



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERIA QUÍMICA

**APLICACIÓN DE MODELOS CFD EN UN INTERCAMBIADOR
DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA COMO COMPLEMENTO
DIDÁCTICO DE LA CÁTEDRA DE TRANSFERENCIA DE CALOR
DE IQ-ESPOCH**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR(A)/(ES):

LUIS ADRIÁN CRESPO ASANZA

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**APLICACIÓN DE MODELOS CFD EN UN INTERCAMBIADOR
DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA COMO COMPLEMENTO
DIDÁCTICO DE LA CÁTEDRA DE TRANSFERENCIA DE CALOR
DE IQ-ESPOCH**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR(A)/(ES): LUIS ADRIÁN CRESPO ASANZA
DIRECTOR(A): ING. DANIEL ANTONIO CHUQUIN VASCO

Riobamba – Ecuador

2023

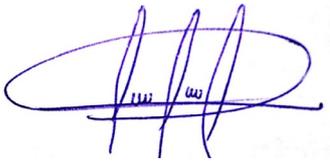
© 2023, Luis Adrián Crespo Asanza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Luis Adrián Crespo Asanza, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 06 de diciembre de 2023

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized oval shape with three vertical strokes extending upwards from the center, and a horizontal line crossing through the middle of the oval.

Luis Adrián Crespo Asanza

070700372-9

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto Técnico, **APLICACIÓN DE MODELOS CFD EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA COMO COMPLEMENTO DIDÁCTICO DE LA CÁTEDRA DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE IQ-ESPOCH**, realizado por el señor: **CRESPO ASANZA LUIS ADRIÁN**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. César Arturo Puente Guijarro Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



23-12-06

Ing. Daniel Antonio Chuquín Vasco Mgs.
DIRECTOR(A) DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



23-12-06

Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy Mgs.
ASESOR(A) DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



23-12-06

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, junto con las largas horas de estudio y sacrificio que me llevaron a este punto, a toda mi familia. Especialmente a mis padres, Marco y Verónica, así como a mis hermanos, Marco y Juan Pablo, que son y serán la base sobre la que se forjan todos mis sueños y sin quienes no hubiese tenido sentido este trayecto. A mi novia, Lisbeth, mi compañera en este viaje, la persona que me ayuda a encontrar el equilibrio y a contemplar la vida desde otra perspectiva. Paso a paso construiremos nuestro camino, este logro solo es el principio.

Luis Adrián

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros sentimientos de gratitud van dirigidos hacia cada una de las personas que formaron parte positiva de mi estancia en esta noble institución, aquellos que han ayudado a crear un sinnúmero de experiencias que me hicieron crecer, no solo en el ámbito académico, sino, lo que es aún más significativo, como ser humano. Brindándome la oportunidad de acercarme, cada día más, a la persona en la que aspiro convertirme.

Un agradecimiento especial al director de este trabajo de integración curricular, Ing. Daniel Chuquín, por siempre haber estado dispuesto a compartir de su tiempo y conocimiento para el desarrollo del mismo. Por último, a un gran amigo, Jose Rey, que estuvo en el primer y último día de esta travesía y sirvió de apoyo en muchos momentos complicados.

Luis Adrián

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XII
RESUMEN.....	XIII
SUMMARY / ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes de investigación	5
2.1.1. <i>Modelos CFD aplicados como una herramienta complementaria de aprendizaje</i>	5
2.1.2. <i>CFD para el estudio de procesos en la ingeniería química</i>	6
2.1.3. <i>CFD para la simulación de intercambiadores de calor</i>	7
2.2. Referencias teóricas	9
2.2.1. Conceptos básicos de transferencia de calor	9
2.2.1.1. <i>Calor</i>	9
2.2.1.2. <i>Principio de conservación de energía</i>	9
2.2.1.3. <i>Métodos de transferencia de calor</i>	10
2.2.2. Intercambiadores de calor	12
2.2.2.1. <i>Clasificación de los intercambiadores de calor</i>	13
2.2.2.2. <i>Intercambiador de calor de tubos y coraza</i>	16
2.2.2.3. <i>Coeficiente total de transferencia de calor</i>	19
2.2.2.4. <i>Diseño de un intercambiador de calor</i>	20
2.2.3. Dinámica de fluidos computacional	23

2.2.3.1.	<i>Principios básicos de la dinámica de fluidos computacional</i>	23
2.2.3.2.	<i>Discretización</i>	26
2.2.3.3.	<i>Mallado</i>	28
2.2.3.4.	<i>ANSYS® Fluent</i>	29

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	30
3.1.	Materiales	30
3.2.	Metodología empleada	31
3.3.	Modelado	31
3.3.1.	<i>Revisión bibliográfica</i>	31
3.3.2.	<i>Generación de geometría</i>	32
3.3.3.	<i>Descripción de la geometría</i>	33
3.4.	Mallado	33
3.4.1.	<i>Selección del tipo de malla</i>	33
3.4.2.	<i>Generación de la malla</i>	34
3.4.3.	<i>Calidad del mallado</i>	35
3.5.	Simulación	36
3.5.1.	<i>Condiciones de frontera</i>	36
3.5.2.	<i>Modelo de turbulencia</i>	37
3.5.3.	<i>Propiedades del fluido</i>	37
3.5.4.	<i>Visualización y validación de resultados</i>	38
3.6.	Metodología para la práctica	38

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS	39
4.1.	Modelo	39
4.2.	Mallado	39
4.3.	Simulación	42
4.4.	Metodología para la práctica	50
4.4.1.	<i>Guía de práctica de transferencia de calor</i>	50

CONCLUSIONES	51
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	53
------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Materiales empleados en la realización del proyecto.	30
Tabla 3-2: Descripción de la literatura consultada.....	32
Tabla 3-3: Parámetros geométricos y de diseño del intercambiador de calor.....	33
Tabla 3-4: Práctica de simulación numérica para la cátedra de transferencia de calor.....	38
Tabla 4-1: Número de iteraciones empleadas en la simulación.....	42
Tabla 4-2: Resultados del análisis CFD.....	44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: (a) Un paso por coraza y tubos; (b) un paso por coraza y dos por tubos	16
Ilustración 2-2: (a) Tubo de evaporador; (b) tubo de condensador	17
Ilustración 2-3: Estructura de los deflectores de varilla	18
Ilustración 2-4: Resistencias térmicas	19
Ilustración 2-5: (a) Volumen de control finito; (b) elemento de fluido infinitesimal.....	24
Ilustración 2-6: Tipos de elementos y dimensionalidad	27
Ilustración 3-1: Diagrama metodológico para el desarrollo del proyecto	31
Ilustración 3-2: Modelo del intercambiador de calor de tubos y coraza	32
Ilustración 3-3: Mallado no estructurado seleccionado para el modelo	34
Ilustración 3-4: Selección de la pared de la coraza para el mallado.....	34
Ilustración 3-5: Características de malla generada.....	35
Ilustración 3-6: Vista de la malla en una de las caras del intercambiador.....	35
Ilustración 3-7: Recomendaciones de ANSYS® para las métricas de malla	36
Ilustración 3-8: Propiedades del agua para la simulación en ANSYS®	37
Ilustración 4-1: Modelo 3D del intercambiador de calor desarrollado en ANSYS®	39
Ilustración 4-2: Detalle de la oblicuidad del mallado.....	40
Ilustración 4-3: Elementos de oblicuidad menores a 0.25.....	40
Ilustración 4-4: Oblicuidad vs número de elementos en el dominio	40
Ilustración 4-5: Detalle de la calidad ortogonal del mallado.....	41
Ilustración 4-6: Elementos con calidad ortogonal mayor a 0.88	41
Ilustración 4-7: Calidad ortogonal vs número de elementos en el dominio	42
Ilustración 4-8: Valores de residuales	43
Ilustración 4-9: Líneas de flujo de velocidad (1 kg/s).....	45
Ilustración 4-10: Líneas de flujo de velocidad del modelo de bibliografía	45
Ilustración 4-11: Contorno de temperatura del modelo (1 kg/s)	46
Ilustración 4-12: Contorno de presión del modelo (1 kg/s).....	46
Ilustración 4-13: Líneas de flujo de velocidad para los 3 casos	47
Ilustración 4-14: Contornos de temperatura del modelo en los 3 casos	48
Ilustración 4-15: Contornos de presión del modelo en los 3 casos	49

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: MODELO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL ACOTADO

ANEXO B: GUÍA DE PRÁCTICA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

RESUMEN

La transferencia de calor es una de las áreas de estudio principales en la formación profesional de un ingeniero químico, y los intercambiadores de calor son objeto de esta rama de la ciencia. Dada la poca accesibilidad a estos dispositivos que existe en el medio, la dinámica de fluidos computacional constituye una alternativa a tener en cuenta. Por esta razón, en el presente proyecto se busca la aplicación de un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en un intercambiador de calor de tubos y coraza con el objetivo de que sirva como complemento didáctico para los estudiantes de la cátedra de transferencia de calor. Con base en una búsqueda bibliográfica y utilizando el software ANSYS® 2023 R2 se modeló y simuló con precisión los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el interior de un intercambiador de calor de tubos y coraza, brindando una aproximación realista de manera virtual del funcionamiento de este dispositivo. Para una representación minuciosa del régimen de flujo, se escogió el modelo de turbulencia k-ε realizable, ya que fue el que presentó mejores resultados y se ajustó mejor a los recursos computacionales disponibles. Los resultados de la simulación numérica, además de ayudar a profundizar en el entendimiento de la transferencia de calor, sustentan la elaboración de guías de práctica que sirvan como un recurso adicional de aprendizaje para que los estudiantes lleven a la práctica los conocimientos teóricos. Este estudio reafirma la importancia de la simulación numérica como un instrumento didáctico de mucha utilidad que ayuda a sortear las barreras propias del estudio de asignaturas fundamentales en el crecimiento académico de los estudiantes de la carrera de ingeniería química, permitiéndoles tener una preparación integral de cara a una futura aplicación de los conocimientos teóricos en un ambiente práctico.

Palabras clave: <CFD>, <INTERCAMBIADOR DE CALOR>, <TRANSFERENCIA DE CALOR>, <ANSYS>, <GUÍA DE PRÁCTICA>.

0154-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

Heat transfer is one of the main areas of study in the professional training of a chemical engineer, and heat exchangers are the subject of this branch of science. Given the limited accessibility of these devices in the environment, computational fluid dynamics is an alternative to be considered. For this reason, this project deals with the application of a Computational Fluid Dynamics (CFD) model in a shell and tube heat exchanger in order to serve as a didactic complement for the students of the heat transfer course. Based on literature research and using ANSYS® 2023 R2 software, the heat transfer phenomena that occur inside a shell and tube heat exchanger were accurately modeled and simulated, providing a realistic approximation of the operation of this device in a virtual way. For a detailed representation of the flow regime, the k- ϵ realizable turbulence model was chosen, since it was the one that presented the best results and was better adjusted to the available computational resources. The results of the numerical simulation, not only help to deepen the understanding of heat transfer but also support the development of practice guides that serve as an additional learning resource for students to put theoretical knowledge into practice. This study reaffirms the importance of numerical simulation as a very useful teaching tool that helps to overcome the barriers of the study of fundamental subjects in the academic growth of students of chemical engineering, allowing them to have a comprehensive preparation for a future application of theoretical knowledge in a practical environment.

Keywords: <CFD>, <HEAT EXCHANGER>, <HEAT TRANSFER>, <ANSYS>, <PRACTICE GUIDE>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es una disciplina clave en la carrera de Ingeniería Química, y es esencial para el diseño y operación de equipos y procesos industriales. En este contexto, la aplicación de modelos CFD (dinámica de fluidos computacional) en la simulación de intercambiadores de calor se ha convertido en una herramienta muy útil para el análisis del comportamiento de los fluidos y la transferencia de calor.

El objetivo de esta tesis es aplicar modelos CFD en un intercambiador de calor de tubos y coraza como complemento didáctico de la cátedra de transferencia de calor de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Se establecerán las ecuaciones y condiciones de diseño del intercambiador de calor, se modelará mediante un software CAD y se simulará mediante CFD con la ayuda del software ANSYS® Fluent.

El resultado final será la elaboración de una guía de práctica de simulación numérica para la cátedra de transferencia de calor, lo que permitirá a los estudiantes adquirir conocimientos y habilidades en el diseño y análisis de intercambiadores de calor mediante la simulación numérica. Esta investigación tendrá un impacto positivo en la formación de los estudiantes de Ingeniería Química, ya que les permitirá aplicar sus conocimientos teóricos en la solución de problemas reales en el campo de la transferencia de calor.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

La dinámica de fluidos computacional es la disciplina que consiste en la predicción del flujo de fluidos, transferencia de masa y calor, reacciones químicas, y fenómenos relacionados mediante la resolución numérica de un conjunto de ecuaciones matemáticas que gobiernan estos fenómenos (conservación de masa, energía y cantidad de movimiento). El CFD representa una herramienta importante en el estudio del comportamiento de equipos que involucran el flujo de fluidos, como intercambiadores de calor, permitiendo la resolución y el análisis de problemas mediante métodos numéricos y algoritmos (Mrope et al. 2021, p. 1). Los modelos CFD han sido usados a lo largo de los años para predecir el comportamiento del flujo de fluidos por medio de aproximaciones que resuelven ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo. Estas predicciones normalmente ocurren bajo condiciones definidas en términos de geometría de flujo, las propiedades físicas de un fluido y las condiciones iniciales y de contorno de un campo de flujo (Hu 2012, pp. 421–422).

Los intercambiadores de calor son usados para transferir energía térmica desde un fluido de alta temperatura hacia un fluido de baja temperatura moviéndose a través de un dispositivo, es decir, existe un flujo de fluidos interno. La temperatura del fluido cambia a medida que este se conduce a través del dispositivo de intercambio de calor y, por lo tanto, la temperatura de la pared divisoria entre el fluido también cambia a lo largo del intercambiador de calor (Bhanuchandrarao et al. 2013, p. 2782). Por su naturaleza, estos dispositivos son objeto de estudio primordial en la cátedra de transferencia de calor y su análisis suele regirse bajo condiciones que no estimulan el aprendizaje, esto debido a que en la ESPOCH no existe un instrumento por el cual se pueda experimentar y analizar por medios reales el comportamiento de un intercambiador. La facultad de Ciencias no dispone, en ninguno de sus laboratorios, de un intercambiador de calor que permita poner en práctica el conocimiento teórico que se adquiere en la cátedra sobre el diseño de estos equipos, lo que ha generado la necesidad de buscar soluciones alternativas que integren el conocimiento.

Bajo este prisma, este trabajo plantea la aplicación de modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) en un intercambiador de calor de tubos y coraza, elaborando una guía de práctica enfocada a la asignatura de transferencia de calor que permita a los estudiantes de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo complementar su estudio

teórico y tener una aproximación más cercana al mundo real gracias a la visualización en 3D mediante el software ANSYS® Fluent.

1.2. Justificación

La ciencia, de la mano con la tecnología, ha avanzado a pasos agigantados durante, por lo menos, el último siglo, lo que implica que la ingeniería, al ser una disciplina que aplica los conocimientos tanto científicos como tecnológicos, se haya visto beneficiada por estos avances. En los últimos años, el surgimiento de los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) ha representado una de las nuevas herramientas más interesantes para el desarrollo de la ingeniería, ya que ha permitido visualizar una aproximación bastante apegada a la realidad de estructuras que contienen flujo de fluidos, así como su análisis con base en las variables más representativas como la temperatura, presión, velocidad, entre otras (Golshan et al. 2020, p. 3). En la transferencia de calor, siendo un fenómeno esencial en la formación ingenieril, los modelos CFD pueden convertirse en un componente muy utilitario a la hora del estudio de, por ejemplo, los intercambiadores de calor, ya que posibilitan el acceso a un análisis detallado de las variables de diseño de un dispositivo de este tipo, sin necesidad de contar con un intercambiador real (Stramana et al. 2014, p. 2).

Moltó & Parra, (2014, pp. 50–52) plantean la utilización de modelos CFD como punto de partida para el aprendizaje, apoyando la adquisición de los contenidos iniciales con los conocimientos de la CFD, que tradicionalmente se ubican cronológicamente después. No pretenden que el alumno adquiera conocimientos de CFD, sino cubrir tres objetivos: 1) asumir la validez de la CFD como método de representación para acercarse al conocimiento del funcionamiento interior de un intercambiador de calor, 2) tener la capacidad de interpretar gráficas de sus resultados, relacionándolas con lo que podría estar ocurriendo en el interior de un sistema real y 3) que la interpretación del alumno le sirva para consolidar conceptos y fomentar la visualización mental tridimensional que exigen estos sistemas mecánicos.

Es por esto por lo que la aplicación de la modelación de dinámica de fluidos computacional (CFD) como complemento didáctico de la cátedra de transferencia de calor se justifica con base en la falta de un enlace teórico-experimental en el estudio del diseño de intercambiadores de calor, además de servir como alternativa a la carencia de un equipo de laboratorio que cubra esta necesidad. Este proyecto de titulación es contemplado en la línea de investigación de Procesos, Tecnológico e Industrial de la carrera de Ingeniería Química y del Grupo de Investigación en Seguridad Ambiente e Ingeniería de la ESPOCH, “GISAI”.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Aplicar modelos CFD en un intercambiador de calor de tubos y coraza como complemento didáctico de la cátedra de transferencia de calor de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Establecer las ecuaciones y condiciones de diseño del intercambiador de calor.
- Modelar mediante un software CAD un intercambiador de calor de tubos y coraza.
- Simular mediante CFD, con la ayuda del software ANSYS® Fluent, el comportamiento del intercambiador de calor de tubos y coraza.
- Elaborar la guía de práctica de simulación numérica para la cátedra de transferencia de calor.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

2.1.1. *Modelos CFD aplicados como una herramienta complementaria de aprendizaje*

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha convertido en un componente de la vida profesional en la práctica de la ingeniería y para preparar a los estudiantes adecuadamente, deben exponerse a todos los aspectos de la profesión que eligieron. Adair, Bakenov, Jaeger, (2014, pp. 1–3) describen el desarrollo, implementación y evaluación de un plan de estudios adecuado para que los estudiantes utilicen la dinámica de fluidos computacional (CFD) como una extensión de sus conocimientos y habilidades de ingeniería química en el nivel intermedio de pregrado, y los resultados de la evaluación basados en experimentos de habilidades y conocimientos previos y posteriores, y los resultados de encuestas a estudiantes documentan resultados de aprendizaje exitosos y la efectividad del enfoque.

Por su parte, Solmaz & Van Gerven, (2022, pp. 1–30) presentan en su estudio un entorno de aprendizaje digital fácil de usar con simulaciones de dinámica de fluidos computacionales interactivas para la educación superior en ingeniería química. Introducen una red cliente-servidor para mantener una conexión bidireccional automatizada entre múltiples solucionadores de CFD y un motor de juego como herramienta de desarrollo multiplataforma. Desde aplicaciones de escritorio hasta aplicaciones de realidad virtual, múltiples plataformas digitales se demuestran dentro de un estudio de caso. Implementan un modelo educativo centrado en tareas para diseñar entornos de aprendizaje digitales relacionados con habilidades complejas que deben desarrollar los alumnos. Las discusiones se basan en la aplicabilidad del sistema y también en la integridad de las prácticas de enseñanza tradicionales.

Stern et al., (2006, pp. 63–83) diseñaron un plan de estudios para su uso en diferentes universidades con diferentes cursos/laboratorios, objetivos de aprendizaje, aplicaciones, condiciones y notas de ejercicios. Describen una interfaz educativa CFD para la experiencia práctica de los estudiantes, que refleja la práctica real de la ingeniería. Su interfaz educativa enseña la metodología y los procedimientos de CFD a través de una implementación interactiva paso a paso que automatiza el proceso de CFD. Un sistema jerárquico de opciones activas predefinidas facilita el uso en niveles introductorio e intermedio, fomenta el autoaprendizaje y facilita la transición al uso de códigos CFD industriales. Una evaluación independiente documentó los resultados de aprendizaje

exitosos y confirmó la efectividad de la interfaz para los estudiantes en cursos de mecánica de fluidos introductorios e intermedios.

2.1.2. CFD para el estudio de procesos en la ingeniería química

Aunque las simulaciones en tiempo real requerirán un progreso sustancial en la precisión, la capacidad y la eficiencia de los modelos numéricos, los desarrollos futuros podrían presagiar una nueva era de la llamada realidad virtual para la ingeniería de procesos, que presenta simulaciones interactivas en lugar de estudios de escalado experimental paso a paso y métodos empíricos de prueba y error costosos. Alobaid et al., (2022, pp. 3–23) proporcionan un importante conjunto de conocimientos sobre el desarrollo de modelos matemáticos CFD y cómo se pueden aplicar en varios sistemas de lecho fluidizado, muy usados en la ingeniería química. La revisión se divide en tres partes principales. La primera parte (modelado matemático) describe los modelos numéricos de última generación de flujos gas-sólido y sus suposiciones fundamentales. La segunda parte (estudios de vanguardia) se centra en cómo estos modelos numéricos se aplican a los sistemas de lecho fluidizado utilizados en la ingeniería de procesos químicos y energéticos. Los pros y los contras de aplicar modelos CFD a sistemas de lecho fluidizado se estudian y evalúan con base en la literatura existente. La tercera parte (conclusión y perspectivas) destaca que la dinámica de fluidos computacional es una herramienta poderosa que permite tanto a los investigadores como a los profesionales obtener información valiosa y una comprensión del sistema de lecho fluidizado.

Con el aumento de los recursos computacionales, el número de publicaciones sobre dinámica de fluidos computacional acoplada al método de elementos discretos está aumentando en los últimos años. Esta técnica es muy útil, especialmente en la simulación de flujos fluido-sólido en ingeniería de procesos. Golshan et al., (2020, p. 3-32) proporcionan una introducción al modelado CFD-DEM en sistemas de ingeniería de procesos, incluida la transferencia de calor y masa y fuerzas de largo alcance, y revisa las principales investigaciones en simulación de procesos de dos fases, como secado, recubrimiento, granulación, cristalización, reacciones químicas (incluyendo combustión, gasificación y pirólisis) y mezcla. Los detalles de la implementación de CFD-DEM sin resolver en estas aplicaciones se explican en detalle y se analizan las principales suposiciones y hallazgos.

En la ingeniería de petróleo, los estudios de CFD y método de elementos discretos (DEM) se han realizado para ayudar a explicar el mecanismo y predecir el flujo de los fluidos en diversas condiciones de trabajo. Teniendo en cuenta esta aproximación, Wang et al., (2023, pp. 1–3) revisaron el progreso en las simulaciones de acoplamiento CFD-DEM en la industria de petróleo al resumir los modelos y las aplicaciones relevantes. Revisan diferentes esquemas de acoplamiento y sus

problemas de ingeniería petrolera aplicables. También discuten las necesidades de futuras investigaciones. Planteándolo como algo útil para los investigadores que son nuevos en la simulación numérica de flujo de partículas en el método CFD-DEM para acortar el ciclo de aprendizaje y mejorar la eficiencia de la resolución de problemas.

También relacionado con la industria de los combustibles fósiles, como parte de un esfuerzo por comprender las condiciones de almacenamiento de combustible durante un período de 50 años, Abboud, (2023, pp. 1–3) construyó un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) tridimensional de los botes sin sellar llenos de combustible gastado en la instalación de almacenamiento. Este modelo CFD se combina con reacciones químicas radiolíticas asociadas con el vapor de agua y otras especies. El modelo acoplado se simula en un rango de parámetros de sensibilidad para el calor de descomposición del combustible, la humedad relativa y el espesor de la película de oxihidróxido para combustible sin secar y totalmente seco. El parámetro más importante fue el calor de decaimiento inicial del combustible. En el rango de casos, las concentraciones de hidrógeno y ácido nítrico son lo suficientemente bajas como para que no se espere un impacto significativo.

2.1.3. CFD para la simulación de intercambiadores de calor

Año tras año, la tecnología de intercambiadores de calor crece para desarrollar intercambiadores de calor eficientes, compactos y económicos en todo el mundo. En la actualidad, se utilizan intercambiadores de calor de tubos concéntricos con convección forzada para bajar la temperatura del fluido de trabajo elevando la temperatura del medio refrigerante. Dhoria et al., (2018, pp. 20–25) utilizaron el software ANSYS® Fluent 17.1 y cálculos teóricos para analizar las caídas de temperatura en función de ambas entradas, la velocidad y la temperatura de entrada y cómo varía cada uno con el otro. Cada modelo de intercambiador de calor fue diseñado y simulado para modelos de intercambiador de calor de flujo paralelo y contraflujo. Los resultados se compararon entre intercambiadores de calor paralelos y de contraflujo. Utilizaron el análisis CFD para encontrar las temperaturas de salida de los intercambiadores de calor paralelos y de contraflujo para la velocidad de entrada y la temperatura de entrada del medio fluido utilizado. Estos valores de temperatura de salida obtenidos se utilizaron para determinar el coeficiente global de transferencia de calor. Los cálculos teóricos se realizaron mediante los valores obtenidos a través del experimento realizado en la configuración del intercambiador de calor tanto para flujo paralelo como en contracorriente.

Aslam Bhutta et al., (2012, pp. 1–10) desarrollaron una revisión literaria centrada en las aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en el campo de los intercambiadores de calor.

Encontraron que el CFD se ha empleado para las siguientes áreas de estudio en varios tipos de intercambiadores de calor: mala distribución del flujo de fluido, ensuciamiento, caída de presión y análisis térmico en la fase de diseño y optimización. Adoptaron diferentes modelos de turbulencia disponibles en herramientas CFD comerciales de uso general junto con esquemas de acoplamiento de velocidad-presión. La calidad de las soluciones obtenidas de estas simulaciones se encontró en gran medida dentro del rango aceptable, lo que demostró que CFD es una herramienta eficaz para predecir el comportamiento y el rendimiento de una amplia variedad de intercambiadores de calor.

Aridi et al., (2022, p. 1) analizaron el rendimiento de la transferencia de calor utilizando un generador de vórtice (VG) trapezoidal en un intercambiador de calor de tubos concéntricos a través de un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) por medio de ANSYS® Fluent. Realizaron el análisis de transferencia de calor y flujo de fluidos para varios números de Reynolds dentro del tubo y el anular. El análisis se realizó en cuatro diseños, donde las VG se colocan en tres ubicaciones diferentes. Los resultados muestran que la mayor mejora se detectó en el caso 1 (VG dentro del tubo) con número de Reynolds de 8000 para el fluido frío y el número de Reynolds de 2000 para el agua caliente, donde la mejora de la relación de transferencia de calor fue de 97 % para el caso 1, 92% para el caso 2 y 56% para el caso 3, mientras que el factor de mejora térmica fue de 210% para el caso 1, 180% para el caso 2 y 142% para el caso 3.

Los intercambiadores de calor juegan un papel importante en la ingeniería porque transfieren calor entre dos corrientes de flujo y temperaturas diferentes. Hay varios diseños de intercambiadores de calor según la construcción, el tamaño y la dirección de los flujos de fluidos. Se requiere un análisis adecuado antes de seleccionar el intercambiador de calor adecuado para la aplicación específica con buenas características de transferencia de calor. Arshi Banu et al., (2022, pp. 1471–1476) consideraron el intercambiador de calor de aletas y tubos para el análisis utilizando ANSYS®2021 Fluent. El mismo modelo lo simularon y compararon con MATLAB Simulink. Observaron variaciones de los parámetros de transferencia de calor, como los coeficientes de transferencia de calor del lado de la aleta y la eficiencia de la aleta con caudales máxicos y parámetros geométricos. Los resultados obtenidos del análisis CFD fueron validados con simulación matemática y las razones de las variaciones en los resultados fueron identificadas y discutidas.

Lokhande & Waghole, (2022, pp. 499–505) completaron la evaluación CFD para decidir el impacto de las diferentes concentraciones de nanomoléculas de CuO mezcladas en agua destilada en los atributos de transferencia de calor del intercambiador de calor de carcasa y tubos para el posicionamiento de contraflujo. Prepararon teóricamente nanolíquidos de CuO de concentración

volumétrica 0,01% y 0,02%. El fin inferido para la investigación fue el coeficiente de transferencia de calor total y la tasa de incrementos de transferencia de calor total con la expansión en la concentración de volumen de nanomoléculas de CuO en contraste con el agua destilada.

2.2. Referencias teóricas

2.2.1. Conceptos básicos de transferencia de calor

2.2.1.1. Calor

El calor, en términos de la termodinámica, se define como la energía que se transfiere a través de los límites de un sistema como resultado de un gradiente de temperatura. De acuerdo a esta definición, el calor por sí solo es un proceso de transferencia de calor y, entonces, se puede decir que usar la expresión “transferencia de calor” resulta redundante. El calor solo puede transferirse y el término “transferencia de calor” no hace más que reforzar el erróneo concepto que se tiene de que el calor es una propiedad de un sistema que puede ser transferida a otro sistema (Kaviany, Kanury 2002, p. 100).

En resumen, el calor es la transferencia de energía debida a una diferencia de temperatura. La termodinámica estudia este fenómeno, pero solo se enfoca en la cantidad de energía que se transfiere en tanto que un sistema atraviesa un proceso en el que cambia su estado de equilibrio, y no se relaciona con cuánto dura esta transferencia. A su vez, la transferencia de calor es la ciencia que predice la velocidad a la que se da este intercambio energético en un marco de condiciones dadas (Kaviany, Kanury 2002, p. 101).

2.2.1.2. Principio de conservación de energía

Es el principio fundamental para entender la transferencia de energía entre dos sistemas, sabiendo que la energía solo sufre transformaciones entre una forma u otra, mas no se crea o se destruye. De acuerdo con este principio, se puede escribir un balance de energía para cualquier sistema:

$$q_{ent} - q_{sal} + E_{gen} = \Delta E_{t\acute{e}rmica,sistema} \quad (1)$$

donde la diferencia $q_{ent} - q_{sal}$ representa la transferencia neta de calor, E_{gen} es la generación de energía y $\Delta E_{t\acute{e}rmica,sistema}$ es el cambio de energía térmica del sistema (Cengel, Ghajar 2011, p. 11).

Balance de energía para sistemas cerrados

Aquellos sistemas en los que no existe variación en la masa. Se resume en:

$$q = mc_v\Delta T \quad (2)$$

donde q es la cantidad neta de calor transferido, m es la masa del sistema, c_v el calor específico a volumen constante y ΔT el gradiente de temperatura en el sistema (Cengel, Ghajar 2011, p. 12).

Balance de energía para sistemas de flujo estacionario

Descartando los aportes de la energía cinética y potencial (caso común en este tipo de sistemas), el balance de energía para sistemas de flujo estacionario se reduce a:

$$\dot{q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m}c_p\Delta T \quad (3)$$

donde \dot{q} es la razón de la transferencia neta de calor, \dot{m} es el flujo másico a través de las fronteras del sistema, Δh es la variación de entalpía en el sistema y c_p es el calor específico a presión constante (Cengel, Ghajar 2011, pp. 12–13).

Balance de energía en la superficie

Para una superficie, el balance de energía se puede expresar como sigue:

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \quad (4)$$

donde \dot{q}_1 (conducción en la superficie) es la suma de \dot{q}_2 (convección hacia los alrededores) y \dot{q}_3 (radiación hacia el entorno) (Cengel, Ghajar 2011, pp. 13–14).

2.2.1.3. Métodos de transferencia de calor

La transferencia de calor se puede presentar bajo tres mecanismos bien marcados: la conducción, la convección y la radiación.

Conducción

La transferencia de calor por conducción ocurre debido a las interacciones a escala microscópica de las partículas portadoras de energía dentro de un material; el tipo de portadores de energía depende de la estructura del material. Los mecanismos físicos que gobiernan este tipo de transferencia son complejos, dado que están relacionados con fenómenos tan variados como las colisiones moleculares en los gases o el flujo libre de electrones en un metal (Mills 1992, p. 8). Por ejemplo, los portadores de energía en un gas o un líquido son moléculas individuales, mientras que, en los sólidos son los electrones y los fotones. La transferencia por conducción está fundamentalmente relacionada a este tipo de interacciones, donde los portadores de energía “más energéticos” transfieren su energía a los “menos energéticos”, resultando en un flujo neto de energía del sistema caliente al frío (Nellis, Klein 2009, p. 1).

Independiente del tipo de portadores de energía involucrados en el proceso, la transferencia de energía por conducción puede ser caracterizada por la Ley de Fourier, siempre y cuando las escalas de longitud y tiempo del problema sean grandes en relación con la distancia y el tiempo entre las interacciones de los portadores de energía. Esta ley relaciona el flujo de calor en cualquier dirección con el gradiente de temperatura en esa dirección:

$$\dot{q}'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

donde k es la conductividad térmica del cuerpo y $\partial T/\partial x$ es el gradiente de temperatura (Nellis, Klein 2009, p. 1).

Convección

La convección es la transferencia de energía en un medio en movimiento, generalmente, un líquido o un gas fluyendo a través de un ducto o sobre un objeto, es decir, es un tipo de transferencia de energía que se da entre una superficie y un fluido en movimiento (Mills 1992, p. 17). La transferencia de energía en un fluido en movimiento no solo es debida a la conducción, sino también a la entalpía que lleva el flujo a escala macroscópica. La transferencia de calor se acrecienta en cuanto mayor sea la velocidad de movimiento del fluido (Holman 2010, p. 10).

La ley de enfriamiento de Newton describe la ecuación que caracteriza la tasa de transferencia de calor por convección de un sistema:

$$\dot{q}_{conv} = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

donde \bar{h} es el coeficiente promedio de transferencia de calor, A_s es el área superficial a la temperatura T_s que está expuesta al fluido a una temperatura T_∞ (Holman 2010, p. 10).

Radiación

La transferencia de calor por radiación hacia una superficie es consecuencia de la diferencia entre la cantidad de radiación emitida por la superficie y la cantidad de radiación que es absorbida por la superficie. La radiación es un tipo de energía que emite la materia gracias a la variación que sufren los átomos y moléculas en sus configuraciones electrónicas. Esta energía se manifiesta a modo de fotones u ondas electromagnéticas. Se diferencia de los otros mecanismos de transferencia de energía porque no es necesario un medio para que esta se lleve a cabo (Nellis, Klein 2009, p. 16).

La transferencia de energía por radiación se torna compleja cuando están envueltas varias superficies a diferentes temperaturas; sin embargo, en el límite en el que una de las superficies a temperatura T_s interactúa con sus alrededores a temperatura T_{sur} la transferencia de la superficie se puede calcular por:

$$\dot{q}_{rad} = A_s \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (7)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) y ε es la emisividad de la superficie. Este último es un parámetro que va de 0 a 1, e indica si las superficies son reflectivas o absorbentes (Nellis, Klein 2009, p. 16).

2.2.2. Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo que es usado para transferir energía térmica (entalpía) entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido, o entre sólidos particulados y un fluido, a diferentes temperaturas y en contacto térmico. Usualmente, en estos dispositivos no existen interacciones de calor y trabajo desde el exterior. Algunas aplicaciones típicas involucran calentar o enfriar una corriente de fluido o la evaporación/condensación de corrientes de fluido de uno o varios componentes (Shah, Sekuli 2003, p. 1). En otras aplicaciones, el objetivo puede ser recuperar o rechazar calor, o esterilizar, pasteurizar, fraccionar, destilar, concentrar, cristalizar, o control un fluido en un proceso (Cengel, Ghajar 2011, p. 629).

En algunos intercambiadores de calor, los fluidos que participan en el intercambio están en contacto directo. En la mayoría de los intercambiadores, la transferencia de calor entre fluidos toma lugar a través de una pared divisoria o intercalando dentro y fuera de una pared de manera transitoria (Tiwari, Koli 2021, p. 1542). En algunos de estos dispositivos, los fluidos están separados por una superficie de transferencia de calor, e idealmente no se mezclan. Estos últimos también son llamados recuperadores, en contraste con los regeneradores, que son aquellos en los que existe intercambio de calor intermitente entre los fluidos caliente y frío (Shah, Sekuli 2003, p. 1).

2.2.2.1. Clasificación de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar de muchas formas diferentes. A continuación, se muestran algunas de sus clasificaciones:

De acuerdo con el proceso de transferencia

En dependencia del proceso de transferencia que se realiza en el interior del intercambiador se clasifican en:

- **Intercambiadores de calor de contacto indirecto**

- De transferencia directa (fase sencilla y multifase)
- De almacenamiento
- De lecho fluidizado

- **Intercambiadores de calor de contacto directo**

- De fluidos inmiscibles
- De intercambio gas-líquido
- De intercambio líquido-vapor

De acuerdo con el número de fluidos

La mayoría de los procesos de calentamiento, enfriamiento, recuperación de calor y eliminación de calor, involucran la transferencia de calor entre dos fluidos. Por lo tanto, los intercambiadores de calor de dos fluidos son los más comunes, aunque los intercambiadores de tres fluidos son ampliamente utilizados en algunos procesos químicos y criogénicos. En la industria se pueden

encontrar intercambiadores usados en procesos que involucran hasta 12 fluidos distintos (Rao 2001, p. 395). Pueden ser:

- Intercambiadores de calor de dos fluidos
- Intercambiadores de calor de tres fluidos
- Intercambiadores de calor de N fluidos ($N > 3$)

De acuerdo con la compacidad superficial

Los intercambiadores de calor compactos son caracterizados por contar con una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen del intercambiador, resultando en una reducción en el espacio, peso, estructura de soporte, requerimiento de energía y costo, así como un diseño de proceso mejorado, junto con un bajo inventario de fluido (Fraas 1989, p. 228). Se clasifican en:

- **Intercambiadores de calor de gas a fluido**
 - Compacto ($\beta \geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$)
 - No compacto ($\beta < 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$)
- **Intercambiadores de calor de líquido a líquido y con cambio de fase**
 - Compacto ($\beta \geq 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$)
 - No compacto ($\beta < 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$) (Shah, Sekuli 2003, pp. 3–12).

De acuerdo con las características de construcción

Existen un sinnúmero de tipos de intercambiadores de calor de acuerdo a la forma en la que fueron construidos. Algunos de ellos son:

- **Intercambiadores de calor tubulares**
 - De doble tubo
 - De tubos y coraza (flujo paralelo a los tubos y flujo cruzado a los tubos)
 - De tubo en espiral
 - De bobina de tubo

- **Intercambiadores de calor de placas**

- De placas (de placas y juntas y de placas soldadas)
- De placas en espiral
- De bobina de placas
- De circuitos impresos

- **Intercambiadores de calor de superficie extendida**

- De placas y aletas
- De tubos y aletas (de pared divisoria ordinaria y de pared de tubos de calor)

- **Regeneradores**

- Rotatorio
- De matriz fija
- De campanas giratorias (Shah, Sekuli 2003, pp. 12–55).

De acuerdo con el arreglo de flujo

Los arreglos de flujo de los fluidos más comunes en un intercambiador de calor se enlistan a continuación:

- **Intercambiadores de calor de paso único**

- Contraflujo
- Flujo paralelo
- Flujo cruzado
- Flujo dividido

- **Intercambiadores de calor de múltiples pasos**

- De superficie extendida (contraflujo cruzado, flujo paralelo cruzado y flujo compuesto)
- De tubos y coraza (contraflujo paralelo y flujo dividido)
- De placas (m pasos del fluido 1 y n pasos del fluido 2) (Shah, Sekuli 2003, pp. 56–73).

2.2.2.2. Intercambiador de calor de tubos y coraza

Este tipo de intercambiador, mostrado en la Ilustración 2-1, generalmente está construido con un haz de tubos redondos montados en una carcasa cilíndrica con el eje del tubo paralelo al de la carcasa. Un fluido fluye dentro de los tubos, el otro fluye a través y a lo largo de los tubos. Los componentes principales de este intercambiador son los tubos (o haz de tubos), la carcasa, el cabezal delantero, el cabezal trasero, los deflectores y las placas tubulares. Dependiendo de las aplicaciones, se selecciona una combinación específica de variables geométricas o tipos asociados a cada componente (Ali et al. 2023, p. 2).

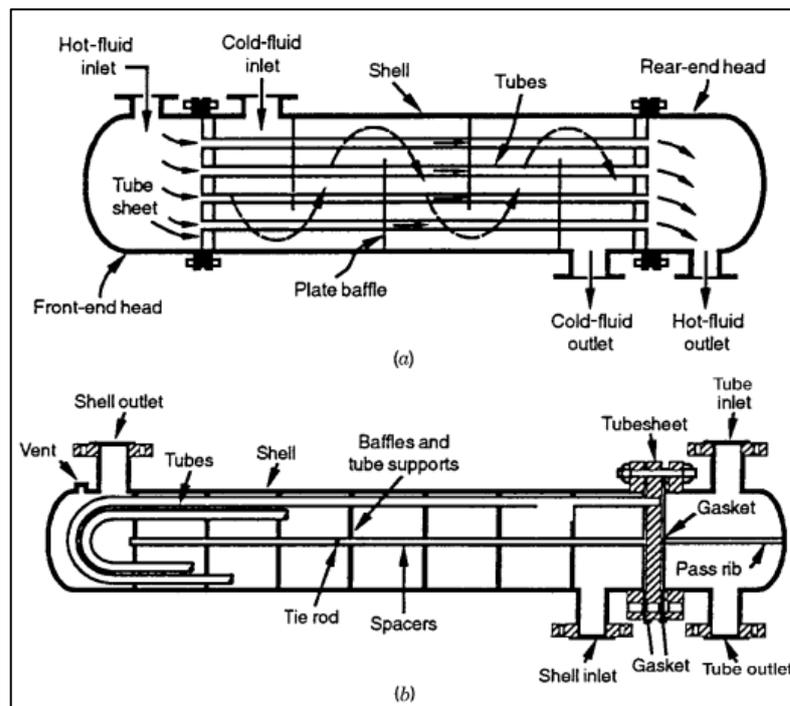


Ilustración 2-1: (a) Un paso por coraza y tubos; (b) un paso por coraza y dos por tubos

Fuente: Shah & Sekuli, 2003.

Más del 65% de la participación de los intercambiadores de calor de la industria petroquímica y de procesos está en manos del intercambiador de calor de carcasa y tubos, por razones como su versatilidad para manejar una amplia gama de condiciones de operación con una variedad de materiales, experiencia en diseño, métodos de diseño probados y práctica de diseño con códigos y estándares. La selección de un intercambiador de calor de carcasa y tubos adecuado se logra mediante una elección juiciosa de la configuración del intercambiador, los parámetros geométricos, los materiales y el diseño "correcto" (Goldstein et al. 2010, p. 4344).

Tubos

En los intercambiadores de tubos y coraza se utilizan tubos redondos de diversas formas. Los más comunes son los haces de tubos con tubos rectos y en U (Ilustración 2-1) utilizados en los intercambiadores de la industria de procesos y energía. Sin embargo, en los intercambiadores nucleares avanzados se utilizan curvas de onda sinusoidal, en forma de J, en forma de L o palos de hockey y palos de hockey invertidos para adaptarse a la gran expansión térmica de los tubos (Bergman et al. 2011, p. 672). Algunas de las geometrías de tubo mejoradas que se utilizan en los intercambiadores de carcasa y tubos se muestran en la Ilustración 2-2.

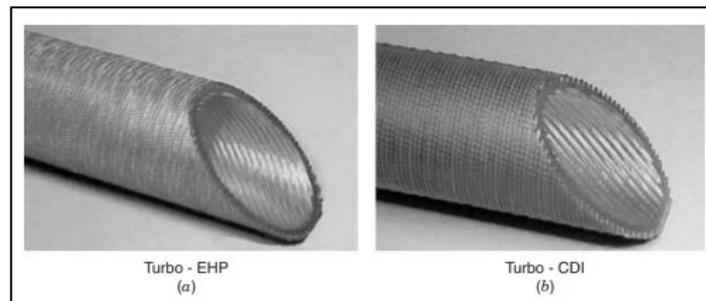


Ilustración 2-2: (a) Tubo de evaporador; (b) tubo de condensador

Fuente: Shah & Sekuli, 2003.

Deflectores

Los deflectores se pueden clasificar en transversales y longitudinales. El propósito de los deflectores longitudinales es controlar la dirección general del flujo del fluido de la cubierta de modo que se logre una disposición general deseada del flujo de las dos corrientes de fluido. Los deflectores transversales se pueden clasificar como deflectores de placa y deflectores de rejilla (varilla, tira y otros flujos axiales). Los deflectores de placa se utilizan para soportar los tubos durante el montaje y la operación y para dirigir el fluido en el haz de tubos aproximadamente en ángulo recto con los tubos para lograr coeficientes de transferencia de calor más altos (Bergman et al. 2011, p. 673). Los deflectores de varilla (o barra), el tipo más común de deflector de rejilla, que se utilizan para soportar los tubos y aumentar la turbulencia del fluido de la coraza, se muestran en la Ilustración 2-3. La elección del tipo de deflector, el espaciado y el corte está determinada en gran medida por la tasa de flujo, la tasa de transferencia de calor deseada, la caída de presión permitida, el soporte del tubo y las vibraciones inducidas por el flujo (Nellis, Klein 2009, pp. 823–824).

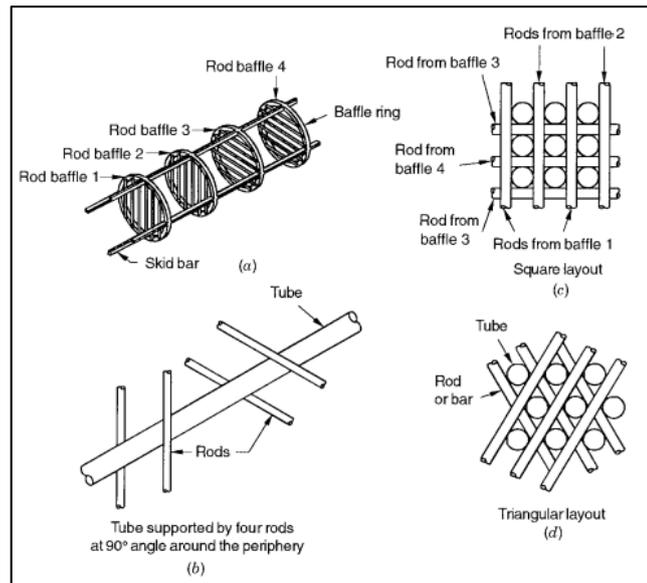


Ilustración 2-3: Estructura de los deflectores de varilla

Fuente: Shah & Sekuli, 2003.

Cabezales delanteros y traseros

Son utilizados para la entrada y salida del fluido del tubo. El cabezal delantero es estacionario, mientras que el cabezal trasero puede ser estacionario (sin permitir la expansión térmica del tubo) o flotante, según las tensiones térmicas entre los tubos y la coraza. Los principales criterios para la selección del cabezal frontal son el costo, el mantenimiento y la inspección, el peligro debido a la mezcla de fluidos de la coraza y el tubo y las fugas a la presión ambiental y de operación. Los principales criterios para la selección de la parte trasera de la cabeza son la tolerancia a las tensiones térmicas, una disposición para quitar el haz de tubos para limpiar el lado de la carcasa, evitar que se mezclen los fluidos de la carcasa y los tubos, y sellar cualquier vía de fuga para que el fluido de la carcasa fluya hacia el ambiente (Shah, Sekuli 2003, p. 18).

Placas de tubos

Estos se utilizan para sujetar los tubos en los extremos. Una placa de tubos es generalmente una placa de metal redonda con orificios perforados para el patrón de tubo deseado, orificios para las varillas de unión (que se utilizan para espaciar y sujetar los deflectores de la placa), ranuras para las juntas y orificios para pernos para bridar a la coraza y al canal. Para evitar fugas del fluido de la coraza en la placa de tubos a través de un espacio libre entre el orificio del tubo y el tubo, las uniones de los tubos a la placa se realizan mediante muchos métodos, como la expansión de los tubos, el laminado de los tubos, la expansión hidráulica de los tubos, relleno de las uniones, o soldadura de tubos a la placa de tubos (Nellis, Klein 2009, pp. 823–824).

2.2.2.3. Coeficiente total de transferencia de calor

Los Generalmente, el intercambiador de calor implica la interacción entre dos fluidos a través de una pared divisoria que los separa y que, a su vez, representa el medio a través del cual transfieren energía. Dada esta configuración, el proceso de intercambio de calor involucra los mecanismos de transferencia de calor tanto por conducción como por convección. Por lo tanto, el coeficiente total de transferencia de calor es utilizado para representar el coeficiente de transferencia de calor que aporta tanto la convección como la conducción (los efectos de la radiación se toman en cuenta junto al coeficiente de transferencia de calor por convección) (Cengel, Ghajar 2011, p. 633).

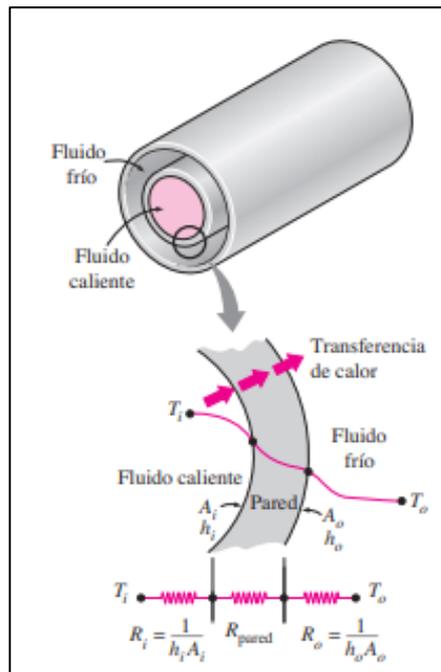


Ilustración 2-4: Resistencias térmicas

Fuente: Cengel & Ghajar, 2011.

Como lo muestra la Ilustración 2-4, el análisis se realiza tomando en cuenta las resistencias térmicas que ofrece cada una de las formas de transferencia de calor que se dan en el proceso. Entonces, la resistencia térmica total en el sistema se expresa tal que:

$$R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (8)$$

donde los subíndices “i” denotan la superficie interior y “o” la superficie exterior de la pared. Si combinamos las resistencias, podemos expresar la tasa de transferencia de calor entre los fluidos tal que:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R} = UA_s \Delta T = UA_i \Delta T = UA_o \Delta T \quad (9)$$

donde U es el coeficiente total de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Si cancelamos ΔT ,

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (10)$$

expresión con la que se podrá calcular el coeficiente total de transferencia de calor del intercambiador (Cengel, Ghajar 2011, p. 633).

2.2.2.4. Diseño de un intercambiador de calor

El diseño es una actividad destinada a proporcionar descripciones completas de un sistema de ingeniería, parte de un sistema o solo un componente del sistema. Estas descripciones representan una especificación inequívoca de la estructura, el tamaño y el rendimiento del sistema/componente, así como otras características importantes para la fabricación y utilización posteriores. Esto se puede lograr utilizando una metodología de diseño bien definida (Rao 2001, p. 396).

A la hora de elegir un intercambiador de calor adecuado, un ingeniero, generalmente está expuesto a dos casos: elegir un dispositivo que cambie la temperatura específica de un fluido con flujo conocido y, por otro lado, conocer las temperaturas finales de los fluidos caliente y frío en un intercambiador dado. Para el primer caso, el método de análisis más apropiado es el de la diferencia logarítmica de temperatura (LMTD), mientras que el método de la efectividad (ϵ)-NTU es el más adecuado para el segundo caso (Bergman et al. 2011, p. 688). A continuación, se explica en qué consisten estos métodos.

Método LMTD

El método LMTD expresa la tasa de transferencia de calor entre las dos corrientes de fluido del intercambiador de calor como el producto de la diferencia de temperatura y la conductancia del intercambiador (UA):

$$\dot{q} = UA \Delta T_{lm} \quad (11)$$

Dado que la distribución de temperatura en el intercambiador de calor depende de la configuración de flujo, la forma necesaria para la diferencia media logarítmica de temperatura (ΔT_{lm}) también depende de la configuración de flujo. Por lo tanto, la forma apropiada de la diferencia media logarítmica de temperatura que se debe usar en intercambiadores de tubos y coraza y con un arreglo a flujo cruzado es difícil de derivar. Entonces, aplicamos un factor de corrección, F ,

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,cf} \quad (12)$$

donde $\Delta T_{lm,cf}$ diferencia media logarítmica de temperatura para un arreglo a contraflujo que se describe a continuación:

$$\Delta T_{lm,cf} = \frac{(T_{H,o} - T_{C,i}) - (T_{H,i} - T_{C,o})}{\ln \left[\frac{(T_{H,o} - T_{C,i})}{(T_{H,i} - T_{C,o})} \right]} \quad (13)$$

donde C denota el fluido frío y H el fluido caliente. El valor de F se puede expresar en términos de dos números adimensionales, P y R , definidos de acuerdo a:

$$P = \frac{(T_{C,o} - T_{C,i})}{(T_{H,i} - T_{C,i})} \quad (14)$$

$$R = \frac{\dot{C}_C}{\dot{C}_H} = \frac{(T_{H,i} - T_{H,o})}{(T_{C,o} - T_{C,i})} \quad (15)$$

cuya definición depende de la configuración. Generalmente, P está a la efectividad LMTD y R a la relación de capacitancia (Bergman et al. 2011, pp. 677–680).

Método de la efectividad-NTU

Este método es más flexible y fácil de usar que el descrito anteriormente. Puede ser usado para determinar directamente las temperaturas a la salida del intercambiador de calor cuando se conoce la conductancia o, a su vez, determinar la conductancia si se conocen las temperaturas de salida deseadas. El método de la efectividad-NTU es algebraicamente equivalente al método LMTD y provee exactamente los mismos resultados. Sin embargo, la formulación se ajusta mucho mejor a una amplia variedad de casos de diseño (Shah, Sekuli 2003, p. 114).

El método ε -NTU expresa la tasa de transferencia de calor en términos de la máxima tasa posible de transferencia de calor (\dot{q}_{max}) y la efectividad (ε), el cual es el rendimiento adimensional del intercambiador de calor:

$$\dot{q} = \varepsilon \dot{q}_{max} \quad (16)$$

Asumiendo que el intercambiador de calor está bien aislado, el balance de energía para las corrientes de fluido frío y caliente llevan a:

$$\dot{q} = \dot{C}_H(T_{H,i} - T_{H,o}) = \dot{C}_C(T_{C,o} - T_{C,i}) \quad (17)$$

donde \dot{C}_H y \dot{C}_C son las tasas de capacitancia de las corrientes de fluido frío y caliente, respectivamente. Por su lado, \dot{q}_{max} se puede expresar tal que:

$$\dot{q}_{max} = \dot{C}_{min}(T_{H,i} - T_{C,i}) \quad (18)$$

donde \dot{C}_{min} es el valor mínimo de las tasas de capacitancia de los fluidos. Combinando las ecuaciones (16) y (18), obtenemos la definición de efectividad:

$$\dot{q} = \varepsilon \dot{C}_{min}(T_{H,i} - T_{C,i}) \quad (19)$$

El número de unidades de transferencia es una variable que representa el tamaño adimensional del intercambiador de calor y se expresa como sigue:

$$NTU = \frac{UA}{\dot{C}_{min}} \quad (20)$$

Otro número adimensional importante es C_R , que representa la relación de capacidad y refleja que tan bien balanceado está el intercambiador. Se define como la relación entre la tasa capacitancia mínima y la máxima, tal que:

$$C_R = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} \quad (21)$$

La forma en la que se expresa la efectividad depende del intercambiador que se analiza. Para un intercambiador a contraflujo tenemos:

$$\varepsilon_{cf} = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_R)]}{1 - C_R \exp[-NTU(1 - C_R)]} \quad \text{para } C_R < 1 \quad (22)$$

$$\varepsilon_{cf} = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad \text{para } C_R = 1 \quad (23)$$

Con un análisis similar para una configuración con flujo paralelo, tenemos:

$$\varepsilon_{Pf} = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_R)]}{1 + C_R} \quad (24)$$

así como podemos encontrar deducciones de esta relación para la efectividad en intercambiadores con distintas configuraciones (Bergman et al. 2011, pp. 688–689).

2.2.3. *Dinámica de fluidos computacional*

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta de simulación, la cual usa poderosas herramientas informáticas y matemáticas aplicadas con el fin de modelar situaciones comunes de estudio de la ingeniería como flujo de fluidos para la predicción de la transferencia de calor, masa y momentum y el diseño óptimo de procesos industriales. Esta rama de la ciencia usa el análisis numérico para resolver ecuaciones matemáticas en pos de entender el movimiento de los fluidos, el transporte de energía en forma de calor y las reacciones químicas (Xia, Sun 2002, pp. 5–7).

La dinámica de fluidos funciona según el principio de simplificar todo el sistema en pequeñas celdas o cuadrículas y aplicar ecuaciones gobernantes a estos elementos discretos para encontrar soluciones numéricas para la distribución de presión, gradientes de temperatura, parámetros de flujo y otras variables en un período de tiempo más corto y en un menor costo debido a la menor cantidad de trabajo experimental requerido. Esto es útil tanto para desarrollar un intercambiador de calor desde cero como para optimizar/solucionar problemas ofreciendo cambio en el diseño de estos (Wendt 2009, pp. 5–6).

2.2.3.1. *Principios básicos de la dinámica de fluidos computacional*

Los modelos CFD, al tratar fenómenos que involucran fluidos, se basan en los tres principios básicos de la conservación: masa, cantidad de movimiento y energía, que son los que rigen el análisis de fluidos incompresibles (Versteeg, Malalasekera 2007, p. 10). A continuación, se describen las ecuaciones y modelos matemáticas que se aplican en el análisis por dinámica de fluidos computacional.

Ecuación de continuidad

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos computacional están sustentadas en un principio físico fundamental que se puede aplicar a un modelo de flujo y obtener una ecuación que describa este principio. Es el caso de la ecuación de continuidad, que está basada en el principio de conservación de la masa (Anderson 1995, p. 38).

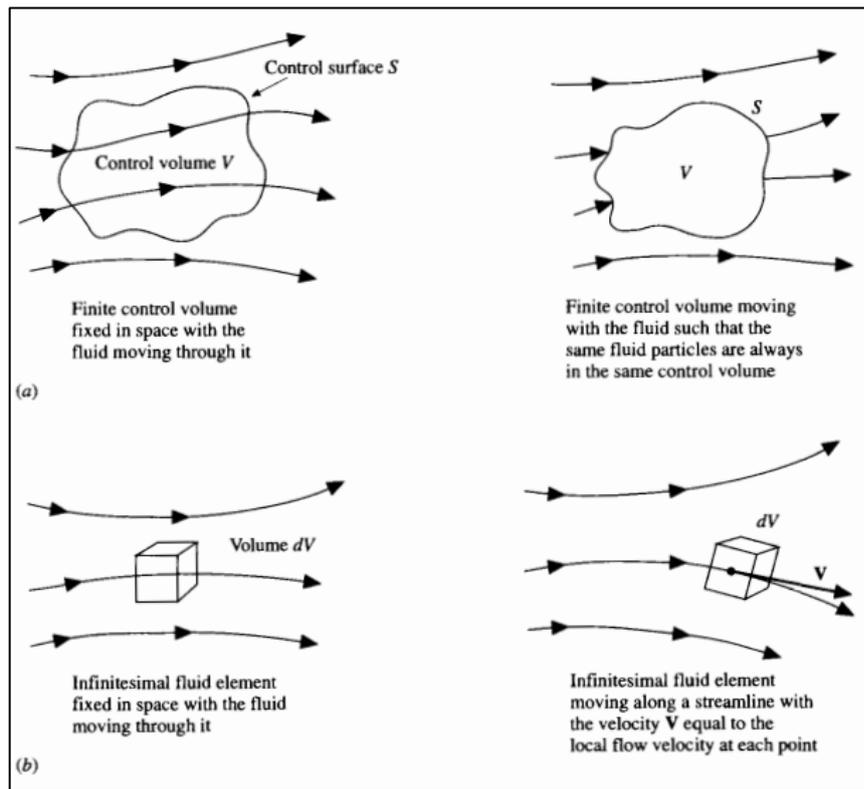


Ilustración 2-5: (a) Volumen de control finito; (b) elemento de fluido infinitesimal

Fuente: Anderson, 1995.

Este principio se puede aplicar de acuerdo con diferentes aproximaciones producto de distintos modelos de flujo usados. Conforme a los modelos presentados en la Ilustración 2-5 podemos obtener distintas formas de la ecuación de continuidad:

- **Modelo de un volumen de control finito fijado en el espacio**

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dv + \iint \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} \quad (25)$$

- **Modelo de un volumen de control finito en movimiento con el fluido**

$$\frac{D}{Dt} \iiint \rho dv = 0 \quad (26)$$

- **Modelo de un elemento infinitesimalmente pequeño fijado en el espacio**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho V) = 0 \quad (27)$$

- **Modelo de un elemento infinitesimalmente pequeño en movimiento con el flujo**

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla * V = 0 \quad (28)$$

Estas 4 ecuaciones son diferentes formas de la misma ecuación, la ecuación de continuidad. Cualquiera de las formas de la ecuación puede ser derivada para expresarla en cualquiera de las otras formas (Anderson 1995, pp. 40–42).

Ecuaciones de Navier-Stokes

Un flujo viscoso es aquel en el que se incluyen los fenómenos de transporte de fricción, conducción térmica y/o difusión de masa. La difusión de masa ocurre cuando hay gradientes de concentración de diferentes especies químicas en el flujo. Conociendo esto, las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo inestable, tridimensional, compresible y viscoso en forma conservativa son:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla * (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (29)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla * (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (30)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla * (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (31)$$

representadas en las 3 dimensiones en régimen conservatorio (Wendt 2009, pp. 27–33).

2.2.3.2. Discretización

En esencia, la discretización es el proceso mediante el cual una expresión matemática de forma cerrada, como una función o una ecuación diferencial o integral que involucra funciones, todas las cuales se considera que tienen un continuo infinito de valores a lo largo de un dominio, es aproximada mediante expresiones análogas (pero diferentes), las cuales prescriben valores en solo un número finito de puntos discretos en el dominio (Versteeg, Malalasekera 2007, pp. 2–3).

Las soluciones analíticas de las ecuaciones diferenciales parciales involucran expresiones de forma cerrada que representan la variación de las variables dependientes de forma continua en todo el dominio. Por el contrario, las soluciones numéricas pueden dar respuestas solo en puntos discretos del dominio, llamados puntos de malla (Tu, Yeoh, Liu 2013, pp. 33–35).

Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas es uno de los métodos usados para resolver ecuaciones diferenciales que son difíciles o imposibles de resolver analíticamente. Es un método estable, de rápida convergencia, preciso y simple para resolver ecuaciones diferenciales parciales de sistemas/problemas unidimensionales. Al aplicar el método de diferencias finitas, el dominio continuo se discretiza y los términos diferenciales de la ecuación se convierten en una ecuación algebraica lineal, la llamada ecuación en diferencias finitas (Zeneli et al. 2021, pp. 165–167). Además, las variables dependientes se consideran solo en puntos discretos. La ecuación fundamental es:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{p_x - p_{x - \Delta x}}{\Delta x} \quad (32)$$

La ecuación (32) puede ser usada para discretizar una ecuación diferencial parcial e implementar un método numérico para resolver la ecuación (Özişik et al. 2017, pp. 2–4).

Método de los volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos es esencialmente una aplicación tridimensional del conocido método de diferencias finitas. Es un método numérico utilizado para evaluar ecuaciones diferenciales parciales elípticas, parabólicas o hiperbólicas en forma de ecuaciones algebraicas, sobre la base de las leyes de la conservación. De manera similar al método antes mencionado, el método de volúmenes finitos evalúa las variables en ubicaciones discretas en el dominio computacional. Al igual que el método de elementos finitos, este método divide un dominio

geométricamente arbitrario en un número finito de elementos (una malla estructurada o no estructurada), que posteriormente se utilizan para construir volúmenes finitos o de control (una malla dual). La discretización del dominio en volúmenes de control se puede realizar adoptando un enfoque centrado en el vértice (donde cada nodo de la malla es el centro de un volumen finito, cuyos límites se obtienen conectando los centroides de cada elemento y los puntos medios de cada elemento borde), en lugar de un enfoque centrado en la celda (donde los volúmenes de control coinciden con los elementos) (Brooks 2015, pp. 39–42).

Dado que los métodos de volumen finito discretizan la ecuación de balance directamente, una virtud obvia de tales métodos es la propiedad de conservación (el flujo que ingresa a un volumen dado es idéntico al que sale del volumen adyacente). Debido a esta característica, el método de volúmenes finitos ha demostrado ser muy adecuado para la solución de problemas en transferencia de calor (Brooks 2015, pp. 39–42).

Método de los elementos finitos

El método de elementos finitos se incluye en una clase de técnicas numéricas utilizadas para encontrar una aproximación adecuada a la solución de un problema de valor límite formulado consistentemente. Comparado con el método de diferencias finitas, el método de elementos finitos ofrece la notable ventaja de poder manejar dominios geoméricamente complejos con relativa simplicidad. La idea básica de este método es representar un dominio continuo mediante entidades discretas no superpuestas geoméricamente más simples, llamadas elementos finitos o simplemente elementos, cuya respuesta se cuantifica mediante los valores de los grados de libertad en los puntos finales (o nodales) (Pradhan, Chakraverty 2019, pp. 25–28).

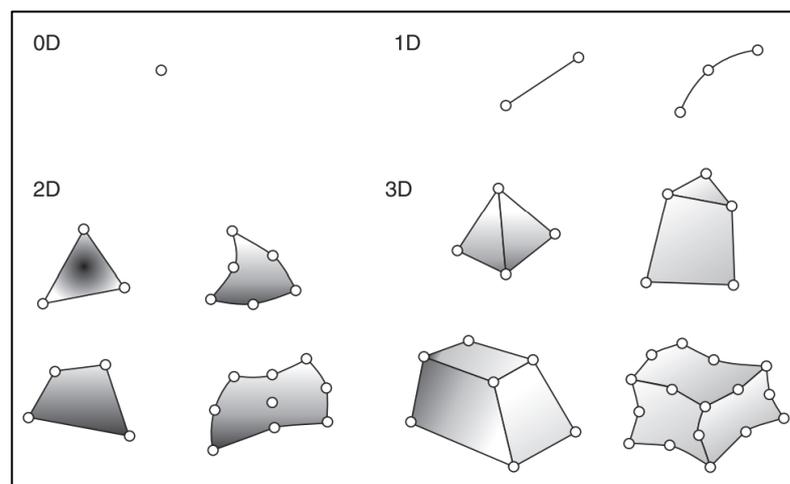


Ilustración 2-6: Tipos de elementos y dimensionalidad

Fuente: Brooks, 2015.

El método de elementos finitos pertenece a los métodos residuales de Galerkin, es decir, se basa en la aproximación de la solución de un problema genérico tomando como punto de partida su formulación débil. Brevemente, el enfoque de elementos finitos para un problema genérico de valores en la frontera se basa en la subdivisión (discretización) del dominio en subdominios (elementos primitivos), representados matemáticamente por ecuaciones descriptivas del problema. Los elementos pueden tener una dimensionalidad intrínseca de cero, uno, dos o tres dimensiones espaciales, como se muestra en la ilustración 2-6 (Brooks 2015, pp. 42–43).

2.2.3.3. *Mallado*

El mallado en la dinámica de fluidos computacional se refiere a un conjunto de técnicas para definir una malla numérica en todo el sistema a simular. La cuadrícula que se seleccione para las simulaciones CFD definirá la precisión y resolución de los resultados de la simulación, los cuales afectarán el tiempo de cálculo y el nivel de detalle de los resultados (Chung 2002, pp. 574–575).

Las técnicas de mallado automático han contribuido significativamente a la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en problemas industriales a gran escala. Sin tales técnicas, los esquemas numéricos más precisos pueden no demostrar todo su potencial o eficacia. La generación automática de cuadrículas en geometrías complicadas, como las de un avión completo, ahora se considera un ejercicio de rutina y una parte importante de los proyectos de CFD. Existe dos tipos de mallado: estructurado y no estructurado (Liseikin 2010, p. 10).

Mallado estructurado

Un mallado estructurado crea una disposición de celdas de cuadrícula (2d) o ladrillos (3d) que se organizan en una estructura similar a una matriz simple. A diferencia de una cuadrícula cartesiana en la que las celdas siempre tienen una forma regular, una cuadrícula estructurada se deforma para seguir los límites del sistema. La disposición de los nodos en la cuadrícula sigue la misma forma que la superficie límite, escalando efectivamente sus nodos interpolados hacia el interior del sistema. Este tipo de generación de cuadrícula proporciona una precisión mucho mayor que la generación de cuadrícula cartesiana en problemas de CFD, ya que seguirá de cerca la superficie de la curva a lo largo del límite (Tu, Yeoh, Liu 2013, pp. 35–37).

Mallado no estructurado

Una malla no estructurada es un mosaico a lo largo de la superficie y el volumen interior del sistema, visto como triángulos (en problemas 2D) o tetraedros (en problemas 3D). Estas

cuadrículas pueden proporcionar una precisión comparable a la de una cuadrícula estructurada, pero requieren una densidad de nodos igualmente alta en regiones con gradientes de flujo altos. Por lo tanto, el uso de una malla no estructurada no siempre garantiza un cómputo más eficiente. Sin embargo, si la resolución de la malla aún se puede ajustar en todo el dominio de la solución, la complejidad computacional se puede reducir para ciertos problemas (Chung 2002, pp. 59–60).

2.2.3.4. ANSYS® *Fluent*

ANSYS® *Fluent* es un paquete de software de dinámica de fluidos computacional utilizado para simular el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las interacciones fluido-estructura. Se puede utilizar para analizar una amplia gama de problemas, incluido el flujo de gases, líquidos y fluidos multifásicos, así como sistemas de reacción y análisis estructural. Es ampliamente usado en algunas industrias como: la industria aeroespacial, automotriz, química y muchas más (Sundén, Fu 2017, pp. 1–2).

Este software utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones que rigen el flujo de fluidos y la transferencia de calor. Esto implica dividir el dominio de la simulación en una serie de pequeños volúmenes de control o celdas interconectados. Los valores de las variables (como la velocidad y la temperatura) se calculan luego en los centroides de estas celdas. ANSYS® *Fluent* utiliza algoritmos iterativos para resolver estas ecuaciones y llegar a una solución convergente (Matsson 2022, pp. 15–19).

ANSYS® *Fluent* puede ser utilizado para simular una amplia gama de problemas, que incluyen:

- El flujo de gases y líquidos a través de tuberías, válvulas y otros componentes;
- transferencia de calor en intercambiadores de calor, hornos y otros equipos;
- interacciones fluido-estructura, como el flujo alrededor del ala de un avión o el movimiento de un objeto flotante en un fluido;
- flujos multifásicos, como el flujo de un gas y un líquido a través de una tubería;
- Análisis estructural, incluido el análisis de tensiones y deformaciones (Sundén, Fu 2017, p. 3).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Materiales

Los medios materiales empleados para el desarrollo del presente trabajo de integración curricular se detallan en la tabla 3-1, que se presenta a continuación:

Tabla 3-1: Materiales empleados en la realización del proyecto.

Elementos	Descripción
Computador	Características del computador: <ul style="list-style-type: none">- Microsoft Windows 11, 64-bit- 16 GB RAM- 8.2 GB RAM (fotogramas por segundo)- AMD Radeon™ Graphics (tarjeta gráfica)
Bibliografía	Artículos investigativos relacionados al modelado y simulación de intercambiadores de calor en CFD. Proyectos de titulación con temas adyacentes a guías de prácticas de simulación numérica en CFD. Contenido multimedia para la formación en el uso de la herramienta Fluent del software ANSYS®.
Documentos	Formato de guías de laboratorio de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.
Softwares	ANSYS® Student 2023 R1. Paquete Microsoft Office®.

Realizado por: Crespo L., 2023.

- Características técnicas y de procesamiento del equipo para la ejecución del software ANSYS®.
- La información necesaria para el modelado, mallado y simulación CFD del intercambiador de calor, y la elaboración del manual de prácticas la encontramos en la bibliografía y los documentos.
- El software ANSYS® Student 2023 R1, con su herramienta Fluent, se utilizó para el diseño de la geometría y el desarrollo de la simulación.
- El paquete Microsoft Office® se usó para los cálculos y la elaboración de la guía de prácticas de simulación numérica.

3.2. Metodología empleada

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados para el presente trabajo de integración curricular, la metodología se determinó de acuerdo a los presentado en la Ilustración 3-1. Se empezará por definir la geometría que se va a modelar con base en una revisión bibliográfica. Luego, se generará la malla en la geometría 3D y se simulará de acuerdo a parámetros obtenidos de bibliografía, validando nuestro modelo. Por último, se elaborará la guía de práctica.

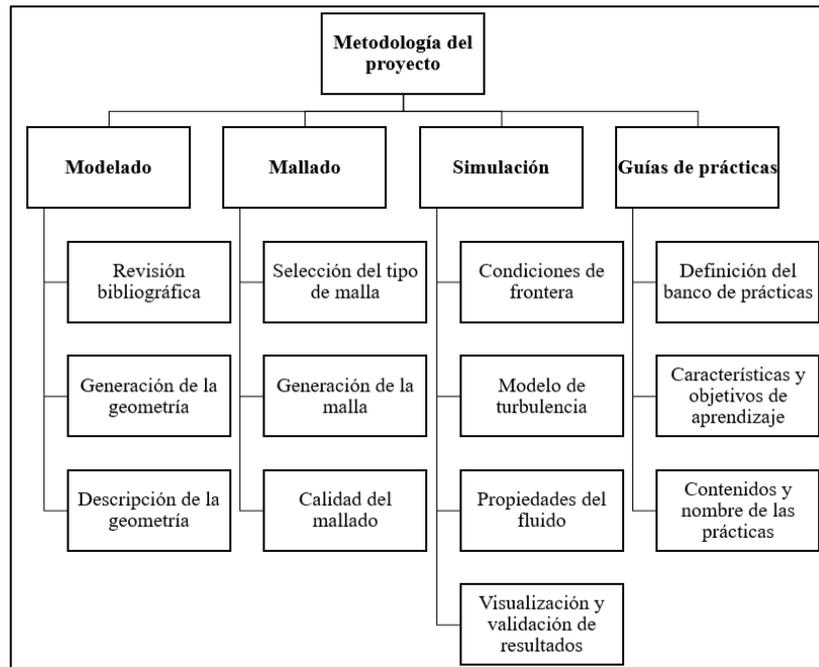


Ilustración 3-1: Diagrama metodológico para el desarrollo del proyecto

Realizado por: Crespo L., 2023.

3.3. Modelado

En esta etapa es donde se define la geometría que se va a modelar en 3D con ayuda de un software CAD (Computer-Aided Design), en este caso, la herramienta de ANSYS® llamada DesignModeler. Esta etapa es la base del proyecto, por lo que, es necesario definir claramente las características generales del cuerpo a simular, de manera que se garanticen resultados de calidad.

3.3.1. Revisión bibliográfica

Una detallada búsqueda bibliográfica relacionada al tema se llevó a cabo con la finalidad de establecer las condiciones de diseño de un intercambiador de calor de tubos y coraza, y así obtener

datos reales que nos permitan comparar y validar nuestro modelo y simulación. Se indagó en artículos científicos de alto impacto, proyectos de grado y libros de texto asociados al diseño de intercambiadores de calor. La tabla 3-2 describe la referencia bibliográfica en la que se basó la simulación de este proyecto.

Tabla 3-2: Descripción de la literatura consultada

Autor	Título del artículo	Dispositivo	Descripción
Ozden & Tari, (2010)	Análisis CFD del lado de la coraza de un pequeño intercambiador de calor de tubos y coraza	Intercambiador de calor de tubos y coraza	Este artículo investiga, mediante una simulación CFD de un pequeño intercambiador de calor de tubos y coraza, la influencia del espaciado entre deflectores, el corte del deflector y el diámetro de la coraza en el coeficiente de transferencia de calor y la caída de presión.

Realizado por: Crespo L., 2023.

3.3.2. Generación de geometría

Como el objetivo en este punto de la investigación es realizar un modelo 3D mediante la herramienta DesignModeler de ANSYS® de un intercambiador de calor de tubos y coraza, el primer paso se trata de plasmar la geometría tridimensional tanto de la estructura sólida del dispositivo como del fluido que circula en el interior de este (coraza y tubos).

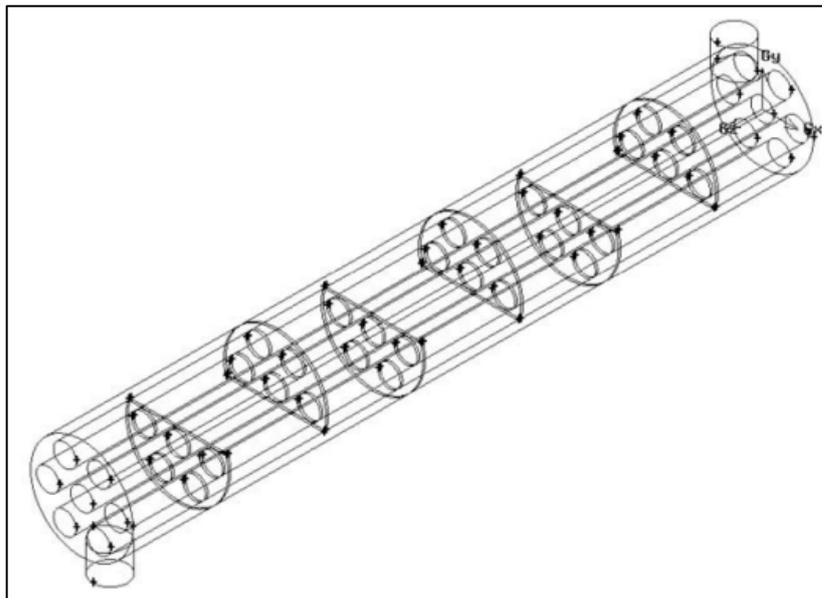


Ilustración 3-2: Modelo del intercambiador de calor de tubos y coraza

Fuente: Ozden & Tari, 2010.

3.3.3. Descripción de la geometría

En el presente trabajo de integración curricular, se seleccionó un pequeño intercambiador de calor de tubos y coraza (Ilustración 3-2) en pos de incrementar el detalle del modelo y realizar observaciones sólidas al momento de analizar los resultados de la simulación. Los parámetros de diseño más importante se detallan en la tabla 3-3. El fluido de trabajo que se seleccionó fue el agua.

Tabla 3-3: Parámetros geométricos y de diseño del intercambiador de calor.

Diámetro de la coraza, D_c	90 mm
Diámetro externo de los tubos, d_e	20 mm
Geometría y paso del arreglo de tubos	Triangular, 30 mm
Número de tubos, N_t	7
Largo del intercambiador de calor, L	600 mm
Temperatura de entrada a la coraza, T	300 K
Corte del deflector, B_c	36%
Espaciado central entre deflectores, B	86 mm
Número de deflectores, N_B	6

Realizado por: Crespo L., 2023.

3.4. Mallado

La etapa de mallado de la geometría consiste en subdividir el dominio de esta en pequeños volúmenes de control, que permiten obtener una solución para el flujo en cada uno de estos puntos. Para esto se utilizó la herramienta Mesh del software ANSYS®, la que nos ayudó a generar el mallado del modelo 3D, con todas las especificaciones que se detallan en los siguientes puntos.

3.4.1. Selección del tipo de malla

El primer paso en el mallado de una estructura geométrica es la selección del tipo de malla. De todos los métodos de mallado de los que dispone el generador de malla de ANSYS®, se seleccionó una malla no estructurada (ilustración 3-3), dado que este se adapta con mayor facilidad a geometrías complejas como la de un intercambiador de calor y, además, brinda una mejor resolución en determinadas áreas. Las superficies del modelo fueron malladas usando elementos cuadrilaterales (mallado tetraédrico) y para el volumen del fluido y de los tubos se utilizó elementos híbridos tetragonales.

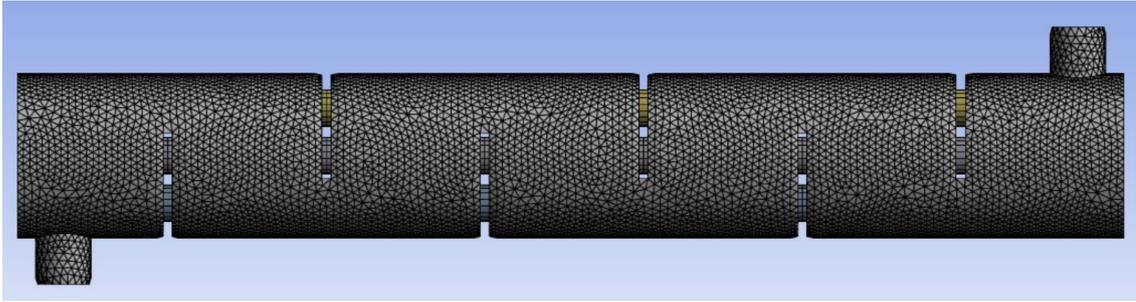


Ilustración 3-3: Mallado no estructurado seleccionado para el modelo

Realizado por: Crespo L., 2023.

3.4.2. Generación de la malla

Antes de generar una malla, debemos discretizar el espacio donde transita el fluido y diferenciarlo de las estructuras sólidas del intercambiador, es decir, tanto de la pared de la coraza como de la pared de los tubos. En la ilustración 3-4 podemos apreciar cómo se selecciona la pared de la coraza del intercambiador en el proceso de discretización. De esta forma, se discretizan cada uno de los elementos y volúmenes de la geometría.

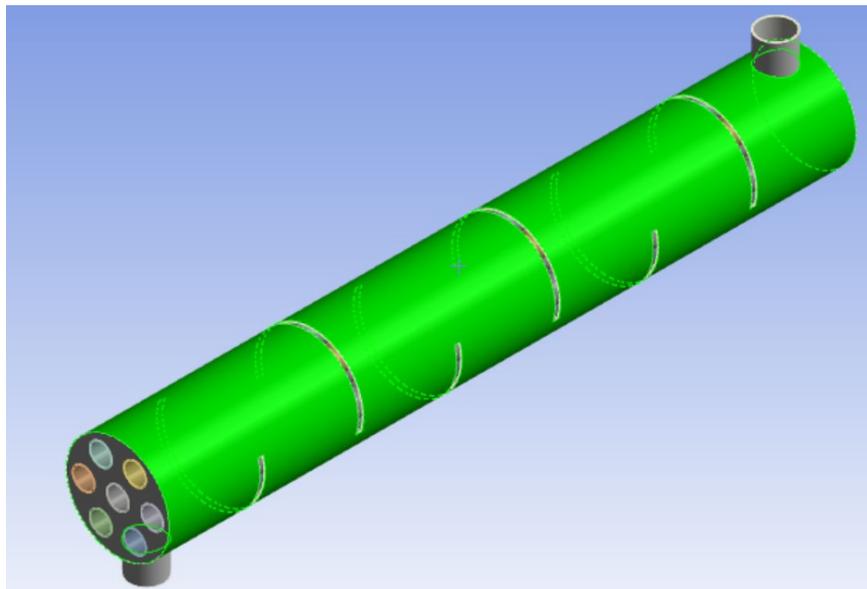


Ilustración 3-4: Selección de la pared de la coraza para el mallado

Realizado por: Crespo L., 2023.

La ilustración 3-5 muestra en detalle las características del mallado generado para la geometría en ANSYS® Mesh. Dadas las limitaciones de la versión estudiantil del software ANSYS® (máximo de 512000 elementos), se generó una malla con un tamaño de elemento de 0.38 m, resultando en que el dominio contó con un total de 503370 elementos y 145929 nodos.

Details of "Mesh"	
+ Display	
- Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input checked="" type="checkbox"/> Element Size	0.38 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
+ Sizing	
+ Quality	
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	145929
<input type="checkbox"/> Elements	503370
Show Detailed Statistics	No

Ilustración 3-5: Características de malla generada

Realizado por: Crespo L., 2023.

La ilustración 3-6 ofrece una visión más cercana y detallada de la malla generada en una de las caras del intercambiador de calor, específicamente en la cara de entrada del fluido por los tubos. Se puede apreciar la malla no estructurada con elementos tetraédricos.

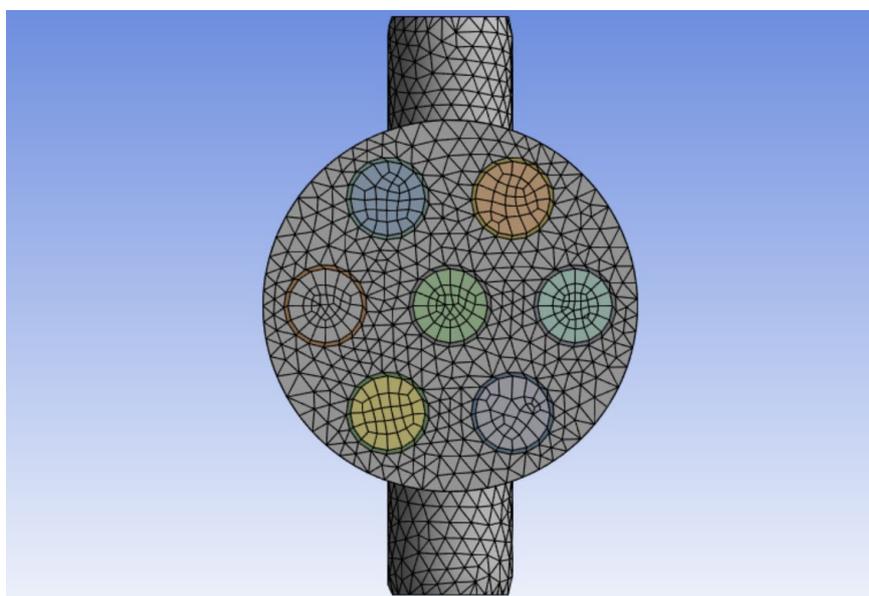


Ilustración 3-6: Vista de la malla en una de las caras del intercambiador

Realizado por: Crespo L., 2023.

3.4.3. Calidad del mallado

El nivel de estabilidad y exactitud de los resultados depende, en gran medida, de la calidad de la malla generada. Por lo tanto, más allá del tipo de malla empleado, es esencial corroborar la calidad

del mallado, que tiene mucho que ver con la simetría que presentan los elementos geométricos que forman parte del dominio.

Los parámetros que se usarán para verificar la calidad del mallado serán la oblicuidad ('skewness') y la calidad ortogonal ('orthogonal quality'), que son las métricas más comúnmente utilizadas que proporciona ANSYS® para determinar las estadísticas de malla. En la ilustración 3-7 se presentan los valores recomendables para un mallado aceptable de acuerdo a cada una de estas variables.

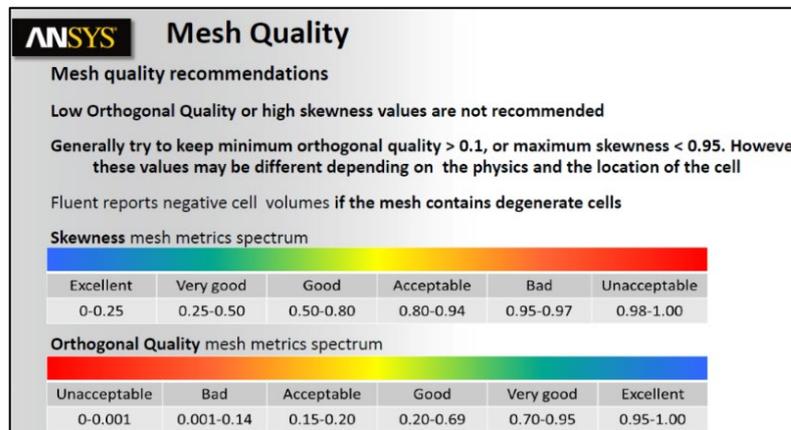


Ilustración 3-7: Recomendaciones de ANSYS® para las métricas de malla

Fuente: ANSYS®, 2015.

3.5. Simulación

Una vez construida la geometría 3D y generada la malla para el modelo del intercambiador de calor, el siguiente paso es la simulación, donde el software ANSYS®, con su herramienta Fluent, da solución a las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido incompresible (ecuaciones de Navier Stokes). Para esto se establecen los parámetros de simulación, que incluyen las condiciones de frontera, el modelo de turbulencia y las propiedades del fluido. Por último, en el post-procesamiento observamos el comportamiento del fluido en toda la estructura y cómo se desarrollan las variables en el proceso.

3.5.1. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se definieron con base en lo presentado en el artículo de Ozden & Tari, (2010, p. 1007). El caudal másico (0.5, 1, 2 kg/s) y los valores de temperatura se asignan a la entrada de la coraza del intercambiador de calor. La temperatura de entrada de la coraza se establece en

300 K. Se asigna una presión manométrica cero a la salida de la coraza para obtener la caída de presión relativa entre la entrada y la salida. Se supone que el perfil de velocidad de entrada es uniforme. No se asigna ninguna condición de deslizamiento a todas las superficies. La condición de contorno de flujo de calor cero se asigna a la pared exterior de la coraza, suponiendo está perfectamente aislada por fuera. De acuerdo al estudio de Ozden & Tari, (2010, p. 1007), el análisis se concentra en el flujo del lado de la coraza. Después de modelar los tubos como cilindros sólidos, la temperatura de 450 K se asigna a las paredes de los tubos.

3.5.2. Modelo de turbulencia

Dado que el flujo en el intercambiador se va a considerar como turbulento, los efectos de la turbulencia deben tenerse en cuenta mediante el modelado de la turbulencia. La elección del modelo de turbulencia es muy crítica en las simulaciones CFD. Sin embargo, no existe un criterio universal para seleccionar un modelo de turbulencia. El modelo de turbulencia utilizado en un proyecto puede no funcionar en otro estudio. Es aconsejable probar algunos modelos de turbulencia diferentes. En este proyecto, y basándose en los estudios realizados por Ozden & Tari, (2010, p. 1007), se determinó que el modelo k-ε realizable es el óptimo conforme al esfuerzo computacional que requiere y los recursos disponibles.

3.5.3. Propiedades del fluido

El fluido de trabajo que se escogió fue el agua y, por el lado de la coraza entra a 300 K. Para el análisis se toman en cuenta las propiedades que presenta ANSYS® Fluent (ilustración 3-8). La solución se da en estado estacionario y con las propiedades del fluido constantes.

Name	Material Type	Order Materials by
water-liquid	fluid	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials	<input type="radio"/> Chemical Formula
h2o<l>	water-liquid (h2o<l>)	<input type="button" value="Fluent Database..."/> <input type="button" value="GRANTA MDS Database..."/> <input type="button" value="User-Defined Database..."/>
Properties		
Density [kg/m ³]	constant	<input type="button" value="Edit..."/>
	998.2	
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant	<input type="button" value="Edit..."/>
	4182	
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant	<input type="button" value="Edit..."/>
	0.6	
Viscosity [kg/(m s)]	constant	<input type="button" value="Edit..."/>
	0.001003	

Ilustración 3-8: Propiedades del agua para la simulación en ANSYS®

Realizado por: Crespo L., 2023.

3.5.4. Visualización y validación de resultados

La etapa de post-procesamiento nos permite obtener los resultados de la simulación en estado estacionario de forma gráfica. Se analizarán los perfiles de velocidad del fluido en el lado de la coraza, así como las líneas de flujo para esta misma variable. De esta forma, se validará la simulación comparando las gráficas obtenidas con las reportadas por Ozden & Tari, (2010, pp. 1010-1011) en su estudio. Además, también se utilizarán los valores de temperatura de salida de la coraza, caída de presión en el lado de la coraza y la tasa de transferencia de calor total documentados por Ozden & Tari, (2010, p. 1008) para la validación.

3.6. Metodología para la práctica

Siendo uno de los objetivos del presente trabajo de integración curricular, se definirá la guía de práctica de CFD para la asignatura de transferencia de calor de acuerdo a la malla curricular de la carrera de ingeniería química de la ESPOCH. Para lo cual, se plantean posibles temas de prácticas, que abarquen temáticas que se relacionan con la cátedra mencionada, afín a la Dinámica de Fluidos Computacional.

Tabla 3-4: Práctica de simulación numérica para la cátedra de transferencia de calor.

Cátedra	Contenidos previos	Tema de práctica
Transferencia de calor	<ul style="list-style-type: none">- Introducción y conceptos básicos.- Métodos de transferencia de calor: conducción y convección.- Intercambiadores de calor.	Análisis computacional del funcionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza

Realizado por: Crespo L., 2023.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Modelo

Con ayuda de la herramienta DesignModeler de ANSYS®, se modeló con éxito la geometría 3D del intercambiador de calor de tubos y coraza escogido con las dimensiones especificadas en la tabla 3. El modelo tridimensional que se aprecia en la ilustración 4-1 nos ayuda a visualizar con detalle la estructura geométrica del intercambiador que posteriormente servirá para la simulación del comportamiento del fluido en el mismo. El anexo A muestra el modelo acotado con sus dimensiones debidamente detalladas.

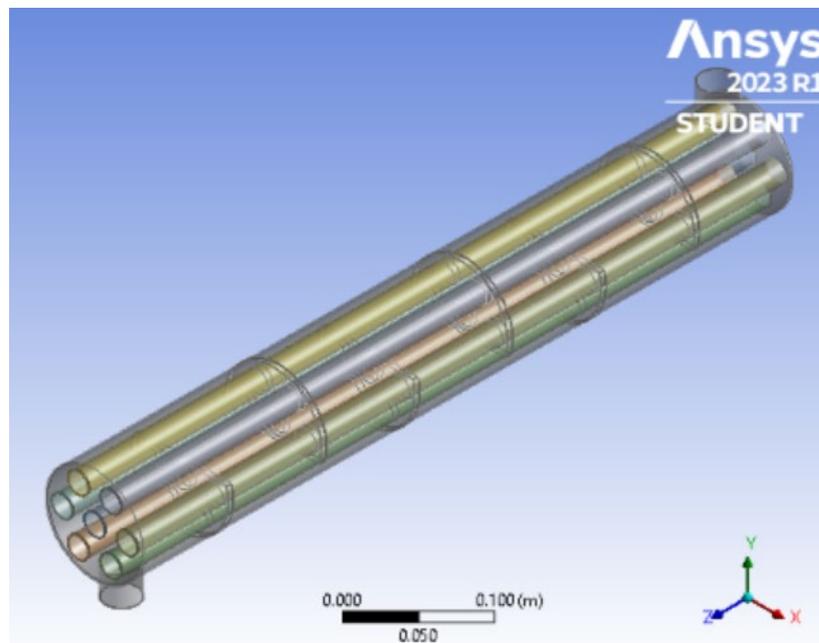


Ilustración 4-1: Modelo 3D del intercambiador de calor desarrollado en ANSYS®

Realizado por: Crespo L., 2023.

4.2. Mallado

En la herramienta Mesh de ANSYS® existe un apartado para la revisión de la calidad del mallado de acuerdo a los parámetros que se estableció previamente: la oblicuidad y la calidad ortogonal. La primera se refiere a la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente y los resultados obtenidos respecto a este parámetro se muestran en las ilustraciones 4-2 y 4-3.

Details of "Mesh"	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	0.9
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1.1597e-004
<input type="checkbox"/> Max	0.99666
<input type="checkbox"/> Average	0.32037
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.21913

Ilustración 4-2: Detalle de la oblicuidad del mallado

Realizado por: Crespo L., 2023.

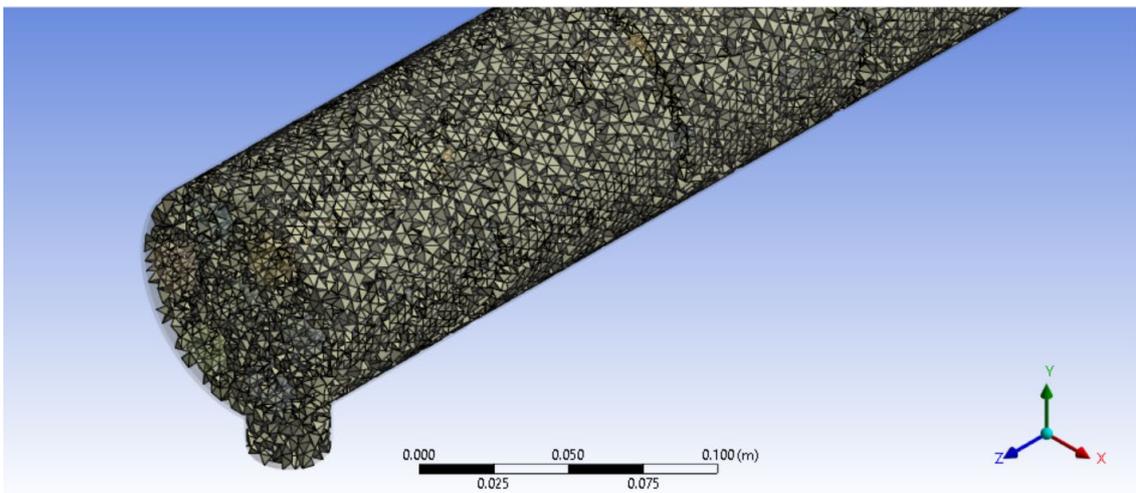


Ilustración 4-3: Elementos de oblicuidad menores a 0.25

Realizado por: Crespo L., 2023.

Además, la ilustración 4-4 nos ofrece una representación gráfica de la oblicuidad versus el número de elementos en el dominio, que nos permite analizar más a profundidad la calidad del mallado.

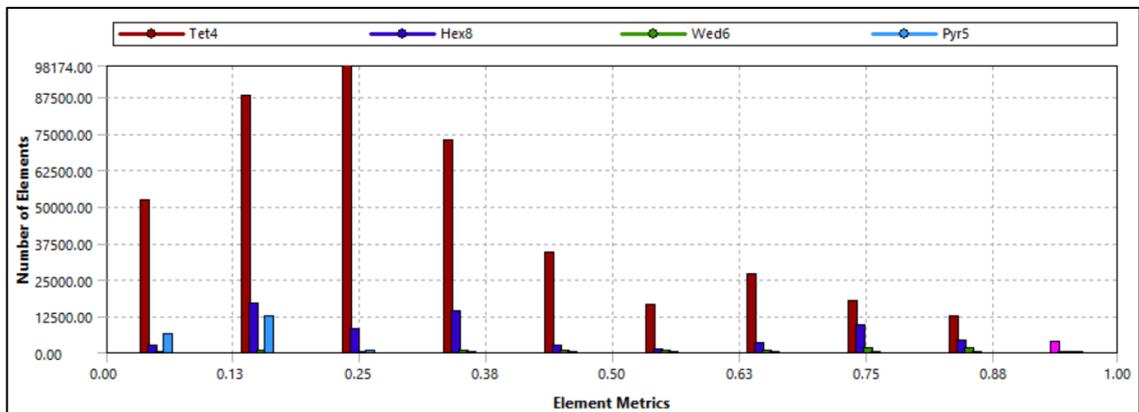
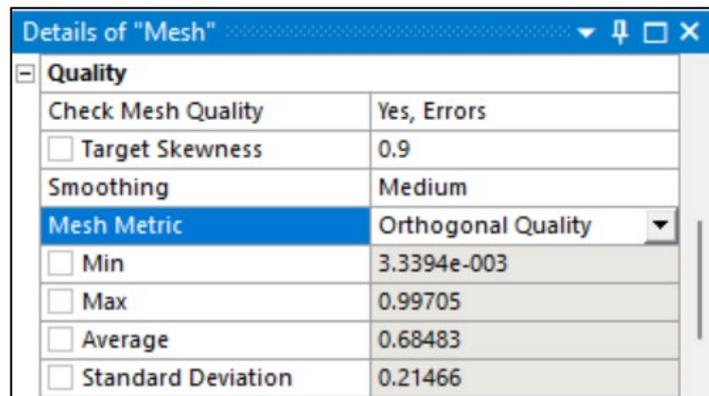


Ilustración 4-4: Oblicuidad vs número de elementos en el dominio

Realizado por: Crespo L., 2023.

Podemos observar que la mayoría de los elementos del dominio se encuentran en el rango de valores de oblicuidad de 0.5 o menores, por lo que podemos afirmar que, bajo el análisis de oblicuidad, la malla es de alta calidad.

Por otro lado, la calidad ortogonal se refiere al grado en que los ángulos entre elementos de malla adyacentes están cerca de los 90 grados. Las ilustraciones 4-5 y 4-6 muestran en detalle los resultados obtenidos con respecto al parámetro de calidad ortogonal de la malla generada en nuestra geometría.



Details of "Mesh"	
<input checked="" type="checkbox"/> Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	0.9
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	3.3394e-003
<input type="checkbox"/> Max	0.99705
<input type="checkbox"/> Average	0.68483
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.21466

Ilustración 4-5: Detalle de la calidad ortogonal del mallado

Realizado por: Crespo L., 2023.

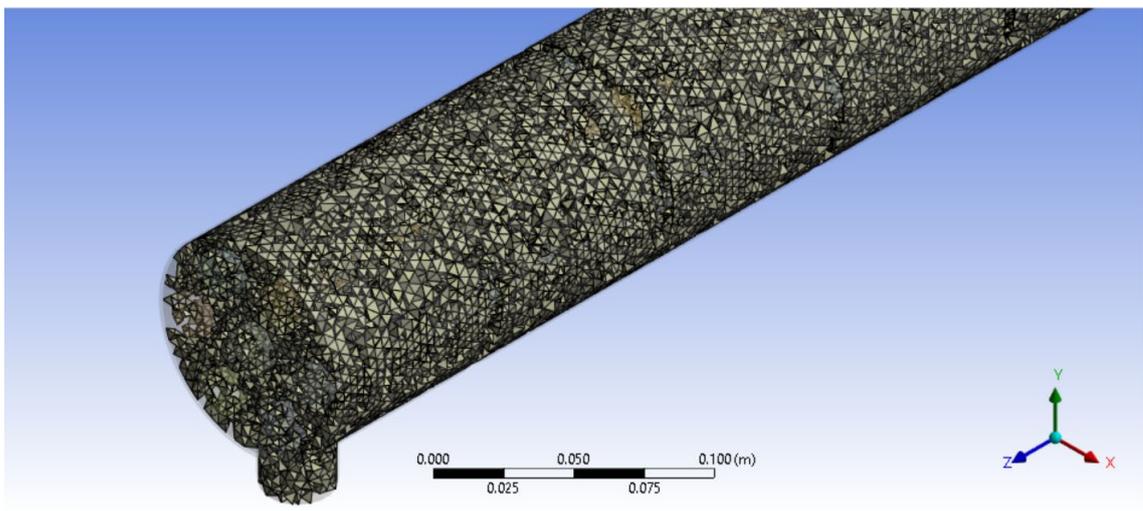


Ilustración 4-6: Elementos con calidad ortogonal mayor a 0.88

Realizado por: Crespo L., 2023.

Además, obtuvimos la ilustración 4-7 nos muestra una representación gráfica del número de elementos con sus respectivos valores de calidad ortogonal, con lo que podemos distinguir con mayor claridad la calidad de los elementos de nuestra malla.

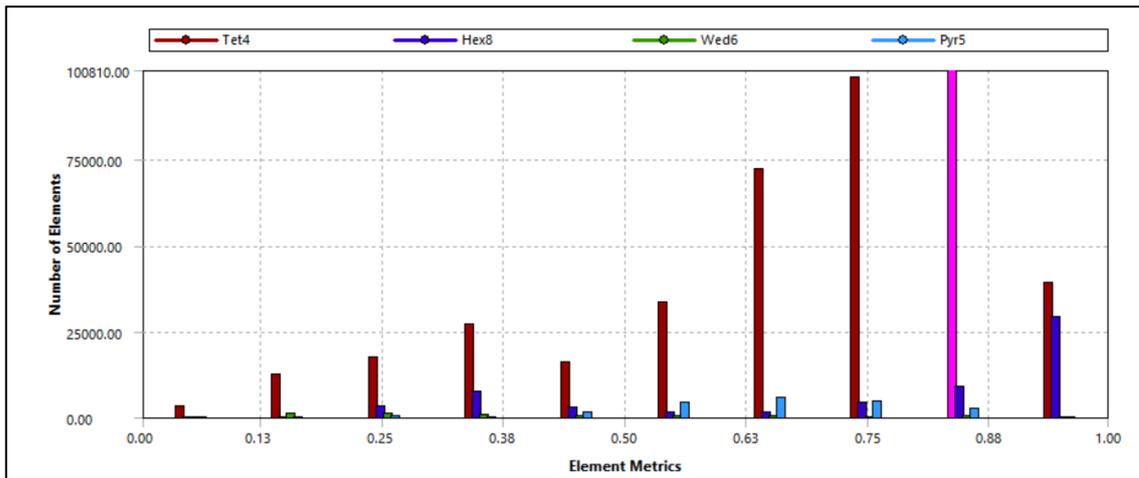


Ilustración 4-7: Calidad ortogonal vs número de elementos en el dominio

Realizado por: Crespo L., 2023.

En la gráfica podemos distinguir que la mayoría de los elementos de la malla tienen un valor de calidad ortogonal superior a 0.63, por lo que, podemos afirmar que se encuentran en el rango de valores de muy buenos a excelentes. De esto concluimos que la calidad del mallado, de acuerdo al análisis de calidad ortogonal, es de muy buena a excelente calidad.

4.3. Simulación

Para obtener los resultados, es esencial llevar a cabo la simulación y establecer un determinado número de iteraciones. En el caso de que los criterios de convergencia no sean satisfechos, el software (Fluent) se detendrá después de completar el número fijado de iteraciones. La tabla 4-1 presenta la cantidad de iteraciones utilizadas en la simulación para la geometría investigada. Además, se proporciona una cifra aproximada a la cual el programa debe llegar para converger. Con el objetivo de simplificar y acelerar el procedimiento de simulación, se empleó un número limitado de repeticiones. Debido a que el propósito principal de este estudio es emplear las simulaciones en la enseñanza de la cátedra de transferencia de calor, no es crucial obtener resultados extremadamente precisos durante la fase de validación. Además, se usó un criterio de convergencia con una tolerancia de $1 \cdot 10^{-6}$.

Tabla 4-1: Número de iteraciones empleadas en la simulación

Tipo de geometría	Número de iteraciones	Convergencia (aprox.)
Intercambiador de calor de tubos y coraza	250	240

Realizado por: Crespo L., 2023.

La ilustración 4-8 presenta los residuales de las simulaciones correspondientes a la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes que gobiernan el flujo en el interior de la geometría. Se realizaron 3 corridas diferentes, para distintos flujos máscicos a la entrada del intercambiador: 0.5, 1 y 2 kg/s.

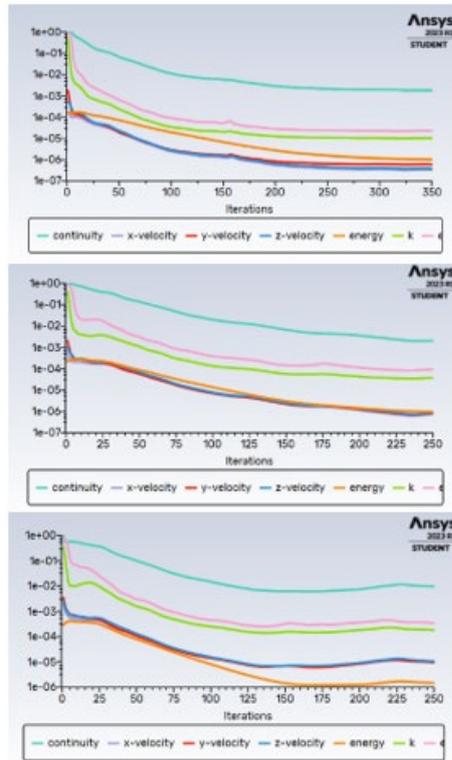


Ilustración 4-8: Valores de residuales

Realizado por: Crespo L., 2023.

Observamos que la simulación, en los tres casos, alcanzó el número total de iteraciones. Los valores de los residuales disminuyen de forma constante con el aumento de las iteraciones y terminan en valores alrededor del orden de $1 \cdot 10^{-6}$, por lo que, podemos concluir que la simulación obtuvo una convergencia exitosa, al acercarse al valor de tolerancia establecido.

La tabla 4-2 detalla los resultados del análisis CFD y la comparación con los datos de bibliografía que permiten validar la simulación. Para realizar la validación de la simulación, se utilizó la ecuación (33), que nos permite calcular el error porcentual existente entre los resultados de la simulación y los resultados de bibliografía.

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{x - x_0}{x_0} \right| * 100\% \quad (33)$$

Donde:

x = valor aproximado (resultado de la simulación)

x_0 = valor real (resultado de bibliografía)

Tabla 4-2: Resultados del análisis CFD

Modelo de viscosidad	Flujo másico (kg/s)	Variables calculadas	Resultados del análisis CFD	Resultados Ozden & Tari, (2010)	Error (%)
<i>k-ε</i> realizable	0.5	Temperatura de salida del lado de la coraza (K)	332.90	334.20	0.39
		Caída de presión del lado de la coraza (Pa)	949.29	1509	37.09
		Tasa total de transferencia de calor (W)	68833.7	71808	4.14
	1	Temperatura de salida del lado de la coraza (K)	323.07	327.72	1.42
		Caída de presión del lado de la coraza (Pa)	6275.29	6112	2.67
		Tasa total de transferencia de calor (W)	96608.46	118515	18.48
	2	Temperatura de salida del lado de la coraza (K)	315.74	325.74	3.07
		Caída de presión del lado de la coraza (Pa)	28841.53	24464	17.89
		Tasa total de transferencia de calor (W)	131828.4	219733	40.01

Realizado por: Crespo L., 2023.

Se comparan los valores de temperatura de salida del lado de la coraza, la caída de presión del fluido del lado de la coraza y la tasa total de transferencia de calor para los 3 valores de flujo másico a los que se simuló. Los valores de error porcentual obtenidos de la comparación de los resultados del análisis CFD con respecto a los datos de bibliografía muestran que la simulación con un flujo másico de entrada de 1 kg/s obtuvo mejores resultados, con un 1.42% de error para la temperatura, un 2.67%, para la caída de presión y un 18.48% para la tasa de transferencia total de calor. El modelo de intercambiador de calor es validado de acuerdo a los datos presentados.

En la etapa de post-procesamiento se visualizan y analizan gráficamente los perfiles de velocidad, temperatura y presión para los 3 casos de simulación y se comparan con los obtenidos por el estudio de Ozden & Tari, (2010, pp. 1010-1011). El caso 2 (1 kg/s) se toma como referencia para la validación, dado que es con el que se obtuvo resultados más aproximados a los de bibliografía y del que Ozden & Tari, (2010, p. 1008) presentan gráficas con las que comparar. Las ilustraciones 4-9 y 4-10 muestran una comparación entre los perfiles de velocidad para el caso 2.

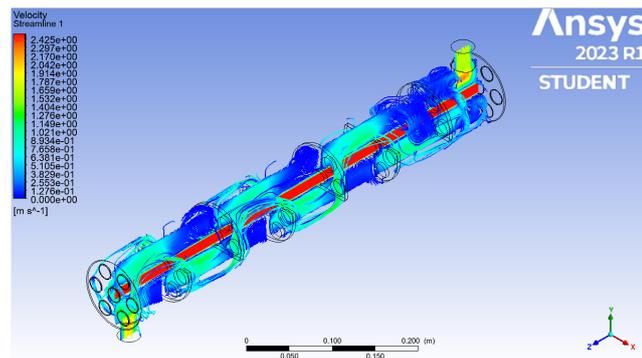


Ilustración 4-9: Líneas de flujo de velocidad (1 kg/s)

Realizado por: Crespo L., 2023.

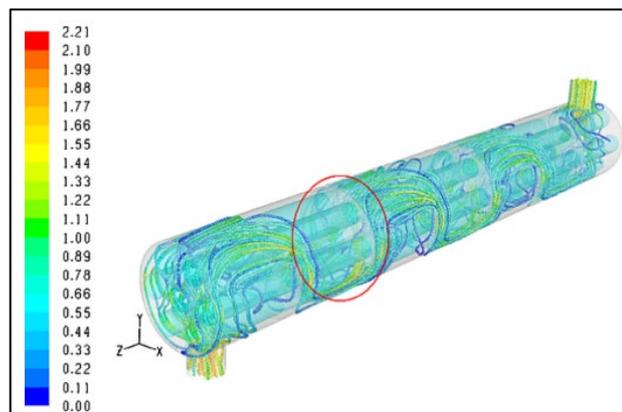


Ilustración 4-10: Líneas de flujo de velocidad del modelo de bibliografía

Fuente: Ozden & Tari, 2010.

Podemos verificar que las líneas de flujo de velocidad del modelo son muy similares de las obtenidas por Ozden & Tari, (2010, pp. 1010-1011), con valores alrededor de 1.5 m/s para el flujo de fluido del lado de la coraza. Se observa claramente que la dirección del fluido está condicionada por la presencia de los deflectores. Además, podemos observar con claridad el efecto de los deflectores en la velocidad de flujo, siendo que, más cerca de los deflectores existen “zonas muertas” donde la velocidad del fluido disminuye considerablemente con relación a la corriente central. La ilustración 4-11 muestra los contornos de temperatura en el intercambiador de calor para el caso 2 (1 kg/s).

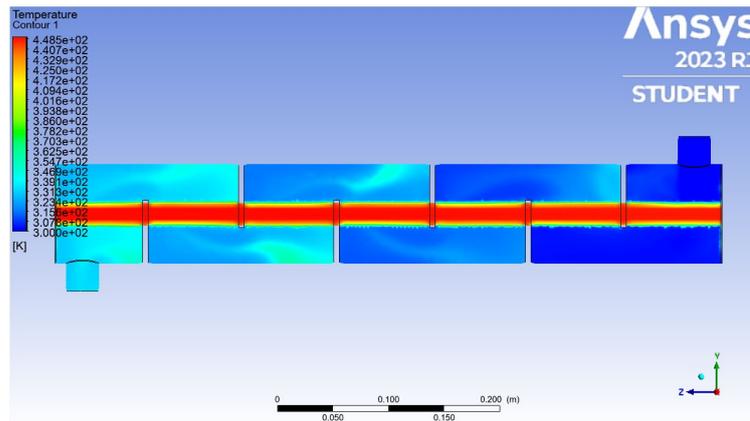


Ilustración 4-11: Contorno de temperatura del modelo (1 kg/s)
 Realizado por: Crespo L., 2023.

Podemos observar el aumento de temperatura que existe del lado de la coraza a medida que el fluido avanza a través del intercambiador de calor. La temperatura aumenta progresivamente hasta que el fluido sale del dispositivo, demostrando que existe transferencia de calor en el interior del intercambiador y, efectivamente, el fluido del lado de la coraza es calentado por el fluido que circula a través de los tubos. La ilustración 4-12 presenta los contornos de presión de la geometría para el caso 2 (1 kg/s).

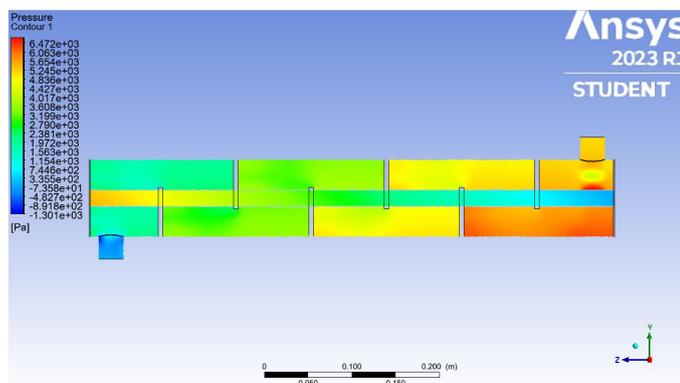


Ilustración 4-12: Contorno de presión del modelo (1 kg/s)
 Realizado por: Crespo L., 2023.

De la ilustración 4-12 podemos afirmar que el modelo presenta una distribución coherente de presión del lado de la coraza, dado que, esta va disminuyendo progresivamente mientras el fluido fluye desde la entrada del intercambiador hasta la salida, diferenciando una clara caída de presión. Además, no se evidencian zonas con presiones atípicas o caídas de presión pronunciadas, por lo que, se puede decir que los valores de presión se encuentran dentro de la normalidad.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos en los 3 casos. La ilustración 4-13 presenta una comparación entre las líneas de flujo de la velocidad para flujos másicos de entrada de 0.5, 1 y 2 kg/s, respectivamente.

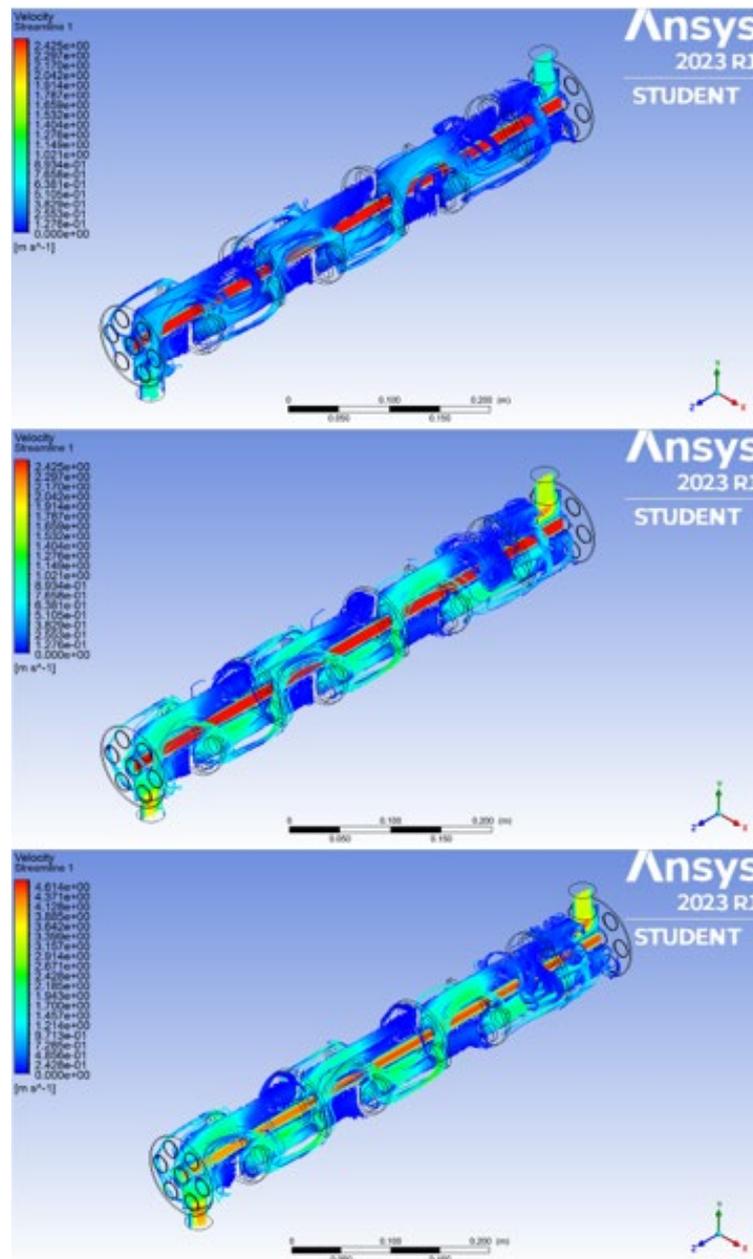


Ilustración 4-13: Líneas de flujo de velocidad para los 3 casos

Realizado por: Crespo L., 2023.

De la ilustración podemos evidenciar que existe una relación directamente proporcional entre el flujo másico a la entrada y la velocidad de flujo en el intercambiador de calor, es decir, el caso 3, con un flujo másico de 2 kg/s presenta mayor velocidad de flujo, con valores de alrededor 2-2.5 m/s en la corriente central de flujo en la coraza. Además, se observa que la velocidad es mayor en lugares donde el área de la sección transversal es menor, es decir, en las zonas de entrada y salida de la coraza, presentando una velocidad relativamente uniforme en el flujo en el interior de la coraza. La ilustración 4-14 muestra los contornos de temperatura de los 3 casos simulados.

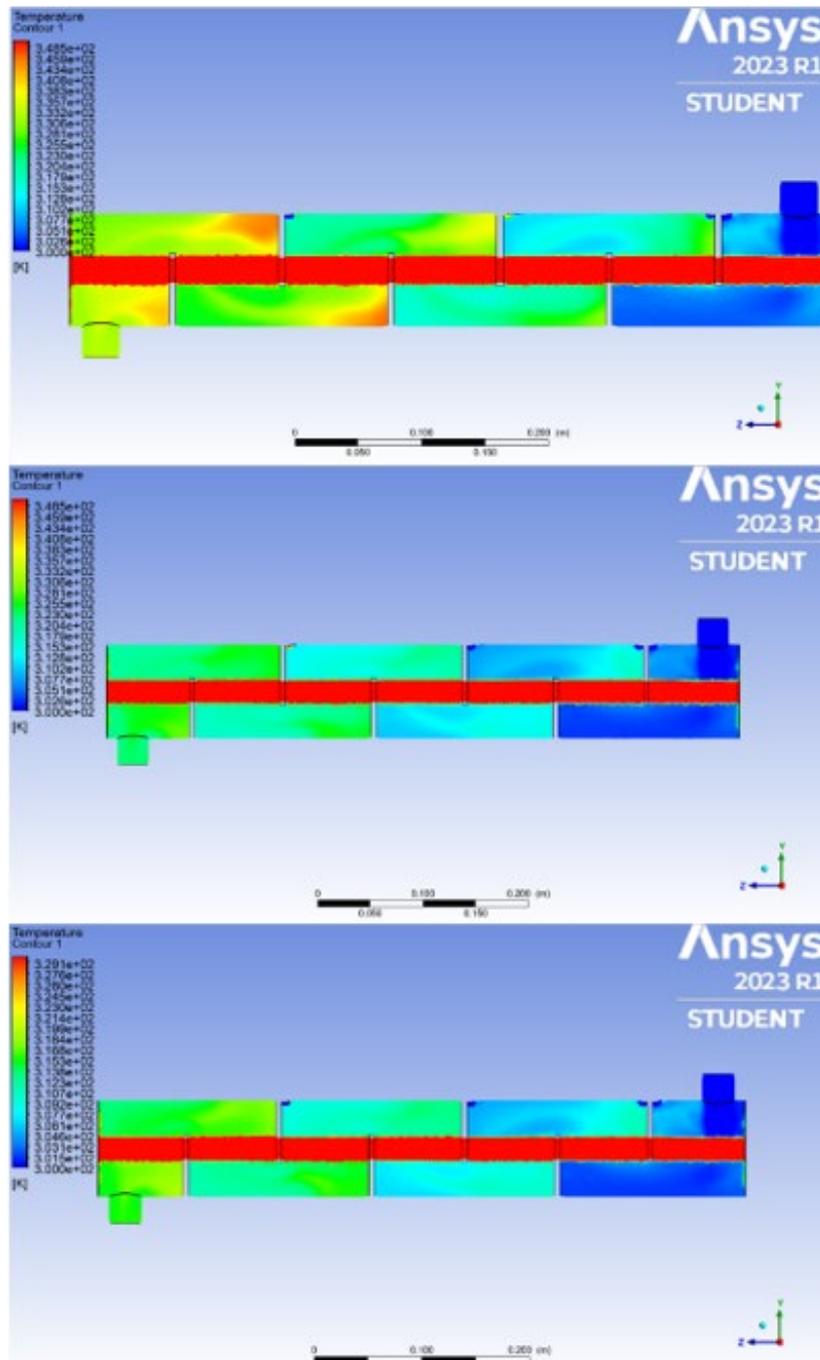


Ilustración 4-14: Contornos de temperatura del modelo en los 3 casos

Realizado por: Crespo L., 2023

En la ilustración 4-14 se visualiza que la relación entre el flujo másico y la temperatura es inversamente proporcional, es decir, a medida que se incrementa el valor del flujo másico a la entrada, el valor de temperatura a la salida es menor. Esto se debe a que, si el valor de flujo másico es más alto, una mayor cantidad de fluido está pasando a través del intercambiador, lo que puede disipar más calor. Como resultado, el fluido sale a una temperatura más baja en el caso 3, que se simuló con un flujo másico de 2 kg/s. Por último, la ilustración 4-15 presenta las gráficas de contornos de presión para los 3 casos simulados.

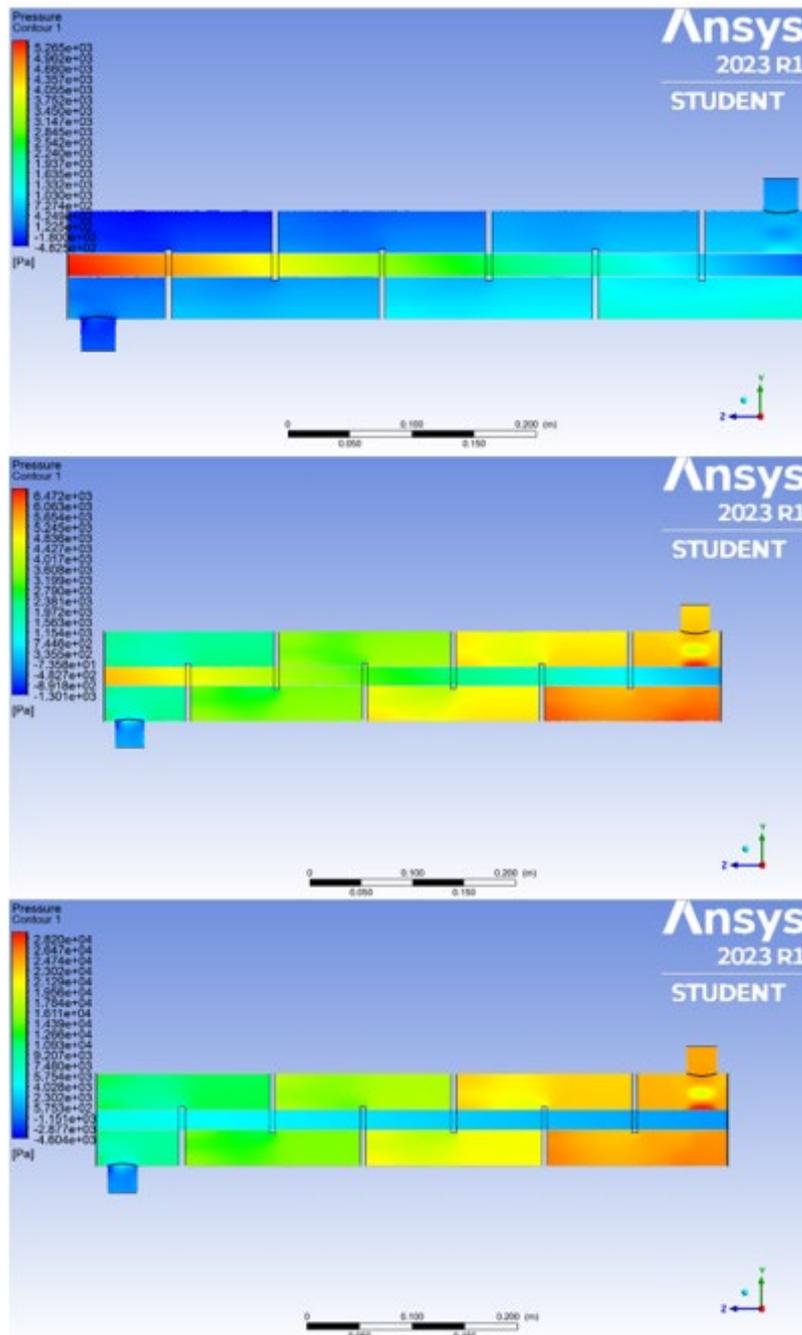


Ilustración 4-15: Contornos de presión del modelo en los 3 casos

Realizado por: Crespo L., 2023.

De acuerdo a la ilustración 4-15, podemos afirmar que, a medida que se aumenta el flujo másico a la entrada del intercambiador de calor, el diferencial de presión entre la entrada y la salida del intercambiador aumenta. Esto puede deberse a que un mayor flujo de fluido puede causar una mayor pérdida de presión debido a la fricción en las paredes del intercambiador. Además, se visualiza que existe una distribución similar de presión a lo largo del intercambiador de calor en los 3 casos, y, con la diferencia de los valores, la distribución de la presión es uniforme a lo largo de la coraza del intercambiador.

4.4. Metodología para la práctica

Los resultados obtenidos en el presente proyecto se plasmaron en el desarrollo de material educativo en forma de una guía de práctica de laboratorio de simulación numérica apoyada en la herramienta computacional CFD dirigida a los estudiantes de la cátedra de transferencia de calor de la carrera de Ingeniería Química de la ESPOCH. Esto les permitirá relacionarse de forma más práctica con el comportamiento de los intercambiadores de calor y los fenómenos que suceden en su funcionamiento.

La práctica establecida se enfoca en la simulación numérica del comportamiento del fluido y la transferencia de calor que sucede en un intercambiador de calor de tubos y coraza a diferentes condiciones de entrada. La guía de la práctica se encuentra detallada en el anexos B. Esta presenta todos los parámetros necesarios para realizar la simulación y el análisis del modelo, de manera que se evidencia de forma precisa el comportamiento del dispositivo.

4.4.1. Guía de práctica de transferencia de calor

La práctica con el tema “Análisis computacional del funcionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza” se plantea con el objetivo de que el estudiante analice las variables más importantes que se estudian en el proceso de transferencia de calor que sucede en este tipo de dispositivos. Los estudiantes evidenciarán los gradientes de temperatura, caídas de presión, tasa de transferencia de calor total, conducción, convección, entre otros. Mediante la manipulación de las variables de entrada y las condiciones de frontera del modelo, podrán simular el comportamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza, presentando resultados de:

- Líneas de flujo de velocidad.
- Contornos de temperatura y presión.
- Vectores de temperatura.
- Flujos de calor en el intercambiador.

CONCLUSIONES

- En este proyecto se aplicó modelos CFD en un intercambiador de calor de tubos y coraza como complemento didáctico de la cátedra de transferencia de calor de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, y, con esto, la integración de estas simulaciones numéricas enriqueció significativamente la experiencia de aprendizaje de los estudiantes al brindarles la oportunidad de explorar y comprender de manera práctica los fenómenos de transferencia de calor en un escenario realista y controlado. El análisis detallado realizado a través de los modelos CFD ha permitido visualizar y cuantificar aspectos fundamentales de la transferencia de calor en el intercambiador, incluyendo perfiles de temperatura, distribuciones de velocidades y pérdidas de presión. Estos resultados, respaldados por datos numéricos y visualizaciones gráficas, proporcionaron una base sólida para la comprensión teórica de los conceptos abordados en la cátedra.
- Se estableció las ecuaciones y condiciones de diseño del intercambiador de calor logrando comprender y formalizar las relaciones clave entre las variables de diseño, las características del fluido y los parámetros de transferencia de calor. La tarea de derivar y formalizar las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del intercambiador de calor, junto con la identificación minuciosa de las condiciones de diseño críticas, estableció un marco teórico sólido que sirvió como guía para la implementación de la simulación CFD, asegurando que los resultados sean precisos y consistentes con las leyes fundamentales de la termodinámica y la mecánica de fluidos.
- Se modeló mediante un software CAD un intercambiador de calor de tubos y coraza, obteniendo un modelo 3D que proporcionó una representación visual del intercambiador de calor y permitió un análisis exhaustivo del comportamiento de los fluidos en su interior. Se utilizó la herramienta DesignModeler del software ANSYS®. Los parámetros geométricos se determinaron de acuerdo a los datos extraídos de bibliografía, modelando un intercambiador de calor con 7 tubos, 6 deflectores, un corte del deflector del 36%, diámetro de la coraza de 90 mm, diámetro externo de los tubos de 20 mm y largo del intercambiador de calor de 90 mm, como dimensiones y consideraciones de diseño más importantes del modelo. Además, estas reducidas dimensiones ayudaron a obtener un modelo más detallado y a realizar observaciones más sólidas del comportamiento del fluido.
- Se simuló mediante CFD, con la ayuda del software ANSYS® Fluent, el comportamiento del intercambiador de calor de tubos y coraza, lo que permitió visualizar de manera virtual cómo el fluido fluye a través de los tubos y la coraza, cómo se distribuye la temperatura y cómo se

intercambia el calor entre los medios. Esto se logró estableciendo de forma precisa las condiciones de frontera, con una temperatura de entrada de 300 K, presión manométrica de cero a la salida de la coraza, temperatura de 450 K en las paredes de los tubos y tres flujos máxicos diferentes a la entrada de la coraza: 0.5, 1 y 2 kg/s. Además, el modelo de turbulencia seleccionado fue el k- ϵ realizable. Los resultados se compararon con datos de bibliografía y el caso 2 (1 kg/s) fue el que arrojó mejores resultados con errores porcentuales de 1.42, 2.67 y 18.48% para la temperatura de salida del lado de la coraza, caída de presión del lado de la coraza y tasa total de transferencia de calor, respectivamente.

- Se elaboró la guía de la práctica de simulación numérica para la cátedra de transferencia de calor que no solo servirá como un recurso valioso para los estudiantes, sino que también enriquecerá la enseñanza de la cátedra de transferencia de calor al introducir un enfoque práctico y aplicado. Para esto se identificaron y estructuraron cuidadosamente los contenidos esenciales de la práctica, desde la formulación de ecuaciones fundamentales hasta la interpretación de resultados y conclusiones. Además, se proporcionó una descripción paso a paso de los procedimientos técnicos necesarios para llevar a cabo las simulaciones de manera exitosa.

RECOMENDACIONES

- Incorporar de manera continua y sistemática el enfoque de simulación numérica mediante CFD en la cátedra de transferencia de calor. Esto permitirá a los estudiantes adquirir habilidades y conocimientos prácticos que son cada vez más relevantes en la industria y la investigación.
- Dado que las tecnologías y herramientas de simulación evolucionan con el tiempo, se sugiere revisar y actualizar periódicamente las guías de prácticas de simulación numérica. Mantener el contenido actualizado garantizará que los estudiantes trabajen con las últimas versiones de software y enfoques metodológicos.
- Incluir una sección específica en la cátedra que se centre en la interpretación y análisis crítico de los resultados obtenidos de las simulaciones CFD. Esto ayudará a los estudiantes a comprender la relevancia práctica de los datos generados y desarrollar habilidades para tomar decisiones informadas en el diseño y optimización de este tipo de sistemas.
- Animar a los estudiantes a explorar diferentes configuraciones y condiciones de operación en las simulaciones CFD puede ampliar su comprensión de cómo los cambios en los parámetros afectan el rendimiento del intercambiador de calor. Esto fomentará el pensamiento crítico y la experimentación virtual.

BIBLIOGRAFÍA

ABBOUD, Alexander W., 2023. Coupled chemical–CFD modeling of unsealed dry storage of advanced test reactor spent fuel. *Annals of Nuclear Energy*. 1 April 2023. Vol. 183. DOI 10.1016/J.ANUCENE.2022.109646.

ADAIR, Desmond, BAKENOV, Zhumabay and JAEGER, Martin, 2014. Building on a traditional chemical engineering curriculum using computational fluid dynamics. *Education for Chemical Engineers*. 1 December 2014. Vol. 9, no. 4, pp. e85–e93. DOI 10.1016/J.ECE.2014.06.001.

ALI, Mohamed R., AL-KHALED, Kamel, HUSSAIN, Muzamil, LABIDI, Taher, KHAN, Sami Ullah, KOLSI, Lioua and SADAT, R., 2023. Effect of design parameters on passive control of heat transfer enhancement phenomenon in heat exchangers–A brief review. *Case Studies in Thermal Engineering*. 1 March 2023. Vol. 43, pp. 102674. DOI 10.1016/J.CSITE.2022.102674.

ALOBALD, Falah, ALMOHAMMED, Naser, MASSOUDI FARID, Massoud, MAY, Jan, RÖSSGER, Philip, RICHTER, Andreas and EPPLE, Bernd, 2022. Progress in CFD Simulations of Fluidized Beds for Chemical and Energy Process Engineering. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1 July 2022. Vol. 91. DOI 10.1016/J.PECS.2021.100930.

ANDERSON, John D., 1995. *Computational Fluid Dynamics*. New York: McGraw-Hill. ISBN 0070016852.

ARIDI, Rima, ALI, Samer, LEMENAND, Thierry, FARAJ, Jalal and KHALED, Mahmoud, 2022. CFD analysis on the spatial effect of vortex generators in concentric tube heat exchangers – A comparative study. *International Journal of Thermofluids*. 1 November 2022. Vol. 16. DOI 10.1016/J.IJFT.2022.100247.

ARSHI BANU, P. S., N. S. RAMESH LOHITH, D., PRAVEEN KALYAN, M., VEMPATI, Dilip Sai and HEMANTH SAI, B., 2022. Simulation of fin and tube heat exchanger and validation with CFD analysis. *Materials Today: Proceedings*. 1 January 2022. Vol. 66, pp. 1471–1476. DOI 10.1016/J.MATPR.2022.05.552.

ASLAM BHUTTA, Muhammad Mahmood, HAYAT, Nasir, BASHIR, Muhammad Hassan, KHAN, Ahmer Rais, AHMAD, Kanwar Naveed and KHAN, Sarfaraz, 2012. CFD

applications in various heat exchangers design: A review. *Applied Thermal Engineering*. 1 January 2012. Vol. 32, no. 1, pp. 1–12. DOI 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.09.001.

BERGMAN, Theodore, LAVINE, Adrienne, INCROPERA, Frank and DEWITT, David, 2011. *Introduction to Heat Transfer*. 6a. New Jersey: John Wiley & Sons. ISBN 978-0470-50196-2.

BHANUCHANDRARAO, D., CHAKRAVARTHY, M. Ashok, KRISHNA, Dr. Y., RAO, Dr. V.V. Subba and KRISHNA, T. Hari, 2013. CFD Analysis and Performance of Parallel and Counter Flow in Concentric Tube Heat Exchangers. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 25 November 2013. Vol. 2, no. 11. DOI 10.17577/IJERTV2IS111089.

BROOKS, R. R., 2015. Soft computing techniques. In: *Distributed Sensor Networks*. Woodhead Publishing. pp. 39–60. ISBN 978-1-78242-179-5.

CENGEL, Yunus and GHAJAR, Afshin, 2011. *Transferencia de calor y masa*. 4a. México D.F.: McGraw-Hill. ISBN 9786071505408.

CHUNG, T. J., 2002. *Computational Fluid Dynamics*. New York: Cambridge University Press. ISBN 0-521-59416-2.

DHORIA, Sneha H, MANOJ KUMAR, E, YESWANTH, I V S and JAYANTI, Lakshmi, 2018. Cfd Analysis on Concentric Tube Heat Exchanger in Parallel and Counter Flow Direction. *Dhoria Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com*. Online. 2018. Vol. 8, pp. 20–25. [Accessed 25 February 2023]. DOI 10.9790/9622-0806022025.

FRAAS, Arthur, 1989. *Heat Exchanger Design*. 2a. New Jersey: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-62868-9.

GOLDSTEIN, R. J., IBELE, W. E., PATANKAR, S. V., SIMON, T. W., KUEHN, T. H., STRYKOWSKI, P. J., TAMMA, K. K., HEBERLEIN, J. V.R., DAVIDSON, J. H., BISCHOF, J., KULACKI, F. A., KORTSHAGEN, U., GARRICK, S., SRINIVASAN, V., GHOSH, K. and MITTAL, R., 2010. Heat transfer—A review of 2004 literature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1 October 2010. Vol. 53, no. 21–22, pp. 4343–4396. DOI 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2010.05.004.

GOLSHAN, Shahab, SOTUDEH-GHAREBAGH, Rahmat, ZARGHAMI, Reza,

MOSTOUFI, Navid, BLAIS, Bruno and KUIPERS, J. A.M., 2020. Review and implementation of CFD-DEM applied to chemical process systems. *Chemical Engineering Science*. Online. 2020. Vol. 221, pp. 115646. DOI 10.1016/j.ces.2020.115646.

HOLMAN, J. P., 2010. *Heat Transfer*. 10ma. New York: McGraw Hill Higher Education. ISBN 0-07-352936-2.

HU, Howard H., 2012. Computational Fluid Dynamics. *Fluid Mechanics*. Online. 1 January 2012. pp. 421–472. [Accessed 8 January 2023]. DOI 10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1.

KAVIANY, M and KANURY, AM, 2002. Principles of Heat Transfer. *Applied Mechanics Reviews*. 1 September 2002. Vol. 55, no. 5, pp. B100–B102. DOI 10.1115/1.1497490.

LISEIKIN, Vladimir, 2010. *Grid Generation Methods*. 2a. New York: Springer. ISBN 978-90-481-2911-9.

LOKHANDE, Atharva A. and WAGHOLE, Dnyaneshwar R., 2022. CFD investigation on heat transfer enhancement in shell and tube heat exchanger using copper oxide nano liquid. *Materials Today: Proceedings*. 1 January 2022. Vol. 64, pp. 499–505. DOI 10.1016/J.MATPR.2022.04.987.

MATSSON, John, 2022. *An Introduction to ANSYS Fluent 2022*. Kansas: SDC Publications. ISBN 978-1-63057-569-4.

MILLS, Anthony F., 1992. *Heat Transfer*. Boston: Richard D. Irwin, Inc. ISBN 0-256-07642-1.

MOLTÓ, José Luis Vicéns and PARRA, Blas Zamora, 2014. Utilización de la CFD como herramienta de apoyo al estudio inicial de las Turbomáquinas Hidráulicas. *Modelling in Science Education and Learning*. Online. 30 March 2014. Vol. 7, no. 0, pp. 49–59. [Accessed 8 January 2023]. DOI 10.4995/MSEL.2014.2091.

MROPE, Hamisi Ally, ABEID, Yusufu, JANDE, Chande and KIVEVELE, Thomas T, 2021. A Review on Computational Fluid Dynamics Applications in the Design and Optimization of Crossflow Hydro Turbines. *Journal of Renewable Energy*. Online. 15 October 2021. Vol. 2021, pp. 1–13. [Accessed 8 January 2023]. DOI 10.1155/2021/5570848.

NELLIS, Gregory and KLEIN, Sanford, 2009. *Heat Transfer*. New York: Cambridge University Press. ISBN 9780511500794.

OZDEN, Ender and TARI, Ilker, 2010. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*. 1 May 2010. Vol. 51, no. 5, pp. 1004–1014. DOI 10.1016/J.ENCONMAN.2009.12.003.

ÖZİŞİK, Necati, ORLANDE, Helcio, COLAÇO, Marcelo and MACHADO, Renato, 2017. *Finite Difference Methods in Heat Transfer*. 2a. Florida: CRC Press. ISBN 978-1-4822-4345-1.

PRADHAN, Karan Kumar and CHAKRAVERTY, Snehashish, 2019. Finite Element Method. In: *Computational Structural Mechanics*. Online. Academic Press. pp. 25–28. [Accessed 28 February 2023]. ISBN 978-0-12-815492-2.

RAO, Y. V. C., 2001. *Heat Transfer*. Hyderabad: University Press (India) Limited. ISBN 81-7371-384-7.

SHAH, Ramesh K. and SEKULI, Duan P., 2003. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 9780471321712.

SOLMAZ, Serkan and VAN GERVEN, Tom, 2022. Interactive CFD simulations with virtual reality to support learning in mixing. *Computers & Chemical Engineering*. 1 January 2022. Vol. 156. DOI 10.1016/J.COMPCHEMENG.2021.107570.

STERN, Frederick, XING, Tao, YARBROUGH, Donald B., ROTHMAYER, Alric, RAJAGOPALAN, Ganesh, OTTA, Shourya Prakash, CAUGHEY, David, BHASKARAN, Rajesh, SMITH, Sonya, HUTCHINGS, Barbara and MOEYKENS, Shane, 2006. Hands-On CFD Educational Interface for Engineering Courses and Laboratories. *Journal of Engineering Education*. Online. 1 January 2006. Vol. 95, no. 1, pp. 63–83. [Accessed 25 February 2023]. DOI 10.1002/J.2168-9830.2006.TB00878.X.

STRAMANA, Angel E., PANELLA, Leandro E., COUSSIRAT, Miguel G. and GANDOLFO, Ernesto F., 2014. Uso de Herramientas CFD como Apoyo al Aprendizaje de la Mecánica de los Fluidos en la Universidad. *Mecánica Computacional*. Online. 2014. Vol. 33, no. 33, pp. 2127–2141. [Accessed 8 January 2023]. Retrieved from: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4811>

SUNDÉN, Bengt and FU, Juan, 2017. Computational Methods for the Investigations of Heat Transfer Phenomena in Aerospace Applications. In: *Heat Transfer in Aerospace Applications*. Academic Press. pp. 179–196. ISBN 978-0-12-809760-1.

TIWARI, Amit Kumar and KOLI, Chandra Shekhar, 2021. LITERATURE REVIEW ON CFD APPLICATIONS IN HEAT EXCHANGERS DESIGN. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science* www.irjmets.com @International Research Journal of Modernization in Engineering. July 2021. Vol. 3, no. 7, pp. 1542–1547.

TU, Jiyuan., YEOH, Guan Heng. and LIU, Chaoqun., 2013. *Computational fluid dynamics : a practical approach*. Elsevier/Butterworth-Heinemann. ISBN 0080982433.

VERSTEEG, H.K: and MALALASEKERA, W., 2007. *Conservation laws of fluid motion and boundary conditions*. Second. Essex, England: Pearson Education Limited. ISBN 0131274988.

WANG, Xiaoyu, GONG, Liang, LI, Yang and YAO, Jun, 2023. Developments and applications of the CFD-DEM method in particle–fluid numerical simulation in petroleum engineering: A review. *Applied Thermal Engineering*. 5 March 2023. Vol. 222. DOI 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.119865.

WENDT, John, 2009. *Computational Fluid Dynamics*. 3a. Sint-Genesius-Rode: Springer. ISBN 978-3-540-85055-7.

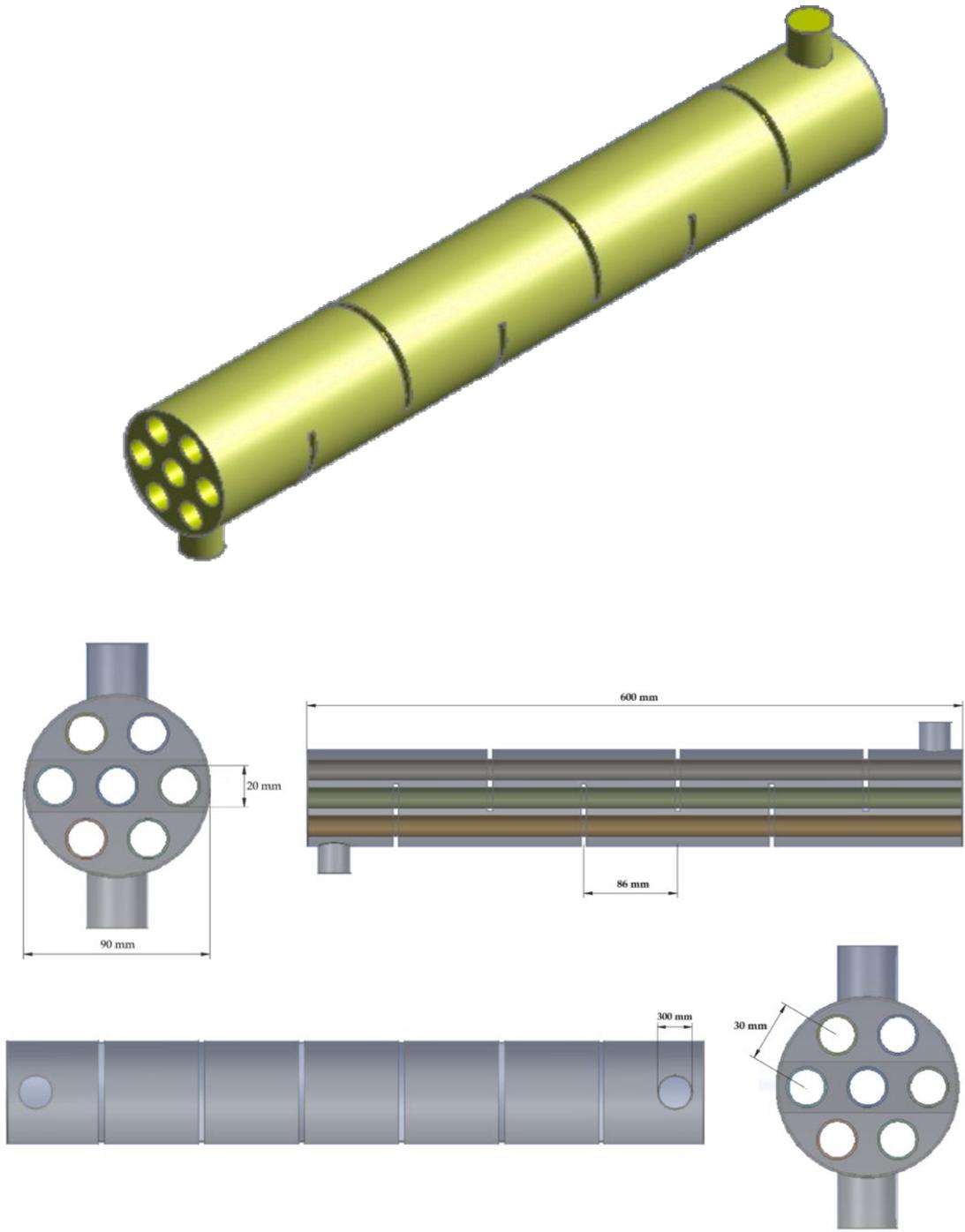
XIA, Bin and SUN, Da Wen, 2002. Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1 May 2002. Vol. 34, no. 1–3, pp. 5–24. DOI 10.1016/S0168-1699(01)00177-6.

ZENELI, Myrto, NIKOLOPOULOS, Aris, KARELLAS, Sotirios and NIKOLOPOULOS, Nikolaos, 2021. Numerical methods for solid-liquid phase-change problems. In: *Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion*. Woodhead Publishing. pp. 165–199. ISBN 978-0-12-819955-8.



ANEXOS

ANEXO A: MODELO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL ACOTADO



ANEXO B: GUÍA DE PRÁCTICA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

INFORME N° 1

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DEL FUNCIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

1. Objetivos

1.1. General:

Analizar mediante un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) el funcionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza.

1.2 Específicos (mínimo 3)

2. Parte Experimental

2.1. Materiales y Equipos:

- Computador Windows de 64 bits, procesador multi-core, como Intel Core i5 o equivalente, mínimo 8 GB de RAM.
- Materiales de oficina.
- Geometría 3D del intercambiador de calor de tubos y coraza (disponible en: [LINK](#)).
- Manual de introducción a ANSYS® Workbench (disponible en: [LINK](#)).

2.2. Procedimiento de mallado, simulación y post procesamiento:

1. Ejecutar el programa Workbench 2023 R2.
2. Seleccionar Fluid Flow (Fluent) de la columna Toolbox y arrastrar a Project Schematic.
3. Clic derecho en “Geometry” y seleccionar “Import geometry”, se importan los modelos CAD previamente descargados.
4. Ahora, clic derecho en “Geometry” y clic en “Edit Geometry in DesignModeler”. Luego, en la ventana que se abra, clic en “Generate”.
5. Clic derecho en Mesh y seleccionar “Edit”.
6. Seleccionar la opción “Mesh” y luego “Generate”.

7. Señalar cada parte del intercambiador y asignarles un nombre presionando la letra N (entrada y salida de la coraza y tubos, dominios del fluido).
8. Cerrar la ventana “Mesh” y dar doble clic en la herramienta “Setup”.
9. Realizar un Check del mallado y verificar el método de solución (pressure-based) y el tipo de flujo (steady). Además, ingresar el valor de la gravedad.
10. En la pestaña “Models”, activar la ecuación de energía en la opción “Energy” y en el modelo de viscosidad elegir el k-épsilon realizable y en “Near-Wall Treatment” la opción “Scalable Wall Functions”.
11. En la pestaña “Materials”, cargar y seleccionar el agua como fluido de trabajo y el acero como material de las paredes y tubos del intercambiador.
12. Ingresar las condiciones de contorno.
13. Establecer los valores de referencia.
14. Definir el método “Coupled” como método de solución en la pestaña “Methods”.
15. Inicializar la simulación en la pestaña “Initialization”
16. Ingresar el número de iteraciones (250) y correr la simulación en la pestaña “Run Calculation”.
17. De vuelta en el “Workbench”, dar doble clic en “Results”.
18. Analizar los resultados obtenidos de la simulación (contornos de presión, velocidad y temperatura, líneas de corriente, ...)

2.3. Procedimiento de análisis matemático:

19. En “Setup” ir a la pestaña “Results” de la parte superior y seleccionar “Report”.
20. Seleccionar las integrales de superficie para conocer los resultados de la simulación.
21. Escoger “Area Weighted Average” como tipo de reporte.
22. Seleccionar la variable temperatura.
23. Obtener los resultados de temperatura del fluido a la salida tanto de la coraza como de los tubos.

3. Marco teórico

- Intercambiadores de calor de tubos y coraza
- Dinámica de fluidos computacional
- Método de volúmenes finitos

4. Datos

4.1 Modelo CAD de la geometría importada

4.2. Parámetros de la Simulación

Tabla 1: Condiciones de contorno para la simulación

Variable	Zona	Entrada	Salida
Temperatura	Coraza	300 K	350 K
	Tubos	450 K	-
	Pared tubos	450 K	-
Flujo másico	Coraza	0.5 - 1 - 2 kg/s	-
	Tubos	1 kg/s	-
Presión	Coraza	-	0 (manométrica)
Flujo de calor	Pared coraza	0 W/m ²	-

4.3. Imágenes del mallado de la geometría

Ilustración 1: Mallado del intercambiador de calor de tubos y coraza

Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023

5. Cálculos y Resultados

5.1. Simulación y procesamiento de resultados

- Contornos

Tabla 2: Contorno de velocidad

Contorno de velocidad
Ilustración
Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:

Tabla 3: Contorno de temperatura

Contorno de temperatura
Ilustración
Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:

Tabla 4: Contorno de presión

Contorno de presión
Ilustración
Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:

- Líneas de flujo

Tabla 5: Líneas de flujo de velocidad

Líneas de flujo de velocidad
Ilustración
Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:

- Vectores

Tabla 6: Vectores de temperatura

Vectores de temperatura
Ilustración
Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:

5.2 Análisis matemático

Tabla 7: Datos de la simulación

Variable	Valor
Temperatura de entrada tubos (K)	
Temperatura de salida tubos (K)	
Temperatura de entrada coraza (K)	
Temperatura de salida coraza (K)	
Calor específico del agua (J/kg*K)	

- Cálculo del calor recibido por el fluido de la coraza

$$Q_C = \dot{m}_C \cdot c_p \cdot (T_{C o} - T_{C i})$$

Donde:

Q_C = Flujo de calor recibido por el fluido de la coraza [W]

\dot{m}_C = Flujo másico del fluido de la coraza [kg/s]

c_p = Calor específico del agua [J/kg*K]

T_{C_o} = Temperatura de salida del fluido de la coraza [K]

T_{C_i} = Temperatura de entrada del fluido de la coraza [K]

- Cálculo del calor transferido al fluido de los tubos

$$Q_T = \dot{m}_T \cdot c_p \cdot (T_{T_i} - T_{T_o})$$

Donde:

Q_T = Flujo de calor transferido al fluido de los tubos [W]

\dot{m}_T = Flujo másico del fluido de los tubos [kg/s]

c_p = Calor específico del agua [J/kg*K]

T_{T_i} = Temperatura de entrada del fluido de los tubos [K]

T_{T_o} = Temperatura de salida del fluido de los tubos [K]

- Cálculo del calor perdido

$$Q_P = Q_T - Q_C$$

Donde:

Q_P = Flujo de calor perdido al medio ambiente [K]

Tabla 8: Resultados numéricos

Variable	Valor
Flujo de calor recibido por el fluido de la coraza	
Flujo de calor transferido al fluido de los tubos	
Flujo de calor perdido al medio ambiente	

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

6.2. Recomendaciones

7. Cuestionario

¿Cómo afecta el flujo másico a la temperatura de salida del fluido que circula por la coraza? ¿Por qué?

¿Cómo se puede utilizar la CFD para optimizar el diseño de un intercambiador de calor?

8. Referencias Bibliográficas

8.1. Citas

8.2. Bibliografía

8.3. Internet

RESUMEN (150 palabras)



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 06 / 02 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Luis Adrián Crespo Asanza
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
 Firma del Director del Trabajo de Titulación
 Firma del Asesor del Trabajo de Titulación