

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

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

**SIMULACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y
CORAZA PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA
DE ALTA TEMPERATURA.**

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

MARÍA SALOMÉ ZAPATA YÁNEZ

maria.zapata@epn.edu.ec

DIRECTOR: MARÍA CRISTINA RIOFRÍO ALMEIDA

maria.riofrio01@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, María Salomé Zapata Yáñez 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.

MARÍA SALOMÉ ZAPATA YÁNEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por María Salomé Zapata Yáñez, bajo mi supervisión.

MARÍA CRISTINA RIOFRÍO ALMEIDA
DIRECTOR

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.

MARÍA SALOMÉ ZAPATA YÁNEZ

MARÍA CRISTINA RIOFRIO ALMEIDA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi amada familia, cuyo inquebrantable apoyo, dedicación constante y palabras de aliento han sido el faro que me ha guiado a lo largo de este arduo camino. Su amor y respaldo han sido mi mayor motivación para alcanzar este logro. A ustedes, mi familia querida, les dedico con gratitud este trabajo, en reconocimiento a la fortaleza que me han brindado y a la inspiración que siempre han sido en mi vida. A ellos les debo todos los logros que alcance en mi vida.

AGRADECIMIENTO

A mi padre, Byron, por enseñarme que la dedicación, la disciplina y las ganas que ponga en todo lo que haga se verán reflejados en los logros que alcance, con sus palabras y cariño me ha impulsado hacia adelante siempre.

A mi madre, Angela, a quien le debo todo lo que soy ahora, y quien siempre con amor, risas, consejos y apoyo incondicional y constante me ha acompañado en cada etapa de mi vida, este logro no fuera posible sin ella.

A mi hermano, Gabriel, quién me ha enseñado que es necesario también relajarse en la vida, y quien me ha dado ánimo siempre, gracias por ser esa persona que me impulsa y por alegrar mi vida todos los días.

A la AEPIQ 2022-2023, asociación que me permitió ser presidente y que me enseñó sobre la paciencia y la amistad, gracias por hacer del final de esta trayectoria académica una anécdota memorable en cada paso que dimos juntos.

A Sofi, Kate, Vivi, Salma, Dani, Jenny, Lu y a todos mis amigos que falta nombrar, por enseñarme que la amistad perdura la distancia y el tiempo, gracias por ser incondicionales y por el apoyo que me han brindado durante esta etapa universitaria, la han hecho mucho más divertida y significativa, sé que contaré con ustedes para toda la vida.

A cada profesor que ha entregado dedicación y paciencia en sus lecciones, gracias por permitirme aprender de ustedes y ser una inspiración constante en esta etapa universitaria. Especial mención a la Ingeniera Cristina Riofrío quien con su orientación y respaldo en todo lo que involucro el trabajo de integración curricular me permitieron el desarrollo de este, acortando significativamente su proceso.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IIV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Simulación.....	3
1.4.2 Dinámica de Fluidos Computacional	4
1.4.2.1 COMSOL Multiphysics	5
1.4.2.2 ANSYS Fluent.....	5
1.4.3 Mallado Computacional	6
1.4.4 Almacenamiento de energía térmica	8
1.4.5 Almacenamiento de energía térmica por calor latente	9
1.4.6 Materiales de cambio de fase	10
1.4.7 Intercambiadores de calor	13
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Selección del programa de simulación	14
2.1.1 Prueba en COMSOL Multiphysics	15
2.1.2 Prueba en ANSYS Fluent.....	16
2.2 Construcción de la Geometría del Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza	17
2.2.1 Diseño de tubos internos	18
2.2.2 Diseño de deflectores.....	18
2.2.3 Diseño de la coraza.....	19
2.2.4 Ensamblaje de Geometría.....	20

2.2.5	Construcción del Mallado en ANSYS Fluent.....	20
2.3	Inicio de la simulación y obtención de gráficas	21
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
3.1	Resultados	24
3.1.1	Selección del programa de simulación	24
3.1.2	Construcción de la geometría del intercambiador de calor de Tubos y Coraza	27
3.1.3	Resultados de la Simulación	33
3.2	Conclusiones	40
3.3	Recomendaciones	41
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
5	ANEXOS	49
	ANEXO I OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN.....	46
	ANEXO II FIGURAS DE LAS PRUEBAS DE SIMULACIÓN	47
	ANEXO III FIGURAS DEL MALLADO	49
	ANEXO IV FIGURAS DE LA SIMULACIÓN	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema Intercambiador de Calor	12
Figura 2.1 Interfaz de COMSOL Multiphysics.....	16
Figura 2.2 Interfaz de ANSYS Fluent	16
Figura 3.1 Geometría realizada en COMSOL Multiphysics	25
Figura 3.2 Geometría realizada en ANSYS Fluent	25
Figura 3.3 Resultados de la simulación en COMSOL Multiphysics	26
Figura 3.4 Resultado de la simulación en ANSYS Fluent.....	26
Figura 3.5 Gráfico distribución triangular en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza	27
Figura 3.6 Gráfico del banco de tubos superior en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza	28
Figura 3.7 Gráfico del banco de tubos completo y placa divisora en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza	28
Figura 3.8 Gráfico del sketch de los deflectores inferiores en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.....	29
Figura 3.9 gráfico del sketch de los deflectores superiores en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.....	29
Figura 3.10 Gráfico de los deflectores superiores e inferiores completos en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza	30
Figura 3.11 Gráfico del intercambiador de calor de tubos y coraza completo.....	31
Figura 3.12 Mallado computacional del intercambiador de calor de tubos y coraza completo	32
Figura 3.13 Mallado computacional del banco de tubos del intercambiador de calor de tubos y coraza	32
Figura 3.14 Resultado de la simulación para la temperatura del precalentamiento de aire de combustión.....	34
Figura 3.15 Resultado de la simulación para la fracción líquida del PCM en la descarga	34
Figura 3.16 Resultado de la simulación para la fracción líquida del PCM en la carga.....	36
Figura 3.17 Resultado de la simulación para la temperatura de los gases de combustión en la carga	36
Figura 3.18 Resultado de la simulación para la variación de la presión en el aire precalentado para la combustión	38

Figura 3.19 Valores residuales de la simulación de descarga del intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de calcio como PCM39

Figura 3.20 Valores residuales de la simulación de carga del intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de calcio como PCM39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.4.2 Propiedades de PCM importantes para su aplicación	11
Tabla 2.1 Especificaciones del dispositivo de simulación	13
Tabla 2.1.1 Datos del ejemplo de prueba	14
Tabla 2.2.1 Parámetros de dimensionamiento de la tubería interna	18
Tabla 2.2.2 Parámetros de dimensionamiento de los deflectores	19
Tabla 2.2.5 Detalles de lamella en configuración	20
Tabla 2.3.1 Propiedades de los materiales creados para la simulación	22
Tabla 2.3.2 Condiciones de borde.....	22
Tabla 2.3.3 Valores de tiempos para correr la simulación	23
Tabla 2.3.4 Condiciones para pruebas en la simulación de descarga	23
Tabla 2.3.5 Condiciones para pruebas en la simulación de carga.....	24
Tabla 3.1.2 Resultados Mallado Computacional	32
Tabla 3.1.3 Pruebas en la simulación de descarga	32
Tabla 3.1.4 Pruebas en la simulación de carga.....	37

RESUMEN

La simulación se ha convertido en una técnica fundamental para reproducir y analizar comportamientos sin necesidad de llevarlos a la realidad. Esto resulta muy útil dentro del campo de la ingeniería. En el presente trabajo se realizó la simulación de un intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de potasio como material de cambio de fase (PCM) para almacenar energía térmica producto de gases de combustión (carga) con el objetivo de precalentar aire para el proceso de combustión (descarga), para lo cual se utilizó un programa de dinámica de fluidos computacional, en donde mediante revisión bibliográfica y pruebas de uso se seleccionó ANSYS Fluent como programa de simulación. Posteriormente, se construyó la geometría del intercambiador de calor la cual se basó en el dimensionamiento realizado en el trabajo de integración curricular presentado por Quishpe (2022), se realizó el mallado computacional, se configuraron las condiciones iniciales y de borde, finalmente se inició la simulación en el mismo programa. Se realizó la geometría de un intercambiador de calor de tubos y coraza que consta de 24 tubos, 8 deflectores y dos pasos por la coraza, así también se obtuvo una malla no estructurada que consta de 279233 nodos y una calidad de 0,82. Con lo que se obtuvo en el proceso de descarga un aire precalentado a 1203,2 K con un 75% de cambio de fase de solidificación en 8 h así también se determinó que si el flujo másico del aire se incrementa al triple del valor original, se obtiene un cambio de fase del PCM del 88%. Para el proceso de carga se obtuvo en 16 h un 99,7% de cambio de fase de fusión, con una potencia cedida de 35,80 kW. Se determinó así también que para el proceso de carga se podría reducir el tiempo de intercambio de calor a 12 h sin afectar de manera significativa el cambio de fase. Ambos procesos obtuvieron valores residuales que hacen de la simulación confiable. Se recomienda realizar pruebas experimentales para realizar la comprobación de resultados.

PALABRAS CLAVE: dinámica de fluidos computacional (CFD), intercambiador de calor, materiales de cambio de fase (PCM), altas temperaturas, mallado computacional.

ABSTRACT

Simulation has become a fundamental technique to reproduce and analyze behaviors without the need to bring them to reality. This is very useful in the engineering field. In the present work, the simulation of a shell and tube heat exchanger with potassium carbonate as phase change material (PCM) to store thermal energy from combustion gases (charge) with the objective of preheating air for the combustion process (discharge) was carried out, for which a computational fluid dynamics program was used, where ANSYS Fluent was selected as the simulation program through literature review and tests of use. Subsequently, the geometry of the heat exchanger was built based on the sizing performed in the curricular integration work presented by Quishpe (2022), the computational meshing was performed, the initial and boundary conditions were configured, and finally the simulation was started in the same program. The geometry of a shell and tube heat exchanger consisting of 24 tubes, 8 baffles and two passes through the shell was made, and an unstructured mesh consisting of 279233 nodes and a quality of 0.82 was obtained. With what was obtained in the unloading process a preheated air at 1203.2 K with a 75% phase change of solidification in 8 h. It was also determined that if the mass flow of the air is increased to triple the original value, a phase change of 88% of the PCM is obtained. For the loading process, a 99.7% melting phase change was obtained in 16 h, with a power yield of 35.80 kW. It was also determined that for the charging process the heat exchange time could be reduced to 12 h without significantly affecting the phase change. Both processes obtained residual values that make the simulation reliable. Experimental tests are recommended to verify the results.

KEYWORDS: computational fluid dynamics (CFD), heat exchanger, phase change material (PCM), high temperatures, computational meshing.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el presente trabajo se realizó la simulación de un intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de potasio como material de cambio de fase (PCM) para la aplicación a alta temperatura en el precalentamiento de aire para la combustión de 923 K a 1123 K, con el uso de gases de combustión para la carga del PCM, para lo cual se utilizó un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD), en dónde mediante revisión bibliográfica y pruebas de uso se seleccionó ANSYS Fluent como programa de simulación, posteriormente se construyó la geometría del intercambiador de calor la cual se basó en el trabajo de titulación presentado por Quishpe (2022), también se realizó el mallado computacional que constó de una malla no estructurada de 279233 nodos y una calidad de 0,82, se configuraron las condiciones de borde las mismas que involucran la temperatura y el flujo másico del fluido tanto de carga como de descarga, así como las condiciones iniciales las cuales son la temperatura del de cambio de fase del PCM, finalmente se inició la simulación en el mismo programa con los tiempos de diseño. Se evaluaron los resultados de la simulación y se realizaron 2 pruebas en el proceso de descarga una en la que se varió el tiempo de simulación y otra en la que se varió el flujo másico del aire de entrada, además se realizaron 3 pruebas en el proceso de carga en el cual se varió el tiempo de simulación en tres diferentes ocasiones. Se procesaron los resultados y se compararon con los resultados teóricos definidos por Quishpe (2022). En el proceso de descarga se obtuvieron en 8 h una temperatura de salida del aire 7% más elevada de lo esperado, con una caída de presión de 0,41 psi y un cambio de fase del 75% del estado líquido al estado sólido, se determinó que al incrementar el valor del flujo másico de aire al triple del valor al cual fue diseñado se incrementa el cambio de fase al 88% del PCM. En el proceso de carga, se obtuvo un cambio de fase en 16 h del 99,7% de estado sólido a líquido, con una potencia cedida del 35,80 kW. Se determinó que se puede reducir el tiempo de intercambio de calor entre el PCM y los gases de combustión a 12 h debido a que en este tiempo se logra obtener una potencia de 34,4 kW de energía para el proceso con un cambio de fase del 99,6%.

1.1 Objetivo general

Simular mediante un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD) el funcionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza para almacenamiento de energía térmica con carbonato de potasio como material de cambio de fase de alta temperatura.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre simuladores de dinámica de fluidos computacional y almacenamiento de energía térmica con el uso de materiales de cambio de fase.
2. Construir la geometría del intercambiador de calor, realizar el mallado computacional del mismo y definir condiciones iniciales y de borde.
3. Evaluar y reportar los perfiles de temperatura del intercambiador de calor de tubos y coraza para el almacenamiento de energía térmica con carbonato de potasio como material de cambio de fase.

1.3 Alcance

Definir el programa CFD para la simulación del funcionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza para almacenamiento de energía térmica con el uso de materiales de cambio de fase de alta temperatura. El programa será definido según la disponibilidad de este. Construir la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza para almacenamiento de energía térmica que tendrá las siguientes características:

- Por el lado de los tubos: 22 tubos internos de 2,40 metros de longitud, con un diámetro externo de 219,10 mm y diámetro interno de 202,74 mm en un arreglo triangular con espaciamiento entre los centros de los tubos de 0,27 m.
- Por el lado de la coraza: diámetro interno de 1,54 m, número de deflectores de 8 y espaciamiento entre deflectores de 0,31 m.

Simular el proceso de carga y descarga de energía y los perfiles de temperatura del intercambiador de calor. No se va a construir ningún prototipo experimental y tampoco se realizarán medidas experimentales.

1.4 Marco Teórico

En el análisis de intercambiadores de calor, la comprensión de los mecanismos de transferencia de calor es importante para desarrollar sistemas energéticos eficientes. Los intercambiadores de calor, presentes en diversos procesos industriales y sistemas energéticos, exigen una investigación para optimizar su rendimiento. La simulación de

estos en este punto resulta importante ya que permite a los usuarios idear soluciones innovadoras de intercambio de calor que se ajusten a las crecientes demandas de eficiencia energética y sostenibilidad, algo realmente importante para el futuro de nuestro planeta sin la necesidad de crear modelos en el mundo real.

1.4.1. Simulación

La simulación es el proceso de creación de un modelo o representación informática de un sistema o proceso del mundo real. Permite a investigadores, ingenieros y responsables de la toma de decisiones explorar y analizar el comportamiento y el rendimiento del sistema sin necesidad de prototipos físicos ni experimentos en el mundo real. (Banks et al., 2015)

La simulación ofrece varias ventajas en diversos campos. Proporciona un medio rentable y eficaz en el tiempo para estudiar sistemas complejos, predecir su comportamiento y optimizar su rendimiento. La simulación también permite explorar distintos escenarios y realizar análisis hipotéticos, lo que facilita la toma de decisiones y la evaluación de riesgos. La simulación proporciona un entorno seguro para la formación y el aprendizaje, especialmente en situaciones de alto riesgo o peligrosas en las que la experimentación en el mundo real resulta poco práctica o peligrosa. A pesar de esto, la simulación también presenta algunas desventajas, como la dificultad de modelar con precisión sistemas complejos y la posibilidad de que las suposiciones o simplificaciones del modelo introduzcan sesgos o imprecisiones. La simulación requiere experiencia en modelado y análisis de datos, así como la disponibilidad de datos de entrada fiables y precisos. A pesar de estas dificultades, la simulación ha demostrado ser una herramienta valiosa en numerosas disciplinas, como la ingeniería, la sanidad, el transporte y las finanzas. (Law and Kelton, 2014)

La simulación de un proceso implica varios pasos necesarios para garantizar una representación exacta del sistema del mundo real. Los pasos clave incluyen la definición del problema, el desarrollo del modelo, la recopilación de datos, la implementación del modelo, la verificación y validación, el diseño del experimento, la ejecución de la simulación, el análisis y la interpretación, el análisis de sensibilidad y la optimización, así como la documentación y la elaboración de informes. Estos pasos ayudan a los investigadores y profesionales a modelar y simular procesos con eficacia, lo que les permite obtener información, tomar decisiones con conocimiento de causa y mejorar el sistema. (Banks et al., 2015)

La simulación abarca varios tipos, entre los que destacan: Simulación electromagnética, análisis térmico, análisis estructural y la dinámica de fluidos computacional (CFD) la cual es objeto de estudio y análisis de este trabajo.

1.4.2. Dinámica de Fluidos Computacional

La CFD es una potente herramienta numérica utilizada para analizar y predecir el comportamiento del flujo de fluidos y sus fenómenos relacionados. Consiste en la aplicación de métodos y algoritmos computacionales para resolver las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos, como las ecuaciones de Navier-Stokes, utilizando técnicas de discretización. La CFD proporciona un laboratorio virtual para simular con el objetivo de estudiar problemas complejos de flujo de fluidos en diversos campos, como la ingeniería aeroespacial, de automoción, química. La precisión de la simulación y la capacidad de visualización de la CFD permiten a ingenieros e investigadores comprender los patrones de flujo, cuantificar fuerzas y presiones, optimizar diseños y evaluar el rendimiento de los sistemas de fluidos. (Anderson, Tannehill and Pletcher, 2016)

El uso de CFD ha revolucionado los procesos de diseño de ingeniería, permitiendo a los ingenieros evaluar y optimizar los sistemas de flujo de fluidos de forma rentable y oportuna. Al simular distintas condiciones de funcionamiento, la CFD ayuda a identificar posibles fallos de diseño, optimizar las formas de los componentes y mejorar la eficiencia general de los sistemas de fluidos. (Versteeg and Malalasekera, 2007)

La ecuación principal en la resolución vía CFD y que se utiliza en todos los programas de CFD es la ecuación del transporte, como se observa en la Ecuación 1.1.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \Phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma_\Phi \nabla \Phi \cdot dA + \int_V S_\Phi dV$$

Ecuación 1.1 Ecuación del transporte de la variable Φ . (ESSS, 2017)

Donde la primera integral representa el tiempo, la segunda integral la advección, la tercera integral difusión y la cuarta integral representa la fuente. (ESSS,2017)

Varios paquetes comerciales de software CFD como COMSOL Multiphysics y ANSYS Fluent ofrecen interfaces fáciles de usar y solvers robustos para simular una amplia gama de escenarios en dinámica de fluidos, lo que permite a los ingenieros analizar flujos de calor, distribución de temperaturas y otros comportamientos críticos en diferentes dispositivos y sistemas de intercambio de calor. (Ferziger and Peric, 2012)

1.4.2.1. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es una plataforma de software versátil y potente que permite a ingenieros e investigadores simular y analizar una amplia gama de fenómenos físicos en diversos campos. Una de sus principales ventajas es su capacidad para gestionar simulaciones multifísicas complejas, lo que permite a los usuarios acoplar distintos fenómenos físicos, como el flujo de fluidos, la transferencia de calor, los campos electromagnéticos y la mecánica estructural, en un único entorno de simulación. Esta capacidad resulta especialmente beneficiosa para simular escenarios reales en los que intervienen múltiples procesos físicos que interactúan entre sí. Sus ventajas incluyen el acoplamiento multifísico, una interfaz fácil de usar y opciones de personalización. Aunque puede presentar algunos retos relacionados con las demandas computacionales y la curva de aprendizaje, su capacidad para simular escenarios complejos lo convierte en un activo valioso en diversas aplicaciones científicas y de ingeniería. (COMSOL, 2022)

1.4.2.2. ANSYS Fluent

ANSYS Fluent es un paquete de software de CFD ampliamente utilizado que proporciona a ingenieros e investigadores herramientas robustas para simular y analizar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y fenómenos relacionados. Ofrece un completo conjunto de funciones para modelar escenarios de flujo complejos en diversas industrias. Gracias a su intuitiva interfaz de usuario, sus avanzadas funciones de solver y sus precisos algoritmos numéricos, ANSYS Fluent permite simular y analizar con eficacia diversos fenómenos de flujo. Emplea un método de discretización de volumen finito y ofrece una gama de modelos de turbulencia, modelos de flujo multifásico y modelos de combustión para capturar diferentes características de flujo. Además, el software incluye herramientas de preprocesamiento para la creación de geometrías y la generación de mallas, así como funciones de postprocesamiento para visualizar e interpretar los resultados de la simulación. (Shamoon, 2018)

ANSYS Fluent se ha ganado una amplia aceptación y credibilidad en la comunidad científica, lo que lo convierte en una elección de confianza para ingenieros e investigadores. Sus aplicaciones abarcan sectores como la ingeniería aeroespacial, de automoción, energética, química y biomédica. El software ha sido ampliamente validado y

es reconocido por su precisión y fiabilidad en la simulación de escenarios complejos de flujo de fluidos (Ansys Inc., 2021)

Tanto para estos programas mencionados como para otra diversidad dentro de la simulación, si se pone énfasis a la CFD, se requieren ciertos pasos esenciales para realizar la simulación, esto con el objetivo de realizar la resolución del problema, los pasos que se realizan de manera general en este tipo de simulaciones son: la definición del problema, creación de la geometría, generación de malla, definición de los materiales, definición de la física y modelos, configuración de las condiciones iniciales y de las condiciones de borde. Dentro de este contexto uno de los principales puntos dentro del proceso de simulación es el mallado computacional de la geometría ya que con este se crean los volúmenes de control en donde se realizarán los cálculos de la simulación y depende de la calidad de la malla para el nivel de precisión de la simulación.

1.4.3. Mallado Computacional

El mallado computacional es un paso crítico en el proceso de varios tipos de simulación, principalmente cuando estos tienen elementos geométricos. El mallado computacional implica la discretización del dominio computacional en pequeños elementos o celdas para facilitar la solución numérica de las ecuaciones gobernantes. (Löhner, 2008)

El mallado computacional es necesario en varios procesos en los que la simulación implica resolver ecuaciones diferenciales parciales o analizar geometrías complejas, es necesario en varios procesos relacionados con la dinámica de fluidos, la transferencia de calor, las interacciones electromagnéticas y el análisis estructural. Permite representar con precisión la geometría y la física del sistema que se simula, lo que conduce a resultados de simulación fiables. (Gómez, 2017)

La malla desempeña un papel fundamental en la simulación de intercambiadores de calor, ya que determina la precisión y la eficacia de la solución numérica. La representación adecuada de la geometría del intercambiador de calor y del dominio de flujo es crucial para captar la dinámica de los fluidos y los fenómenos de transferencia de calor. (Ravi y Deeno, 2021)

Existen varios tipos de mallas utilizadas en simulaciones computacionales, cada una de las cuales ofrece características y ventajas diferentes. Algunas de las mallas más utilizadas son las siguientes. (Quiu We et al, 2011)

- Malla estructurada: Las matrices de malla estructurada consisten en una rejilla regular de celdas interconectadas con una geometría y topología bien definidas. Ofrecen buenas propiedades de estabilidad numérica y convergencia, pero pueden tener dificultades para representar con precisión geometrías complejas.
- Malla no estructurada: Las mallas no estructuradas son más flexibles y versátiles que las estructuradas. Utilizan celdas de forma irregular que pueden ajustarse a geometrías complejas. Las mallas no estructuradas son especialmente útiles cuando se trata de dominios muy complejos o irregulares. Sin embargo, las mallas no estructuradas pueden ser exigentes desde el punto de vista computacional y requieren un mayor esfuerzo en la generación de la malla y el control de calidad.
- Malla híbrida: las mallas híbridas combinan elementos de mallas estructuradas y no estructuradas. Ofrecen la ventaja de combinar la eficacia de las mallas estructuradas en regiones regulares con la flexibilidad de las mallas no estructuradas en regiones complejas.
- Malla adaptativa: Las mallas adaptativas refinan o engrosan dinámicamente la malla en función del comportamiento de la solución durante la simulación. Las mallas adaptativas son útiles para capturar fenómenos localizados y optimizar los recursos computacionales. Sin embargo, pueden introducir una complejidad adicional en la configuración de la simulación y requerir más recursos computacionales. (Patankar, 2018; Versteeg & Malalasekera, 2007).

La elección del tipo de malla depende de los requisitos específicos de la simulación, incluida la complejidad de la geometría, la precisión deseada, los recursos computacionales y la presencia de características de flujo de interés. Cada tipo tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la selección del conjunto de malla más adecuado es crucial para obtener resultados de simulación precisos y eficientes. (Spatial, 2022)

Después de realizar el mallado computacional de la geometría que se requiera se debe realizar la elección de la física y modelo que se va a simular, para el presente trabajo se realizará una simulación de un intercambiador de calor para almacenamiento de energía térmica por lo cual se profundizará en estos temas.

1.4.4. Almacenamiento de energía térmica

Se conoce como energía térmica a la forma de energía liberada por un sistema en forma de calor. Esto representa la energía interna de un objeto y refleja el movimiento de partículas (mientras un objeto absorbe calor, las partículas aumentan su velocidad, lo que se llama "carga"; por otro lado, si el objeto pierde calor, las partículas se vuelven más estables, lo que se denomina "descarga"). Algunas propiedades de la energía térmica incluyen su capacidad para transferirse entre cuerpos, su origen variado y su potencial para transformarse en otras formas de energía. Diversos procesos pueden generar energía térmica, tales como la radiación solar, reacciones exotérmicas, divisiones celulares e incluso la corriente eléctrica. (Rodríguez, 2018)

El almacenamiento de energía térmica se traduce en enfriar o calentar un medio para aprovechar esta energía. Por ejemplo, cuando el exceso de energía se almacena en forma de calor durante los periodos de baja demanda y se libera cuando es necesario. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica, se los puede dividir en tres tipos: termoquímico, calor sensible y calor latente. (Rasmussen, 2022)

El almacenamiento de energía térmica por calor sensible es un método de almacenamiento y liberación de energía térmica mediante el uso de la capacidad calorífica de los materiales sin que se produzca un cambio de fase. Según Dincer y Rosen (2012), estos sistemas almacenan energía térmica en forma de calor sensible al aumentar o disminuir la temperatura de un medio llamado de almacenamiento, normalmente un sólido o un líquido. Durante el proceso de carga, se suministra un exceso de energía térmica al medio de almacenamiento, aumentando su temperatura. Esta energía térmica almacenada puede recuperarse durante el proceso de descarga en un intercambio de calor. (Dincer y Rosen, 2012).

Por otro lado, el almacenamiento de energía termoquímico consiste en almacenar y liberar energía térmica mediante reacciones químicas que implican cambios en la composición química y la estructura molecular de los materiales. Según Zalba, Marín, Cabeza y Mehling (2003), los sistemas de almacenamiento de calor químico utilizan reacciones exotérmicas o endotérmicas para almacenar y liberar energía térmica. Durante el proceso de carga, se desencadena una reacción química mediante el suministro de energía, lo que da lugar a la absorción y almacenamiento de energía térmica. Esta energía almacenada puede recuperarse durante el proceso de descarga invirtiendo la reacción química, liberando el calor almacenado. (Zalba et al., 2003).

Finalmente, el almacenamiento de energía térmica por calor latente consiste en el aprovechamiento del calor latente el cual se refiere a la energía calorífica absorbida o liberada por una sustancia durante una transición de fase, como la fusión o la congelación, sin que se produzca un cambio de temperatura. Se produce cuando cambia la estructura interna de la sustancia, ya sea rompiendo o formando enlaces intermoleculares entre las partículas. Este fenómeno es responsable de la estabilidad de la temperatura observada durante los cambios de fase y desempeña un papel importante en diversos procesos naturales y aplicaciones de ingeniería, como el almacenamiento de energía. (Lange, 2013)

Con un enfoque al almacenamiento de energía térmica, el presente estudio dirige su atención al almacenamiento de energía térmica por calor latente. A continuación, se expande la información sobre este tema para proporcionar una visión más detallada.

1.4.5. Almacenamiento de energía térmica por calor latente

El almacenamiento de energía térmica con calor latente implica la utilización de materiales de cambio de fase (PCM) para almacenar y liberar energía térmica durante el proceso de transición de fase. Este método ofrece varias ventajas. En primer lugar, los sistemas de almacenamiento de calor latente tienen una gran capacidad de almacenamiento de energía por unidad de masa en comparación con los sistemas de almacenamiento de calor sensible. (Royo, 2019).

Según Sharma, Tyagi, Chen y Buddhi (2009), los PCM pueden almacenar y liberar tanto para el proceso de carga como de descarga, una gran cantidad de energía térmica durante el proceso de cambio de fase, lo que permite un almacenamiento eficiente de la energía térmica en un medio compacto y ligero. En segundo lugar, el almacenamiento de calor latente proporciona un funcionamiento isotérmico, ya que la temperatura permanece casi constante durante el proceso de cambio de fase. Esto es ventajoso en aplicaciones donde el control de la temperatura es crítico, como en sistemas de confort térmico o procesos industriales que requieren un rango de temperatura específico. Por último, los sistemas de almacenamiento de calor latente tienen la capacidad de almacenar y liberar energía a una temperatura constante, lo que se traduce en una alta eficiencia de transferencia de energía térmica (Sharma et al., 2009).

Sin embargo, también existen algunas desventajas asociadas al almacenamiento de energía térmica mediante calor latente. Uno de los principales inconvenientes es la conductividad térmica relativamente baja de los PCM, que puede limitar la velocidad de

transferencia de calor durante los procesos de carga y descarga. Esto puede dar lugar a tiempos de carga y descarga más largos, lo que afecta a la eficiencia global y a la capacidad de respuesta del sistema de almacenamiento. Además, la selección de PCM adecuados para rangos de temperatura y aplicaciones específicas puede resultar complicada. Hay que tener en cuenta factores como la estabilidad térmica, el coste, la compatibilidad con el sistema y la disponibilidad (Sharma et al., 2009). Además, la expansión o contracción del volumen de algunos PCM durante el proceso de cambio de fase puede plantear retos en el diseño del sistema, requiriendo consideraciones adicionales para el espacio de expansión o los componentes del sistema. (Sari, 2007)

A pesar de estas dificultades, los sistemas de almacenamiento de calor latente pueden contribuir a mejorar la eficiencia energética y la gestión térmica en diversas aplicaciones, y explorar la versatilidad y métodos de mejora de los PCM podría ayudar a mejorar esta aplicación. (Cabeza, 2011)

1.4.6. Materiales de cambio de fase

Los PCM son sustancias que presentan una capacidad única para almacenar y liberar grandes cantidades de energía térmica durante las transiciones de fase, como la fusión o la solidificación. Estos materiales experimentan un cambio en su estructura molecular, absorbiendo o liberando energía térmica en el proceso. Según Sari y Karaipekli (2007), los PCM se han estudiado y utilizado en aplicaciones en diversos campos, como la edificación y la construcción, los sistemas de energías renovables, el confort térmico y la electrónica, y ofrecen soluciones eficientes y eficaces de gestión de la energía térmica. (Cabeza, Mehling, Hiebler, & Silva, 2011)

Entre las propiedades físicas de los PCM se destacan una alta densidad con lo que se tiene menor volumen por unidad de masa, además debe poseer la densidad similar en su forma sólida y líquida. Entre las propiedades químicas que tiene que poseer un material de cambio de fase ideal es elevada estabilidad por los ciclos de carga y descarga, material no reaccionante con su contención para evitar la corrosión y se requiere que el PCM no sea tóxico ni inflamable. (García, 2012) En la Tabla 1.4.2 se tiene un resumen de las propiedades importantes que un PCM tiene que poseer.

Tabla 1.4.2 Propiedades de PCM importantes para su aplicación.

Propiedades térmicas	Propiedades físicas	Propiedades químicas
Rango de cambio de fase estable.	Densidad elevada	Estabilidad y baja degradación.
Alta entalpía específica.	Fusión congruente.	Estabilidad química y poco reaccionantes.
Conductividad térmica alta	Densidad similar en estado sólido y líquido	No tóxicos ni inflamables.

(García, 2012)

Por su temperatura de operación los PCM se clasifican en PCM de baja temperatura, PCM de media temperatura y PCM de alta temperatura.

Los PCM de baja temperatura son aquellos materiales que operan en rangos menores a 15 °C, sus aplicaciones principales se centran en la industria alimenticia para sistemas de refrigeración. (Rolka et al., 2021)

Los PCM de media temperatura operan en un rango de 15 °C a 90 °C y su principal aplicación se centra en la construcción, para edificios y construcciones en donde se quiere primar el ahorro energético, también se utiliza en la captación de energía solar y en la industria textil y también en la industria electrónica. (García, 2021).

Finalmente, los PCM de alta temperatura operan en rangos de temperaturas mayores a 90 °C y de acuerdo con el material que se utilice estos valores pueden llegar hasta los 1000 °C y su operación principal es a nivel industrial como en la combustión, en aplicaciones solares y también en la sección aeroespacial. (Royo et al., 2019)

El presente trabajo se enfocará en la aplicación del precalentamiento de aire para la combustión utilizando carbonato de potasio el cual tiene un punto de fusión de 897 °C como el PCM de alta temperatura en un intercambiador de calor de tubos y coraza.

1.4.7. Intercambiadores de calor

El intercambio de calor es un proceso fundamental en numerosas aplicaciones industriales y sistemas de ingeniería. Según Incropera, DeWitt, Bergman y Lavine (2013), el intercambio de calor implica la transferencia de energía térmica entre dos o más cuerpos o fluidos a diferentes temperaturas. Esta transferencia de energía térmica puede ocurrir mediante diferentes mecanismos, como la conducción, la convección y la radiación. El

intercambiador de calor juega un papel clave en facilitar este proceso al proporcionar una interfaz eficiente entre los fluidos o cuerpos, permitiendo así la transferencia de calor deseada.

El diseño y la selección adecuada del intercambiador de calor dependen de factores como los flujos de los fluidos, las propiedades térmicas de los fluidos, la geometría del intercambiador y las condiciones de operación. (Kern, 2012)

Hay diversos tipos de sistemas de intercambio de calor que se configuran según necesidades y aplicaciones particulares. Estos se clasifican primordialmente en dos grupos: intercambiadores de contacto directo y de contacto indirecto. Los intercambiadores de contacto directo son aquellos en los que los fluidos intercambian calor en contacto directo, mientras que los de contacto indirecto lo hacen de manera separada. En la gama del contacto indirecto algunos de los más comunes son: Intercambiador de calor de placas, intercambiador de calor en espiral y el intercambiador de calor de tubos y coraza. (García, 2021).

Un intercambiador de calor de tubos y coraza es un tipo de intercambiador de calor muy utilizado que consiste en una carcasa o recipiente cilíndrico exterior con un haz de tubos que lo atraviesan. Hewitt, Shires y Bott (1994) mencionan que esta configuración proporciona una gran superficie para el intercambio de calor, lo que permite una transferencia eficaz de energía térmica entre los dos fluidos. En la Figura 1.1 se puede observar un esquema de un intercambiador de calor de tubos y coraza.

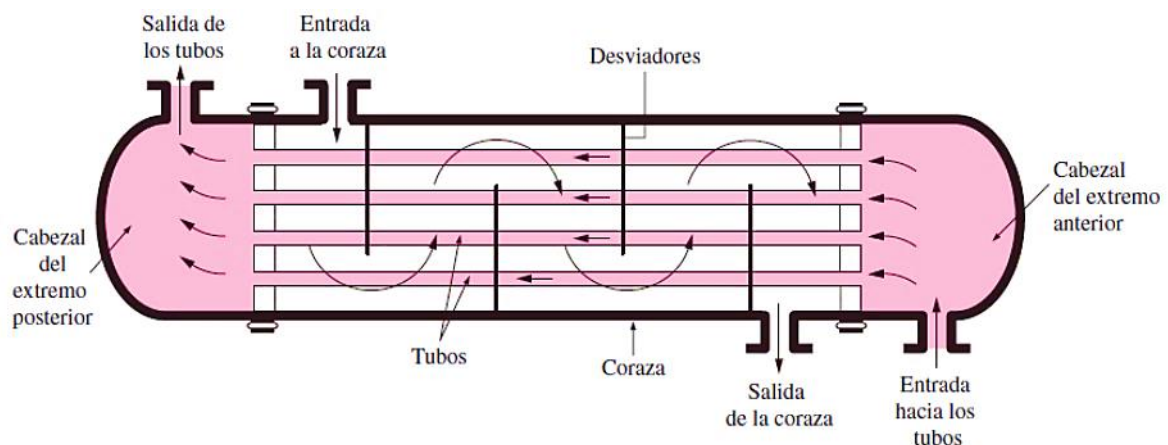


Figura 1.1. Esquema Intercambiador de Calor. (Haya, 2007)

Los intercambiadores de calor de tubos y coraza se emplean habitualmente en diversos procesos industriales, como la generación de energía, el procesamiento químico y los

sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, debido a su versatilidad, su gran eficacia en la transferencia de calor y su capacidad para soportar aplicaciones de alta presión y temperatura, se utilizan además en aplicaciones de almacenamiento de energía, incluidos los sistemas de almacenamiento de energía térmica por su eficacia a la hora de capturar y distribuir energía. (Hewitt et al., 1994; Rasmussen, 2022).

El presente trabajo se centrará en la simulación CFD de un PCM de fase de alta temperatura, que ha almacenado energía producto de gases de combustión y que será usado para el precalentamiento de aire para combustión.

2 METODOLOGÍA

El presente trabajo consiste en la simulación CFD de un intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de potasio como PCM para una aplicación de precalentamiento de aire para la combustión con gases obtenidos de la misma combustión. El presente trabajo de integración curricular (TIC) es la continuación del TIC presentado en el semestre 2021-B en la Escuela Politécnica Nacional con el título “DIMENSIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA MEDIANTE EL USO DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCM) DE ALTA TEMPERATURA” por Yadira Quishpe, el cual dimensionó el intercambiador para el proceso de descarga.

La geometría de intercambiador de calor de tubos y coraza, el mallado computacional y la definición de las condiciones iniciales y de borde, además de todas las simulaciones, se realizaron en un computador con las características numeradas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Especificaciones del dispositivo de simulación.

Especificación	Características
Nombre del dispositivo	ASUS-RYZEN5-X505Z
Procesador	AMD Ryzen 5 2500U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.00 GHz
RAM instalada	8,00 GB (6,95 GB usable)
Tipo de Sistema	Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64

2.1 Selección del programa de simulación

Para la selección del programa de simulación CFD en el cual se realizará el presente trabajo se realizó una extensa revisión bibliográfica además de comparaciones con ejemplos específicos para encontrar el software adecuado que más se ajuste a lo que se quiere realizar, como las simulaciones de transferencia de calor con PCM. La investigación bibliográfica implicó la búsqueda de artículos académicos, documentos de conferencias e informes técnicos que traten sobre la simulación de la transferencia de calor con PCM en donde los autores utilizaron programas CFD para aplicaciones relacionadas con el intercambio de calor. Se evaluaron las capacidades y características que ofrecen los distintos paquetes de software, teniendo en cuenta factores como la eficiencia computacional, la interfaz que se maneja y por consiguiente la facilidad de uso y la disponibilidad de módulos especializados para simulaciones con fluidos PCM.

Se determinó que, por las características buscadas, los programas CFD que se podrían utilizar en el presente trabajo para la simulación en el intercambiador de calor son COMSOL Multiphysics y ANSYS Fluent. COMSOL y ANSYS son dos paquetes de software ampliamente utilizados para simulaciones de ingeniería, incluido el análisis de transferencia de calor. Los dos programas de simulación cuentan con el paquete especializado para PCM.

Se realizó un ejemplo simple de transferencia de calor entre un sólido y un líquido para evaluar la interfaz y familiarizarse con los dos programas de simulación. En la Tabla 2.1.1 se pueden observar los datos del ejemplo estudiado, el cual es un intercambio de calor en un tubo concéntrico para el enfriamiento de un sólido con agua.

Para elegir el programa de simulación se compararon la facilidad de uso del programa principalmente en la parte de la construcción de la geometría y la variedad de mallas que ofrece el programa para la simulación propuesta. Además, se realizó la comparación del resultado de la temperatura final del

Tabla 2.1 Datos del ejemplo de prueba

Parámetro	Dimensión
Radio externo (R1) [mm]	50
Radio Interno (R2) [mm]	30
Longitud (L1) [m]	500
Velocidad entrada agua [m/s]	1
Temperatura entrada agua [K]	300
Temperatura sólido inicial [K]	400
Temperatura sólido final [K]	310
Propiedades del sólido	
Conductividad térmica (k1) [W/m s]	100
Densidad (d1) [kg/m ³]	8000
Capacidad calorífica (cp1) [J/kg s]	400

2.1.1 Prueba en COMSOL Multiphysics

Se empezó con la familiarización del programa y de la interfaz, la pantalla principal del programa COMSOL Multiphysics se puede observar en la Figura 2.1. Una de las ventajas que este programa ofrece es que tiene una sección inicial cuyo nombre es “Model Wizard” la cual es un esquema en orden que permite al usuario seguir un programa predeterminado para la construcción del modelo. Ya que se realizará el enfriamiento de un sólido con un tubo externo de agua con las condiciones anteriormente dadas, se seleccionaron en COMSOL las opciones Flujo Laminar, Transferencia de Calor en Fluidos y finalmente Estado Estacionario. Posteriormente se realizó la geometría en el Plano XY con eje en la coordenada Z de dos tubos concéntricos de radio R1 y R2 y de largo L1. Se seleccionó para el tubo externo el material de agua y para el tubo interno se creó un material con la conductividad térmica k1, densidad d1 y capacidad calorífica cp1. Posteriormente se configuraron las condiciones iniciales y las condiciones de borde las cuales fueron la velocidad de entrada de agua, la temperatura de entrada del agua y la temperatura del nuevo material. Se realizó el mallado computacional en donde se seleccionó la opción Physics-controlled mesh y como tamaño Coarser, se activaron todas las opciones de contributor y se construyó la malla. Para la iniciar la simulación se seleccionó en la pantalla Model Builder la pestaña Study 1 y Compute, después se realizó el procesamiento de datos, en donde se seleccionó el gráfico de presión.

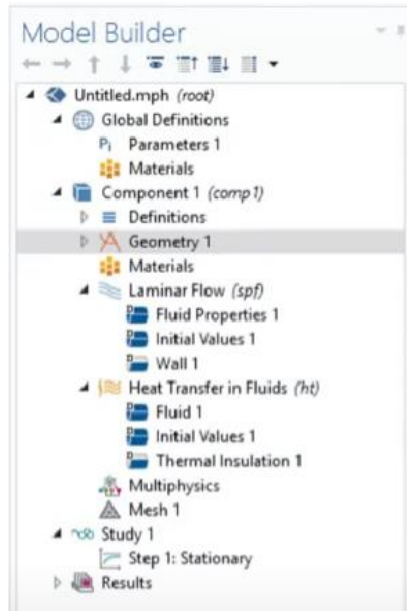


Figura 2.1 Interfaz de COMSOL Multiphysics.

2.1.2 Prueba en Ansys Fluent

Se realizó la misma prueba en Ansys Fluent, para este caso la interfaz del Workbench tiene varias opciones al costado izquierdo de los modelos que se pueden tomar y una vez elegido uno de ellos, se sigue el orden que marca en este caso: Geometría, Malla, Configuración, Solución y Resultados, como se puede observar en la Figura 2.2, se tomó el de Fluid Flow (Fluent) para realizar el mismo ejemplo que en el apartado 2.1.1.

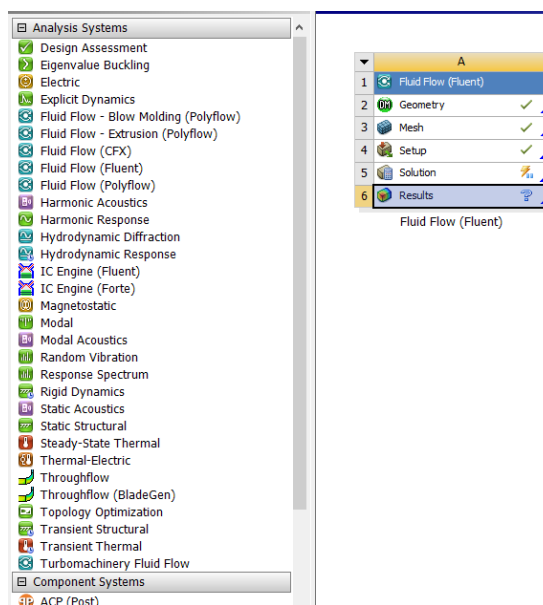


Figura 2.2 Interfaz de ANSYS Fluent.

Se realizó primero la geometría, haciendo en un solo sketch los dos tubos concéntricos con las dimensiones que se muestran en la Tabla 2.1, se rellenó el centro del tubo interno con la herramienta Fill. Se nombró la geometría en diferentes partes con los nombres de tubo externo, tubo interno, entrada de cada tubo, esto con el objetivo de que las partes se formen automáticamente en los siguientes apartados.

Una vez realizada la geometría se procedió al apartado Mesh, en donde se seleccionó la herramienta Fluent y posteriormente se ubicó el tamaño por default Coarser. Para la parte de Set Up se configuró la herramienta "Heat Exchanger" en on. Se colocaron las condiciones de borde y las condiciones iniciales las cuales fueron la velocidad de entrada de agua, la temperatura de entrada del agua y la temperatura a la que se encuentra inicialmente el nuevo material, se seleccionaron los materiales agua para el tubo externo y un nuevo material para el tubo interno.

Una vez realizadas las simulaciones en los dos programas y generados los gráficos de presión se realizaron las comparaciones mencionadas anteriormente, con lo cual se seleccionó el programa de simulación.

Una vez realizada la selección del programa de simulación, se realizó la construcción del intercambiador de calor paso a paso.

2.2 Construcción de la Geometría del Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

Para la construcción definitiva del intercambiador de calor de tubos y coraza objeto de este trabajo, se realizó un primer plano en el programa AutoCAD para la distribución de los tubos en el plano frontal, se observó que en la geometría presentada por Yadira Quishpe (2022) podía ser modificada por condiciones de configuración de los tubos en la coraza, por lo que en lugar de 22 tubos se trabajó con 24 tubos internos y la longitud de los tubos varió de 2,4 m a 2,2 m de las mismas dimensiones iniciales de diámetro interno y externo, dimensiones mencionadas en la Tabla 2.2.1, en consecuencia el diámetro de la coraza se modificó de 1,54 m a 1,60 m. Se modificó la longitud de los tubos con el objetivo de alcanzar la misma área de transferencia de calor con la que se realizó el diseño del intercambiador.

Se realizó la construcción de la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza en el programa de simulación de ANSYS Fluent, en el apartado de Geometry en component systems en el workbench mediante la aplicación de Design Modeler (DM). Se realizó aquí

el diseño de tubos internos, diseño de deflectores, diseño de la coraza, ensamblaje de geometría y construcción del mallado.

2.2.1 Diseño de los tubos internos

Se realizó el diseño de la tubería interna en la aplicación DM mediante la creación de un nuevo Sketch en el plano XY. En la sección sketching se dibujó un círculo con diámetro D_e y una altura de h desde el centro del eje de coordenadas representando la tubería externa y un círculo concéntrico con diámetro D_i representando la tubería interna. Posteriormente, se realizó en la sección modeling la extrusión del sketch especificando simetría con un valor de $L/2$. Se realizó el relleno simbólico de la tubería con PCM mediante el uso de la herramienta Fill. En la Tabla 2.2.1 se puede observar los valores mencionados para este apartado.

Para realizar la copia de la tubería base que se creó se utilizó la herramienta Pattern en la cual se especificó la cantidad de tubos y la distancia entre los mismos tanto a la derecha como a la izquierda. Para realizar la fila superior de tubos se utilizó la herramienta Translate en donde se especifica que se conservan los cuerpos y se coloca a que distancia en el eje de coordenadas se ubica la siguiente fila de tubos (pt), se repite el proceso con Pattern. Se realizó este proceso hasta obtener la parte superior del arreglo de tuberías. Finalmente se utiliza la herramienta Mirror en el Plano XZ de todos los cuerpos realizados y se obtiene el arreglo final de tubos.

Tabla 2.2.1 Parámetros de dimensionamiento de la tubería interna

Parámetro	Dimensión
Diámetro externo (D_e) [m]	0,2191
Diámetro interno (D_i) [m]	0,2027
Longitud de la tubería (L) [m]	2,2000
Altura desde el eje de coordenadas (h) [m]	0,1350
Número de tubos	24
Tipo de Arreglo	Triangular
Distancia entre centros (pt) [m]	0,2700

2.2.2 Diseño de deflectores

Para realizar el diseño de deflectores fue necesario realizar una placa base en el centro del arreglo de tubos, la cual sirvió de soporte para los deflectores y permitió efectuar los dos pasos por la coraza tanto de los gases de combustión como del aire para la simulación de carga o descarga del sistema, respectivamente. Para ello, en un nuevo sketch en el plano XY se realizó un rectángulo de longitud A que corresponde a la misma longitud del diámetro de la coraza y de altura B el cual se encuentra justo en el centro del eje de coordenadas, posteriormente con la herramienta Trim en el apartado de Modify Sketching se eliminó las esquinas del rectángulo de la base con el objetivo de que las partes del intercambiador no queden superpuestas, por consiguiente las paredes laterales de la placa se encuentran en la misma dimensión de la coraza. Este se extruyó de manera asimétrica, por un lado, una distancia $L/2$ y por el otro lado una distancia C ya que se necesita dejar un paso para el fluido.

Se creó posteriormente un nuevo plano XY a una distancia 0,66 [m] del eje de coordenadas y con este un nuevo Sketch en donde se realizó el diagrama del deflector que consisten en un semicírculo recortado ya que tiene una segmentación al 25% con una base A y una altura O que tiene como soporte inferior la placa. Se realizó la extrusión de este en el apartado modeling en donde se especificó un espesor de 0,015 m ya que este es un valor promedio y común de espesor dentro de los deflectores en intercambiadores de calor de tubos y coraza en la industria, posteriormente se utilizó la herramienta Boolean en donde se seleccionó tanto la placa como los tubos para crear los orificios en los deflectores donde los tubos se ubica y así que estos no interfieran con el PCM. Se siguió el mismo proceso para realizar los deflectores superiores. Con el uso de las herramientas Pattern y Mirror se realizó la copia de los deflectores originales para todo el esquema. En la Tabla 2.2.2 se encuentran los parámetros para el dimensionamiento de los deflectores.

Tabla 2.2.2 Parámetros de dimensionamiento de los deflectores

Parámetro	Dimensión
Longitud de la placa (A) [m]	1,60
Altura de la placa (B) [m]	0,02
Distancia Asimétrica (C) [m]	0,66
Altura del deflector (O) [m]	0,40

2.2.3 Diseño de la coraza

Para el diseño de la coraza simplemente se creó un nuevo plano XY en el eje de coordenadas y un nuevo Sketch en donde se graficó un círculo con el diámetro interno de la coraza que es de 1,60 m.

El Sketch se extruyó de manera simétrica un valor de $L/2$, no se realizó la creación de un sketch para el diámetro externo de la coraza ya que este se despreció para la simulación debido a que, en este caso de estudio, el punto de interés se centra en el PCM y la transferencia de calor que ocurre en el interior del intercambiador de calor, despreciando la posible transferencia de calor al exterior, considerando un sistema aislado térmicamente.

Para la creación de la entrada y salida del fluido de carga y de descarga se realizó un nuevo plano en el eje ZX en el cual se realizó un círculo y se extruyó el mismo, además con la herramienta mirror se realizó el reflejo de este para la parte inferior de intercambiador de calor, con lo cual se tiene la salida.

2.2.4 Ensamblaje de Geometría

Es importante que la geometría del intercambiador sea ensamblada en una sola parte ya que así se evita problemas para la construcción del mallado, por la posible generación de caras que no son parte de la simulación, para lo cual se nombró todos los sólidos generados tanto los cuerpos como las caras de los cuerpos con la herramienta Named Section. Posteriormente con la herramienta Form New Part se creó una sola parte llamada "Intercambiador de Calor" y todo se compactó de esta manera. Con esto la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza del presente trabajo quedó finalizada y se procede a realizar el mallado computacional.

2.2.5 Construcción del Mallado en ANSYS Fluent

Para realizar la construcción del mallado computacional en ANSYS Fluent del intercambiador de calor de tubos y coraza, en la interfaz se seleccionó el apartado de Mesh en component systems en el workbench mediante la aplicación Meshing (M). Una vez abierto esto se selecciona en Model (A3) la sección Mesh y se configura la malla como se detalla en la Tabla 2.3. Es importante seleccionar el mallado no estructurado en la aplicación.

Tabla 2.2.5 Detalles de la malla en configuración

Parámetro	Característica
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Elemento Order	Linear
Element Size [m]	$1,6 \times 10^{-2}$ (Default)
Growth Rate	Default
Max Size	Default
Mesh Defeaturing	Yes
Check Mesh Quality	Yes
Inflation Option	Smooth Transition

Una vez realizada la configuración de la malla, se selecciona Generate Mesh y se esperó el tiempo necesario para que se complete el mallado, finalmente se selecciona la opción update mesh para que esta se cargue a la pantalla principal del workbench de ANSYS Fluent.

Una vez realizada la malla se procedió a realizar la configuración del modelo para colocar las condiciones iniciales y de borde, además de la creación de los materiales para la simulación los cuales son aire, gases de combustión y carbonato de potasio.

2.3 Inicio de la simulación y obtención de gráficas

Para seguir con el proceso de la simulación se configuraron los parámetros necesarios para colocar las condiciones iniciales y también las condiciones de borde.

Se seleccionó “SET UP” en la línea de configuración después del mallado, una vez abierta la ventana se seleccionó en General el estado transitorio. El modelo que se requiere en la pestaña models, donde se asegura que “Solidification & Melting” y “Energy” se encuentren con la opción “on” activada.

En el apartado de Materiales se seleccionó los fluidos y sólidos que se requieren para la simulación, en el caso del sólido se colocó el material para los deflectores, la placa y los tubos de aluminio, el mismo que se obtuvo de la base de datos de ANSYS Fluent, posteriormente se crearon nuevos materiales para el aire (descarga), PCM y finalmente

para la carga, se creó a los gases de combustión como material, para ello se asumió una composición química de los gases de combustión de 11,75% de CO₂, 75% de N₂, 10% de H₂O y 3,25% de O₂, por lo cual se utilizó el Manual de Transferencia de Calor 2021A para obtener las propiedades de densidad, viscosidad, conductividad térmica y capacidad calorífica, en el Anexo I se encuentra la gráfica de donde se obtuvieron las propiedades para este material. Las propiedades que se utilizaron se encuentran detalladas en la Tabla 2.3.1

Tabla 2.3.1 Propiedades de los materiales creados para la simulación.

Propiedades	Materiales		
	Aire	PCM (Carbonato de Potasio)	Gases de combustión
Densidad [kg/m ³]	0,344	2290	0,27
Capacidad calorífica [J/kgK]	1130	1250	1420
Conductividad Térmica [W/mK]	0,068	2	0,10
Viscosidad [kg/ms]	4,21x10 ⁻⁰⁵	-	4,94 x10 ⁻⁰⁵
Calor de fusión [J/kg]	-	236000	-
Temperatura de Transición [K]	-	1170	-

Se colocaron los materiales en cada caso en la sección del Cell Zone Conditions, donde también se especifican las partes de intercambiador de calor que son sólidas y aquellas que son fluidos, en este caso, la sección aire y pcm como fluidos, y en el caso de deflectores, placa y tubos se selecciona sólido.

En las condiciones de borde, se colocó en la entrada del fluido de descarga el flujo másico seleccionando la opción de “mass-flow-inlet” y la temperatura de entrada, valores mostrados en la Tabla 2.3.2. Para la salida del fluido de descarga, se seleccionó la opción de “pressure-inlet” y se especificó la presión manométrica. El resto de las secciones del intercambiador se dejó con la selección por defecto que son paredes sin flujo de calor.

Tabla 2.3.2 Condiciones de borde

Parámetro	Aire	Gases de combustión
Flujo másico fluido [kg/s]	0,177	0,06
Temperatura de entrada [K]	923	1373
Presión manométrica [Pa]	0	0

En la inicialización de la simulación, para el proceso de descarga se colocó un valor de 1171 K ya que, a esta temperatura el PCM se encuentra en estado líquido y en cuanto al proceso de carga se colocó un valor de 1169 K ya que, a esta temperatura el PCM se encuentra en estado sólido. Para correr finalmente la simulación se colocó el tiempo, el paso del tiempo y la iteración por paso del tiempo con los valores que se encuentran detallados en la Tabla 2.3.3.

Tabla 2.3.3 Valores de tiempos para correr la simulación

Parámetro	Aire	Gases de combustión
Tamaño de paso del tiempo [s]	28,8	23
Numero de pasos del tiempo	1000	2500
Tiempo teórico de simulación [h]	8	16

Se realizó además la configuración para dos pruebas extras que se simularon. En el caso de la descarga se incrementó el flujo másico y el tiempo como se observa en la Tabla 2.3.4 y se comparó el % de cambio de fase en el intercambiador, en el caso de la carga, se varió el tiempo de simulación del intercambio de calor de los gases de combustión como se observa en la Tabla 2.3.5 y para este caso se comparó de igual manera el % de cambio de fase y el calor cedido.

Tabla 2.3.4 Condiciones para pruebas en la simulación de descarga

Número de prueba	Flujo másico de aire	Tiempo de simulación [h]
1	0,117	8
2	0,117	12
3	0,351	8
4	0,351	12

Tabla 2.3.5 Condiciones pruebas en la simulación de carga.

Número de prueba	Tiempo de simulación [h]
1	16
2	12
3	8

Finalmente, se siguió con el procesamiento de los resultados de la geometría y de las simulaciones.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En esta sección del trabajo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para la selección del programa de simulación, también los resultados de la geometría final del intercambiador de calor, del mallado computacional y de la simulación final del intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de potasio como PCM para su aplicación en el precalentamiento de aire para la combustión.

3.1.1. Selección del programa de simulación.

De las dos pruebas que se realizaron para la selección del programa de simulación, se pueden observar las Figura 3.1 y Figura 3.2 que corresponden a las geometrías realizadas en los dos programas a ser comparados, en este caso y a manera personal, fue más sencillo realizar la geometría en el programa ANSYS Fluent ya que, este cuenta con un módulo especializado y bastante intuitivo para la construcción de la geometría, al contrario del programa COMSOL Multiphysics para el cual se necesita un conocimiento previo más avanzado para entender los módulos que este ofrece.

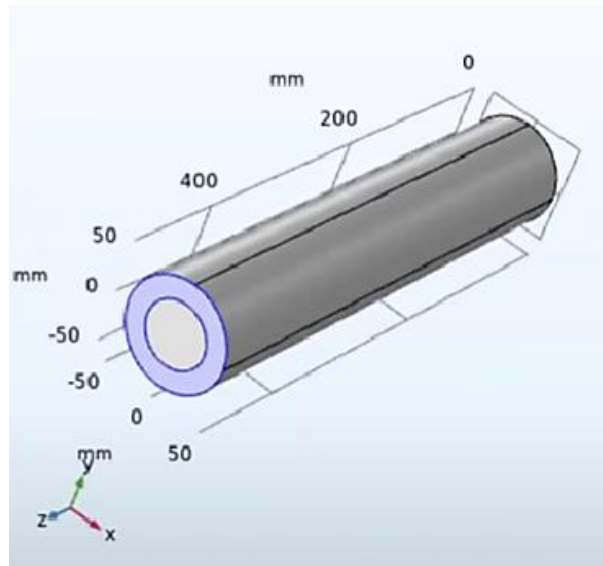


Figura 3.1 Geometría realizada en COMSOL Multiphysics.

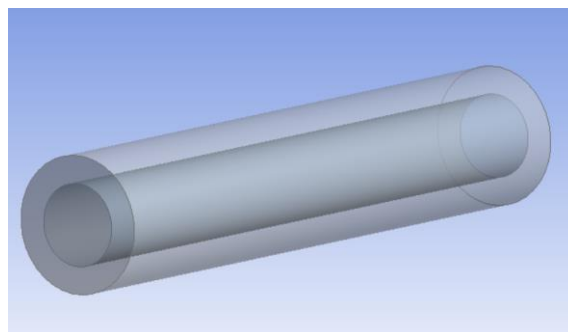


Figura 3.2 Geometría realizada en ANSYS Fluent.

Por otro lado, en el caso del mallado computacional en los dos programas, se configuraron ambos con los mismos parámetros de mallado, en este caso el programa ANSYS Fluent, ofrece una mayor cantidad de tipos de mallado, al igual que variación a conveniencia del tamaño de elemento que influye directamente en la cantidad de nodos en la geometría de

la simulación, al contrario que el programa COMSOL Multiphysics. En lo que refiere al tiempo de mallado, el tiempo que se demoró en realizar esto fue de 8 segundos para el programa COMSOL Multiphysics y de 4 segundos para ANSYS Fluent. En el Anexo II se pueden observar los mallados obtenidos con los dos programas, sin embargo, el tiempo de mallado no fue un factor para la elección del programa ya que, aunque se configuraron de manera similar, se obtuvieron mallados completamente diferentes en cada caso.

Finalmente, una vez lanzada la simulación para cada uno de los programas, ésta demoró 5 minutos en el caso de COMSOL Multiphysics y 2 minutos en el caso de ANSYS Fluent, respectivamente. Se obtuvieron los gráficos del perfil de presiones al final de cada simulación y se puede observar en las Figuras 3.3 y 3.4 que en ambos casos los resultados son similares.

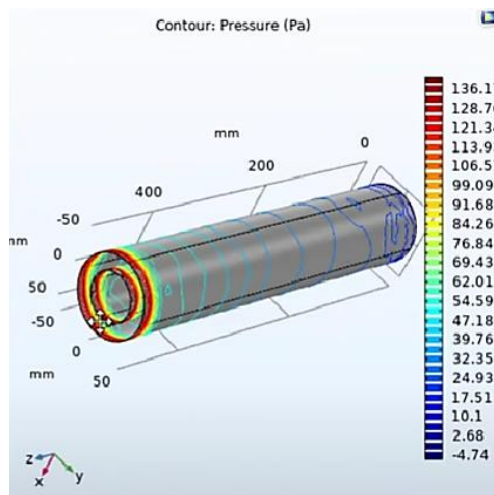


Figura 3.3 Resultado de la simulación en COMSOL Multiphysics.

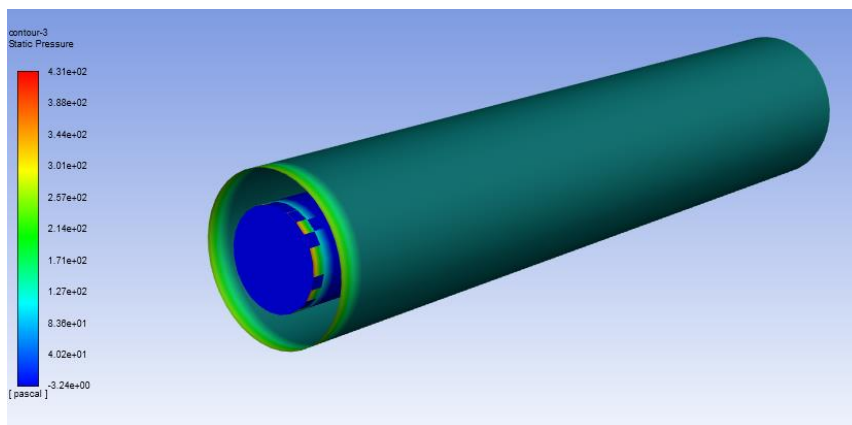


Figura 3.4 Resultado de la simulación en ANSYS Fluent.

Se obtuvieron de ambas simulaciones la temperatura final del nuevo material, las mismas que se compararon con la temperatura final que problema proporciona (310 K), para el

caso de COMSOL Multiphysics se obtuvo una temperatura de 315 K mientras que para ANSYS Fluent se obtuvo una temperatura de 309 K. Evidenciándose una mejor aproximación en el caso de ANSYS Fluent.

Adicionalmente, tanto Maghalseh (2017) y Prakash (2020) concuerdan en el uso del programa ANSYS Fluent para realizar simulaciones CFD cuando se trata de PCM por su interfaz para el seguimiento de modelos y módulos especializado. Por lo tanto, por las pruebas realizadas en esta sección se concluyó que, por la interfaz intuitiva para realizar la geometría sin previo estudio, la similitud en el cálculo teórico y por la información bibliográfica obtenida, se seleccionó ANSYS Fluent como el programa de simulación para continuar con el desarrollo del presente trabajo.

3.1.2. Construcción de la Geometría del Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza.

En primer lugar, se realizó el diseño de los tubos internos, los mismos que fueron dispuestos en una distribución triangular, cumplen con una separación igual en cada centro de tubería y en diagonal cumplen con un ángulo equivalente entre si como se menciona en Burbano (2014) y lo cual se puede observar en la Figura 3.5, por otro lado, el banco de tubos superior se puede observar en la Figura 3.6.

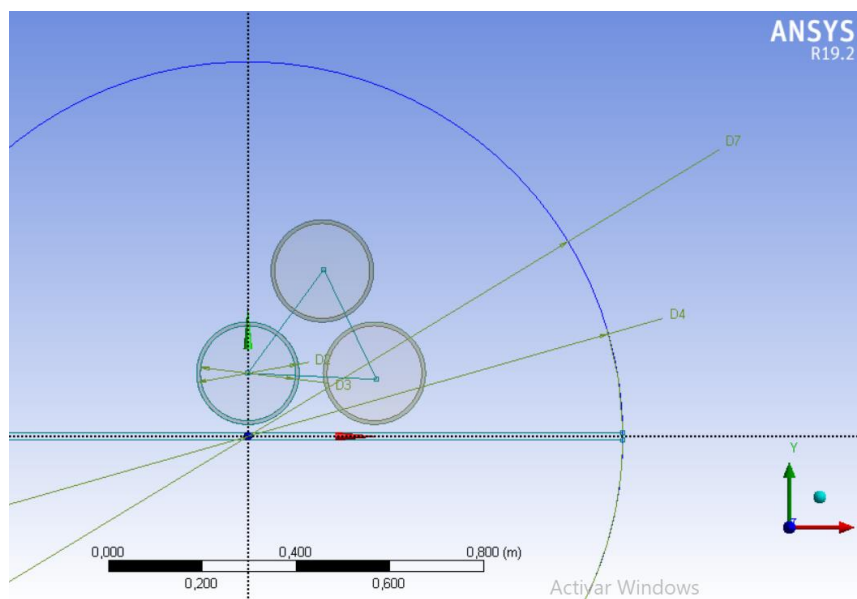


Figura 3.5 Gráfico distribución triangular en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.

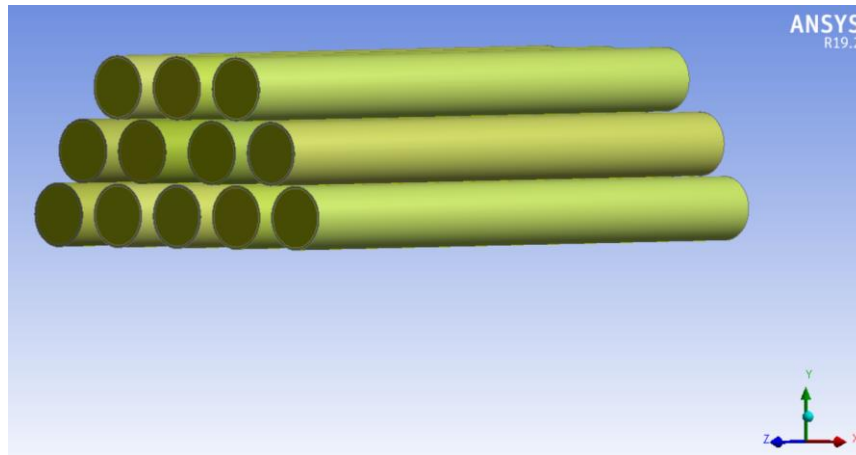


Figura 3.6 Gráfico del banco de tubos superior en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.

En la Figura 3.7 por otro lado, se puede observar la placa realizada para el soporte de los deflectores la misma que ayuda a crear los dos pasos por la coraza necesarios en la simulación junto con el banco de tubos completo el cual consta de 24 tubos.

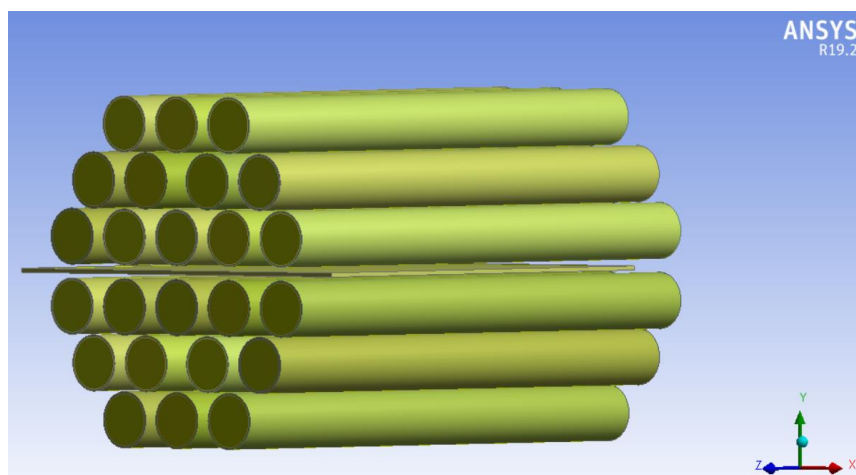


Figura 3.7 Gráfico del banco de tubos completo y placa divisora en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.

En las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se pueden observar el diseño de los 8 deflectores necesarios para la simulación, mismos que tienen una segmentación del 25% de acuerdo con el dimensionamiento realizado por Quishpe (2022), desde el dibujo para el deflector inferior, superior y el resultado de todos los deflectores en el banco de tubos.

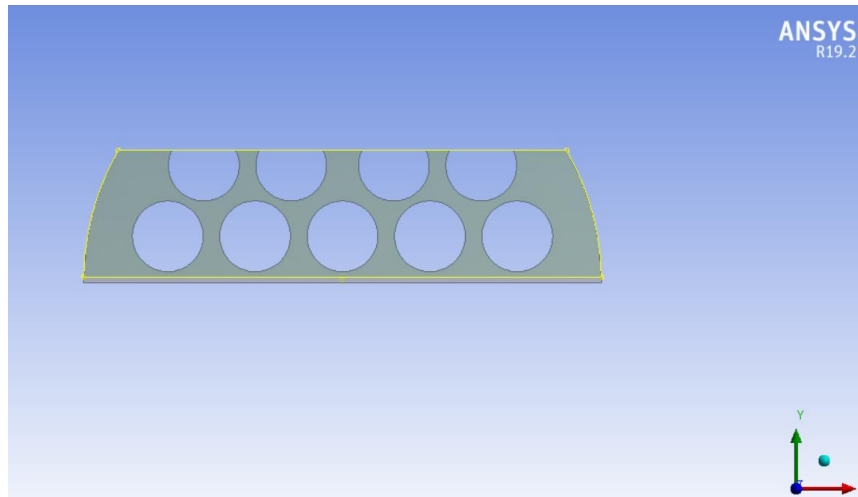


Figura 3.8 Gráfico del sketch de los deflectores inferiores en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.

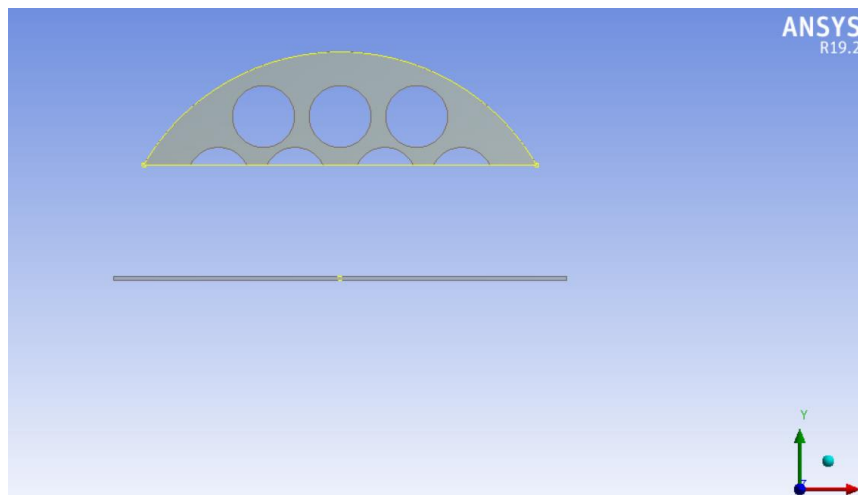


Figura 3.9 Gráfico del sketch de los deflectores superiores en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.

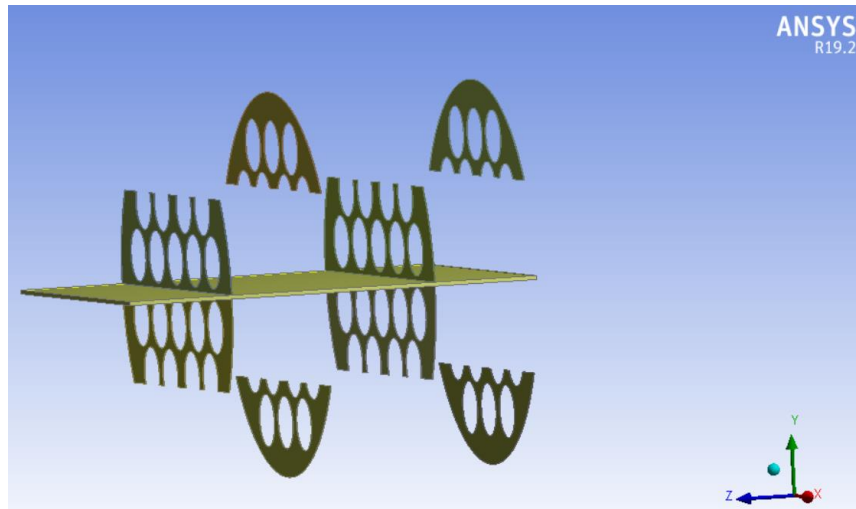


Figura 3.10 Gráfico de los deflectores superiores e inferiores completos en la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza.

Finalmente, en la Figura 3.11 se puede observar la construcción del fluido que pasa por la coraza el cual en este caso fue gases de combustión y aire, para la carga y la descarga del sistema, respectivamente. Cabe destacar la ausencia de una armadura para la coraza de metal, ya que en la simulación interesa principalmente lo que sucede en el interior del intercambiador en los tubos con el PCM.

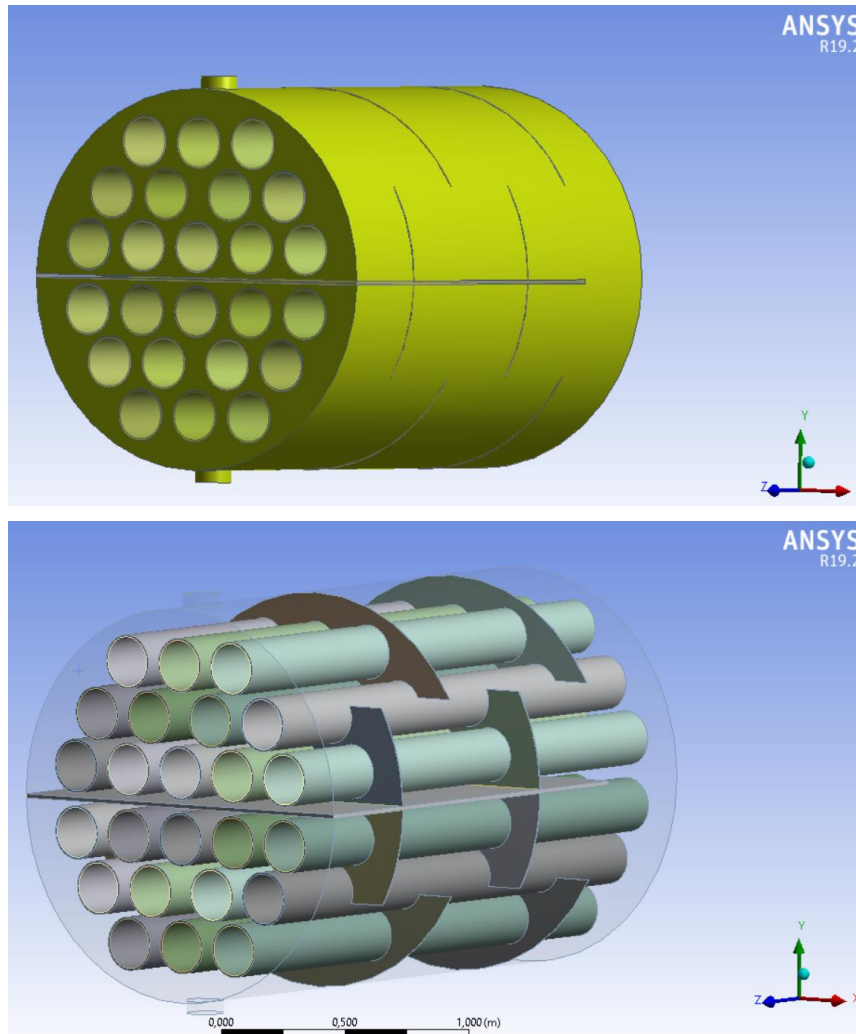


Figura 3.11 Gráfico del intercambiador de calor de tubos y coraza completo.

En la Figura 3.12 se puede observar el mallado computacional del intercambiador de calor completo, obtenido en el programa de simulación. En la Figura 3.13 se puede observar el mallado computacional de la sección que posee el PCM, cabe destacar que en esta sección se puso especial énfasis ya que es el lugar de principal interés, por lo que la malla en esta sección cuenta con un tamaño de elementos menor. Se optó en este caso por una malla no estructurada para todo el intercambiador de calor. En la Tabla 3.1.2 se puede observar el número de nodos y de elementos totales del mallado, así también la calidad de la malla que se obtuvo.

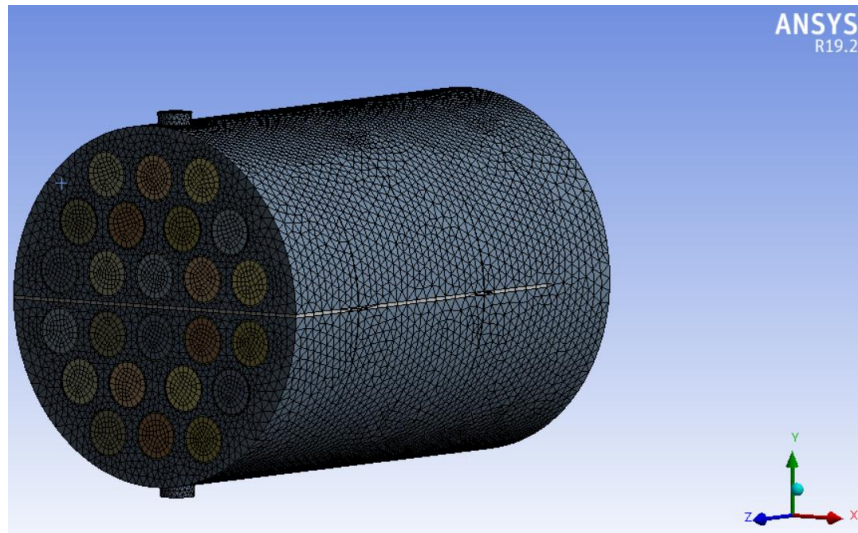


Figura 3.12 Mallado computacional del intercambiador de calor de tubos y coraza completo.

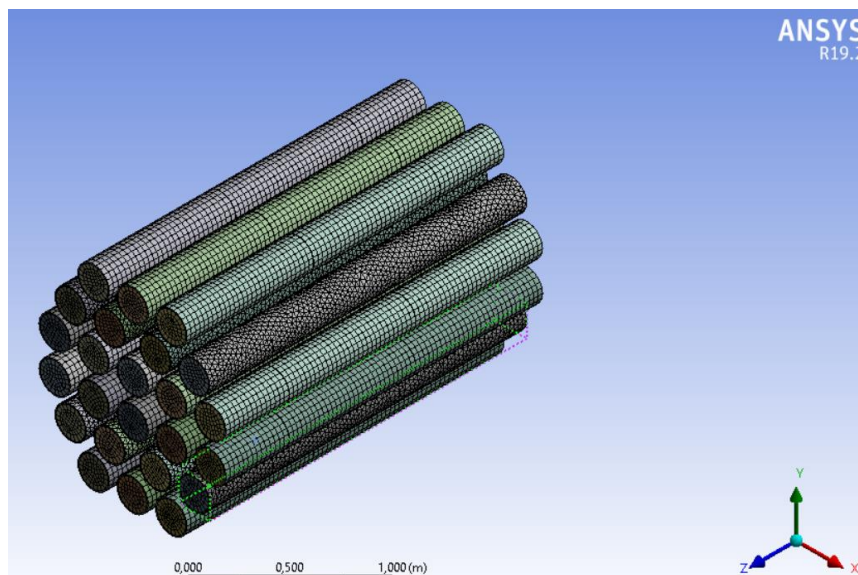


Figura 3.13 Mallado computacional del banco de tubos del intercambiador de calor de tubos y coraza.

Tabla 3.1.2 Resultados Mallado Computacional

Parámetro	Valor
Nodos	279233
Elementos	877778
Calidad	0,82

Se obtuvieron valores estadísticos de mínimo volumen de control de $1,89 \times 10^{-09} \text{ m}^3$ y máximo volumen de control de $8,29 \times 10^{-05} \text{ m}^3$. Así también se obtuvieron valores de las áreas de las caras de los elementos mínimo de $5,83 \times 10^{-08} \text{ m}^2$ y máximo de $4,64 \times 10^{-03} \text{ m}^2$. Con esto se obtuvo una calidad de malla de 0,82, la cual se considera viable según lo recomendado por el programa ANSYS Fluent y mencionado por García et al (2018).

3.1.3. Resultados de la Simulación

El dimensionamiento inicial del intercambiador de calor de tubos y coraza para el presente estudio se realizó a partir del fluido de descarga, que es aire que debe ser precalentado para ser usado en un proceso de combustión, el objetivo es elevar la temperatura del aire para el precalentamiento de 923 K a 1123 K. Para el proceso de carga se utilizaron gases de combustión, con lo cual se logra la fusión del PCM. En el presente trabajo, se simularon los dos casos, en el caso de la descarga el tiempo de simulación fue de 2,56 h mientras para el caso de la carga el tiempo fue de 5,16 h.

En la Figura 3.14 se puede observar el resultado de la simulación para el calentamiento del aire, en la entrada del intercambiador de calor, donde ocurre el primer paso por la coraza, el aire tiene una temperatura más baja que en la sección del segundo paso por la coraza, esto sucede debido a que el PCM el cual está en los tubos se mantiene estático y únicamente sede calor al descargarse para pasar del estado líquido a sólido por lo que en cuanto este recorre el segundo paso por la coraza este ya tiene una temperatura más elevada. (Raut et al., 2022).

La transferencia de calor entre el aire y el PCM, no solo se evidencia en el calentamiento del aire, sino también se ve reflejado en el cambio de fase del PCM, mostrado en la Figura 3.15, donde se puede observar cómo es la distribución de la fracción líquida en la descarga dentro de los tubos donde se ubica el PCM, donde en el banco superior de los tubos se tiene una fracción líquida completa, mientras que la parte inferior de los tubos todavía tiene PCM sin solidificar. Se logró una fracción líquida en la descarga del 25%, sin embargo, en el dimensionamiento la fracción sin solidificar que se asumió fue del 10%, esto podría deberse al cambio en el dimensionamiento que se realizó por motivos de geometría, incurriendo en un cambio de fase más lento por la velocidad de transferencia de calor, además de que el carbonato de potasio el cual es el PCM de esta aplicación tiene un valor de conductividad térmica bajo para este tipo de aplicaciones como lo menciona Kant (2021) en donde realiza ciertos ensayos para mejorar esta característica en este compuesto como las mejoras en el proceso de fabricación en cambios de cristalinidad o tamaño y

distribución, además incorporar materiales como partículas de grafeno, nanotubos de carbono u óxidos metálicos podrían ser mezclados con el carbonato de calcio para aumentar su capacidad de conducir calor, cabe destacar que no se puede realizar este tipo de modificaciones sin realizar un estudio en el rendimiento global para la aplicación específica que se requiere; otro aspecto que considerar es el cambio de conductividad térmica que posee el PCM en estado líquido y en estado sólido, ya que el mecanismo de transferencia de calor que gobierna esta aplicación es la conducción, cuando el PCM se encuentra en estado líquido la conductividad térmica más baja que en estado sólido ya que los átomos se encuentran con una mayor separación, con lo cual la transferencia de calor se complica en el cambio de fase, lo que hace que no todo el PCM se solidifique. (Tecsience, 2020). Aún y con estas condiciones se llegó a una temperatura de calentamiento del aire de combustión de 1203,2 K la cual es aproximadamente 7% más elevada de lo esperado.

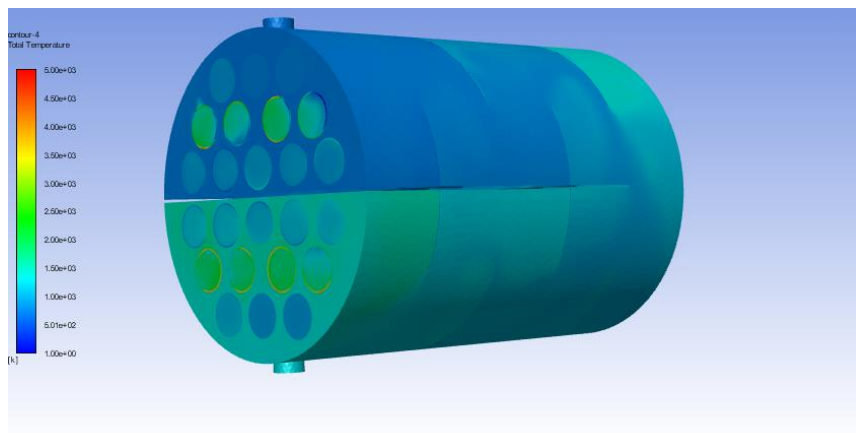


Figura 3.14 Resultado de la simulación para la temperatura del precalentamiento de aire de combustión.

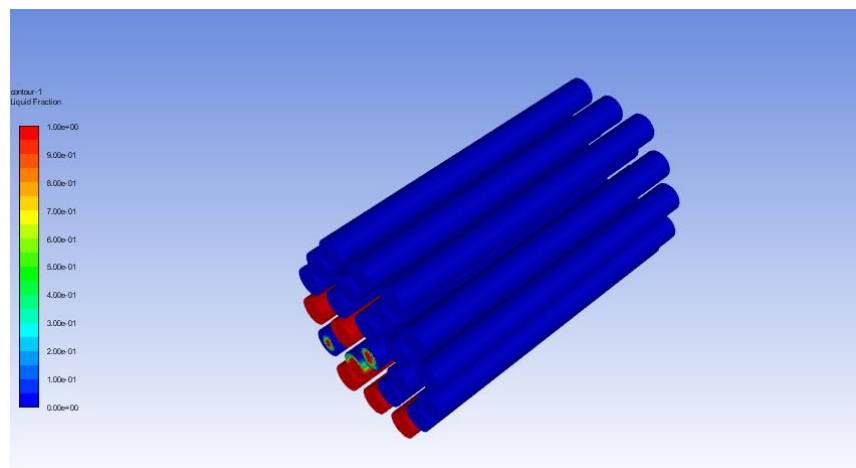


Figura 3.15 Resultado de la simulación para la fracción líquida del PCM en la descarga.

Se realizaron además tres ensayos adicionales en donde se incrementó para la prueba 2 y 4 el tiempo de simulación y para la prueba 3 y 4 se incrementó el flujo másico del aire al triple del original, los resultados se pueden observar en la Tabla 3.1.3, de donde el aumento del tiempo de simulación no modificó significativamente la fracción líquida en el intercambiador en el proceso de descarga con el flujo másico de aire original, sin embargo el aumento del flujo másico sí modificó el porcentaje de cambio de fase en la prueba 3 y 4, más solo en la prueba 4 se obtiene una temperatura de salida cercana a la que se requiere en el proceso con un tiempo de descarga superior también, por lo que esta opción podría ser considerada para esta aplicación si la combustión posterior necesita más aire.

Tabla 3.1.3 Pruebas en la simulación de descarga

Número de prueba	Flujo másico de aire [kg/s]	Tiempo de simulación [h]	Fracción Líquida en el intercambiador [%]	Temperatura de salida del aire [K]
1	0,117	8	25,1	1203,2
2	0,117	12	25	1204,1
3	0,351	8	20	1089,1
4	0,351	12	12	1124,8

Se realizó también la simulación del proceso de carga del PCM en el intercambiador de calor, en el cual se utilizan gases de combustión a una temperatura de 1373 K para realizar el cambio de fase del PCM de estado sólido a líquido, en la Figura 3.16 se puede observar la distribución de la fracción líquida en el intercambiador de calor, la misma que fue de 99,7 %, con esto se obtiene un intercambio de calor eficiente en la carga.

La potencia térmica que cedieron los gases de combustión al PCM de acuerdo con la simulación fue de 35,80 kW, este valor es aproximadamente un 10% menor al valor de dimensionamiento obtenido por Quishpe (2022) el cual fue de 39,95 kW, se podrían realizar otras pruebas de dimensionamiento en donde se incremente el flujo másico de los gases de combustión, o se disminuya la cantidad de tubos de PCM que tiene el intercambiador, aún así se llegó al cambio de fase que se requería en donde el PCM paso del estado sólido a líquido casi por completo.

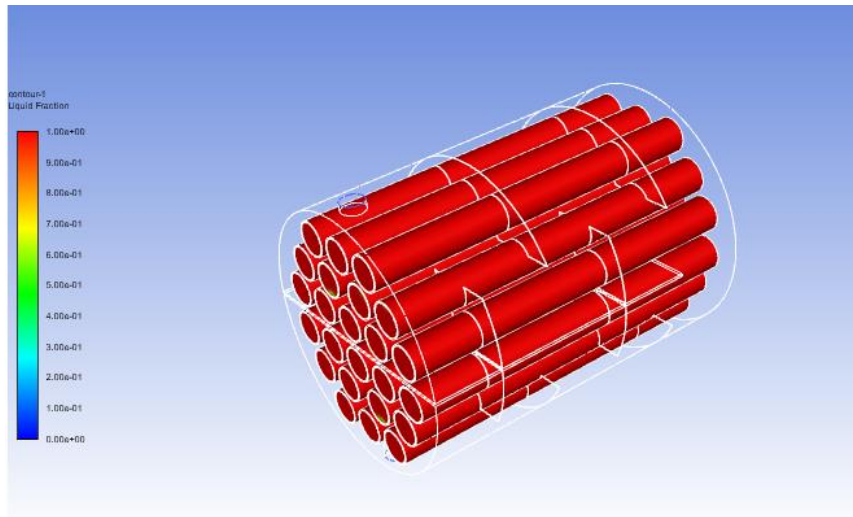


Figura 3.16 Resultado de la simulación para la fracción líquida del PCM en la carga.

En la Figura 3.17 se puede observar el comportamiento de los gases de combustión dentro del intercambiador de calor, en donde si se observan las líneas donde se encuentran los deflectores, tienen un valor de temperatura superior al del resto del intercambiador, los deflectores pueden evitar la estratificación o acumulación de calor en una parte específica del intercambiador. Esto puede conducir a un flujo de calor más uniforme y, por lo tanto, a temperaturas más elevadas en la región de los deflectores, además de que los deflectores están hechos de metal por lo que su capacidad de conducción térmica es más elevada que el resto del intercambiador, los usos de los deflectores son variadas y todos ellos dirigidos a mejorar la transferencia de calor, optimizar el rendimiento térmico y garantizar un funcionamiento eficiente y duradero del sistema. (Pytlik, 2022)

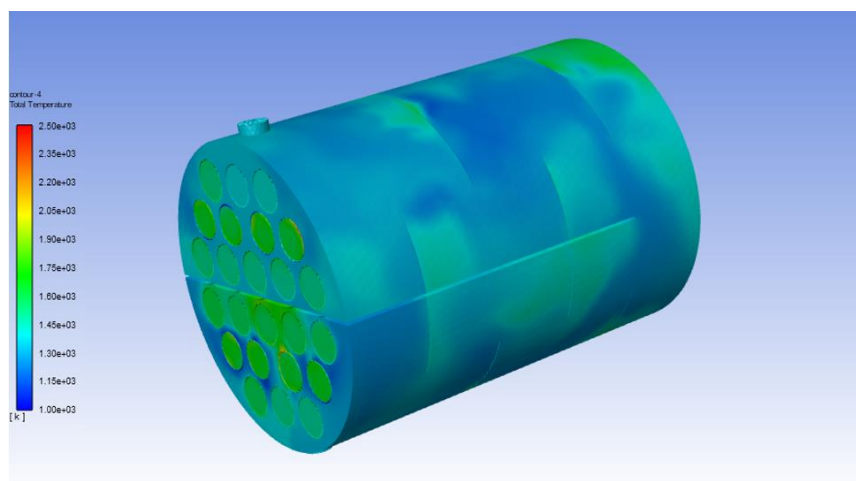


Figura 3.17 Resultado de la simulación para la temperatura de los gases de combustión en la carga.

Se realizaron además dos pruebas diferentes, en donde se disminuyó el tiempo de simulación para la carga, de esto se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.1.4 de donde se puede concluir que aunque en el dimensionamiento del intercambiador de calor se realizó contemplando un tiempo de carga de 16 h, de acuerdo a la presente simulación es suficiente con 12 h de carga para obtener un cambio de fase del 99,6% y una potencia de 34,40 kW, además la temperatura a la cual los gases de combustión salieron del intercambiador fue de 1180,89 K, valor superior al de la temperatura de fusión del carbonato de potasio, con lo cual se evidencia el intercambio de calor entre los dos fluidos ya que el valor de la temperatura de salida es menor al valor de la temperatura de entrada, mostrando además que los gases de combustión son capaces de cargar este material para el almacenamiento de energía térmica de manera eficaz. (Roos, 2008).

Tabla 3.1.4 Pruebas en la simulación de carga.

Número de prueba	Tiempo de simulación [h]	Fracción Líquida en el intercambiador [%]	Calor Cedido [kW]
1	16	99,70	35,80
2	12	99,60	34,40
3	8	97,00	30,62

Para el caso de la caída de presión, se observa en la Figura 3.18 el resultado de la simulación en el proceso de descarga, en donde se observa la presión en el cuerpo de aire. Se obtiene al ingreso del intercambiador de calor una presión de 0,689 psi y de salida de 0,283 psi por lo que la caída de presión tiene un valor de 0,41 psi el cual es cercano al calculado de 0,16 psi, y aún se mantiene bajo el valor de 10 psi el cual es el límite permisible en el dimensionamiento de intercambiadores de calor de tubos y coraza. (Kern, 1998)

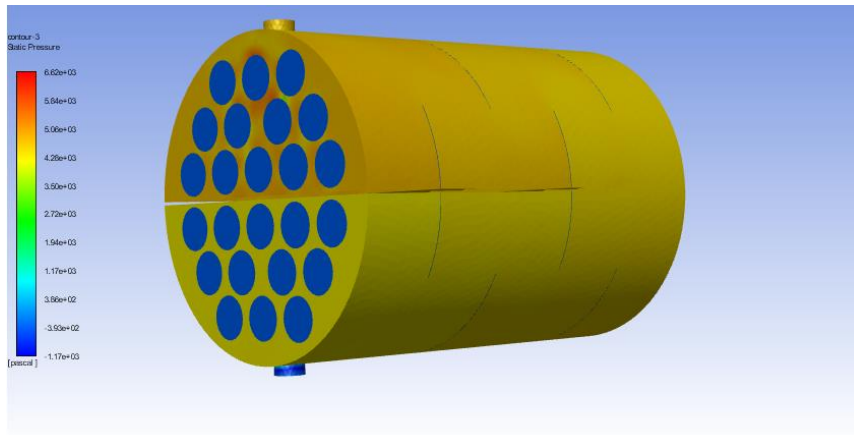


Figura 3.18 Resultado de la simulación para la variación de la presión en el aire precalentado para la combustión.

En el contexto de simulaciones, especialmente en simulaciones numéricas como las realizadas mediante métodos computacionales, los "residuales" se refieren a las cantidades que representan la diferencia entre los valores calculados y los valores reales o teóricos esperados en cada iteración de la solución. En las Figuras 3.19 y 3.20 se pueden observar los valores residuales de la simulación de descarga y carga del intercambiador de calor, respectivamente. A medida que la simulación avanza y se realizan más iteraciones, se espera que los residuales disminuyan y converjan hacia cero, lo que indica que la solución numérica está convergiendo hacia una solución precisa. (Kuron, 2015)

En este caso se puede observar que la solución para el caso de la descarga se obtuvo residuales en orden de 1×10^{-06} para energía y continuidad, y para el caso de velocidad se obtuvieron residuales en el orden de 1×10^{-10} , esto puede dar una idea de la fiabilidad en la simulación ya que, en CFD, los valores residuales mayores a 1×10^{-04} suelen considerarse poco convergentes, mientras que los valores menores a 1×10^{-04} se consideran con una correcta convergencia. Una convergencia aún más rigurosa se alcanza con niveles cercanos a valores de 1×10^{-06} . (Baskar, 2022). La convergencia exitosa de los residuales es un indicador clave de que la simulación numérica se ha realizado de manera adecuada y se ha obtenido una solución cercana a la realidad deseada. (Kuron, 2015)

Esto no se puede corroborar con los residuales obtenidos en la simulación de la carga, misma que resultan en valores en orden de 1×10^{-02} para energía y continuidad, y para el caso de velocidad se obtuvieron residuales en el orden de 1×10^{-06} , lo que por lo indicado anteriormente no podría resultar en una alta confiabilidad para la simulación, estos valores podría disminuir con modificaciones en el mallado computacional, al aumentar el número de

odos totales (Baskar, 2022), sin embargo esto no se realizó debido a la capacidad del computador en el que se está trabajando, además del tiempo de simulación que resultaría extenso, y por ende se necesita un dispositivo que pueda soportar estos cambios.

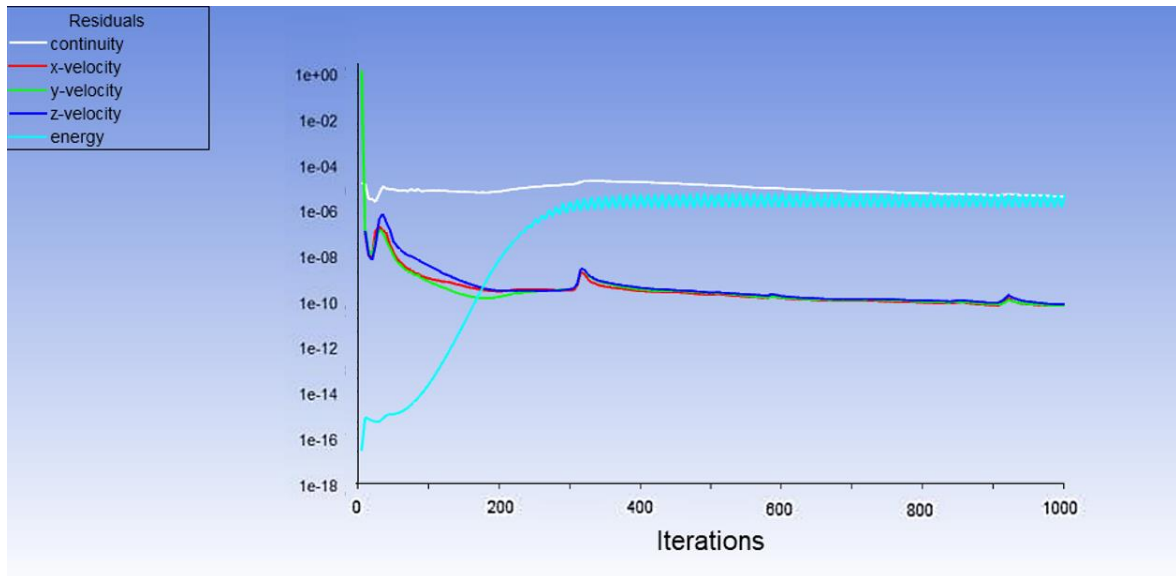


Figura 3.19 Valores residuales de la simulación de descarga del intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de calcio como PCM.

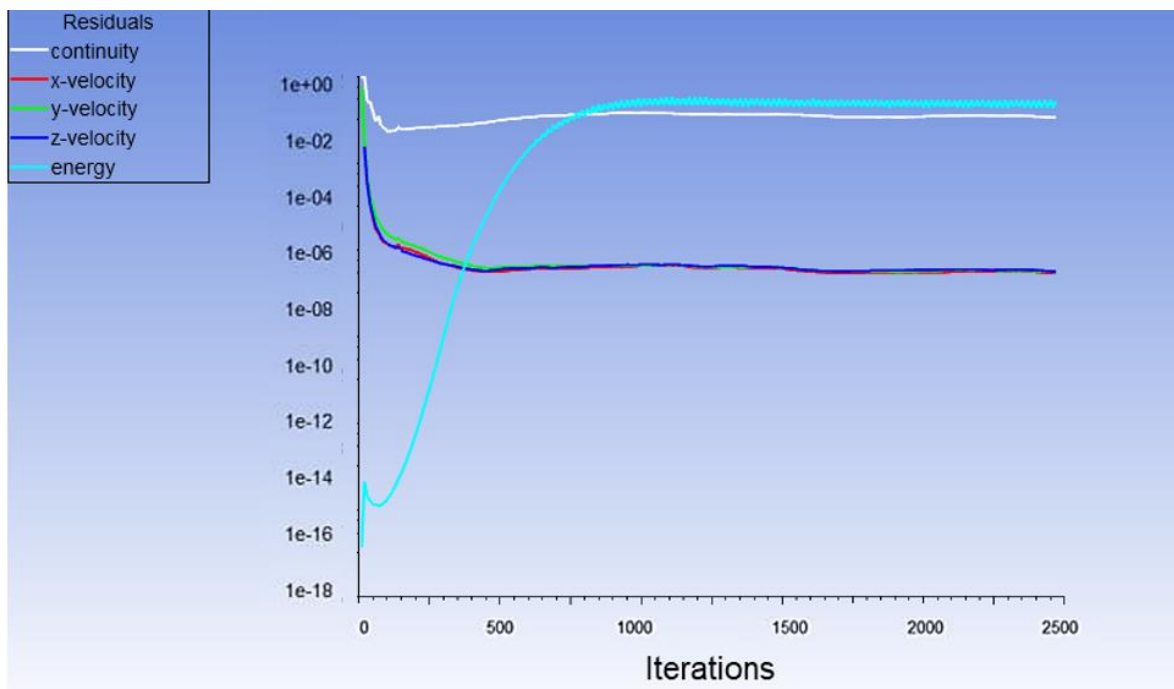


Figura 3.20 Valores residuales de la simulación de carga del intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de calcio como PCM.

3.2 Conclusiones

Por la facilidad de uso, principalmente en la sección de construcción de la geometría, y variedad de opciones para el mallado computacional, además de la velocidad de simulación y módulos especializados para PCM en comparación con otros programas de simulación se seleccionó a ANSYS Fluent como programa definitivo.

Se realizó un aumento en la cantidad de tubos del intercambiador con respecto al dimensionado en Quishpe (2022) por condiciones de configuración de la geometría en la coraza, por lo que en lugar de 22 tubos se trabajó con 24 tubos internos y la longitud de los tubos varió de 2,4 m a 2,2 m de las mismas dimensiones iniciales de diámetro interno y externo, y en consecuencia el diámetro de la coraza se modificó de 1,54 m a 1,60 m sin embargo el área de transferencia de calor se mantuvo constante. La geometría fue realizada en el mismo programa de simulación para evitar interferencias y superposiciones de partes de la geometría.

Se obtuvo un mallado computacional de malla no estructurada con 279233 nodos, 877778 elementos y 0,82 de calidad de la malla, la cual resultó ser suficiente para el proceso de descarga en la simulación, sin embargo, se necesita incrementar la calidad para el caso del proceso de carga, con lo que se podrían disminuir los valores residuales de la simulación que fueron valores en orden de 1×10^{-02} para energía y continuidad, y para el caso de velocidad se obtuvieron residuales en el orden de 1×10^{-06} .

En el proceso de descarga, con las condiciones de diseño, se obtuvieron en 8 h una temperatura de salida del aire 7 % más elevada de lo esperado, con una caída de presión de 0,41 psi y un cambio de fase del 75 %. Se determinó que, al incrementar el valor del flujo másico de aire al triple del valor de diseño, se incrementa el cambio de fase del PCM al 88 % y además se obtiene una temperatura de salida de aire similar a la requerida en el diseño, con un aumento en el tiempo de 12 h. Se podría considerar este proceso para la aplicación requerida con lo que se lograría realizar el precalentamiento de un mayor flujo de aire, aún así se deberían realizar pruebas experimentales para ajustar los valores simulados y teóricos a la realidad.

En el proceso de carga, con las condiciones de diseño, se obtuvo un cambio de fase de estado sólido a líquido en 16 horas del 99,7 %, con una potencia cedida del 35,80 kW. Para el proceso de carga se determinó que se puede reducir el tiempo de intercambio de calor entre el PCM y los gases de combustión a 12 h debido a que en este tiempo se logra obtener una potencia de 34,4 kW de energía para el proceso con un cambio de fase del 99,6%. En ninguna de las pruebas la potencia cedida fue de 39,95 kW que fue la de diseño

por lo que se podrían realizar pruebas experimentales con lo cual se obtengan los valores ajustados a la realidad.

Los valores residuales obtenidos en el proceso de descarga son suficientemente bajos para considerar a la simulación confiable, sin embargo, hay que tener precaución con el proceso de carga ya que los valores residuales obtenidos son mayores a 1×10^{-03} con lo que no se puede asegurar su fiabilidad.

3.3 Recomendaciones

Para simulaciones CFD de intercambiadores de calor de tubos y coraza, especialmente si incluyen detalles complejos y mallas refinadas, sería beneficioso trabajar en una computadora con una potencia de cálculo adecuada, suficiente memoria RAM y, si es posible, una tarjeta gráfica de alto rendimiento. Además, considerar el acceso a recursos de cálculo en la nube o sistemas de alto rendimiento podría ser una opción para acelerar el proceso de simulación, como acceso a las súper computadoras cuyos servidores se encuentran en la nube.

Se recomienda utilizar el mismo programa de simulación en el que se va a trabajar para realizar la geometría ya que es más rápido realizar modificaciones de ser requeridas, además de que se evita la superposición de figuras.

Se podrían realizar pruebas con una malla híbrida, en donde la malla estructurada vaya en lugares no indispensables de la geometría con lo que la simulación podría ser más rápida y precisa, además se podría realizar la prueba $\pm 50\%$ en donde al tamaño definido de malla se aumenta un 50% el tamaño de los elementos y se disminuyó un 50% el tamaño de los elementos, con lo que se podría comparar la diferencia entre estos y si es significativo el aumentar o disminuir la cantidad de nodos de la geometría.

Se recomienda la construcción un modelo real del intercambiador de calor de tubos y coraza con carbonato de potasio como fluido de cambio de fase para recopilar datos reales de funcionamiento y evaluar una posible aplicación y ajustes de este dispositivo en la realidad.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Europea del medio ambiente. (2017). La energía y el cambio climático. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2017-configuracion-del-futuro/articulos/la-energia-y-el-cambio-climatico>. (enero, 2023).
- Anderson, J. D., Tannehill, J. C., & Pletcher, R. H. (2016). Computational fluid mechanics and heat transfer (3rd ed.). CRC Press. (julio, 2023).
- Ansys Inc. (2021). ANSYS Fluent. Retrieved from <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. (julio, 2023).
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2015). Discrete-event system simulation (5th ed.). Pearson Education. (julio, 2023).
- Baskar, N. (2022). All About The Convergence Criteria. Recuperado de <https://skill-lync.com/blogs/technical-blogs/cfd-all-about-the-convergence-criteria>. (julio, 2023).
- Bielsa, D. (2022). Almacenamiento por calor sensible. Recuperado de <https://www.norvento.com/blog/almacenamiento-por-calor-sensible/#:~:text=El%20almacenamiento%20por%20calor%20sensible,de%20un%20cuerpo%20aport%C3%A1ndole%20calor>. (enero, 2023)
- Burbano, S. (2014). DISEÑO DE UN MÓDULO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/719/Diseno%20de%20un%20modulo%20de%20intercambiador%20de%20calor%20de%20coraza%20y%20tubos.pdf;sequence=1>. (julio, 2023).
- Cabeza, L., Barreneche, C., Gracia, A., y Fernández, A. (2011). Materiales usados como PCM en almacenamiento de energía térmica. *Energía renovable y sostenible*, 15, 1675-1695. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018. (enero, 2023)
- Cabeza, L. F., Mehling, H., Hiebler, S., & Silva, M. L. (2011). Medium and high temperature thermal energy storage. *Solar Energy*, 85(9), 1906-1920. doi:10.1016/j.solener.2011.04.014 (julio, 2023).
- Celigüeta-Lizarza, J. T. (2011). Método de los elementos finitos para análisis estructural. (julio, 2023).

- Centro de investigación de energía. (2017). Intercambiadores de calor. Recuperado de <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/> (enero, 2023)
- Codecasa, Alessandro, Magnani, Rinaldi and Zampardi. (2014). "Fast novel thermal analysis simulation tool for integrated circuits (FANTASTIC)," 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, Greenwich, UK, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/THERMINIC.2014.6972507. (julio, 2023).
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2012). Thermal Energy Storage: Systems and Applications (2nd ed.). Wiley. (julio, 2023).
- Duque, D. (2011). Condiciones de contorno. Recuperado de <https://dcain.etsin.upm.es/~daniel/ProyectoInvestigador/node27.html> (enero, 2023)
- Energy Information Administration. (2022). Forms of energy. Recuperado de <https://www.eia.gov/energyexplained/what-is-energy/forms-of-energy.php> (enero, 2023)
- Estévez, R. (2021). ¿Cómo almacenar energía? Energía térmica. Recuperado de <https://www.ecointeligencia.com/2021/09/almacenar-energia-termica-4/> (enero, 2023)
- ESSS. (2016). Dinámica de fluidos computacional: ¿Qué es? Recuperado de <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/> (enero, 2023).
- Ferziger, J. H., & Perić, M. (2012). Computational methods for fluid dynamics (3rd ed.). Springer Science & Business Media. (julio, 2023).
- Garcia, E. (2021). Thermal Characterization of Medium-Temperature Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage Using the T-History Method. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8658725/>. (julio, 2023).
- García, J. (2012). Materiales de cambio de fase. Diseño de una instalación para la caracterización de PCM a elevadas temperaturas. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/289972658.pdf> (enero, 2023).
- García, L., Gil, A., Navarro, R., Quintero, P. (2018). Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado. Recuperado de <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%20calidad%20del%20mall....pdf?sequence=1 (julio, 2023).
- García, R. (2021). Intercambiadores de calor. Recuperado de <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>. (julio, 2023).
- Gómez, S. (2017). Mallado y Simulación CFD de Automóvil. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado_y_simulacion_CFD_de_automovil_-_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (agosto, 2023).
- Haya, J. (2007). Transformación y uso eficiente de la energía. Recuperado de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2504/course/section/2589/1-02%20Intercambiadores.pdf>. (julio, 2023).
- Hewitt, G. F., Shires, G. L., & Bott, T. R. (1994). Process Heat Transfer. CRC Press. (julio, 2023).
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2013). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. (julio, 2023).
- Juárez, D; Balart, R; Ferrándiz, S; García, D. (2012). Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de Micro (PCM). Recuperado de <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2012/11/cambio-de-fase.pdf> (enero, 2023).
- Kant, K., Shukla, A., Smeulders, D. M. J., & Rindt, C. C. M. (2021). Performance analysis of a K₂CO₃-based in thermochemical energy storage system using a honeycomb structured heat exchanger. *Journal of Energy Storage*, 38, [102563]. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102563> (julio, 2023).
- Kuron, M. (2015). 3 Criteria for Assessing CFD Convergence. Recuperado de <https://www.engineering.com/story/3-criteria-for-assessing-cfd-convergence> (julio, 2023).
- Labster. (2021). Cambios de fase. Recuperado de https://theory.labster.com/phase_changes-es/ase_changes-es/ (enero, 2023)
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (2014). Simulation modeling and analysis (5th ed.). McGraw-Hill Education. (julio, 2023).

- Lange, M. (2013). Renewable Energy and Water Resources. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00320-8>. (julio, 2023).
- Löhner, R. (2008). Applied computational fluid dynamics techniques: An introduction based on finite element methods. John Wiley & Sons. (julio, 2023).
- Madrid, M. (2020). Mallado de simulación. Recuperado de <https://www.portaldelpetroleo.com/2020/06/mallado-de-simulacion.html> (enero, 2023).
- Maghalseh, M. (2017). Investigate the Natural Convection Heat Transfer in A PCM Thermal Storage System Using ANSYS/FLUENT. Recuperado de <http://jjmie.hu.edu.jo/vol11-4/JJMIE-1206-17-01.pdf>. (julio, 2023).
- Mahfuz, MH., Anisur, MR., Kibria, MA., Saidur, R.; Metselaar, IHSC. (2014). Sistema de almacenamiento de energía térmica con material de cambio de fase (PCM) para aplicaciones de calentamiento solar de agua. Comunicaciones internacionales en materia de transferencia de calor y masa, 57, 132-139. doi: 10.1016 / j.icheatmasstransfer.2014.07.022. (enero, 2023)
- Moreno, J. (2018). Diseño de una instalación experimental para el estudio de sistemas de acumulación de energía solar, basados en la utilización de materiales de cambio de fase. Recuperado de <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/7801/tfgmor>. (enero, 2023)
- Nagano, K. et al. (2003): "Thermal characteristics of manganese (II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems". Applied Thermal Engineering, 23(2), pp. 229-241. (enero, 2023)
- Ortega, I; Gutiérrez, M. (2020). Almacenamiento térmico: El camino hacia la optimización de la gestión energética. Recuperado de <https://cicenergigune.com/es/blog/almacenamiento-termico-optimizar-gestion-energetica#:~:text=Sistemas%20de%20almacenamiento%20de%20calor%20latente,%20evaporaci%C3%B3n%20condensaci%C3%B3n%20o%20sublimaci%C3%B3n>. (enero, 2023).
- Oliver, A., Neila, F., García, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. Recuperado de https://oa.upm.es/19031/1/INVE_MEM_2012_138993.pdf (enero, 2023).

- Patankar, S. V. (2018). *Transferencia numérica de calor y flujo de fluidos* (2ª ed.). CRC Press. (julio, 2023).
- Pérez, J; Merino, M. (2008). *Energía*. Recuperado de <https://definicion.de/energia/>. (diciembre, 2022).
- Pérez, A., Ranero, E., Gastamiza, C. (2020). *Diseño térmico de un intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de metanol*. Recuperado de <http://revistas.uni.edu.ni/index.php/Nexo>. <https://doi.org/10.5377/nexo.v33i02.10807> (enero, 2023)
- Pielichowska, K. y Pielichowski, K. (2014). *Materiales de cambio de fase* *Progreso en ciencia de materiales*, 65, 67–123. doi: 10.1016 / j.pmatsci.2014.03.005. (enero, 2023).
- Prakash, S. (2020). *CFD analysis on heat transfer in a building wall using Phase Change Materials (PCM)*. Recuperado de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/993/1/012017/pdf> (julio, 2023).
- Principe, R. (2017). *Simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de un intercambiador de flujo cruzado*. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/117152/TFG_Giraldo_Vivas_Adria.pdf?sequence=1&isAllowed=y (enero, 2023).
- Pytlik, Beata, Daniel Smykowski, and Piotr Szulc. (2022). *The Impact of Baffle Geometry in the PCM Heat Storage Unit on the Charging Process with High and Low Water Streams*. *Energies* 15, no. 24: 9349. <https://doi.org/10.3390/en15249349> (julio, 2023).
- Qiu Wei, Xia Lingzhi, Yang Lanjun, Zhang Qiaogen, Xiao Lei and Chen Li. (2011). *Experimental Study on the Velocity and Efficiency Characteristics of a Serial Staged Needle Array-Mesh Type EHD Gas Pump*. Recuperado de DOI 10.1088/1009-0630/13/6/11 (julio, 2023).
- Ramírez, F. (2014). *Beneficios reales en simulaciones digitales*. Recuperado de <https://www.mundohvacr.com.mx/2014/12/beneficios-reales-en-simulacionesdigitales/#:~:text=%E2%80%9CLa%20simulaci%C3%B3n%20permite%20obtener%20un,se%20presenten%20defectos%E2%80%9D%2C%20se%20%20B1ala>. (enero, 2023)

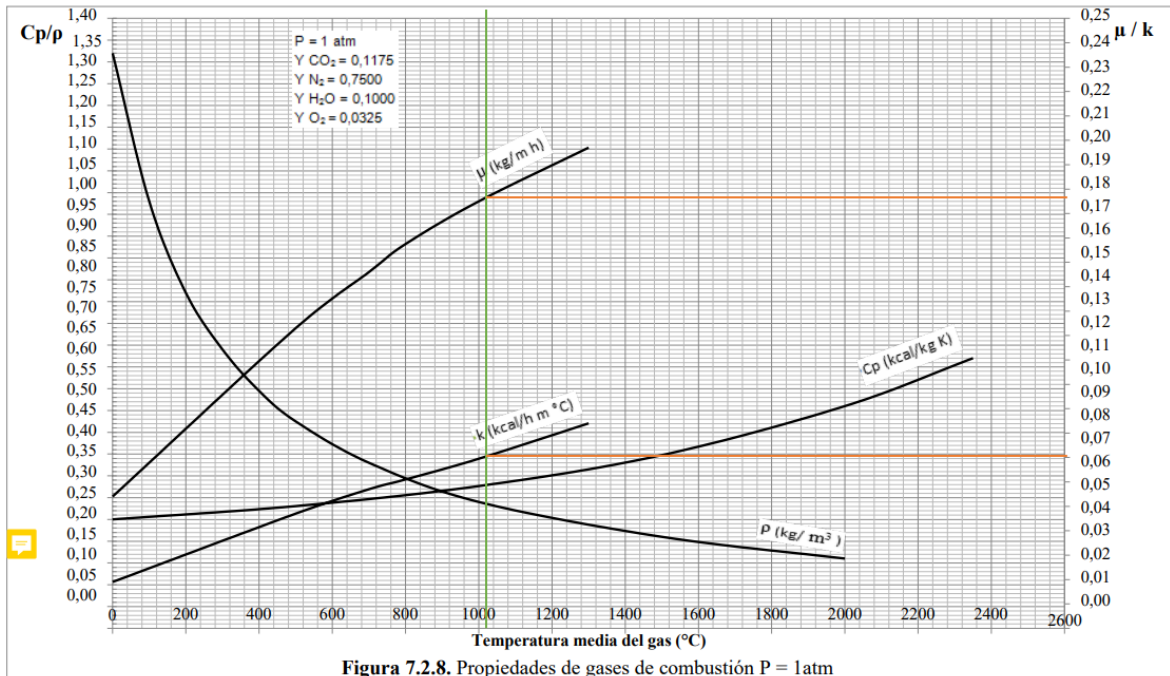
- Rasmussen, Jesper. (2022). Brug for fintælling: 2020 i uhyre tæt opløb med 2019 om dansk vindrekord. Recuperado de <https://energinet.dk/Om-nyheder/Nyheder/2021/01/03/Brug-for-fintaelling-2020-i-uhyre-taet-oploeb-med-2019-om-dansk-vindrekord/> (enero, 2023)
- Raut, D., Londhe, S.m Kalamkar, V. (2022). Performance investigation of latent heat energy storage in series and parallel arrangement: A numerical study. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22016668>. (julio, 2023).
- Ravi, K., Deenoo, P. (2021). Design and Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger using different tubes materials. Recuperado de <https://www.jetir.org/papers/JETIR2107590.pdf>. (agosto, 2023)
- Rodríguez, A. (2018). Energía térmica | Concepto, detalles técnicos y características. Recuperado de <https://como-funciona.co/la-energia-termica/> (enero, 2023)
- Royo, P., Acevedo, L., Ferreira, V., Garcial, T., Sabirón, A. (2019). High-temperature PCM-based thermal energy storage for industrial furnaces installed in energy-intensive industries. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.118>. (julio, 2023).
- Rodríguez, E. (2015). Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y traslúcidas. Recuperado de https://oa.upm.es/40328/1/EDWIN_ISRAEL_RODRIGUEZ_UBINAS.pdf (enero, 2023).
- Rolka, P., Przybylinski, T., Kwizinski, R., Lockowski, M. (2021). The heat capacity of low-temperature phase change materials (PCM) applied in thermal energy storage systems. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.038> (julio, 2023).
- Roos, C. (2008). Principles of Heat Transfer. Recuperado de https://www.energy.wsu.edu/documents/aht_principles%20of%20heat%20transfer.pdf. (julio, 2023).
- Sari, A., & Karaipekli, A. (2007). A review of phase change materials for solar thermal energy storage applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1034-1064. doi:10.1016/j.rser.2005.08.001 (julio, 2023).

- Scyoc, M. (2020). Tutorial de Ansys Fluent: todo lo que necesitas saber. Recuperado de <https://sunglass.io/tutorial-de-ansys-fluent-todo-lo-que-necesitas-saber/> (enero, 2023).
- Shamoon, T., & Abed, F. H. (2018). Computational fluid dynamics (CFD) simulation in the design process of centrifugal compressors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 11, 1-15. doi: 10.1016/j.csite.2018.02.004 (julio, 2023).
- Spatial, T. (2022). What is meshing?. Recuperado de <https://blog.spatial.com/what-is-meshing-optimization#:~:text=The%20Importance%20of%20Meshing%20in%20CFD%20and%20FEA&text=Meshing%20is%20important%20because%20it,performant%20the%20simulation%20will%20be.> (julio, 2023).
- Stadler, M. (2021). Ansys Fluent Brochure. Recuperado de <https://www.ansys.com/content/dam/product/fluids/fluent/ansys-fluent-brochure-140.pdf> (enero, 2023).
- Tec-science. (2020). Thermal conduction in solids and ideal gases. Recuperado de <https://www.tec-science.com/thermodynamics/heat/thermal-conduction-in-solids/>. (agosto, 2023)
- Thompson, J. F., Soni, B. K., & Weatherill, N. P. (2016). *Handbook of grid generation*. CRC Press. (julio, 2023).
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education Limited. (julio, 2023).
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283. doi:10.1016/s1359-4311(02)00192-8. (julio, 2023).
- Zannini, Carlo. (2013). *Electromagnetic Simulation of CERN Accelerator Components and Experimental Applications*. Recuperado de <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-5737> (julio, 2023).
- Zwick, D; Muskulus, M. (2014). The simulation error caused by input loading variability in offshore wind structural analysis. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/we.1767> (julio, 2023).

5 ANEXOS

ANEXO I

OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN



ANEXO II

FIGURAS DE LAS PRUEBAS DE SIMULACIÓN

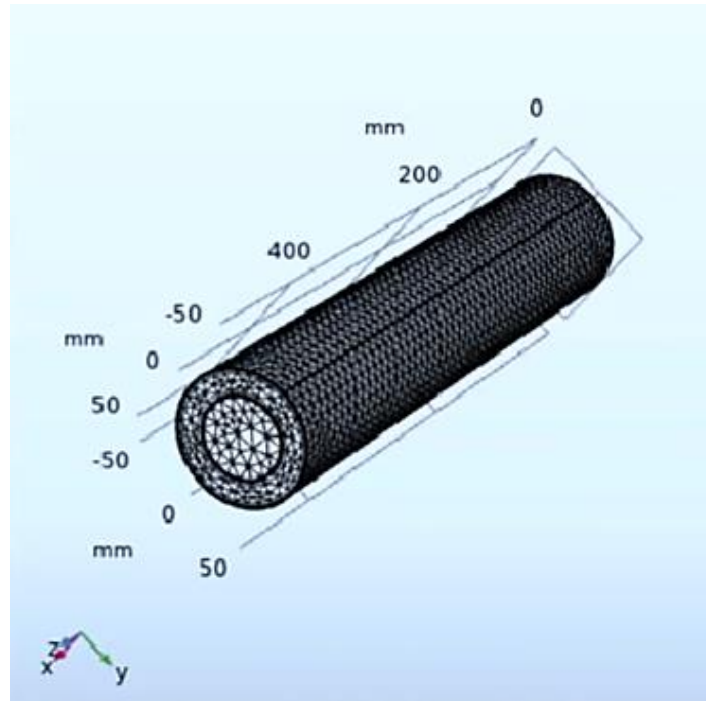


Figura A1.1 Mallado Computacional para la prueba en COMSOL Multiphysics.

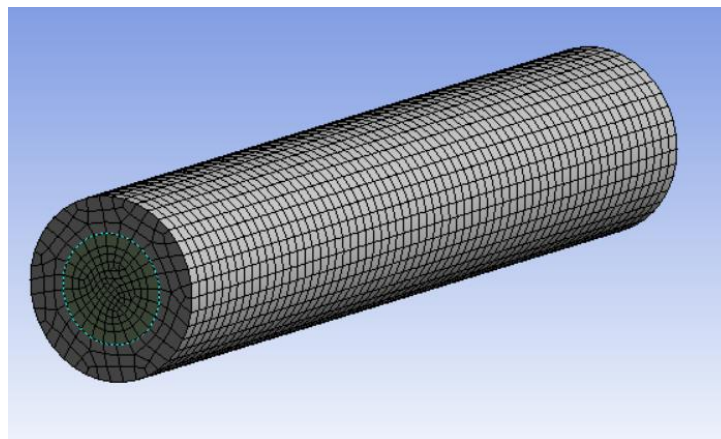


Figura A1.2 Mallado Computacional para la prueba en ANSYS Fluent.

ANEXO III

FIGURAS DEL MALLADO

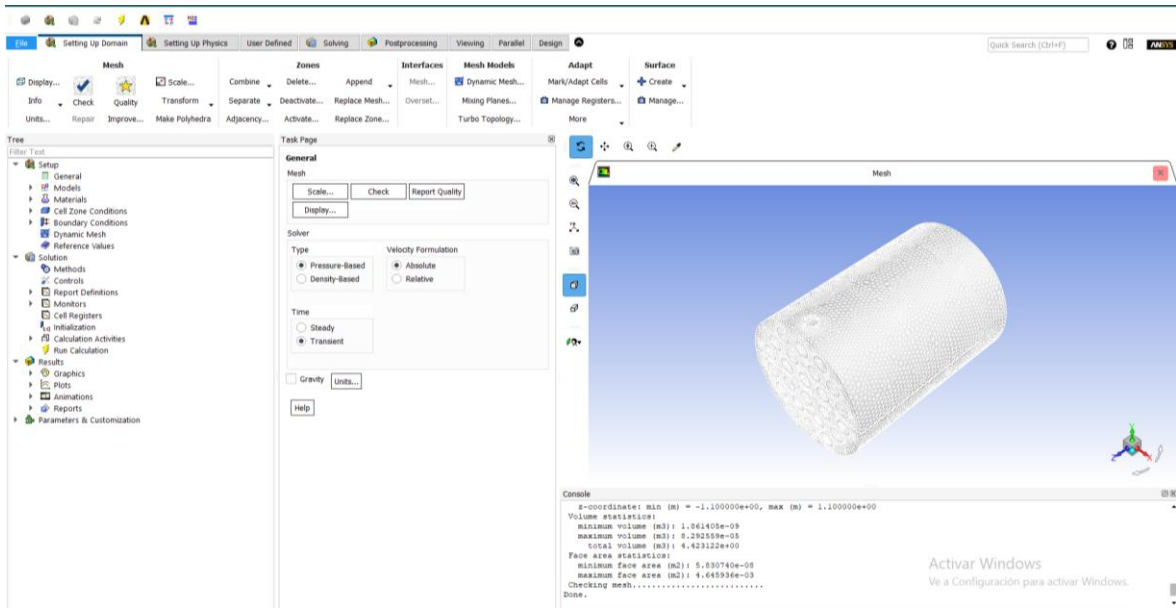


Figura AII.1 Resultados del Mallado Computacional para la simulación definitiva en ANSYS Fluent.

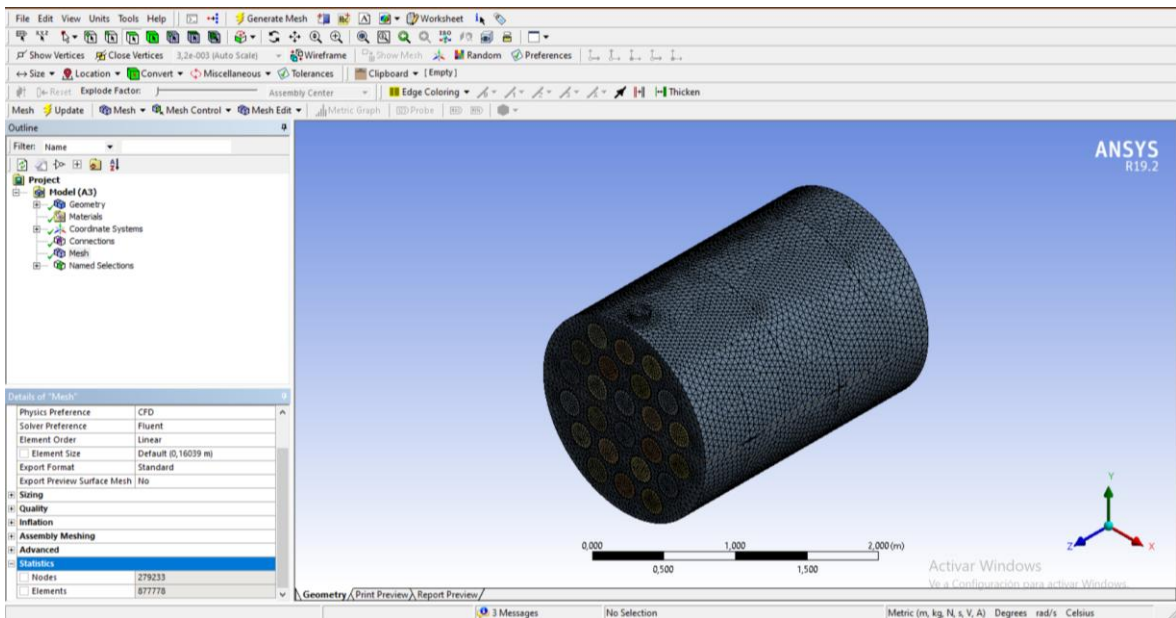


Figura AII.2 Resultados del Mallado Computacional para la simulación definitiva en ANSYS Fluent (Nodos y Elementos).

ANEXO IV

FIGURAS DE LA SIMULACIÓN

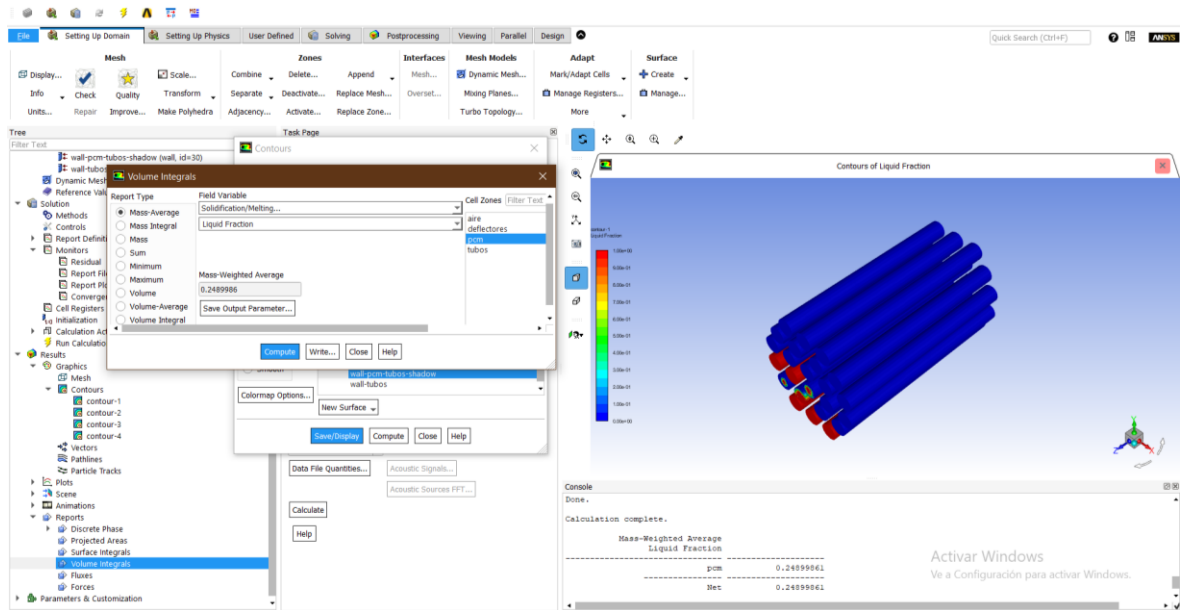


Figura AIV.1 Resultados de la simulación Prueba 1 descarga

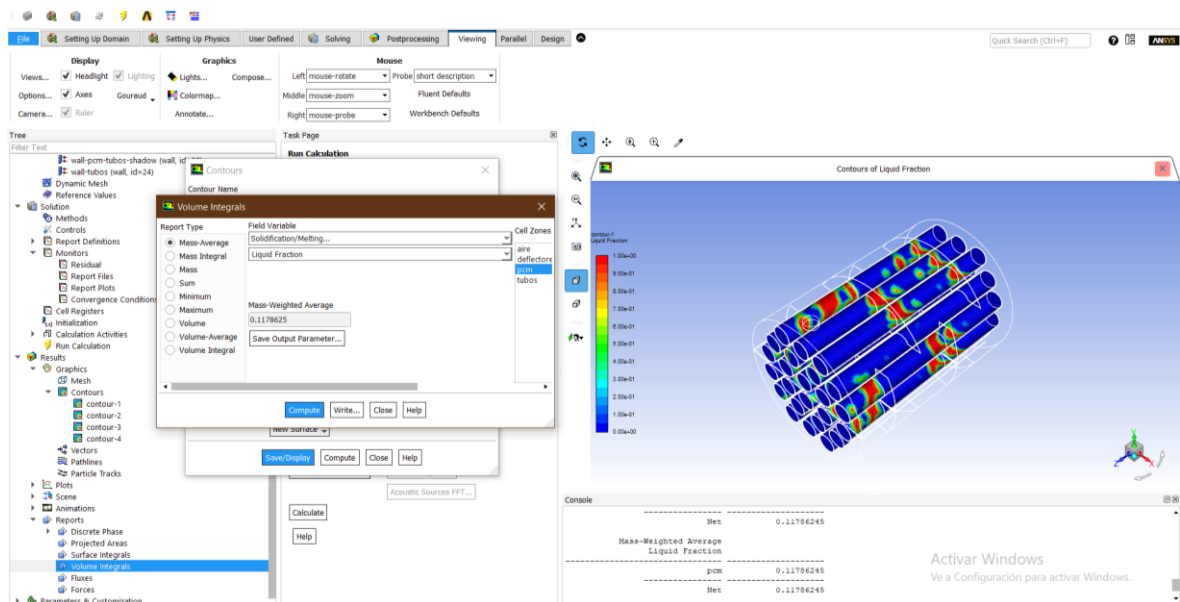


Figura AIV.2 Resultados de la simulación Prueba 2 descarga

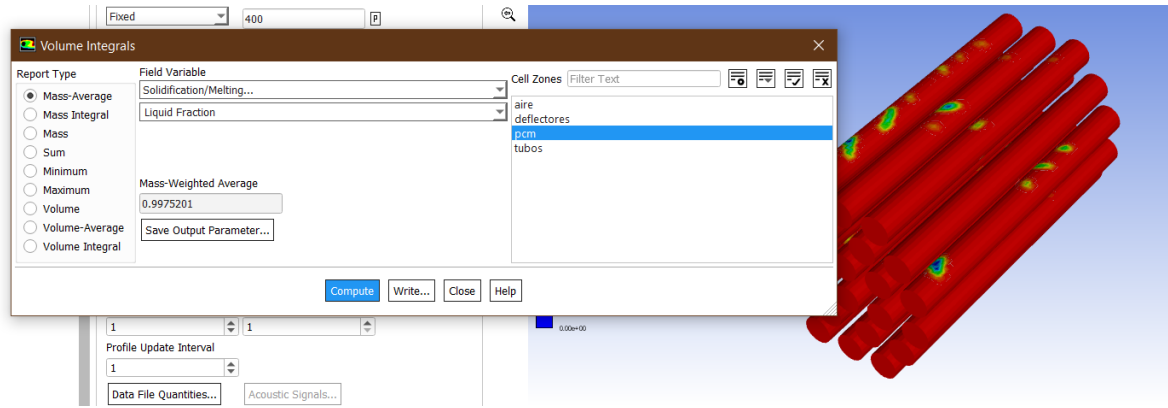


Figura AIV.3 Resultados de la simulación Prueba 1 carga

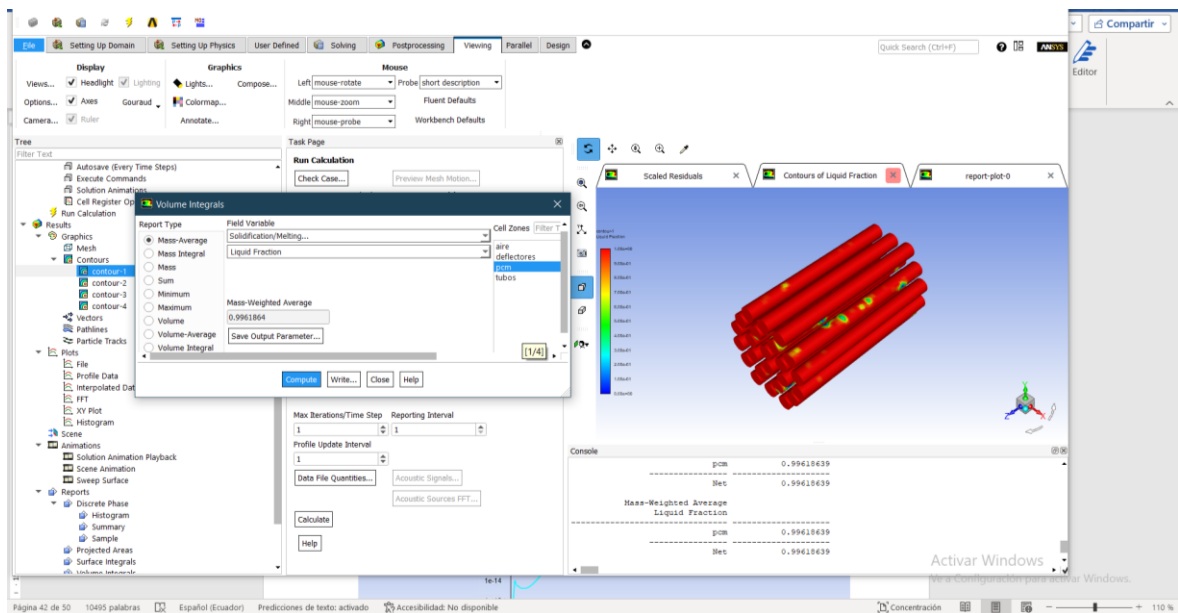


Figura AIV.4 Resultados de la simulación Prueba 2 carga

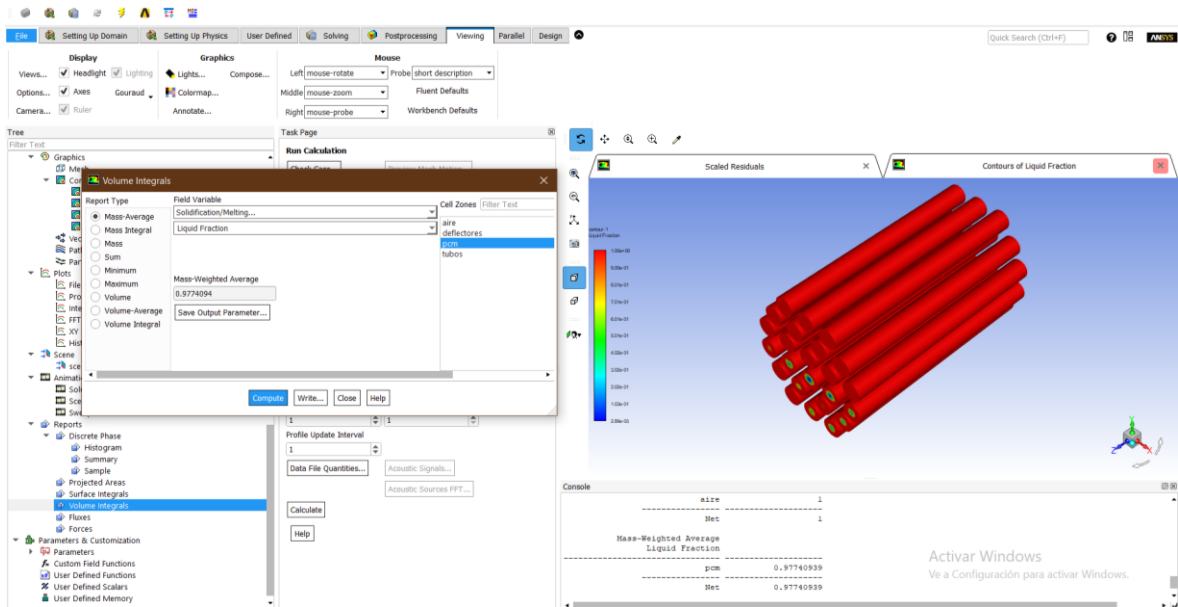


Figura AIV.5 Resultados de la simulación Prueba 3 carga