de simulación numérica, pues de acuerdo con el tipo de malla aplicada el procesamiento tardará más en completarse. Actualmente existen generadores de malla automatizados que presentan buenos resultados y cada vez se usan de forma más habitual (Lugmania & Cisneros, 2018).

Las mallas se pueden dividir en estructuradas y no estructuradas. Las mallas estructuradas son aquellas donde la conectividad entre celdas es trivial y fácil de obtener; mientras que para las mallas no estructuradas la conectividad no es trivial y es necesario calcular la información de conectividad entre celdas y guardarla en algún tipo de estructura de datos, lo que hace el cálculo menos eficiente. Las mallas estructuradas presentan el inconveniente de que no son adaptables a geometrías complejas; de igual manera su procesamiento es complejo y requiere mayor intervención humana, lo que lo vuelve menos eficiente (García, Gil, Navarro, & Quintero, 2020).

Otra clasificación de las mallas es en conformes y no conformes. Las conformes son aquellas donde los nodos y caras entre las celdas coinciden, estas permiten obtener mayor precisión y convergencia, pero no siempre es posible obtenerlas. Por otro lado, en las mallas no conformes las caras y nodos entre las celdas no coinciden, lo que puede llegar a dar problemas de precisión y convergencia (García, Gil, Navarro, & Quintero, 2020).

1.4.7 PROGRAMAS PARA SIMULACIÓN CFD

Ansys

Ansys Fluent es un programa de simulación aplicado a problemas ingenieriles, gobernado por el modelo de elementos finitos en el caso de estructuras sólidas y de volúmenes finitos para fluidos. Este software permite simular el flujo de líquidos, la turbulencia, la transferencia de calor, entre otros. Se usa para aplicaciones industriales como el flujo de aire alrededor de vehículos o aviones, procesos de combustión, también para la fabricación de plantas de tratamiento de agua. Dentro del Software de Ansys Fluent se puede generar y modificar una geometría en una sección denominada DesignModeler. Se puede elaborar el mallado cuyo tamaño es clave para la obtención de un resultado fiable; se requiere un refinamiento idóneo de la malla en el área de estudio considerando la capacidad del computador. Para el procesamiento Ansys Fluent cuenta con el solucionador Workbench donde, si se logra la convergencia, esta será fiable, aunque el tiempo de procesamiento puede incrementar dependiendo del equipo en el que se trabaje y la complejidad del modelo. En el post-procesamiento CFD se representan resultados gráficos y cuantitativos, para estos últimos se emplea la herramienta de reportes que arroja resultados numéricos específicos, como temperaturas, presiones o fracciones másicas. Para los resultados gráficos se emplean herramientas como contornos, vectores, animaciones y líneas de corriente. (Cedillo & Marín, 2015). De sus principales características, se destacan las siguientes:

- Interfaz gráfica "amigable", intuitiva e interactiva en cada una de las etapas del proceso de modelado.
- Posee herramientas CAD para el diseño del modelo en cualquier dimensión: 1D, 2D y 3D. Permite importar y modificar geometrías de archivos CAD en formato DXF, STEP y IGES. También, permite importar archivos creados en AutoCAD y CATIA.
- Generación automática de mallas, que se adapta en base al modelo que se desea estudiar, sea mecánico o de fluidos. Otorga control sobre el tamaño del elemento de la malla pues permite modificarlo.

La interfaz del programa Ansys se muestra en la figura 1.1. Se observa que en la parte izquierda se encuentra la caja de herramientas que contiene varias secciones como los sistemas de análisis que se puede emplear como estructural, de fluidos, magneto estático, entre otros. También se encuentra la sección de componentes de sistema como por ejemplo para realización de geometría, mallado, visualización de resultados, entre otros. Estas dos secciones fueron las únicas empleadas para la resolución del proyecto.

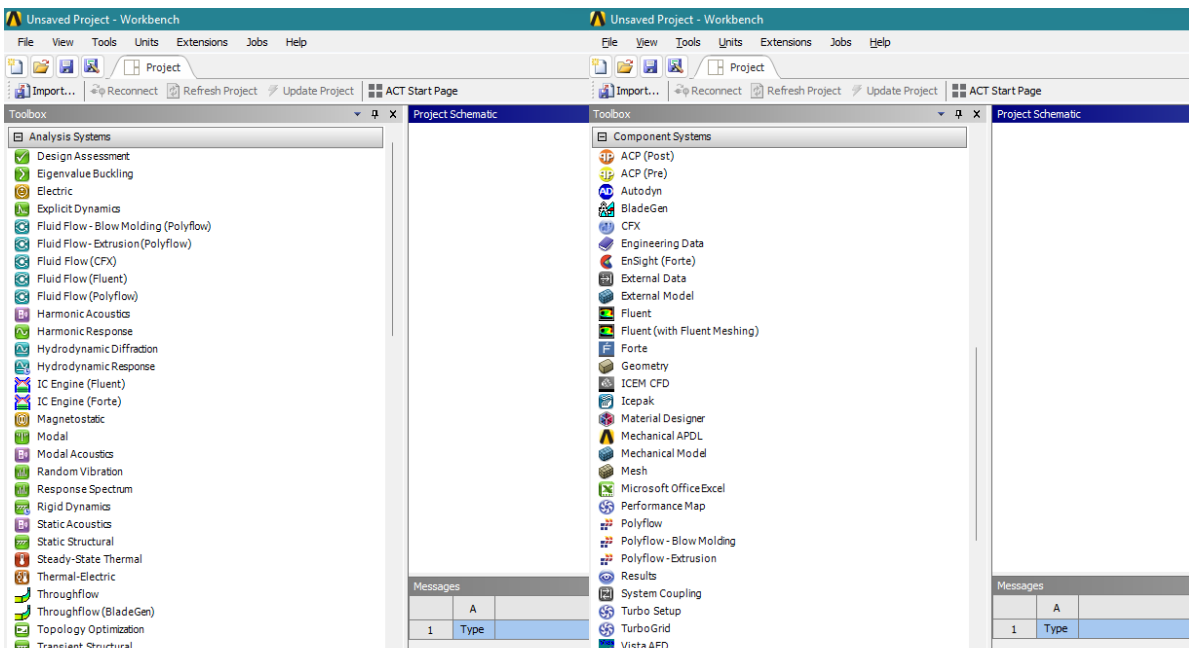


Figura 1.1. Interfaz del programa Ansys.

La Sección “Fluid Flow (Fluent)” es recomendado para el estudio de un intercambiador de calor. Esta pestaña cuenta con las siguientes secciones:

1. Geometría: donde se puede dibujar el objeto deseado o importar una geometría realizada en otro programa.
2. Malla: una vez terminada la geometría se procede a mallar para dividir a todo el cuerpo en elementos finitos.
3. Setup: donde se colocan las condiciones iniciales y de frontera, se especifica el tipo de análisis que se desea y se coloca el tiempo de simulación en el caso de un estudio transitorio.

4. Solution: es una interfaz exactamente igual a la anterior, pero donde se pueden observar los resultados de la simulación tanto numéricos mediante reportes, como cuantitativos mediante gráficos.
5. Results: sirve principalmente para visualizar de mejor manera los resultados gráficos.

COMSOL

COMSOL Multiphysics es un programa que permite la simulación de cualquier proceso físico que sea gobernado por ecuaciones en derivadas parciales. El método de resolución que emplea COMSOL es mediante elementos finitos. Es capaz de resolver problemas complejos rápidamente y con resultados precisos. La estructura de este programa brinda una gran facilidad de uso, así como flexibilidad (García R, 2008).

En su página oficial, COMSOL Multiphysics posee plantillas predefinidas acerca de prácticamente cualquier fenómeno. El acceso a las plantillas es libre y es posible descargarlas y modificarlas para obtener aplicaciones específicas. COMSOL se utiliza principalmente en la investigación y en el desarrollo de productos, pues mediante simulaciones es posible analizar las propiedades de materiales o productos y se asegura que los resultados son cercanos a la realidad (García, 2008).

OpenFOAM

OpenFOAM es un software libre y de código abierto en el cual es posible crear aplicaciones que se clasifican como: solvers, los cuales se emplean para la resolución de problemas, y utilities que permiten manejar y modificar la información (Velasco, 2020).

OpenFOAM posee varias herramientas que ayudan al usuario durante la de simulación CFD, tanto para el pre-proceso, como para el post-proceso de resultados. Algunas herramientas empleadas durante el pre-proceso son:

- BlockMesh: genera bloques y mallas base.
- SnappyHexMesh: genera una malla hexaédrica automáticamente.
- Check-Mesh: realiza pruebas sobre la malla para conocer la calidad de esta.

- ideasUnvToFoam: convierte archivos de mallado con extensión .unv al formato de OpenFoam.
- fluentMeshToFoam: convierte archivos de mallado con extensión .msh a uno con formato de OpenFoam.

Una herramienta empleada para el post-procesamiento de resultados es:

- wallShearStress: calcula el esfuerzo cortante para las secciones de la geometría especificadas como wall (Velasco, 2020).

2. METODOLOGÍA

Se realizaron pruebas preliminares tanto en Comsol como en Ansys para entender el funcionamiento de los simuladores previo a la simulación de la geometría definitiva.

2.1 Pruebas preliminares en COMSOL

Para poder entender el programa y los errores que se puedan presentar, las geometrías y modelos fueron de menor a mayor complejidad, es decir, se empezó con geometrías que se compusieran solamente de cuerpos sólidos, luego se pasó a añadir cuerpos líquidos al sistema para finalmente estudiar el material de cambio de fase.

Primera prueba preliminar en COMSOL

La primera simulación realizada en Comsol consistió en la transferencia de calor por conducción a través de una pared compuesta, es decir, una pared de vidrio, seguida de un espacio de aire; y por último otra pared de vidrio.

Para la geometría se crearon tres bloques; las dimensiones de los bloques situados en los extremos fueron: 4 mm de ancho, 8 mm de profundidad; 15 mm de altura. Mientras que, para el bloque medio el ancho fue de 10 mm, la profundidad y altura se mantuvieron iguales. Posteriormente, se formó una unión de las tres geometrías para que sea un solo cuerpo.

Tanto el aire como el vidrio fueron materiales definidos por el usuario con las propiedades mostradas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales para la primera prueba preliminar en COMSOL.

Propiedades	Vidrio	Aire
Densidad [kg/m ³]	2500	1,29
Capacidad calorífica [J/kgK]	840	1000,52
Conductividad térmica [W/mK]	0,78	0,026

La física escogida fue de "Transferencia de calor en sólidos". La temperatura de referencia se tomó la que el programa asigna por defecto que fue de 293,15 K. Luego, se asignaron dos flujos de calor por convección. El primer flujo de calor se situó en la cara frontal del primer bloque, es decir, de la primera pared de vidrio; el coeficiente de transferencia de

calor por convección fue de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ y la temperatura ambiente se fijó en $293,15 \text{ K}$. El segundo flujo de calor se situó en la cara posterior del último bloque, es decir, de la segunda pared de vidrio; el coeficiente de transferencia de calor por convección fue de $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ y la temperatura ambiente se fijó en $263,15 \text{ K}$.

El mallado de la geometría fue controlada por la física y como tamaño de elemento se seleccionó "Más fino". El estudio se estableció como estado estacionario, se calculó la solución y se analizaron los resultados.

Segunda prueba preliminar en COMSOL

En este caso se simuló la transferencia de calor por conducción a través de una tubería larga de acero inoxidable. Para la geometría se dibujaron dos círculos concéntricos de diámetros 16 cm y 14 cm cada uno; y se extruyó el plano de trabajo para formar un cilindro hueco con una longitud de 20 m .

El material fue definido por el usuario con las propiedades mostradas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades del acero inoxidable para la segunda prueba preliminar en COMSOL.

Propiedades	Valor
Densidad [kg/m^3]	8000
Capacidad calorífica [J/kgK]	510
Conductividad térmica [W/mK]	20

La física escogida fue de "Transferencia de calor en sólidos". La temperatura de referencia se tomó la que el programa asigna por defecto que fue de $293,15 \text{ K}$. A la cara lateral externa del cilindro se le asignó una temperatura de $333,15 \text{ K}$, mientras que, a la cara interna una temperatura de $423,15 \text{ K}$ de manera que se genere un flujo de calor a través de la pared de la tubería. También se aislaron térmicamente las caras transversales tanto frontal como posterior.

Nuevamente se eligió una malla controlada por la física y el tamaño de elemento "Extra fino". El estudio fue en estado estacionario, se calculó la solución y se analizaron los resultados.

Tercera prueba preliminar en COMSOL

Para la tercera prueba, se simuló el flujo de agua a través de una tubería y la transferencia de calor en la misma. Para la geometría se dibujaron dos círculos concéntricos de diámetros 16 cm y 13 cm cada uno, luego se empleó la herramienta “diferencia” manteniendo los objetos de entrada, de manera que al extruir se obtuvieron dos cuerpos, un cilindro hueco y un cilindro entero. La longitud de la tubería fue de 2 m.

En la biblioteca de materiales se eligió el acero estructural para la pared de la tubería; y agua como fluido para el cilindro entero.

La física escogida fue la “Transferencia de calor en sólidos”. La temperatura de referencia se tomó aquella asignada por defecto de 293,15 K. Se insertó un dominio de fluido para el cilindro central, aquí se especificó la velocidad de entrada de 10 m/s en el eje Z; y se especificó la cara posterior como salida del fluido. Se asignaron dos temperaturas, la primera en la cara lateral externa del cilindro hueco con un valor de 297,15 K; y la segunda a la cara frontal del cilindro central con un valor de 383,15 K que representa la temperatura de entrada del agua.

La malla fue especificada por el usuario, se eligió una malla triangular para todas las superficies del cilindro central con un tamaño de elemento de 2 cm; y una malla tetraédrica para el resto de la geometría. El estudio se realizó en estado estacionario, se calculó la solución y se analizaron los resultados.

Cuarta prueba preliminar en COMSOL

En este caso se decidió simular un intercambiador de tubos y coraza. Este constó de 4 tubos a través de los cuales circulaba agua como fluido frío, mientras que por la coraza circulaba un fluido caliente. Para la geometría se formaron nueve cilindros en total, todos con la misma longitud de 3,66 m. Los 4 primeros cilindros representaron el agua y se les asignó un diámetro de 1 cm; los 4 cilindros siguientes, concéntricos a los 4 anteriores, representaron las tuberías con un diámetro externo de 1,5 cm; el último cilindro representó el fluido caliente que pasa por la coraza con un diámetro de 6,5 cm.

Dos de los tres materiales fueron definidos por el usuario con las propiedades de la tabla 2.3. El tercer material fue acero estructural para las paredes de las tuberías y se lo seleccionó de biblioteca de materiales.

Tabla 2.3. Propiedades de los materiales para la cuarta prueba preliminar en COMSOL.

Propiedades	Agua	Fluido caliente
Densidad [kg/m ³]	991,708	810
Capacidad calorífica [J/kgK]	4178	2260
Conductividad térmica [W/mK]	0,6319	0,074
Viscosidad dinámica [Pa×s]	0,000646	0,000805
Coefficiente de dilatación térmica	1	1

La física escogida fue la “Transferencia de calor en sólidos y fluidos”. La temperatura de referencia se tomó la que el programa asigna por defecto que fue de 293,15 K. Se insertó un dominio de fluido para los 4 cilindros que representan al agua, así como para el cilindro que representa el fluido caliente. Las caras posteriores de ambos cilindros se especificaron como zonas de salida de los fluidos. Se asignaron dos temperaturas de entrada, la primera en las caras frontales del agua con un valor de 305,37 K; y la segunda en la cara frontal del fluido caliente con un valor de 433,15 K.

Se eligió una segunda física de “Flujo laminar” para los dominios que representan líquidos. Aquí se establecieron las velocidades de entrada tanto para el agua como para el fluido caliente con valores de 0,0108 m/s y 0,0029 m/s respectivamente. También se establecieron las presiones manométricas de salida, con un valor de 0 [Pa] para ambos fluidos.

Se eligió una malla controlada por la física con un tamaño de elemento “Fino”. El estudio fue en estado estacionario, se calculó la solución y se analizaron los resultados.

Quinta prueba preliminar en COMSOL

La última prueba realizada en COMSOL fue la simulación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos, con agua como fluido frío que circula por la coraza y material de cambio

de fase (PCM) en el tubo central. Para la geometría se construyeron dos cilindros, ambos con una longitud de 2 m; y diámetros de 40 cm y 15 cm cada uno.

El PCM fue definido por el usuario tanto en su fase sólida como en fase líquida con las propiedades de la tabla 2.4. El acero estructural para las paredes de las tuberías y el agua se seleccionaron de biblioteca de materiales.

Tabla 2.4. Propiedades de los materiales para la quinta prueba preliminar en COMSOL.

Propiedades	PCM líquido	PCM sólido
Densidad [kg/m ³]	1032	1032
Capacidad calorífica [J/kgK]	3900	3900
Conductividad térmica [W/mK]	0,53	0,53
Viscosidad dinámica [Pa×s]	0,0017	0,0100
Coefficiente de dilatación térmica	1	1

La física escogida fue la “Transferencia de calor en fluidos”. El primer fluido se le asignó al agua con una temperatura de entrada de 283,15 K; mientras que el PCM se denominó como fluido 2 con una temperatura de entrada de 333 K. Para el fluido 2 se estableció el criterio de “Material de cambio de fase” donde se especificaron las siguientes características.

Tabla 2.5. Condiciones de cambio de fase para la quinta prueba preliminar en COMSOL.

Parámetro	Valor
Temperatura a la que ocurre el cambio de fase	323,15 [K]
Intervalo de transición entre fases	10 [K]
Calor latente	200740 [J/Kg]
Material de la fase 1	Parafina líquida
Material de la fase 2	Parafina sólida

Se eligió una segunda física de “Flujo laminar”. Aquí se estableció la velocidad de entrada para el agua con un valor de 0,1 m/s. También se estableció la presión manométrica de salida, con un valor de 0 Pa pues se consideró que el agua sale hacia el ambiente.

Se eligió una malla controlada por la física con un tamaño de elemento “Normal”. El estudio fue en estado estacionario, se calculó la solución y se analizaron los resultados.

2.2 PRUEBAS PRELIMINARES ANSYS

En Ansys también se simularon geometrías de menor a mayor complejidad, empezando por un sistema con un cuerpo sólido y uno líquido, para después pasar a tener dos cuerpos líquidos y finalmente analizar el sistema con el material de cambio de fase.

Primera prueba preliminar en Ansys

Se simuló la transferencia de calor en un intercambiador de tubos concéntricos sin paredes. Para la geometría se generó un cilindro de radio 15 cm y otro cilindro hueco concéntrico al primero de radio externo 20 cm, la longitud para ambos cuerpos fue de 1 m. También se crearon 5 selecciones, dos para cuerpos sólidos: Agua y PCM sólido; y 3 para superficies: Entrada agua, Salida agua, Paredes del PCM.

En la sección de *mallado* se eligió la malla generada por el sistema por defecto, este proceso duró aproximadamente 2 minutos y la malla presentó las características mostradas en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Características del mallado de la primera prueba preliminar en Ansys Fluent.

Parámetro	Valor
Tipo de mallado	Tetraédrico
Tamaño de elemento	0,0574 [m]
Número de nodos	2873
Calidad promedio de la malla	0,8574

En la sección de *Setup* se activa el estado transitorio y el modelo de energía. De los materiales, el agua se seleccionó de la base de datos de Ansys Fluent, mientras que el material sólido fue creado con las propiedades mostradas en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Propiedades del material sólido de la primera prueba preliminar en Ansys Fluent.

Propiedades	PCM sólido
Densidad	789 [kg/m ³]
Capacidad calorífica	2439 [J/kgK]
Conductividad térmica.	0,2 [W/mK]

En las condiciones de borde, en la selección “Entrada agua” se especifica la velocidad y temperatura de entrada de 0,1 m/s y de 283,01 K respectivamente; mientras que en la selección “Salida agua” se especifica la presión manométrica de salida como 0 Pa. El resto de las selecciones se dejan especificadas como paredes sin flujo de calor. En la inicialización se especifica la temperatura con la que se empezará a calcular el modelo con un valor de 329 K pues la temperatura inicial a la que se encuentra el cilindro central. Se especificó un tiempo de 100 segundos con 1 iteración por cada segundo. Se calculó la solución, esto tomó alrededor de 10 minutos y finalmente se compararon los resultados de la simulación con los cálculos manuales ubicados en el Anexo II.

Segunda prueba preliminar en Ansys

Se simuló nuevamente la transferencia de calor en un intercambiador de tubos concéntricos sin paredes, pero con un material de cambio de fase especificado. Para la geometría se generó un cilindro de radio 15 cm y otro cilindro hueco concéntrico al primero de radio externo 20 cm, la longitud para ambos cuerpos fue de 1 m. También se crearon 6 selecciones, dos para cuerpos sólidos: Agua y PCM; y 4 para superficies: Entrada agua, Salida agua, Entrada del PCM, Salida del PCM.

En la sección de mallado se eligió la malla generada por el sistema por defecto, este proceso duró aproximadamente 2 minutos y la malla presentó las características mostradas en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Características del mallado de la segunda prueba preliminar en Ansys Fluent.

Parámetro	Valor
Tipo de mallado	Tetraédrico
Tamaño de elemento	0,0574 [m]
Número de nodos	2853
Calidad promedio de la malla	0,8574

En la sección de Setup se activa el estado transitorio, el modelo de “Energía” y el modelo de “Solidificación/Fusión”. Para los materiales, el agua se seleccionó de la base de datos de Ansys Fluent, mientras que el material de cambio de fase fue especificado por el usuario con las siguientes propiedades.

Tabla 2.9. Propiedades del material de cambio de fase para la segunda prueba preliminar en Ansys Fluent.

Propiedades	Valor
Densidad	789 [kg/m ³]
Capacidad calorífica	2439 [J/kgK]
Conductividad térmica.	0,2 [W/mK]
Viscosidad a 293 K	0,1 [Paxs]
Viscosidad a 373 K	0,009 [Paxs]
Calor latente	200740 [J/kg]
Temperatura en estado líquido	328 [K]
Temperatura en estado sólido	328 [K]

En las condiciones de borde, en la selección “Entrada agua” se especifica la velocidad y temperatura de entrada de 0,1 m/s y de 283,01 K respectivamente; mientras que en la selección “Salida agua” se especifica la presión manométrica de salida como 0 Pa. El resto de las selecciones se dejan especificadas como paredes sin flujo de calor. En la inicialización se especifica la temperatura con la que se empezará a calcular el modelo con un valor de 329 K pues es la temperatura a la que el PCM se encuentra en estado líquido. Se especificó un tiempo de 100 segundos con 1 iteración por cada segundo. Se calculó la solución, esto tomó alrededor de 10 minutos y finalmente se compararon los resultados de la simulación con los cálculos manuales presentados en el Anexo II.

Tercera prueba preliminar en Ansys

En la tercera prueba preliminar se realizó una simulación casi idéntica a la anterior, con la diferencia de que el intercambiador presentaba paredes alrededor del PCM (cilindro central) por lo que se generaron dos nuevas selecciones, una para un cuerpo sólido llamada “Tubo” y una para superficies llamada “Paredes del tubo”. El mallado también se generó por defecto y se obtuvieron las características presentadas en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Características del mallado de la tercera prueba preliminar en Ansys Fluent.

Parámetro	Valor
Tipo de mallado	Tetraédrico
Tamaño de elemento	0,01 [m]
Número de nodos	477777
Calidad promedio de la malla	0,8675

En la sección de Setup se volvieron a activar los modelos de “Energía” y “Solidificación/Fusión” y el estado transitorio. Los materiales se seleccionaron de la misma forma que en la prueba preliminar previa, excepto por el material de la tubería donde se escogió el material sólido que el sistema muestra por defecto que es aluminio. Nuevamente se especificó un tiempo de 100 segundos con 1 iteración por cada segundo. Se calculó la solución, esto tomó alrededor de 10 minutos y finalmente se compararon los resultados de la simulación con los cálculos manuales que se muestran en el Anexo II.

Cuarta prueba preliminar en Ansys

Para la cuarta prueba se decidió simular la geometría inicial de un intercambiador de calor de tubos y coraza diseñado por Marbelle Porras (2022) en el Trabajo de Integración Curricular 2021-B con las características presentadas en la tabla 2.11, donde el agua es el fluido frío que circula en 2 pasos por la coraza y el PCM se ubica dentro de los tubos. Esta geometría se la realizó en el programa SolidWorks para su futura importación.

Tabla 2.11. Características del intercambiador de calor de la cuarta prueba preliminar en Ansys.

Parámetro	Valor
Diámetro externo de los tubos	0,0603 [m]
Diámetro interno de los tubos	0,05248 [m]
Longitud de los tubos	1,66 [m]
Tipo e arreglo	Triangular
Espaciamiento entre tubos	0,075375 [m]
Número de tubos	226
Número de deflectores	7
Diámetro de la coraza	1,25 [m]

El mallado de toda la geometría se generó por defecto. Este proceso duró aproximadamente 2 horas y la malla tuvo las características presentadas en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Características del mallado de la cuarta prueba preliminar en Ansys Fluent.

Parámetro	Valor
Tamaño del elemento	0,13125 [m]
Número de nodos	6575841
Calidad promedio de la malla	0,76

En la sección de Setup se activa el estado transitorio, el modelo de “Energía” y el modelo de “Solidificación/Fusión”. Para los materiales, el agua se seleccionó de la base de datos de Ansys Fluent, mientras que el material de cambio de fase fue especificado por el usuario con las propiedades mostradas en la tabla 2.9, para la tubería se seleccionó el material sólido que el sistema muestra por defecto que es aluminio.

En las condiciones de borde, en la selección “Entrada agua” se especifica el flujo másico y temperatura de entrada de 0,104 [kg/s] y de 283,01 K respectivamente; mientras que en la selección “Salida agua” se especifica la presión manométrica de salida como 0 [Pa]. El resto de las selecciones se dejan especificadas como paredes sin flujo de calor. En la inicialización se especifica la temperatura con la que se empezará a calcular el modelo con un valor de 329 K pues la temperatura a la que el PCM se encuentra en estado líquido. Se especificó un tiempo de 100 segundos con 1 iteración por cada segundo. Se calculó la solución, esto tomó alrededor de 15 horas y finalmente se compararon los resultados de la simulación con los cálculos realizados por Marbelle Porras en el Trabajo de Integración Curricular 2021-B.

Posteriormente se realizó una segunda geometría en el programa Inventor, en este caso sin paredes, es decir, sin tuberías; el resto de las especificaciones fueron las mismas que las de la tabla 2.11. Se siguieron los mismos pasos antes indicados, tanto para el mallado como para la simulación que tuvo la misma duración que la anterior y se analizaron los resultados.

Quinta prueba preliminar en Ansys

Se decidió simular un intercambiador de tubos y coraza, donde el agua es el fluido frío que circula en 2 pasos por la coraza y el PCM se ubica dentro de los tubos. La geometría se la realizó dentro del programa Ansys con las siguientes especificaciones; y se crearon las mismas selecciones que las mencionadas en la cuarta prueba preliminar.

Tabla 2.13. Características del intercambiador de calor de la quinta prueba preliminar en Ansys.

Parámetros	Valor
Diámetro externo de los tubos	0,07 [m]
Diámetro interno de los tubos	0,06 [m]
Longitud de los tubos	1,8 [m]
Tipo e arreglo	Triangular
Espaciamiento entre tubos	0,0875 [m]
Número de tubos	10
Número de deflectores	6
Espaciamiento entre deflectores	0,292 [m]
Diámetro de la coraza	0,38 [m]

En la sección de mallado se generó por defecto para toda la geometría. Este proceso duró aproximadamente 20 minutos y la malla presentó las características detalladas en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Características del mallado de la quinta prueba preliminar en Ansys Fluent.

Parámetro	Valor
Número de nodos	332108
Calidad promedio de la malla	0,79

En la sección de Setup se activa el estado transitorio, el modelo de “Energía” y el modelo de “Solidificación/Fusión”. Para los materiales, el agua se seleccionó de la base de datos de Ansys Fluent, mientras que el material de cambio de fase fue especificado por el usuario con las propiedades mencionadas en la tabla 2.9, para la tubería se seleccionó aluminio que es el material sólido que el sistema muestra por defecto.

En las condiciones de borde, en la selección “Entrada agua” se especifica el flujo másico y temperatura de entrada de 0,026 [kg/s] y de 283,01 K respectivamente; mientras que en la selección “Salida agua” se especifica la presión manométrica de salida como 0 [Pa]. El resto de las selecciones se dejan especificadas como paredes sin flujo de calor. En la inicialización se especifica la temperatura con la que se empezará a calcular el modelo con un valor de 329 K pues la temperatura a la que el PCM se encuentra en estado líquido. Se especificó un tiempo de 2400 segundos, con un paso de tiempo de 12 segundos y con una iteración por cada paso. Se calculó la solución, esto tomó alrededor de 1,5 horas y finalmente se compararon los resultados de la simulación con los parámetros establecidos para los cálculos del dimensionamiento de este intercambiador de calor que se muestran en el Anexo III.

Simulación definitiva en Ansys

Se simuló un intercambiador de tubos y coraza, donde el agua es el fluido frío que circula en 2 pasos por la coraza y el PCM se ubica dentro de los tubos. La geometría definitiva se realizó dentro del programa Ansys con las especificaciones detalladas en la tabla 2.15; y se crearon las mismas selecciones que las mencionadas en pruebas anteriores.

Tabla 2.15. Características del intercambiador de calor de la simulación definitiva en Ansys.

Parámetro	Valor
Diámetro externo de los tubos	0,0285 [m]
Diámetro interno de los tubos	0,0267 [m]
Longitud de los tubos	1,8 [m]
Tipo e arreglo	Triangular
Espaciamiento entre tubos	0,0357 [m]
Número de tubos	50
Número de deflectores	6
Espaciamiento entre deflectores	0,288 [m]
Diámetro de la coraza	0,3 [m]

Para el diseño del intercambiador de calor en Design Modeler se siguieron los pasos que se detallan a continuación:

- Clic derecho en el módulo de geometría y seleccionar “New DesignModeler Geometry”.
- Seleccionar un plano de trabajo, para este caso se eligió el plano XY; y crear un nuevo Sketch el cual es uno de los bocetos donde se dibujarán las diferentes partes de la geometría.
- El primer elemento que se generó fue un tubo, para esto se dibujó un círculo al que se le asignó el diámetro interno del tubo, una distancia del centro hasta el eje X y otra distancia del centro hasta el eje Y.
- Luego se realiza otro círculo concéntrico al primero al que se le asignó el diámetro externo del tubo.
- Se extruye el primer boceto en dirección perpendicular al plano de trabajo, es decir, en el eje Z; donde la distancia es la longitud del tubo. Se debe especificar que la extrusión sea simétrica.
- Para rellenar el cilindro hueco con otro sólido que posteriormente se especificará como el PCM, se empleó la herramienta “Fill” en la cara interna del cilindro.
- El resto de los tubos de la primera fila se crearon con la herramienta “Pattern”; mientras que para la fila superior se usó la herramienta “Translate” que mueve los objetos en la dirección especificada sin borrar los cuerpos originales. Y así sucesivamente hasta tener la mitad superior del banco de tubos. Para la mitad inferior se empleó la opción de “Mirror”.
- Los deflectores se formaron en un nuevo sketch y aplicó la operación de “Boolean” para realizar los orificios donde se ubican los tubos; y se utiliza “Translate” y “Mirror” nuevamente.
- La placa media, así como el agua se dibujaron en diferentes sketches y se extruyeron para terminar de formar el intercambiador de calor.

En la sección de mallado se insertaron dos sizing, el primero para los bordes de la tubería con un número de 10 divisiones; y el segundo para el agua con un tamaño de elemento de 50 mm. La malla para el resto de la geometría se generó por defecto. Este proceso duró

aproximadamente 20 minutos y la malla presentó las características detalladas en la tabla 2.16.

Tabla 2.16. Características del mallado de la simulación definitiva en Ansys Fluent.

Parámetro	Valor
Número de nodos	3111608
Calidad promedio de la malla	0,76

En la sección de Setup se activa el estado transitorio, el modelo de “Energía” y el modelo de “Solidificación/Fusión”. Para los materiales, el agua se seleccionó de la base de datos de Ansys Fluent, mientras que el material de cambio de fase fue especificado por el usuario con las propiedades mencionadas en la tabla 2.9, para la tubería se seleccionó aluminio que es el material sólido que el sistema muestra por defecto.

En las condiciones de borde, en la selección “Entrada agua” se especifica el flujo másico y temperatura de entrada de 0,026 [kg/s] y de 283,01 K respectivamente; mientras que en la selección “Salida agua” se especifica la presión manométrica de salida como 0 [Pa]. El resto de las selecciones se dejan especificadas como paredes sin flujo de calor. En la inicialización se especifica la temperatura con la que se empezará a calcular el modelo con un valor de 329 K pues la temperatura a la que el PCM se encuentra en estado líquido. Se especificó un tiempo de 2400 segundos con un paso de tiempo de 24 segundos y 1 iteración por cada paso. Se calculó la solución, esto tomó alrededor de 4 horas y finalmente se compararon los resultados de la simulación con los parámetros establecidos para los cálculos del dimensionamiento de este intercambiador de calor que se muestran en el Anexo IV.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

Para la elección del simulador a emplear se consideraron una serie de aspectos como: que posea un software CFD para ser capaces de resolver problemas de flujo de fluidos, que posea un módulo de intercambio de calor, que permita crear materiales para poder especificar el material de cambio de fase específico para este caso de estudio, que sea un programa accesible, es decir, que presenten versiones estudiantiles gratuitas; y que su interfaz gráfica sea amigable con el usuario. Los programas que cumplieron con estas características fueron COMSOL Multiphysics y Ansys Fluent. Al estudiar y analizar ambos programas se determinó que la interfaz de COMSOL era más didáctica y de fácil entendimiento por lo que se consideró que se orientaba más al ámbito académico; además en la página oficial de COMSOL se encuentran archivos modelos donde se resuelven una gran cantidad de fenómenos físicos, entre ellos el cambio de fase lo que representa una ventaja y una guía para la resolución de este proyecto. Por otro lado, la interfaz de ANSYS presenta una gran cantidad de módulos, su guía de usuario es mucho más extensa y compleja por lo que se consideró que se orientaba más a la industria. De manera que el simulador seleccionado inicialmente fue COMSOL Multiphysics.

Resultados de las pruebas preliminares en COMSOL

Las dos primeras pruebas preliminares en COMSOL fueron acerca de la transferencia de calor por conducción, al comparar el flujo de calor obtenido en las simulaciones con el flujo de calor obtenido mediante cálculos manuales (Anexo I) se determinó que la simulación fue exitosa. Los valores se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Flujos de calor de las dos primeras pruebas preliminares.

Flujos de calor	Primera prueba preliminar (Pared compuesta)	Segunda prueba preliminar (Tubería)
Simulado	57,71 [W/m ²]	1,10x10 ⁵ [W/m ²]
Calculado	56,59 [W/m ²]	1,02x10 ⁵ [W/m ²]

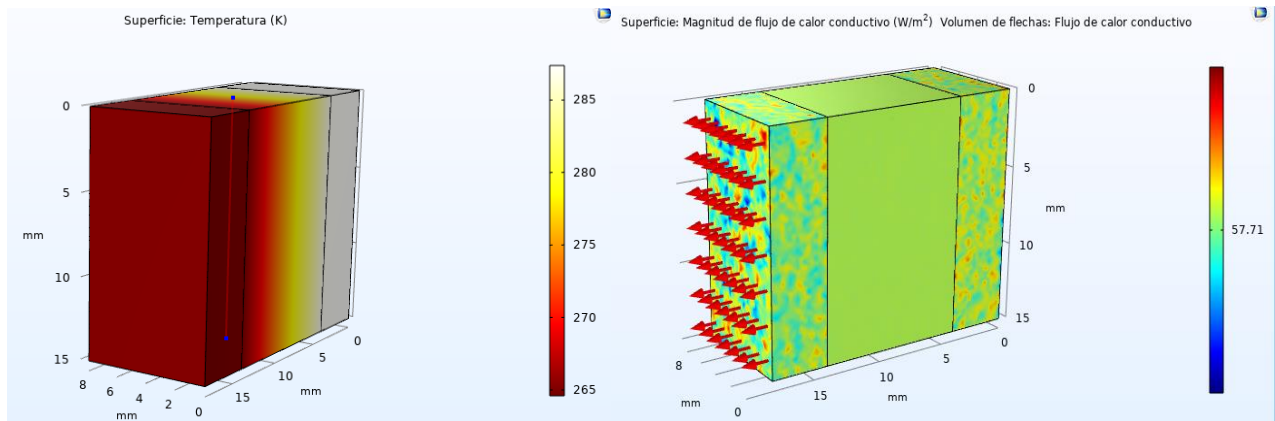


Figura 3.1. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en pared compuesta

En la figura 3.1a se observa el cambio de temperatura a lo largo de la pared compuesta, la sección de color blanco representa la mayor temperatura de 293 K y la de color rojo la temperatura más baja de 263 K; en la figura 3.1b se observa que el flujo de calor va en dirección de derecha hacia izquierda esto debido a que este siempre fluye desde la región de mayor temperatura hacia una de menor temperatura (Jiménez, 2018). Este tipo de paredes compuestas son empleadas en ventanas de edificaciones aprovechando la resistencia térmica del aire que se encuentra en medio de ambos vidrios y disminuyendo la transmisión térmica de la ventana (Muñoz, 2017), razón por la cual el calor transferido fue relativamente bajo con un valor de $57,71 \text{ W/m}^2$.

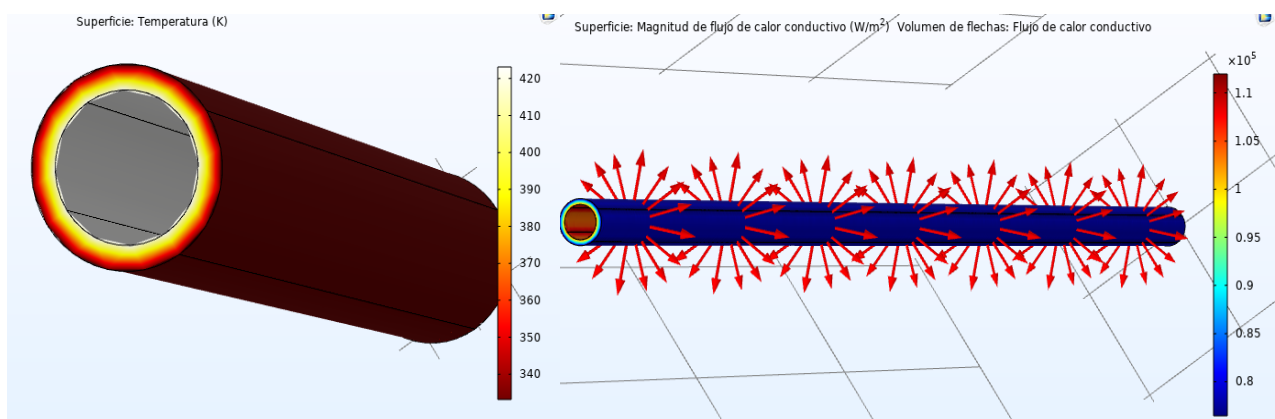


Figura 3.2. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en una tubería.

En la figura 3.2a se observa el cambio de temperatura; y en la 3.2b el flujo de calor a través de una tubería. La cara interna de la tubería se encuentra a una temperatura de 423 K,

mientras que la cara externa 333,15 K por lo que el flujo de calor va de dentro hacia afuera. Las caras frontal y posterior fueron aisladas de manera que el calor se transfiera en dirección radial como lo indican las flechas en la figura 3.2b.

Una vez corroborado el funcionamiento del programa para la transferencia de calor en sólidos de las primeras dos pruebas preliminares, se decidió añadir un fluido al sistema. En este caso el flujo de calor también se transfiere de forma radial desde el interior al exterior de la tubería con un valor de $1,4 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ como se observa en la figura 3.3b; mientras que el flujo calculado fue de $1,38 \times 10^5 \text{ W/m}^2$.

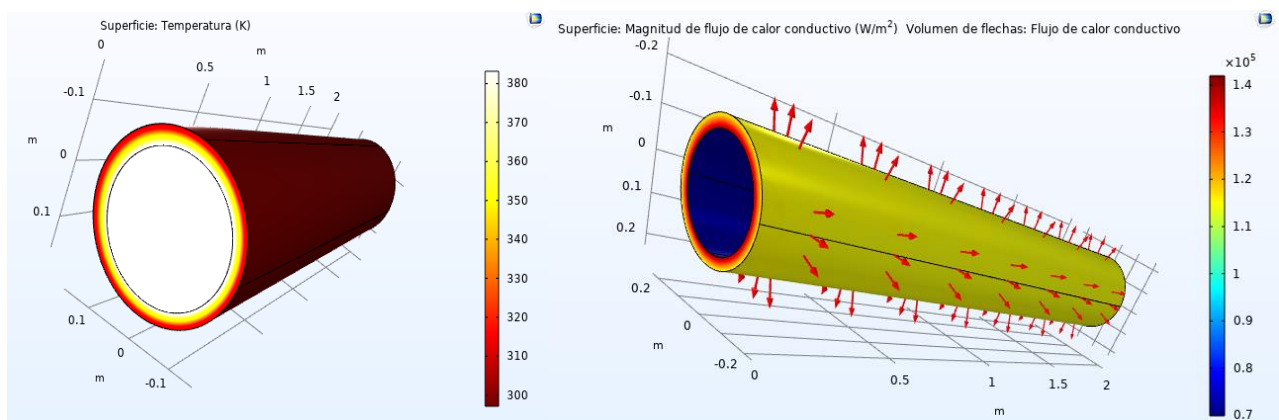


Figura 3.3. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en una tubería con agua por dentro.

Se decidió simular una geometría más compleja que las anteriores, un intercambiador de calor de tubos y coraza con 4 tubos por los cuales circulaba agua, mientras que por la coraza circulaba un fluido caliente. En este caso la simulación no fue la esperada; a diferencia de las anteriores pruebas preliminares donde se observaba la variación de temperatura a lo largo del cuerpo analizado y el flujo de calor en sentido radial, en este intercambiador la temperatura cambia solamente en la primera sección de la geometría como lo muestra la figura 3.4. También se observa que el calor solo fluye en sentido longitudinal ya que es el agua el fluido que lo transfiere (figura 3.4b). Estos resultados no tienen coherencia pues al estar ambos fluidos a diferentes temperaturas, es el fluido caliente el que pasa por la coraza quien debe transferir el calor en sentido radial hacia el agua dentro de los tubos. En un principio la velocidad del fluido caliente que circula por la coraza fue de $0,0029 \text{ m/s}$, se consideró que este valor tal vez representaba un flujo másico muy pequeño razón por la cual la variación de temperatura no tenía lugar a lo largo de todo

el cuerpo. Se simuló la misma geometría 5 veces más modificando la velocidad hasta incrementarla 10 veces más que la inicial; sin embargo, el resultado obtenido en cada ocasión fue el mismo.

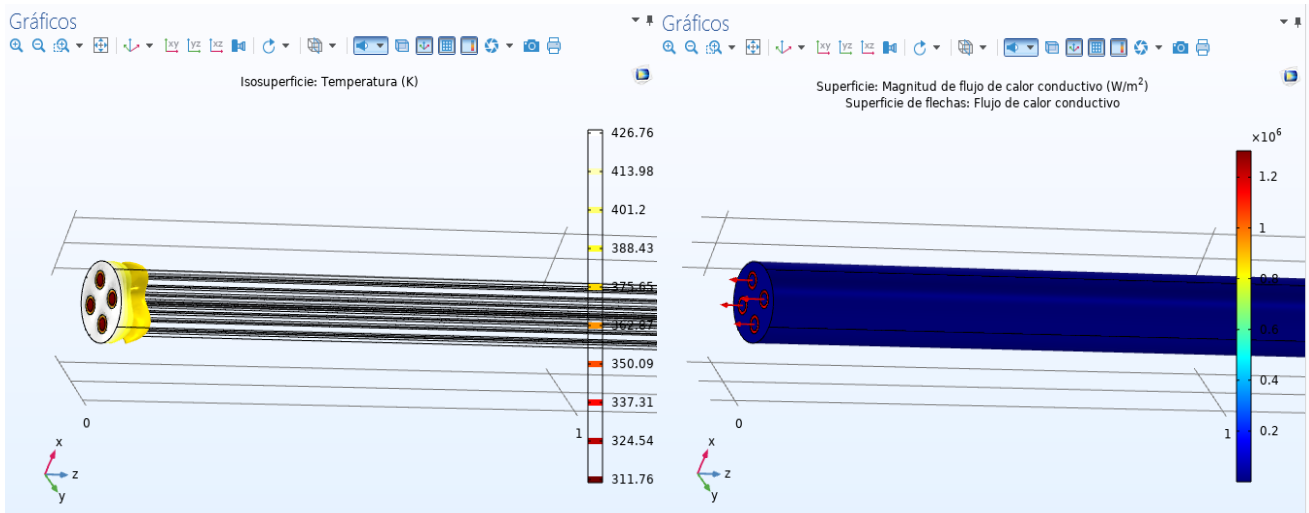


Figura 3.4. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en un intercambiador de tubos y coraza de 4 tubos.

Se decidió realizar una última prueba preliminar en COMSOL. Se simuló el sistema más simple respecto a intercambiadores de calor, es decir, un intercambiador de tubos concéntricos con agua que circula por la coraza y PCM dentro del tubo. Se consideró que, de resultar exitosa la simulación y con resultados acorde a los calculados, luego se podría extrapolar el mismo procedimiento a intercambiadores cada vez más complejos hasta obtener la geometría deseada por completo.

Sin embargo, en este caso no hubo ningún resultado al observar que el resolvidor no convergió. En la página oficial de COMSOL, al consultar sobre este error se recomendó ampliar el número de iteraciones y reducir el factor de tolerancia (COMSOL, 2012). Se varió de 10 a 25 iteraciones y de 0,5 a 0,1 el factor de tolerancia. El tamaño de elemento de la malla también se modificó de "Normal" a "Fino" pues un mal mallado también influye en la confiabilidad de los resultados. A pesar de las modificaciones el sistema continuó sin converger.

También se decidió seguir un curso virtual en la plataforma UDEMY llamado “CFD simulations in COMSOL Multiphysics” para poder obtener más información del programa, así como de los posibles errores, pero no hubo información para reparar el problema presentado.

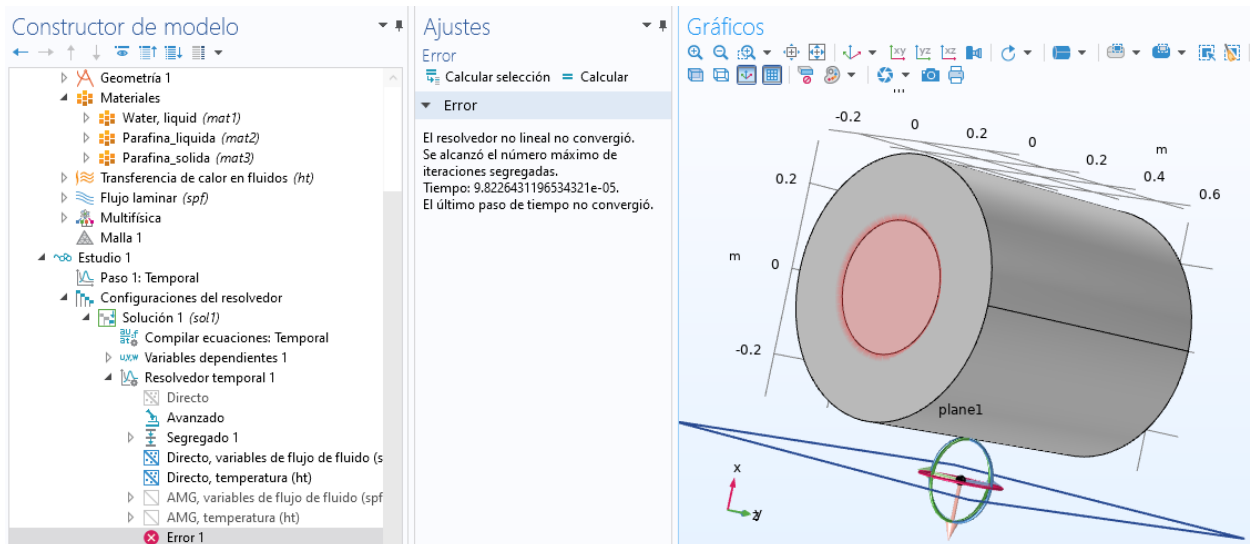


Figura 3.5. a) Variación de temperatura. b) Flujo de calor por conducción en un intercambiador de tubos concéntricos.

Al haber empleado alrededor de dos meses en realizar y verificar todas las pruebas preliminares y no obtener un resultado favorable con el PCM se consideró la opción de cambiar de programa de simulación. El segundo programa que cumplía con las características deseadas para un simulador CFD fue Ansys. Para poder manejar su interfaz también se siguió un curso dictado por “Capacitaciones Técnicas del Ecuador” del cual se obtuvo una certificación. Se determinó que la interfaz de ANSYS a pesar de ser más compleja es bastante intuitiva y de la que se puede obtener más información, razón por la cual se tomó la decisión de realizar algunas pruebas preliminares previo a la elección del simulador definitivo a emplear.

Resultados de las pruebas preliminares en Ansys

Al igual que en Comsol, cada simulación realizada era más compleja que la anterior, de manera que se podía analizar cualquier error existente en cada etapa del proceso. Antes de introducir un material de cambio de fase se quiso verificar que la transferencia de calor

entre un sólido y un fluido era posible, es así como, en la primera prueba preliminar agua fluía por la coraza y el tubo era de un material sólido. Los resultados mostraron que, para una velocidad de 0,1 m/s, que representa un flujo de 5,48 kg/s, el calor transferido fue de 22,93 kJ y el agua incrementa su temperatura de 10°C a 10,01°C. Estos valores coinciden con los cálculos manuales que se muestran en el Anexo II.

Para la siguiente simulación se decidió cambiar el tubo, de cuerpo sólido a PCM; para este intercambiador no se colocaron paredes alrededor del PCM para poder simular la transferencia de calor solamente entre esos dos cuerpos y para evitar mayor número de superficies en contacto que pudieran arrojar más errores. Los resultados se muestran en la tabla 3.2 y coinciden con los cálculos manuales que se muestran en el Anexo II.

Tabla 3.2. Resultados de la segunda prueba preliminar en Ansys.

Parámetro	Valor simulado	Valor Calculado
Temperatura de entrada del agua	283 [K]	283 [K]
Temperatura de salida del agua	283,03 [K]	283,026 [K]
Fracción líquida inicial del PCM	1	1
Fracción líquida final del PCM	0,997	0,997
Calor cedido	323,1 [W/m ² K]	322,07 [W/m ² K]
Tiempo	100 [s]	100 [s]

En la figura 3.6 se observa la fracción líquida del PCM, se nota que la fracción de la zona cercana a la pared lateral es menor que el resto del cuerpo, es decir, que el material empieza a solidificar desde afuera hacia adentro.

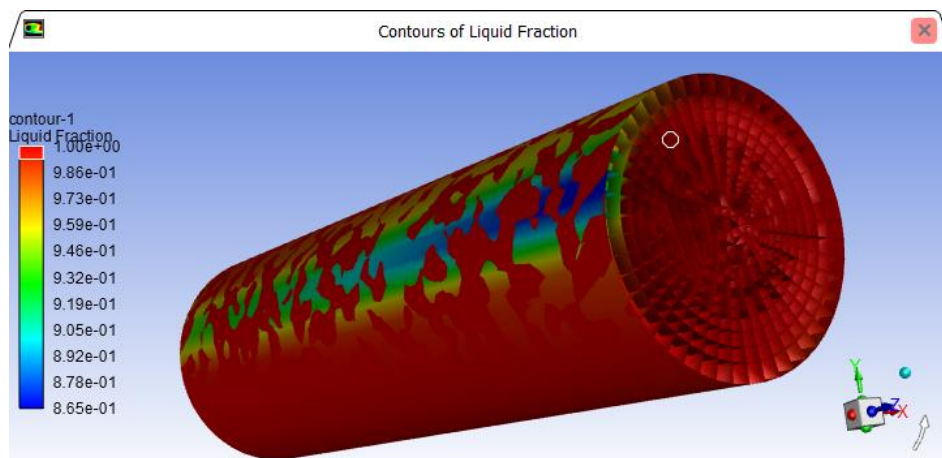


Figura 3.6. Fracción líquida del PCM de la segunda prueba preliminar en Ansys.

Después se decidió añadir paredes alrededor del PCM. Al igual que la anterior simulación, esta también convergió después de las 100 iteraciones. Los resultados se muestran en la tabla 3.3 y coinciden con los cálculos manuales. El cambio de fase del PCM para esta simulación es más notorio que el anterior, como se observa en la figura 3.7.

Tabla 3.3. Resultados de la tercera prueba preliminar en Ansys.

Parámetro	Valor simulado	Valor calculado
Temperatura de entrada del agua	283 [K]	283 [K]
Temperatura de salida del agua	283,44 [K]	283,29 [K]
Fracción líquida inicial del PCM	1	1
Fracción líquida final del PCM	0,943	0,943
Calor cedido	354,76 [W/m ²]	352,55 [W/m ²]
Tiempo	100 [s]	100 [s]

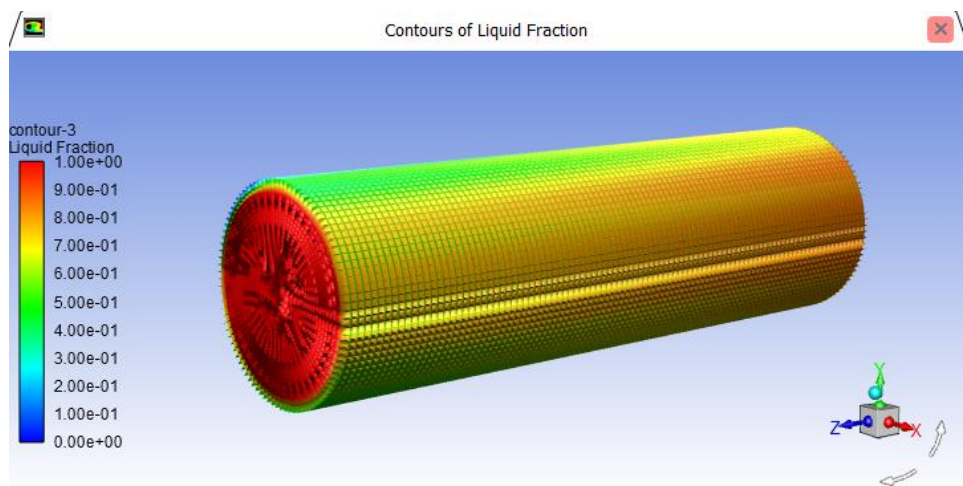


Figura 3.7. Fracción líquida del PCM de la tercera prueba preliminar en Ansys.

Al no presentar error en ninguna de estas simulaciones se decidió definitivamente emplear Ansys para el análisis del intercambiador de calor completo. Es así que, la geometría diseñada en SolidWorks (figura 3.8) del intercambiador de calor de tubos y coraza con 226 tubos se importó al módulo de Ansys Fluent.

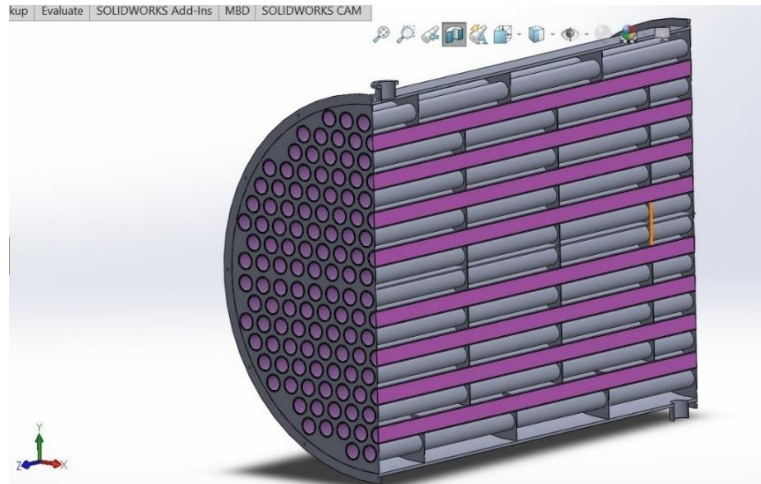


Figura 3.8. Geometría del intercambiador de calor completo realizada en SolidWorks.

En las condiciones de borde de la sección de *Setup*, además de las selecciones creadas, se hallaba un gran número de interfases que no era posible editar. Este error se corrigió al unir todos los elementos del intercambiador y formar una sola parte.

Después de las 15 horas que tardó la simulación, el modelo no convergió y el sistema presentó un error donde se especificaba que varias superficies mallas se superponían y no era posible seguir con el cálculo. La geometría constaba de más de 3000 superficies en contacto y el revisar una sola superficie en busca de algún error tomó alrededor de 5 minutos. Para todas las superficies en contacto el tiempo que se invertiría en hallar las superficies superpuestas sería de 250 horas aproximadamente razón por la cual no fue factible realizarlo.

Se decidió entonces realizar otra geometría del intercambiador de calor, pero sin paredes, es decir, sin tuberías. La geometría se la generó en el programa Inventor. Se volvió a importar la nueva geometría, pasadas las 15 horas de simulación el programa arrojó el mismo error de las superficies superpuestas, así como un nuevo problema por tener dos fluidos continuos. Este último problema se debía a que, al estar tanto el agua como el PCM inicialmente en fase líquida, el programa intentó mezclar ambos fluidos; sin embargo, al cambiar de fase el PCM no podía mezclarse con el agua y se generaban inconsistencias al momento de la resolución.

Al ser la geometría del intercambiador de mayor tamaño que las geometrías de las pruebas preliminares resultaba ser muy complejo y demorado encontrar las superficies superpuestas que impedían la simulación del modelo. Entonces se decidió disminuir el número de tubos e irlos aumentando conforme converja cada solución.

Por lo tanto, en Ansys se creó la geometría de un intercambiador de calor de tubos y coraza con 10 tubos como se muestra en la figura 3.9. Pasadas las 1,5 horas de simulación el modelo convergió, de forma que se concluyó que, el problema de las superficies superpuestas pudo deberse a la importación de las geometrías. Los resultados de esta simulación se presentan en la tabla 3.4.

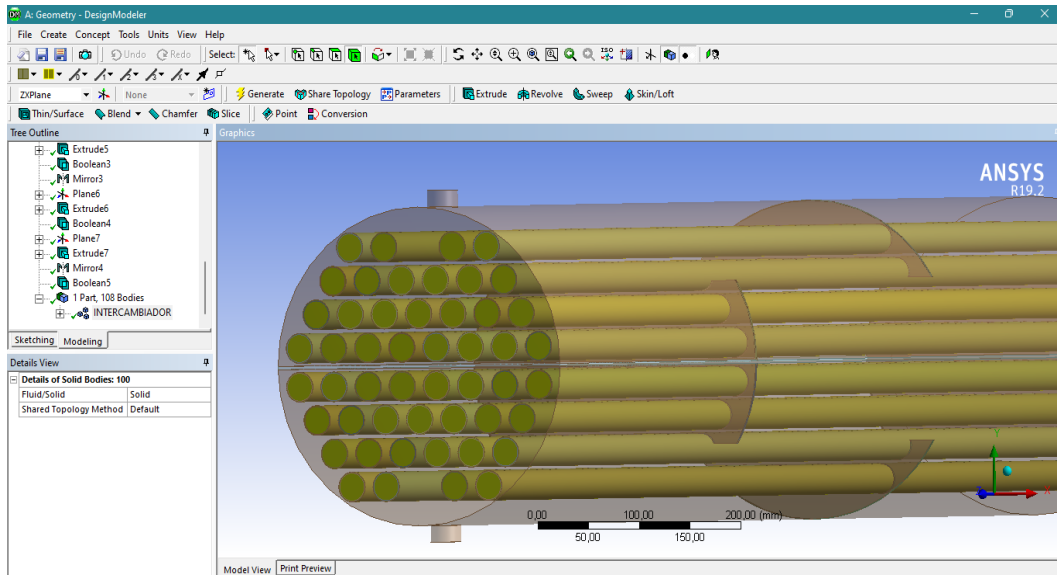


Figura 3.9. Intercambiador de calor de tubos y coraza con 50 tubos realizado en Ansys.

Tabla 3.4. Resultados de la cuarta prueba preliminar en Ansys.

Parámetro	Valor simulado	Valor establecido
Temperatura de entrada del agua	283 [K]	283 [K]
Temperatura de salida del agua	293,43 [K]	299 [K]
Fracción líquida inicial del PCM	1	1
Fracción líquida final del PCM	0,375	0,1
Calor cedido	356,63 [W/m ²]	514,22 [W/m ²]
Tiempo	2400 [s]	2400 [s]

A los 2400 s la simulación converge y se alcanza una temperatura final del agua de 293 K, esta es 5,57 K menor que la calculada, razón por la cual se observa que el calor transferido también fue menor que el calculado y por ende la cantidad de PCM que no logró solidificarse será mayor que el valor calculado.

Finalmente se decidió realizar la geometría definitiva en Ansys en Design Modeler. En este caso el programa no presentó errores y la simulación convergió después de 100 iteraciones que tomó alrededor de 4 horas. Los resultados de esta simulación se presentan en la tabla 3.5 y coinciden con los parámetros establecidos para los cálculos del dimensionamiento de este intercambiador de calor.

Tabla 3.5. Resultados de la simulación definitiva en Ansys.

Parámetro	Valor simulado	Valor establecido
Temperatura de entrada del agua	283 [K]	283 [K]
Temperatura de salida del agua	314,22 [K]	309 [K]
Fracción líquida inicial del PCM	1	1
Fracción líquida final del PCM	0,0586	0,1
Calor cedido	377,367 [W/m ²]	374,615 [W/m ²]
Tiempo	2400 [s]	2400 [s]

La temperatura final deseada del agua era de 309 K. Para alcanzar este valor se consideró la solidificación del 90% del PCM. Sin embargo, el porcentaje total solidificado fue del 94,14% esto se traduce en un mayor flujo de calor transferido razón por la cual la temperatura de salida del agua obtenida a los 2400 s. fue de 314,22 K. Es decir, el resultado de la temperatura varía en un 1,68% al calculado por Marbelle Porras, este es un valor bajo ya que el software Ansys considera un error permisible del 20% para la simulación de diferentes tipos de estructuras (Velilla, Mendoza, & Triana, 2012); mientras que, analizar un sistema con fluidos la obtención de resultados es aceptada si el margen de error permisible no excede el 10% (Torres & Gonzáles, 2009). Por lo tanto, los resultados obtenidos se pueden considerar buenos.

En la figura 3.10 se observa la fracción líquida del PCM, aquí se nota que las secciones donde el PCM aún no ha solidificado corresponde a la parte inicial de la segunda, séptima y octava fila del banco de tubos. Estas filas coinciden con el borde de los deflectores superiores e inferiores, estos al hacer que el fluido cambie de dirección impiden que el agua tenga suficiente contacto con dichas filas de tubos para que terminen de cambiar de fase.

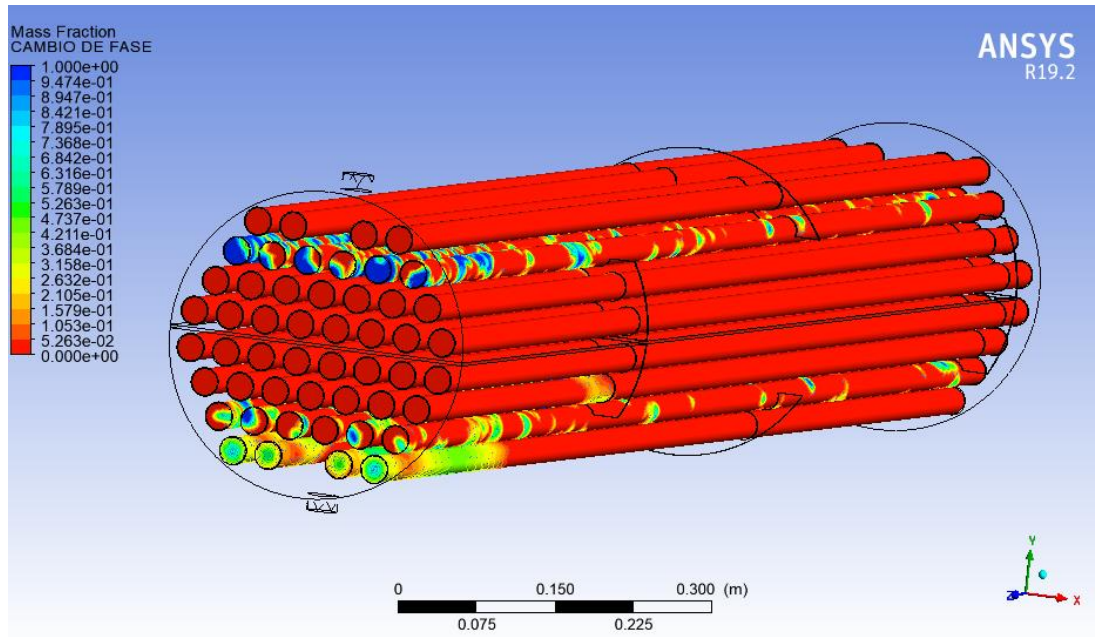


Figura 3.10. Fracción de masa líquida del PCM.

En la figura 3.11 se observa el cambio de temperatura del agua. Se nota que alcanza su temperatura máxima a mitad del segundo paso por la coraza. Una parte del flujo de agua que se localiza junto al plato divisor en el primer paso de la coraza también alcanza la temperatura máxima, esto debido a que no solamente recibe calor proveniente del PCM a su alrededor, sino también del PCM que se encuentra bajo el plato divisor, así como del fluido ya caliente en el segundo paso.

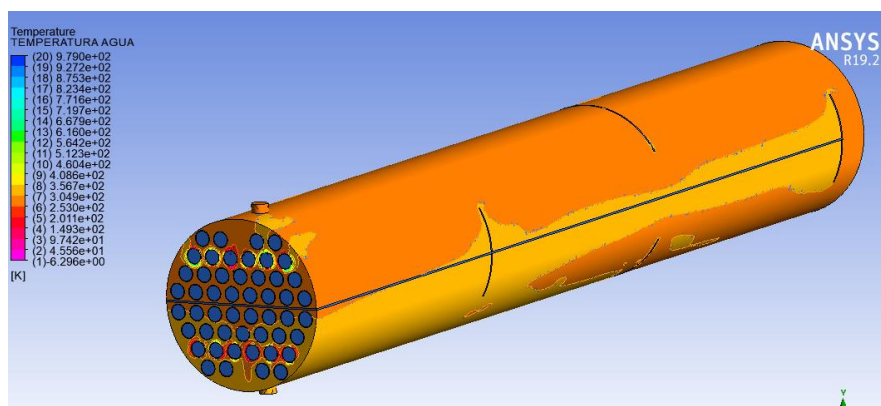


Figura 3.11. Variación de temperatura en el cuerpo de agua.

Al analizar la pérdida de presión en el intercambiador se obtuvo que el agua ingresa con una presión manométrica de 1,91 Pa y sale con una presión de 0 Pa, este último valor fue

especificado pues se consideró que el agua sale al ambiente. Sin embargo, al observar la figura 3.12 se evidencia que la presión más baja previo a la región de salida del agua, es de aproximadamente 1,5 Pa. Es decir que la pérdida presión en el sistema fue de 0,41 Pa. Este valor también es cercano al calculado cuyo valor fue de 0,65 Pa.

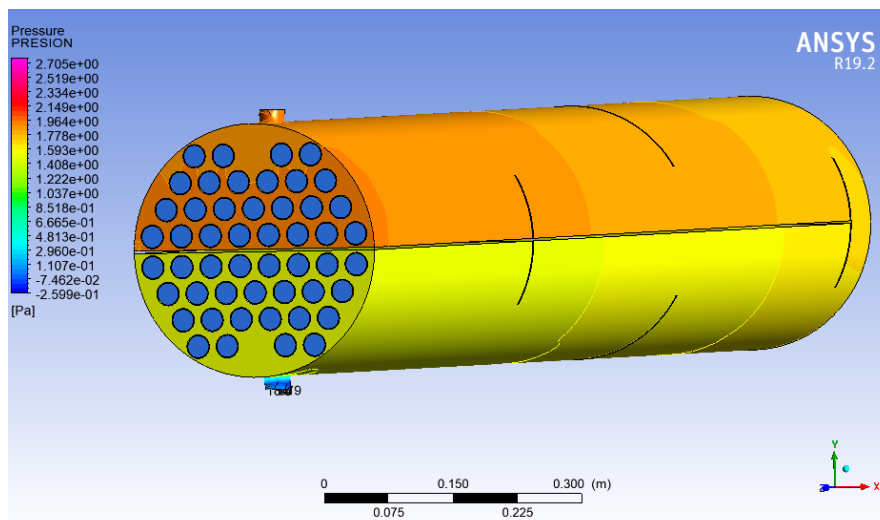


Figura 3.12. Variación de la presión en el cuerpo de agua.

En el Trabajo de Integración Curricular 2021-B de Marbelle Porras (2022) se determinó que una persona ocupa un flujo de 0,026 kg/s de agua para ducharse y el tiempo de descarga para alcanzar una temperatura de 309 K era de 2400 s, razón por la cual este fue el tiempo especificado en la simulación. En la figura 3.13 se observa que, después de 100 iteraciones, cada una con una duración de 24 segundos el modelo alcanza los valores deseados, pero no logra converger. En la figura 3.14 se observa que a partir de 600 iteraciones todas las curvas llegan a converger. A pesar de alcanzar la convergencia los residuales de la curva de energía difieren de los residuales para el resto de curvas.

Los residuales se definen como el desequilibrio o la inexactitud que existe en cada iteración al resolver las ecuaciones de conservación. Generalmente el criterio de convergencia se basa en un valor de 1×10^{-3} o menor en la magnitud de los residuales (Baharol & Mustafa, 2022). Para el presente trabajo el valor de los residuales para las curvas de velocidad y continuidad es de 1×10^{-6} . Estos valores aseguran entonces una correcta convergencia y que los resultados obtenidos son fiables. Por otro lado, para la curva de la energía se obtuvo un valor de residuales de 5×10^{-1} aproximadamente, esto pudo deberse a que el

mallado requiere refinamiento, sin embargo, al analizar los resultados de la simulación y comprobar que se ajustan con los calculados (Anexo IV), no se consideró necesario refinar la malla hasta el punto donde los residuales de la energía disminuyan.

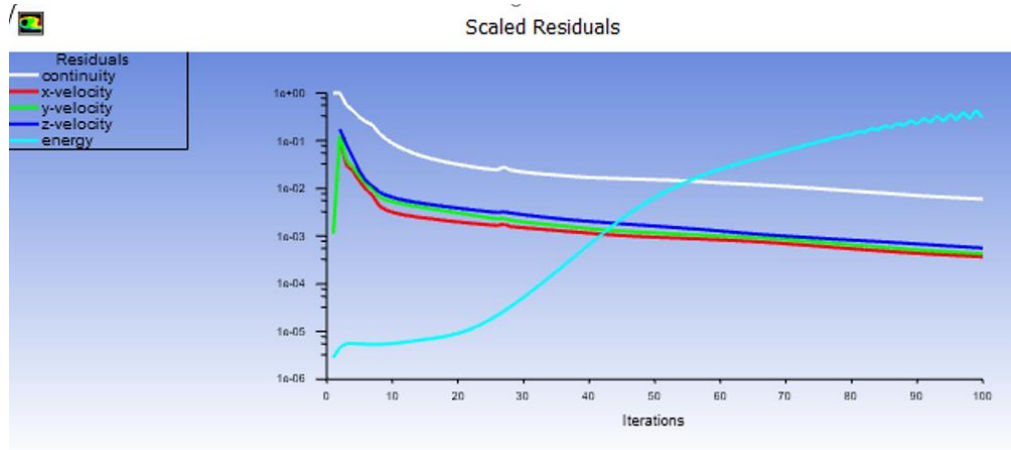


Figura 3.13. Valores residuales de las curvas de energía, velocidad y continuidad para un tiempo de 2400 s.

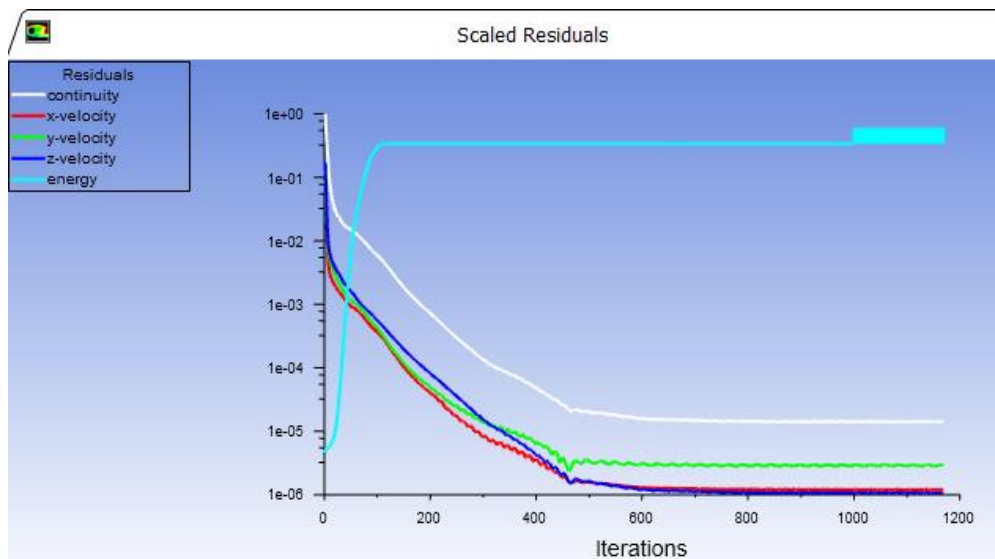


Figura 3.14. Valores residuales de las curvas de energía, velocidad y continuidad para un tiempo de 8 horas.

3.2 Conclusiones

1. Se realizó una revisión bibliográfica para conocer los simuladores de dinámica de fluidos computacional (CFD) que sean accesibles y amigables con el usuario para llevar a cabo la simulación de un intercambiador de calor de tubos y coraza. Así se seleccionó inicialmente al simulador COMSOL.
2. El programa COMSOL presentaba una interfaz gráfica sencilla y estética, ideal para el manejo para un nuevo usuario, sin embargo, al no poder obtener resultados en la simulación de cambio de fase se optó por reemplazarlo por Ansys. El simulador Ansys a pesar de tener una interfaz más compleja que COMSOL, es más intuitiva y permite obtener resultados con mejor confiabilidad.
3. Al requerir revisar más de 3000 superficies en contacto que presentaban errores en la simulación del intercambiador de calor de 226 tubos, se consideró que resultaba ser muy complejo y demorado encontrar las superficies superpuestas que impedían la resolución, por lo que se decidió simplificar la geometría a un intercambiador de calor de 50 tubos.
4. Se realizó la geometría en Ansys en lugar de importarla otros programas como SolidWorks o Inventor para evitar problemas de superposición de superficies en el transcurso de la simulación.
5. Para el mallado de la geometría realizado en Ansys, se insertaron dos sizing tanto para el cuerpo de agua como para el PCM, mientras que el resto de los elementos se mallaron por defecto. Así se obtuvo una calidad de malla de 0,76 que es considerada buena.
6. El valor de la temperatura de salida del agua obtenido en la simulación difiere del valor calculado en el trabajo de integración curricular 2021-B, con un margen de error del 1,68% que se considera bajo.
7. La solidificación del PCM estimada fue del 90% del Trabajo de Integración Curricular 2021-B de Marbelle Porras, es posible que el porcentaje sea mayor como lo demuestra la simulación donde el cambio de fase fue del 94,14% lo que incrementó el calor transferido, razón por la cual la temperatura final del agua alcanzó los 314 K en lugar de los 309 K.

8. La caída de presión en la coraza fue de 0,41 Pa, este valor es cercano al esperado de 0,65 Pa, y se encuentra dentro del rango permisible.
9. Las curvas de energía, velocidad y continuidad llegan a converger después de 600 iteraciones. La curva de energía alcanza un valor de residuales de 5×10^{-1} , mientras que para el resto de las curvas de velocidad y continuidad el valor de residuales fue de 1×10^{-6} .

3.3 Recomendaciones

1. Es preferible realizar la geometría que se desea simular dentro del programa Ansys en el módulo de “Geometría” en lugar de importarla, pues puede presentar errores de superposición de superficies.
2. Se recomienda unir cada elemento de la geometría formando una sola parte de manera que no se generen interfaces al momento de simular que puedan generar errores.
3. Emplear un computador 1 GB de RAM y procesador de 1,8 a 2,4 GHz para optimizar el tiempo de simulación y poder analizar sistemas complejos. En el caso de no poseer tales características, optar por simular una geometría con menos elementos, es decir, más simplificada.
4. Se recomienda el refinamiento del mallado en zonas de interés, como el área de contacto del agua con los tubos del intercambiador.
5. Escalar el proyecto a uno experimental para analizar los resultados verdaderos.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguas de Hoyos, M. (2016). *Análisis del comportamiento de materiales para el almacenamiento de energía térmica solar mediante cambio de fase. (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59210>
- Álvarez, L. (2019). *Diseño y análisis por medio de volumen finito y elementos finitos de un seguidor solar*. Universidad de Sonora. División de Ingeniería. Obtenido de: http://www.irsitio.com/refbase/documentos/410_AlvarezRomero+HerreraJimenez2019.pdf
- Baharol, D., & Mustafa, N. (2022). CFD Analysis of Rear-Spoilers Effectiveness on Sedan Vehicle in Compliance with Malaysia National Speed Limit. *Journal of Automotive Powertrain and Transportation Technology*, 26-36. Obtenido de: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/japtt/article/view/11849>
- Bravo, D., Gonzáles, J., & Martínez, Y. (2017). Costos de las tecnologías de almacenamiento de energía térmica. *Revista Centro Azúcar. Vol.44*, 67-76. http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/121
- Brazo, M. (2016). *Sistema pasivo de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares. (Tesis de pregrado)*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Energética. Obtenido de: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/50338/TFG_MariaBrazoReina.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Carvajal, L. (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado (28 ed.)*. Santiago de Cali: U.S.C.
- Cedillo, J., & Marín, J. (2015). *Estudio experimental y computacional mediante CFD Ansys del flujo de aire a través de techos de edificaciones usando un túnel de viento*. Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7958/1/UPS-CT004821.pdf>
- Chilvers, J. (11 de Noviembre de 2014). *The Righth RANS*. Obtenido de The Tame Aerodynamicist: <https://tameaero.wordpress.com/2014/11/11/the-right-ans/>
- COMSOL. (12 de Febrero de 2012). *Improving convergence in nonlinear time dependent models*. Obtenido de COMSOL: <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1127>
- De Loera, F. (2022). *Diseño y simulación CFD del subsistema de enfriamiento de un sistema fotovoltaico de concentración solar*. Centro de Investigaciones en Óptica. A.C. Obtenido de: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/1244/1/18154.pdf>
- Dellicompagni, P., Castro, N., & Franco, J. (2017). Caracterización energética de materiales de cambio de fase para uso en acondicionamiento edilicio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol.21*, 23-35. Obtenido de:

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/140670/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1

- Estenssoro, F., Zolezzi, J., Tokman, M., Núñez, R., Águila, E., Sohr, R., . . . Sunkel, O. (2011). *Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina : los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. Santiago de Chile : IDEA-USACH .
- García, L., Gil, A., Navarro, R., & Quintero, P. (2020). *Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado*. Universitat Politècnica de València. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/146219/Garc%C3%ADa-Cuevas%3BGil%3BNavarro%20-%20Mec%C3%A1nica%20de%20fluidos%20computacional%3A%20tipos%20de%20mallas%20y%20cali>.
- García, R. (2008). *Simulación CFD de una caldera de recuperación*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (Tesis de grado). <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6287/MEMORIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Gómez, J., & Ochoa, C. (2011). Dinámica de fluidos computacional en operaciones de secado y refrigeración aplicados a la industria de alimentos. *Ingeniería y Competitividad*, 13(2), 103-114. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323530008.pdf>
- Gómez, J., Narváez, R., & Guerrón, G. (2020). Análisis de selección de materiales de cambio de fase (PCM) para almacenamiento de calor latente por métodos de decisión de multi-criterio (MCDM). *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 176-189. Obtenido de: <https://www.proquest.com/openview/63deba1836c13b0f72ac8e1e2ddb4df3/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>
- Gómez, S. (2017). *Mallado y Simulación CFD de automóvil*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (Maestría). https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado_y_simulacion_CFD_de_automovil_-_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Hernández, M. (2019). *Análisis de cocción por el método de diferencias finitas*. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/17226/1/Tesina.pdf>
- Jiménez, C. (2018). *Transferencia de Calor*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Obtenido de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10176/Trasferencia%20de%20calor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lugmania, L., & Cisneros, R. (2018). *Análisis y simulación mediante CFD (Computational fluid Dynamics) de ANSYS del comportamiento térmico del refrigerante 134a en un*

condensador dentro de un ciclo de refrigeración. Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15928>

- Méndez, A., Gómez, J., Rodríguez, F., & Nicolalde, J. (2020). Selección de un material de cambio de fase mediante el uso del método de selección multicriterio para su uso en un sistema de almacenamiento térmico automotriz. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 113-125. Obtenido de: <https://www.proquest.com/openview/63deba1836c13b0f5ceb448dbcbfa2e3/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>
- Muñoz, J. (2017). *Estudio y análisis de la transferencia de calor en una ventana con cavidad interior*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Carlos III de Madrid. Obtenido de: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28253/TFG_Jorge_Munoz_Gomez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pereira, M. (2015). Relación entre energía, medio ambiente y desarrollo económico a partir del análisis jurídico de las energías renovables en Colombia. *Saber, Ciencia y Libertad*. Vol.10, No.1, 35-59. Obtenido de: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/saber/article/view/868>
- Porras, M. (2022). *Dimensionamiento de un equipo de ingeniería química para almacenamiento de energía térmica a media temperatura, mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCM)*. Trabajo de Integración Curricular. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y agroindustrial. Obtenido de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22427>
- Rodríguez, E. (2015). *Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y traslúcidas*. Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de: https://oa.upm.es/40328/1/EDWIN_ISRAEL_RODRIGUEZ_UBINAS.pdf
- Salgado, V. (2021). *Ecuaciones Diferenciales Parciales del tipo parabólico mediante el método de diferencias finitas*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6064>
- Velasco, M. (2020). *Estudio de mallado estructurado 3D rotativo en OpenFOAM para aplicaciones en turbinas tipo Francis*. Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20915?mode=full>

5. ANEXOS

ANEXO I

EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA PRIMERA PRUEBA PRELIMINAR DE CONSOL

En primer lugar, se calculan las resistencias, tanto por conducción para las 3 paredes, como por convección:

$$R_{1\text{conducción}} = \frac{L}{K \times A} \quad [\text{AI.1}]$$

Como las paredes de los extremos son las mismas y tienen las mismas dimensiones se multiplica por 2 una misma resistencia.

$$R_{1\text{conducción}} = \frac{2 \times 0,008 \text{ m}}{0,78 \frac{W}{mK} \times 6 \times 10^{-5} m^2}$$

$$R_{2\text{conducción}} = \frac{0,01 \text{ m}}{0,026 \frac{W}{mK} \times 6 \times 10^{-5} m^2}$$

$$R_{1\text{convección}} = \frac{1}{h \times A} \quad [\text{AI.2}]$$

$$R_{1\text{convección}} = \frac{1}{10 \frac{W}{m^2K} \times 6 \times 10^{-5} m^2}$$

$$R_{2\text{convección}} = \frac{1}{40 \frac{W}{m^2K} \times 6 \times 10^{-5} m^2}$$

$$R_{TOTAL} = \frac{2 \times 0,008 \text{ m}}{0,78 \frac{W}{mK} \times 6 \times 10^{-5} m^2} + \frac{0,01 \text{ m}}{0,026 \frac{W}{mK} \times 6 \times 10^{-5} m^2} + \frac{1}{40 \frac{W}{m^2K} \times 6 \times 10^{-5} m^2} + \frac{1}{10 \frac{W}{m^2K} \times 6 \times 10^{-5} m^2}$$

$$R_{TOTAL} = 8835,47 \frac{K}{W}$$

$$Q = \frac{(293,15 - 263,15)K}{8835,47 \frac{K}{W}}$$

$$Q = 3,39 \times 10^{-3} W$$

$$Q'' = 56,59 \frac{W}{m^2}$$

ANEXO II

CÁLCULOS PARA LAS TRES PRIMERAS PRUEBAS PRELIMINARES EN ANSYS

Primera prueba preliminar

Para calcular el calor cedido por el tubo sólido central se debe conocer la variación de temperaturas, bien del agua o del tubo. En este caso se tomó la temperatura de salida del agua obtenida de la simulación con un valor de 283,01 K:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad [\text{AII.1}]$$

$$\dot{Q} = 5,48 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \times (283,01 - 283)\text{K}$$

$$\dot{Q} = 229,34 \text{ W}$$

El flujo de calor obtenido en Ansys es por unidad de área, de manera que al calor se lo divide por el área lateral del cilindro:

$$A = 2 \times \pi \times r \times L \quad [\text{AII.2}]$$

$$A = 2 \times \pi \times 0,15 \text{ m} \times 2 \text{ m}$$

$$A = 1,885 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}'' = \frac{229,34 \text{ W}}{1,885 \text{ m}^2} = 121,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Segunda prueba preliminar

En la segunda prueba preliminar ya se tiene un material de cambio de fase, entonces, en lugar de tomar como base la temperatura de salida del agua, se tomó la fracción del PCM que se solidificó:

$$\text{Volumen del PCM} = \pi \times r^2 \times L \quad [\text{AII.3}]$$

$$\text{Volumen del PCM} = 0,0707 \text{ m}^3$$

$$\text{Masa total del PCM} = 0,0707\text{m}^3 \times 789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa total del PCM} = 55,77 \text{ kg}$$

$$\text{Masa que cambia de fase} = (1 - 0,997) \times 55,77 \text{ kg}$$

$$\text{Masa que cambia de fase} = 0,167 \text{ kg}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T + \dot{m}_{\text{cambia}} \times l_p \quad [\text{AII.4}]$$

$$Q = 607,1 \text{ W}$$

$$\dot{Q}'' = \frac{\dot{m} \times c_p \times \Delta T + \dot{m}_{\text{cambia}} \times l_p}{\text{Área lateral}} \quad [\text{AII.5}]$$

$$\dot{Q}'' = 322,07 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Con el calor calculado se obtiene la temperatura de salida del agua. Previamente se calcula el flujo másico que fue el ingresado al simulador de Ansys como condición de borde.

$$\dot{m} = \rho \times v \times A \quad [\text{AII.6}]$$

$$\dot{m} = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,055 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = 5,48 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{salida agua}} = \frac{Q}{\dot{m} \times c_p} + T_{\text{entrada agua}} \quad [\text{AII.7}]$$

$$T_{\text{salida agua}} = \frac{607,1 \text{ W}}{5,48 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}} + 283 \text{ K}$$

$$T_{\text{salida agua}} = 283,026 \text{ K}$$

Tercera prueba preliminar

En la tercera prueba preliminar se tiene un material de cambio de fase con paredes alrededor, entonces, se vuelve a tomar como base la fracción del PCM que se solidificó:

$$\text{Volumen del PCM} = \pi \times r^2 \times L$$

$$\text{Volumen del PCM} = 0,0707 \text{ m}^3$$

$$\text{Masa total del PCM} = 0,0707 \text{ m}^3 \times 789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa total del PCM} = 55,77 \text{ kg}$$

$$\text{Masa que cambia de fase} = (1 - 0,943) \times 55,77 \text{ kg}$$

$$\text{Masa que cambia de fase} = 3,178 \text{ kg}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T + \dot{m}_{\text{cambia}} \times l_p$$

$$Q = 663,79 \text{ W}$$

$$\dot{Q}'' = \frac{\dot{m} \times c_p \times \Delta T + \dot{m}_{\text{cambia}} \times l_p}{\text{Área lateral}}$$

$$\dot{Q}'' = 352,55 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Con el calor calculado se obtiene la temperatura de salida del agua. Previamente se calcula el flujo másico que fue el ingresado al simulador de Ansys como condición de borde.

$$\dot{m} = \rho \times v \times A$$

$$\dot{m} = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,055 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = 5,48 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{salida agua}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \times c_p} + T_{\text{entrada agua}}$$

$$T_{\text{salida agua}} = \frac{663,79 \text{ W}}{5,48 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}} + 283 \text{ K}$$

$$T_{\text{salida agua}} = 283,289 \text{ K}$$

ANEXO III

CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA DE LA CUARTA PRUEBA PRELIMINAR

A continuación, se detallan los cálculos realizados para el dimensionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza de 10 tubos.

Cálculo de la potencia y energía requerida

Primero se calcula el flujo másico que circula por la coraza:

$$2,615 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \times 997,6 \frac{kg}{m^3} = 0,026 \frac{kg}{s}$$

Con la ecuación All.1 se obtiene la potencia

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad [AIII.1]$$

$$\dot{Q} = 0,026 \frac{kg}{s} \times 4,18 \frac{kJ}{kgK} \times 16K$$

$$\dot{Q} = 1,744 kW$$

Para este caso se tomó en cuenta el flujo que ocupa una persona al momento de ducharse con un tiempo de descarga de 2400 s.

$$Energía = 1,744 kW \times 2400s$$

$$Energía = 4187,31 kJ$$

Cálculo del volumen del PCM, volumen de los tubos y número de tubos

En primer lugar, se calcula la masa de PCM con la ecuación All.2 y se sobredimensiona un 10%.

$$m_{PCM} = \frac{Energía}{c_{pPCM} \times \Delta T + l_p} \quad [AIII.2]$$

$$m_{PCM} = \frac{4187,31 \text{ kJ}}{2,439 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 1K + 200,74 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$m_{PCM} = 20,608 \text{ kg}$$

$$m_{PCM} = \frac{20,608}{0,9} \text{ kg} = 22,89 \text{ kg}$$

El volumen del PCM se obtuvo con la ecuación AII.3 y el volumen de los tubos con la ecuación AII.4. se consideró un segundo sobredimensionamiento del 10% para el volumen de los tubos. La longitud elegida para los tubos fue de 1,8 m, con diámetros interior y exterior de 0,06 m y 0,07 m respectivamente.

$$V_{PCM} = \frac{m_{PCM} \times 1,1}{\rho} \quad [\text{AIII.3}]$$

$$V_{PCM} = \frac{22,89 \text{ kg} \times 1,1}{818 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0307 \text{ m}^3$$

$$V_{TUBOS} = \frac{\pi \times \phi_{in}^2 \times L}{4} \quad [\text{AIII.4}]$$

$$V_{TUBO} = \frac{\pi \times (0,06 \text{ m})^2 \times 1,8}{4} = 0,005 \text{ m}^3$$

El número de tubos a emplear se obtuvo con la ecuación AII.5.

$$nT = \frac{V_{PCM}}{V_{TUBO}} \quad [\text{AIII.5}]$$

$$nT = 10$$

Velocidad por el lado de la coraza

Primero se obtiene el diámetro de la coraza con la ecuación AII.6 y para conocer la velocidad del fluido que circula por la coraza se emplean las ecuaciones AII.7, AII.8 y AII.9.

$$Dic = \sqrt{nT} \times Pt + Pt \quad [\text{AIII.6}]$$

$$Dic = \sqrt{10} \times (1,25 \times 0,07) + (1,25 \times 0,07) = 0,38 \text{ m}$$

$$C = Pt - \phi_{ext} \quad [\text{AIII.7}]$$

$$C = 0,0875 \text{ m} - 0,07 \text{ m} = 0,0175 \text{ m}$$

$$Af = \frac{Dic \times \frac{Dic}{1,3} \times C}{Pt \times n_{pasos}} \quad [\text{AIII.8}]$$

$$Af = \frac{0,38 \text{ m} \times \frac{0,38 \text{ m}}{1,3} \times 0,0175 \text{ m}}{0,0875 \times 2} = 0,011 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{\dot{m}}{Af \times \rho} \quad [\text{AIII.9}]$$

$$v = \frac{0,026 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,011 \text{ m}^2 \times 997,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0023 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Número de Reynolds

Se obtiene con las ecuaciones All.10 y All.11

$$L^* = \frac{8 \times \left((0,43 \times Pt^2) - \left(\pi \times \frac{\phi_{ext}^2}{8} \right) \right)}{\pi \times \phi_{ext}} \quad [\text{AIII.10}]$$

$$L^* = \frac{8 \times \left((0,43 \times (0,0875 \text{ m})^2) - \left(\pi \times \frac{(0,07 \text{ m})^2}{8} \right) \right)}{\pi \times 0,07 \text{ m}} = 0,049 \text{ m}$$

$$Re = \frac{v \times L^* \times \rho}{\mu} \quad [\text{AIII.11}]$$

$$Re = \frac{0,0023 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,049 \text{ m} \times 997,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,000948 \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}}} = 123,28$$

Número de Nusselt y coeficiente de convección externo

Se obtiene con las ecuaciones All.12 y All.13.

$$Nu = 0,25 \times Re^{0,6} \times Pr^{0,5} \times \mu^{0,14} \quad [\text{AIII.12}]$$

$$Nu = 0,25 \times 123,28^{0,6} \times 6,56^{0,5} \times 0,000948^{0,14} = 11,5088$$

$$he = \frac{Nu \times k}{L^*} \quad [\text{AIII.13}]$$

$$he = \frac{11,5088 \times 0,0006038 \frac{kW}{mK}}{0,049 m}$$

$$he = 0,139 \frac{kW}{m^2K}$$

Cálculo de la diferencia media logarítmica (LMTD)

Con la ecuación All.14.

$$LMTD = \frac{\Delta T_{caliente} - \Delta T_{frio}}{LN\left(\frac{\Delta T_{caliente}}{\Delta T_{frio}}\right)} \quad [AIII.14]$$

$$LMTD = \frac{20^{\circ}C - 45^{\circ}C}{LN\left(\frac{20^{\circ}C}{45^{\circ}C}\right)} = 30,82^{\circ}C$$

Coefficiente global de transferencia de calor de operación

Se obtuvo con las ecuaciones All.15 y All.16.

$$At = \pi \times \phi_{ext} \times L \times nT \quad [AIII.15]$$

$$At = \pi \times 0,07 m \times 1,8 m \times 10 = 3,958 m^2$$

$$U_{operación} = \frac{\dot{Q}}{At \times LMTD} \quad [AIII.16]$$

$$U_{operación} = \frac{1744 W}{3,958 m^2 \times 30,82^{\circ}C} = 14,29 \frac{W}{m^2K}$$

Coefficiente global de transferencia de calor de diseño

Se requirió calcular la resistencia por conducción ya que el PCM se solidifica.

$$V_{PCM liq} = \frac{m_{PCM} \times 0,1}{\rho} \quad [AIII.17]$$

$$V_{PCM liq} = 0,0003 m^3$$

$$d_{PCM\ liq} = \sqrt{\frac{V_{PCM\ liq}}{\pi \times \frac{L}{4}}} \quad [AIII.18]$$

$$d_{PCM\ liq} = \sqrt{\frac{0,0003\ m^3}{\pi \times \frac{1,8\ m}{4}}} = 0,0145\ m$$

$$R_{cond} = \frac{LN\left(\frac{di}{d_{PCM\ liq}}\right)}{2 \times \pi \times k_{PCM} \times L} \quad [AIII.19]$$

$$R_{cond} = \frac{LN\left(\frac{0,06}{0,0145}\right)}{2 \times \pi \times 0,2 \frac{W}{mK} \times 1,8\ m} = 0,624 \frac{K}{W}$$

$$Ac = \pi \times \phi_{ext} \times L \quad [AIII.20]$$

$$Ac = \pi \times 0,07\ m \times 1,8\ m$$

$$Ac = 0,39\ m^2$$

$$U_{diseño} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + (Ac \times R_{cond})} \quad [AIII.21]$$

$$U_{diseño} = 39,29 \frac{W}{m^2K}$$

Caída de presión por la coraza

$$N = \frac{L}{B} \quad [AIII.22]$$

$$N = 6$$

$$Gc = \frac{m}{Af} \quad [AIII.23]$$

$$Gc = \frac{0,026 \frac{kg}{s}}{0,011\ m^2} \times \frac{1\ kg}{2,2\ lb} \times \frac{3600\ s}{1\ h} \times \frac{1\ m^2}{(3,2808\ ft)^2} = 1728,06 \frac{lb}{h \times ft^2}$$

El factor de fricción f tiene un valor de 0,0015 y se obtuvo de gráfica (Incropera, 1996).

$$\Delta P_{coraza} = \frac{f \times Gc^2 \times Dic \times (N+1)}{5,22 \times 10^{10} \times L^*} \quad [AIII.24]$$

$$\Delta P_{coraza} = 4,49 \times 10^{-6} psi$$

Eficiencia

Se calculó solo con las temperaturas del agua

$$Eficiencia = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})}$$

$$Eficiencia = \frac{(36 - 10)}{(56 - 10)} = 57\%$$

ANEXO IV

CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA DE LA CUARTA PRUEBA PRELIMINAR

A continuación, se detallan los cálculos realizados para el dimensionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza de 10 tubos.

Cálculo de la potencia y energía requerida

Primero se calcula el flujo másico que circula por la coraza:

$$2,615 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \times 997,6 \frac{kg}{m^3} = 0,026 \frac{kg}{s}$$

Con la ecuación AIII.1 se obtiene la potencia

$$\dot{Q} = 0,026 \frac{kg}{s} \times 4,18 \frac{kJ}{kgK} \times 26K$$

$$\dot{Q} = 2,83 kW$$

Para este caso se tomó en cuenta el flujo que ocupa una persona al momento de ducharse con un tiempo de descarga de 2400 s.

$$Energía = 2,83 kW \times 2400s$$

$$Energía = 6804,38 kJ$$

Cálculo del volumen del PCM, volumen de los tubos y número de tubos

En primer lugar, se calcula la masa de PCM con la ecuación AIII.2 y se sobredimensiona un 10%.

$$m_{PCM} = \frac{6804,38 kJ}{2,439 \frac{kJ}{kgK} \times 1K + 200,74 \frac{kJ}{kg}}$$

$$m_{PCM} = 33,48 kg$$

$$m_{PCM} = \frac{33,48}{0,9} \text{ kg} = 37,21 \text{ kg}$$

El volumen del PCM se obtuvo con la ecuación AIII.3 y el volumen de los tubos con la ecuación AIII.4. se consideró un segundo sobredimensionamiento del 10% para el volumen de los tubos. La longitud elegida para los tubos fue de 1,8 m, con diámetros interior y exterior de 0,0267 m y 0,0285 m respectivamente.

$$V_{PCM} = \frac{37,21 \text{ kg} \times 1,1}{780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,05 \text{ m}^3$$

$$V_{TUBO} = \frac{\pi \times (0,0267 \text{ m})^2 \times 1,8}{4} = 0,001 \text{ m}^3$$

El número de tubos a emplear se obtuvo con la ecuación AIII.5.

$$nT = 50$$

Velocidad por el lado de la coraza

Primero se obtiene el diámetro de la coraza con la ecuación AIII.6 y para conocer la velocidad del fluido que circula por la coraza se emplean las ecuaciones AIII.7, AIII.8 y AIII.9.

$$Dic = \sqrt{50} \times (1,25 \times 0,0285) + (1,25 \times 0,0285) = 0,3 \text{ m}$$

$$C = 0,0357 \text{ m} - 0,0285 \text{ m} = 0,0071 \text{ m}$$

$$Af = \frac{0,3 \text{ m} \times \frac{0,3 \text{ m}}{1} \times 0,0071 \text{ m}}{0,0357 \times 2} = 0,0083 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0,026 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,0083 \text{ m}^2 \times 997,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,003 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Número de Reynolds

Se obtiene con las ecuaciones AIII.10 y AIII.11

$$L^* = \frac{8 \times \left((0,43 \times (0,0357 \text{ m})^2) - \left(\pi \times \frac{(0,0285 \text{ m})^2}{8} \right) \right)}{\pi \times 0,0285 \text{ m}} = 0,0203 \text{ m}$$

$$Re = \frac{0,003 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0203 \text{ m} \times 997,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,000948 \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}}} = 67,26$$

Número de Nusselt y coeficiente de convección externo

Se obtiene con las ecuaciones AIII.12 y AIII.13.

$$Nu = 0,25 \times 67,26^{0,6} \times 6,56^{0,5} \times 0,000948^{0,14} = 8,001$$

$$he = \frac{8,001 \times 0,0006038 \frac{\text{kW}}{\text{mK}}}{0,0203 \text{ m}}$$

$$he = 0,23 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Cálculo de la diferencia media logarítmica (LMTD)

Con la ecuación AIII.14.

$$LMTD = \frac{20^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}}{\text{LN} \left(\frac{20^\circ\text{C}}{45^\circ\text{C}} \right)} = 30,82^\circ\text{C}$$

Coeficiente global de transferencia de calor de operación

Se obtuvo con las ecuaciones AIII.15 y AIII.16.

$$At = \pi \times 0,0285 \text{ m} \times 1,8 \text{ m} \times 50 = 8,079 \text{ m}^2$$

$$U_{\text{operación}} = \frac{2835 \text{ W}}{8,079 \text{ m}^2 \times 30,82^\circ\text{C}} = 11,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Coeficiente global de transferencia de calor de diseño

Se requirió calcular la resistencia por conducción ya que el PCM se solidifica.

$$V_{PCM\ liq} = 0,0000979\ m^3$$

$$d_{PCM\ liq} = \sqrt{\frac{0,0000979\ m^3}{\pi \times \frac{1,8\ m}{4}}} = 0,0083\ m$$

$$R_{cond} = \frac{LN\left(\frac{0,0267}{0,0083}\right)}{2 \times \pi \times 0,2\ \frac{W}{mK} \times 1,8\ m} = 0,5\ \frac{K}{W}$$

$$Ac = \pi \times 0,0285\ m \times 1,8\ m$$

$$Ac = 0,16\ m^2$$

$$U_{diseño} = 11,408\ \frac{W}{m^2K}$$

Caída de presión por la coraza

$$N = 6$$

$$G_c = \frac{0,026\ \frac{kg}{s}}{0,0083\ m^2} \times \frac{1kg}{2,2\ lb} \times \frac{3600s}{1h} \times \frac{1m^2}{(3,2808\ ft)^2} = 2309,55\ \frac{lb}{h \times ft^2}$$

El factor de fricción f tiene un valor de 0,009 y se obtuvo de gráfica (Incropera, 1996).

$$\Delta P_{coraza} = 9,45 \times 10^{-5}\ psi = 0,65\ Pa$$

Eficiencia

Se calculó solo con las temperaturas del agua:

$$Eficiencia = \frac{(36 - 10)}{(56 - 10)} = 57\%$$

ANEXO V

IMÁGENES DE LAS SIMULACIONES

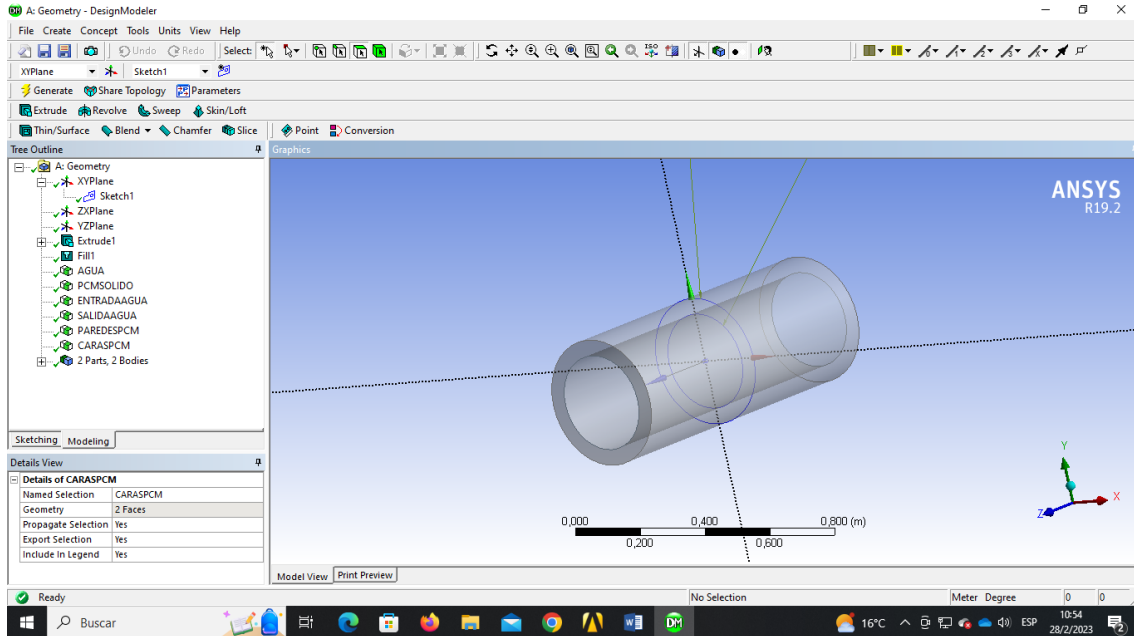


Figura AV.1. Geometría para la primera y segunda prueba preliminar

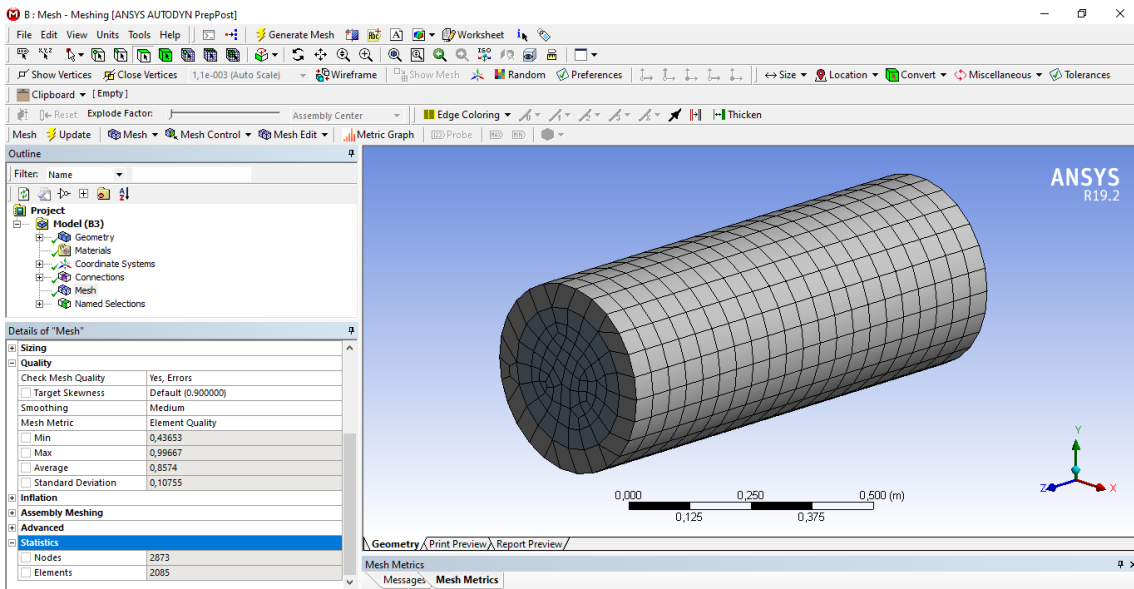


Figura AV.2. Mallado para la primera y segunda prueba preliminar.

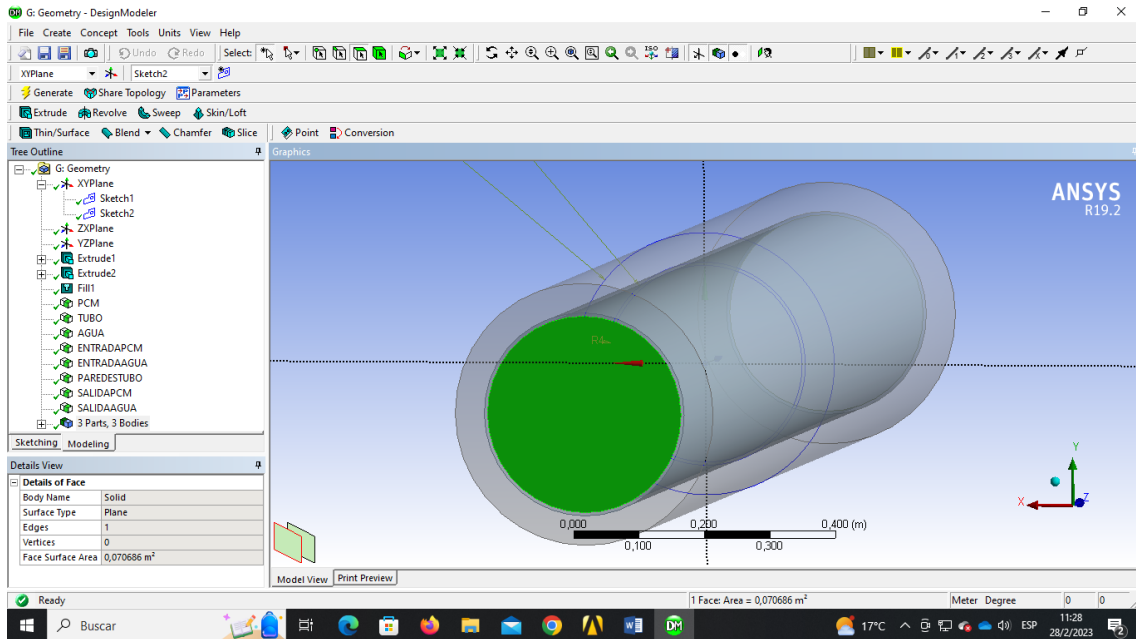


Figura AV.3. Geometría para la tercera prueba preliminar en Ansys.

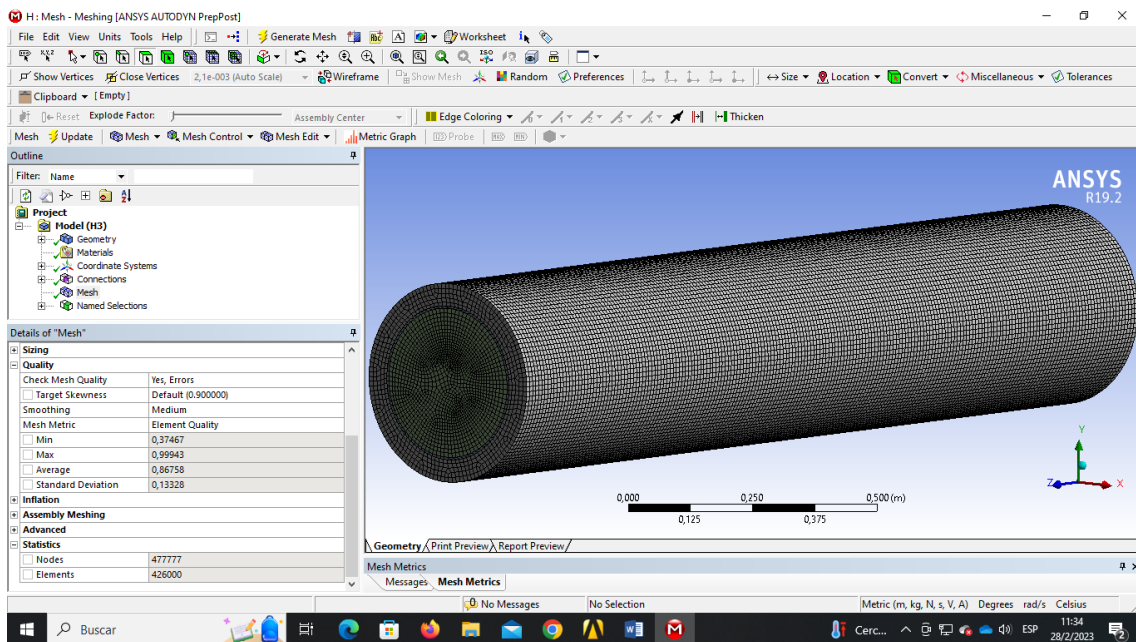


Figura AV.4. Mallado para la tercera prueba preliminar en Ansys

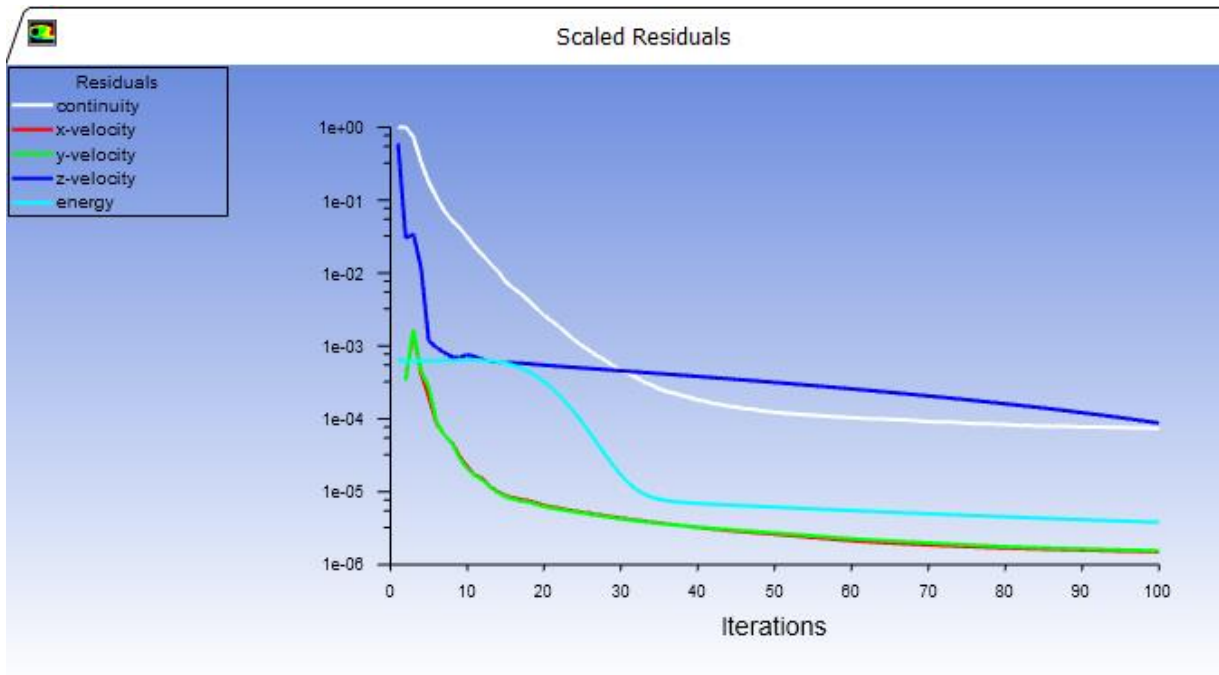


Figura AV.5. Convergencia de la tercera prueba preliminar en Ansys.

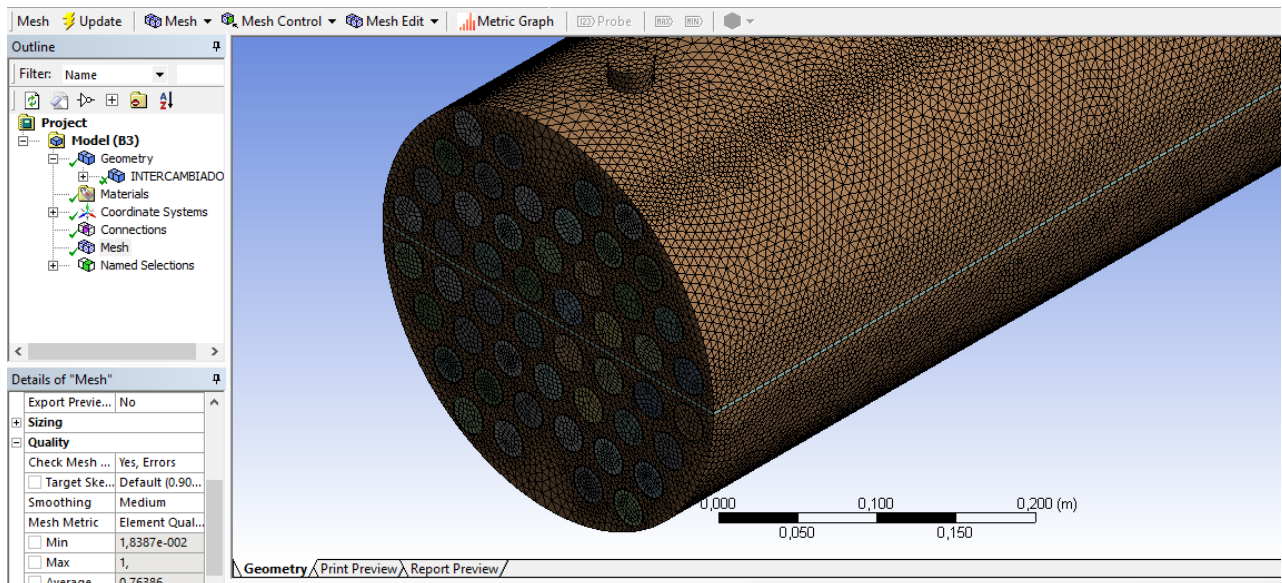


Figura AV.6. Mallado del intercambiador de calor definitivo de 50 tubos.

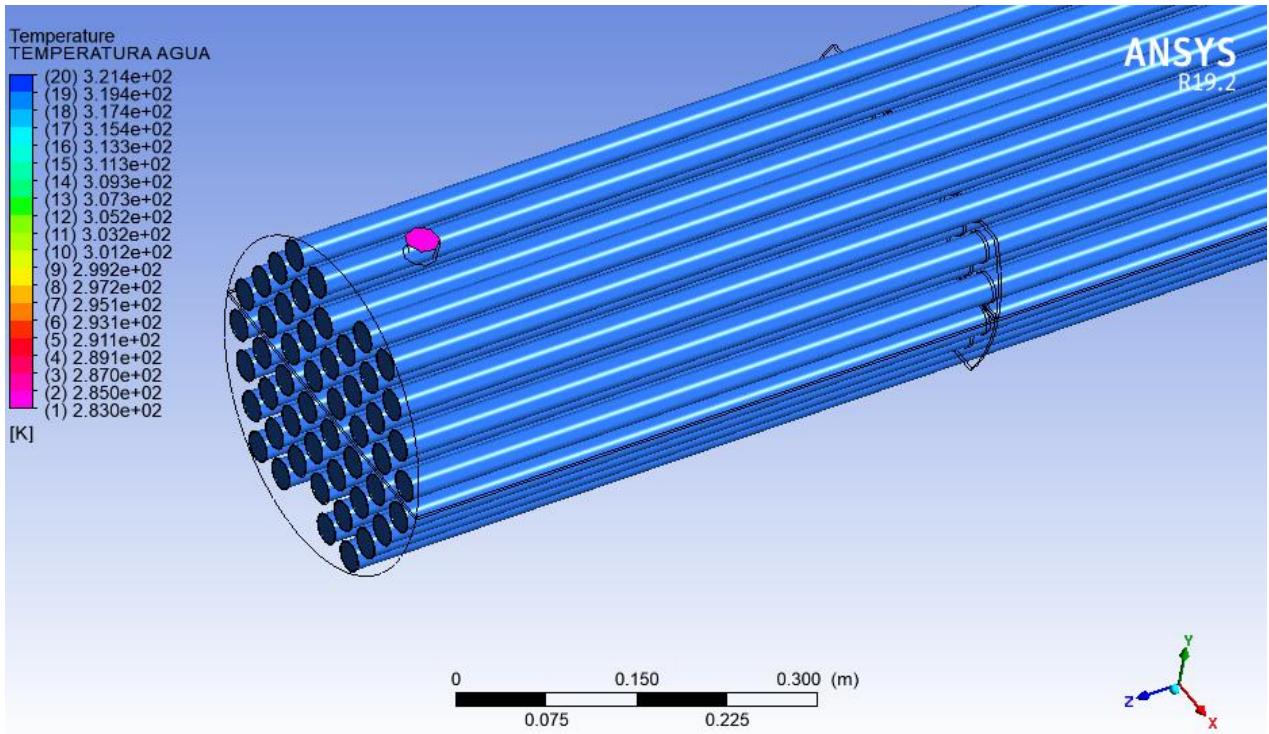


Figura AV.7. Temperatura de entrada del agua (Simulación definitiva).

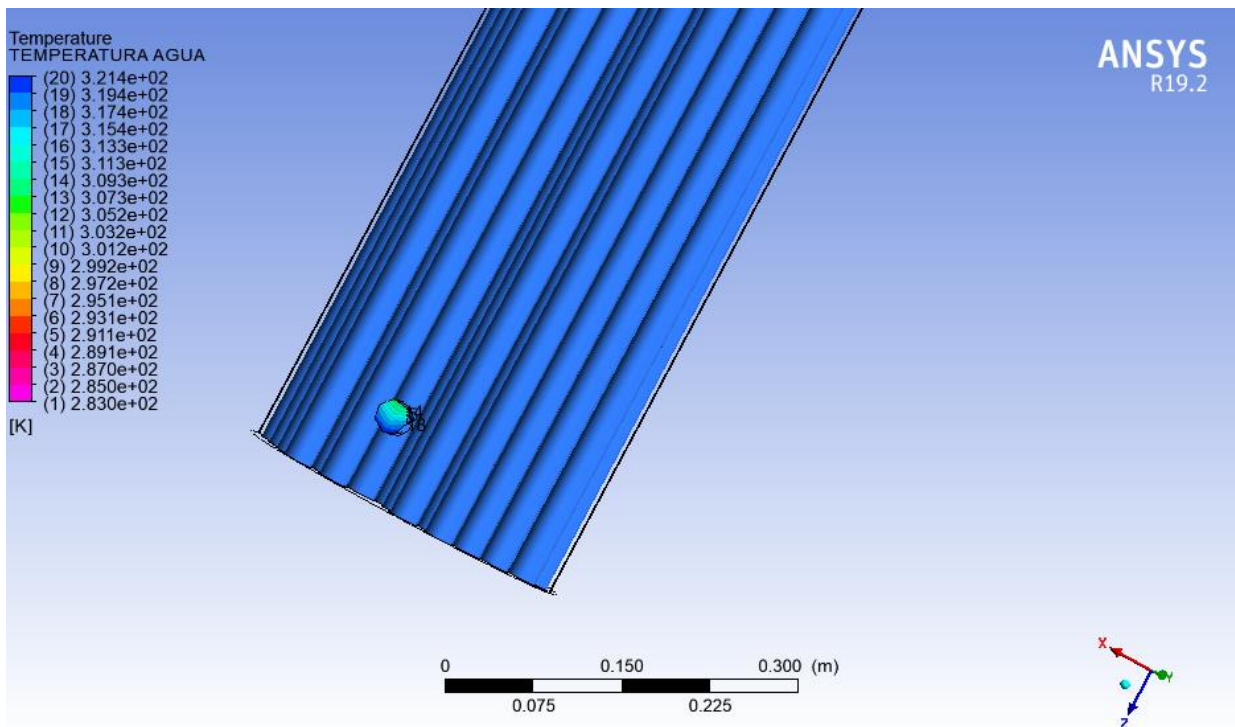


Figura AV.8. Temperatura de salida del agua (Simulación definitiva)