



Diseño y construcción de un banco de pruebas termodinámico con un sistema intercambiador de calor de tubos y coraza

Andrés David Barón Vanegas

Edwin Ricardo Barragán Salazar

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2021

Diseño y construcción de un banco de pruebas termodinámico con un sistema intercambiador de calor de tubos y coraza

Andrés David Barón Vanegas

Edwin Ricardo Barragán Salazar

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director:

I.M., M.Sc., Ph.D., Nicolás Giraldo Peralta

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2021

El presente proyecto de grado está dedicado a Dios, quien con su bendición me ha permitido llegar a este momento de mi vida. A mi familia quienes han sido el pilar que no me dejo desfallecer en los momentos más difíciles en este arduo y laborioso camino. Ellos quienes me brindaron un apoyo desinteresado, su amor; consejos, comprensión y respaldo incondicional contribuyeron para que fuera posible obtener este logro tan importante en mi vida. Sin ellos nada de esto habría sido posible.

Andrés David Barón Vanegas

En primer lugar, quiero agradecer a dios por tal bendición, a mis padres que me han acompañado durante este proceso y a mi esposa que en todo momento me acompaño y me animo para no desfallecer en el camino, mis más sinceros agradecimientos para ellos, mis seres queridos por ellos estoy donde estoy. Muchas gracias.

Edwin Ricardo Barragán Salazar

Agradecimientos

En las siguientes líneas queremos expresar un sincero agradecimiento a la universidad Antonio Nariño, directivos y profesores de la facultad de ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica (FIMEB), quienes a lo largo del programa nos guiaron y entregaron su conocimiento, lo que nos permitió adquirir un desarrollo como profesionales íntegros éticos, competitivos y con calidad humana

Para finalizar queremos dar un agradecimiento sincero a nuestro director de tesis el Ing. Nicolás Giraldo Peralta, quien con su guía, experiencia, paciencia, sabiduría y confianza, nos permitió abordar esta última etapa con el propósito de obtener un trabajo de alto nivel y profesionalismo.

Resumen

En el presente documento se describe el diseño y construcción de un banco de pruebas con un intercambiador de calor de tubos y coraza con la finalidad de que su funcionamiento quede claramente evidenciado al igual que las mediciones de las variables que intervienen en el proceso, para que su conjunto sea un elemento didáctico en el aprendizaje de las materias relacionadas con la transferencia de calor. Adicionalmente, contiene unas guías de laboratorio en la cual los estudiantes podrán realizar prácticas que facilitaran la comprensión del método de intercambio de calor que presenta este tipo de intercambiadores, de una forma práctica, didáctica, técnica y amigable.

Para el diseño y posterior fabricación se utilizó el software AutoCAD, de acuerdo a los requerimientos de diseño y el espacio designado en el laboratorio de máquinas térmicas e hidráulicas de la universidad. Este empeño lo planteamos a raíz de la actual ausencia de un banco de pruebas con este tipo de intercambiadores en la sede sur de la universidad y su notoria presencia en la industria.

PALABRAS CLAVE: Banco de pruebas, conocimiento práctico, transferencia de calor, temperatura, sensores, cálculos y diseño.

Abstract

This document describes the design and construction of a test bench with a shell and tube heat exchanger so that its operation is clearly evidenced as well as the measurements of the variables involved in the process, so that its set is a didactic element in the learning of matters related to heat transfer. Additionally, it contains laboratory guides in which the student can carry out practices that will facilitate the understanding of the heat exchange method that this type of exchangers present, in a practical, didactic, technical and friendly way.

For the design and subsequent manufacture, AutoCAD software was used, according to the design requirements and the designated space in the laboratory of thermal and hydraulic machines of the university. We propose this endeavor as a result of the current absence of a test bench with this type of exchangers in the south headquarters of the university and its notorious presence in the industry.

Keywords: Testing bench, practical knowledge, heat transfer, temperature, sensors, calculations and design.

Contenido

	Pág.
Resumen	5
Lista de figuras	10
Lista de tablas	11
Introducción	12
1. Definición del proyecto	16
1.1 Objetivos	16
1.2 Antecedentes	17
1.3 Justificación	18
1.4 Metodología	19
2. Marco teórico	21
2.1 Definición de calor	21
2.2 Mecanismos de transferencia de calor	22
2.2.1 Radiación	22
2.2.2 Conducción	22
2.2.3 Convección	23
2.3 Concepto de un intercambiador de calor	24
2.4 Tipos de intercambiadores de calor	24
2.4.1 Tubo doble o tubos concéntricos	24
2.4.2 Placas y armazón	26
2.4.3 Compactos	28
2.4.4 Regenerativos	29
2.5 Conceptualización del intercambiador de tubos y coraza	30
3. Diseño y construcción del intercambiador de tubo y coraza	33
3.1 Criterios de diseño para el banco intercambiador de calor	33
3.2 Métodos usados para el análisis de intercambiadores de calor	34
3.2.1 Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD)	35
3.2.2 Número de unidades de transferencia de calor (NTU)	36

3.3	Materiales seleccionados	37
3.3.1	Perfil metálico	37
3.3.2	Acrílico	38
3.3.3	Cobre	40
3.3.4	PVC	41
3.3.5	Sistema eléctrico	41
3.3.6	Sistemas de control	42
3.3.7	Bombas para fluidos	43
3.4	Características de los fluidos y de la tubería del intercambiador	44
3.4.1	Temperatura	44
3.4.2	Flujo másico o gasto de masa	45
3.4.3	Calor específico	45
3.4.4	Densidad	46
3.4.5	Viscosidad	46
3.4.6	Conductividad térmica	46
3.5	Cálculos para el diseño del intercambiador	47
3.5.1	Razón de transferencia de calor	47
3.5.2	Calculo de la temperatura del agua a la salida	48
3.5.3	Calculo LMTD en flujo paralelo y a contraflujo	49
3.5.4	Factor de corrección	50
3.5.5	Diferencia de temperatura media	51
3.5.6	Área superficial de transferencia de calor	52
3.5.7	Calculo del número de tubos	53
3.5.8	Distancia entre centros de tubos	53
3.5.9	Diámetro del paquete de tubos	53
3.5.10	Tolerancia entre coraza y paquete de tubos	54
3.5.11	Diámetro interno de la coraza	55
3.5.12	Distancia entre deflectores	56
3.5.13	Área de flujo cruzado	56
3.5.14	Velocidad másica al interior de la coraza	56
3.5.15	Diámetro equivalente de transferencia de calor	57
3.5.16	Temperatura media aritmética del agua	57
3.5.17	Número de Reynolds del lado coraza	58
3.5.18	Número de Prandtl	58
3.5.19	Factor de Chilton Colburn	59
3.5.20	Número de Nusselt	59

3.5.21	Numero de pasos por los tubos	60
3.5.22	Velocidad másica al interior de los tubos	60
3.5.23	Temperatura media aritmética del aceite	61
3.5.24	Velocidad del aceite	61
3.5.25	Número de Prandtl	61
3.5.26	Número de Reynolds	62
3.5.27	Coeficiente de transferencia de calor interno	63
3.5.28	Coeficiente de transferencia de calor externo	63
3.5.29	Coeficiente de transferencia total calculado	64
3.5.30	Coeficiente de transferencia total externo	65
3.5.31	Área de transferencia de calor interna	65
3.5.32	Área de transferencia de calor externa	65
3.5.33	Relación de transferencia de calor	66
3.5.34	Capacitancia térmica	66
3.5.35	Relación de capacidades	66
3.5.36	Efectividad	67
3.5.37	Calculo de NTU	67
3.5.38	Factor de fricción del agua	68
3.5.39	Caída de presión del agua	68
3.5.40	Caída de presión del aceite	69
3.6	Diseño propuesto del intercambiador de calor	70
4.	Construcción del intercambiador	75
4.1	Fabricación de estructura	75
4.2	Armado de equipos e intercambiador	76
4.3	Instalación de tanques y motobombas	77
4.4	Armado, distribución e instalación de tuberías	77
4.5	Instalación del sistema eléctrico	78
4.6	Ensamble final de estructura e intercambiador	79
5.	Análisis y resultados	81
6.	Guías de laboratorio	83
7.	Conclusiones y recomendaciones	84
7.1	Conclusiones	84
7.2	Recomendaciones	85
8.	Bibliografía	87
A.	Anexo: Guías de laboratorio	89
B.	Anexo: Planos de construcción	104

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del proyecto	19
Figura 2. Enfriamiento de un elemento por convección forzada y convección normal.	23
Figura 3. Intercambiador de calor de doble tubo o (tubos concéntricos).	25
Figura 4. Régimen de temperaturas y flujo paralelo en un intercambiador de tubo doble	25
Figura 5. Régimen de temperaturas a contraflujo en un intercambiador de tubo doble.	26
Figura 6. Intercambiador de placas y armazón	27
Figura 7. Intercambiador de calor tipo compacto	29
Figura 8. Intercambiador de calor de tubos y coraza.	31
Figura 9. Clasificación de los intercambiadores según el número de pasos.	32
Figura 10. Representación de ΔT_1 y ΔT_2 para el caso de flujo paralelo y contraflujo.	35
Figura 11. Curva de rendimiento de la bomba de agua	44
Figura 12. Factor de corrección para intercambiadores	51
Figura 13. Grafica de paquete de tubos respecto a tipo cabezales	55
Figura 14. Factor de Colburn respecto al número de Reynolds	59
Figura 15. Factor de fricción del agua respecto al número de Reynolds	68
Figura 16. Intercambiador de calor de tubo y coraza	70
Figura 17. Intercambiador de calor de tubo y coraza	71
Figura 18. Explosionado del intercambiador de calor.	72
Figura 19. Banco del intercambiador.	73
Figura 20 Diagrama termohidráulico.	73
Figura 21 Proceso de ensamble de estructura y ajuste de perfiles	75
Figura 22 Estructura terminada con sistema de bloqueo	76
Figura 23. Instalación de tubería en los deflectores	76
Figura 24. Instalación de tanques y motobombas	77
Figura 25. Distribución de tuberías	78
Figura 26. Instalación de sistemas de control en caja eléctrica	79
Figura 27. Ensamble final del banco propuesto	80

Lista de tablas

Tabla 1. Perfil metálico estructural	38
Tabla 2. Componentes en acrílico del intercambiador	39
Tabla 3. Tubería en cobre	40
Tabla 4. Tubería en PVC	41
Tabla 5. Componentes para sistema de potencia	42
Tabla 6. Componentes de control e instrumentación	42
Tabla 7. Electrobomba sistema de agua	44
Tabla 8. Valores de coeficiente de transferencia de calor total	52
Tabla 9. Constantes para arreglo cuadrado del paquete de tubos.	54
Tabla 10. Datos de los parámetros del intercambiador.	82

Introducción

En este proyecto se presenta el diseño, construcción y funcionamiento de un intercambiador de calor de tubo y coraza partiendo desde un marco teórico hasta un plan de actividades para que el estudiante de ciencias termodinámicas reconozca en este sistema una extensión práctica a la carga teórica propia de su carrera y que sea proyectada a su vida laboral profesional. A la fecha de presentación de este proyecto de grado, la Universidad Antonio Nariño, Bogotá sede sur, no cuenta en su laboratorio de máquinas térmicas e hidráulicas con un intercambiador de este tipo el cual tiene gran aplicación en el sector industrial debido a su gran versatilidad y posibilidad de diseño de acuerdo a las necesidades de un determinado proceso como los que abarcan empresas del sector alimenticio, químico, de generación de energía, acondicionamiento de aire, entre otros.

Al abarcar una temática termodinámica en este proyecto, se idealizó con un propósito didáctico adjunto con la finalidad de que este banco de prueba sea una herramienta física de apoyo para el docente y sus estudiantes que complementara la parte teórica y se diera espacio a una enseñanza integral donde el alumno apropié de manera más eficaz los conceptos de su carrera profesional. Como referencia a este empeño se cuenta con una obra de la Universidad Nacional de Colombia en su guía denominada “Equipos de transferencia de calor” [1], en donde se realiza una propuesta destinada a compilar el material didáctico, el cual induce al estudiante a evaluar y diseñar equipos industriales enfocados en la transferencia de calor, ese material está destinado a ser una guía de estudio sobre equipos de transferencia de calor para nivel universitario de pregrado. Bajo ese destino, esa guía de estudio se relaciona en gran manera con el proyecto de este documento debido a la propuesta de aprendizaje enfocada a la comprensión de las variables termodinámicas presentes en un intercambiador de calor de una manera más práctica apoyada en la visualización de los parámetros incluyentes a través de la instrumentación instalada.

Este proyecto se referencia también con el trabajo denominado “Diseño y construcción de un banco de prueba de un intercambiador de calor de tubos para la Universidad Autónoma del Caribe” [2], el cual, como objetivo primordial fue la implementación de un sistema educativo y didáctico acerca de los intercambiadores de calor destinada a la comunidad educativa para complementar sus conocimientos teóricos en el área de ciencias térmicas

y mecánica de fluidos, fortaleciendo y desarrollando su perfil profesional de una manera práctica y comprensible. Bajo esta descripción, el proyecto de este documento comparte el elemento educativo didáctico y funcional de este tipo de intercambiadores de calor en donde además de visualizar el funcionamiento general de los intercambiadores de calor, también se puede configurar 2 tipos de flujo, como son flujo paralelo y contraflujo, con gran incidencia en el resultado tanto de diseño constructivo como de funcionamiento de estos sistemas.

El objetivo principal de este proyecto es el de diseñar, construir y poner a punto el banco de pruebas termodinámico compuesto por un intercambiador de calor del tipo tubo y coraza a pequeña escala con dos intercambios de flujo y la posibilidad de variación de caudal de cada fluido. Para lograr este objetivo, se contemplan empeños específicos como la determinación de los requerimientos de diseño del banco intercambiador de calor acorde con parámetros físicos; el diseñar mecánica y térmicamente el banco de pruebas para un intercambiador de calor de tubos y coraza; la construcción y puesta a punto de dicho banco de pruebas y la elaboración de dos guías de laboratorio con actividades destinadas a el aprendizaje del diseño y funcionamiento del intercambiador de calor con variaciones de dirección de flujo y de caudal.

Como apoyo al cumplimiento de estos objetivos se cuenta un sistema de banco termodinámico compuesto por un intercambiador de calor del tipo tubo y coraza, fabricada esta coraza en acrílico donde fluye el fluido frío que es agua a temperatura ambiente y se visualice la disposición de las tuberías de cobre por donde fluye el fluido caliente que es aceite calentada por una resistencia eléctrica controlada electrónicamente para que sostenga una temperatura determinada simulando así la temperatura que podría alcanzar un fluido en algún proceso industrial específico, ambos fluidos van impulsados por motobombas desde tanques independientes pues en ningún momento los fluidos se mezclan entre sí, solamente realizan su transferencia de calor a través de la tubería de cobre anteriormente señalada. Se tiene una serie de válvulas de bola para realizar maniobraje con el fin de obtener un flujo paralelo y contraflujo, también se dispone de válvulas reguladoras de caudal para cada fluido y de instrumentación como termómetros digitales para en su conjunto, visualizar los efectos de dichas variaciones en la temperatura de cada fluido antes y después de atravesar el intercambiador.

El banco termodinámico se diseñó y construyó con unas limitaciones derivadas de su objetivo educativo como son el tamaño, capacidad de intercambio calorífico, materiales e instrumentación. Siendo el laboratorio de máquinas térmicas e hidráulicas de la Universidad Antonio Nariño, Bogotá sede sur la ubicación final del intercambiador, se consideraron unas dimensiones máximas permitidas para que se incluya este proyecto junto con los demás equipos y que facilite su movilidad al momento de realizar las prácticas educativas, esta limitación de tamaño incide proporcionalmente en la capacidad de transferencia de calor respecto a otros intercambiadores de dimensiones y propósitos industriales. Se decidió usar acrílico como elemento translucido para poder tener un acercamiento más a fondo de este sistema que en condiciones industriales normales se encuentra encapsulado sin siquiera suponer su configuración interna, la instrumentación instalada es la adecuada para observar los efectos en el intercambio de calor de las variaciones de temperatura y caudal de los fluidos que componen el sistema.

La metodología usada para llevar a cabo los objetivos, abarca las siguientes etapas:

- Requerimientos de diseño: en esta etapa inicial se hicieron unas consideraciones primarias, en su momento alejadas de cálculos detallados y del material disponible comercialmente, se consideró usar agua a temperatura ambiente de Bogotá como fluido frío lo que es aproximadamente 15°C, aceite hidráulico calentado hasta 40°C y que circulara en el intercambiador a través tubería de cobre de ½" diámetro interno con un descenso de temperatura de aproximadamente 9 °C a la salida del mismo.
- Diseño: esta etapa contempla el diseño de cada parte del conjunto del banco termodinámico, tales como dimensiones máximas según su ubicación final, variaciones de temperatura de 2°C para el agua y 9°C para el aceite, un coeficiente global de transferencia de calor inicial de 200 W/m². °C y unas caídas de presión de 2 psi y 9 psi para el agua y aceite respectivamente. Se contemplaron también diseños eléctricos, mecánicos e hidráulicos que permitieran operar adecuadamente en el sistema de forma coordinada.

Las siguientes etapas fueron las de construcción y puesta a punto; cabe destacar que con la obtención de los cálculos adecuados y la concepción de los materiales disponibles en el mercado, se realizaron unas modificaciones, específicamente en cuanto a calibre de tubería y temperatura inicial del fluido caliente, a fin de mantener en lo más posible, los parámetros iniciales del proyecto. De esta forma ya se pudo concretar con cálculos y

materiales reales una construcción y puesta a punto acorde a un sistema de intercambio de calor real que pudiera satisfacer las expectativas iniciales.

Con el estudio de este proyecto de grado se afianzan conocimientos propios de la carrera y se profundizan en el área termodinámica, se le da gran protagonismo en cuanto a diseño y construcción, con las consecuentes adaptaciones a los requerimientos iniciales, a los cálculos específicos y su relación con materiales comerciales existentes y modificaciones requeridas de los mismos para anexarlos al sistema y poder tener un conjunto de elementos individuales funcionando adecuadamente formando un elemento deseado y con fines acordes a los objetivos que motivaron originalmente el enfoque de este documento como proyecto de grado.

1. Definición del proyecto

1.1 Objetivos

Objetivo general

Diseñar, construir y poner a punto el banco de pruebas termodinámico con un sistema de intercambiador de calor de tubos y coraza a pequeña escala con dos intercambios de flujo.

Objetivos específicos

1. Determinar de manera específica los requerimientos de diseño del banco intercambiador de calor acorde con parámetros físicos.
2. Diseñar mecánica y térmicamente el banco de pruebas para un sistema intercambiador de calor de tubos y coraza.
3. Construir el banco de pruebas de un sistema intercambiador de calor de tubos y coraza.
4. Probar y poner a punto el banco de pruebas del sistema intercambiador de calor de tubos y coraza para diferentes configuraciones de flujos y temperaturas.
5. Diseñar y ejecutar 2 modelos de prácticas de laboratorio, para configuraciones en flujo paralelo y a contraflujo.

1.2 Antecedentes

En la Universidad Antonio Nariño sede sur, a la fecha no cuenta con un banco termodinámico con las características que ofrece un intercambiador de calor de tubos y coraza. En este sentido la guía de estudio [1], de la Universidad Nacional de Colombia, a través de la obra: “Equipos de transferencia de calor” realiza una propuesta enfocada a compilar el material didáctico, el cual induce al estudiante a evaluar y diseñar equipos industriales enfocados en la transferencia de calor; esta obra es concebida como una guía de estudio sobre equipos de transferencia de calor orientado hacia un curso de nivel universitario de pregrado.

Esta obra se relaciona con la investigación en curso, debido a la propuesta de aprendizaje enfocada a la comprensión de los fenómenos presentes de una manera práctica, didáctica y apoyada en la instrumentación que facilita los datos de las variables en tiempo real.

Un segundo trabajo [2], llamado “Diseño y construcción de un banco de prueba de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para la Universidad Autónoma del Caribe”, tiene como objetivo implementar un sistema didáctico de intercambiadores de calor que le permita a la comunidad educativa complementar sus conocimientos teóricos en el área de ciencias térmicas y mecánica de fluidos, fortaleciendo y desarrollando su perfil profesional de una manera práctica y comprensible. Esta implementación también busca incrementar el nivel de competencia de las instituciones.

La implementación de este intercambiador es muy semejante a la investigación en proceso ya que las características de los intercambiadores son muy similares, el estudio del comportamiento de los fluidos en flujo paralelo y contra flujo son aplicables, la toma de lectura de las mediciones en los fluidos que intervienen en el proceso son realizadas por medio de instrumentación en sitio, la utilización de resistencias para el calentamiento del fluido y el uso de válvulas para el direccionamiento del proceso hacen que se relacionen con el proyecto tanto en su estructura como en el modo de operación.

Un tercer trabajo [3], denominado “Simulación, montaje y puesta en marcha de un intercambiador de calor tipo coraza y tubos de cabezales flotantes con configuración de haces de tubos variables para fines educativos” trata la ingeniería conceptual, básica y la

ingeniería de detalle para un intercambiador de calor, el cual es fabricado por una empresa especializada en este tipo de mecanismos termodinámicos, adicional a esto presenta un programa de simulación en Excel para el análisis de resultados.

Este proyecto se relaciona con la investigación planteada, ya que la ingeniería de detalle y conceptual es aplicable en nuestra investigación y es acorde, para solucionar el problema que presenta actualmente la universidad, en cuanto a la ausencia de este tipo de equipos didácticos, que aportan al mejoramiento de las prácticas educativas de la institución.

1.3 Justificación

El proceso educativo reconoce su componente teórico y práctico, ambos de gran valor y aporte al adquirir conocimiento y apropiarlo, sobre todo cuando el conocimiento teórico llega a un límite que promueve al conocimiento práctico avivando la atención del educando [3]. Partiendo de la experiencia como estudiantes, cuando se combinan el conocimiento teórico junto al práctico, éste se consolida y apropia de una manera más fácil que permite cubrir situaciones reales desde ambos frentes; esta sinergia brinda unas herramientas más contemporáneas y vanguardistas propias de un profesional en la actualidad.

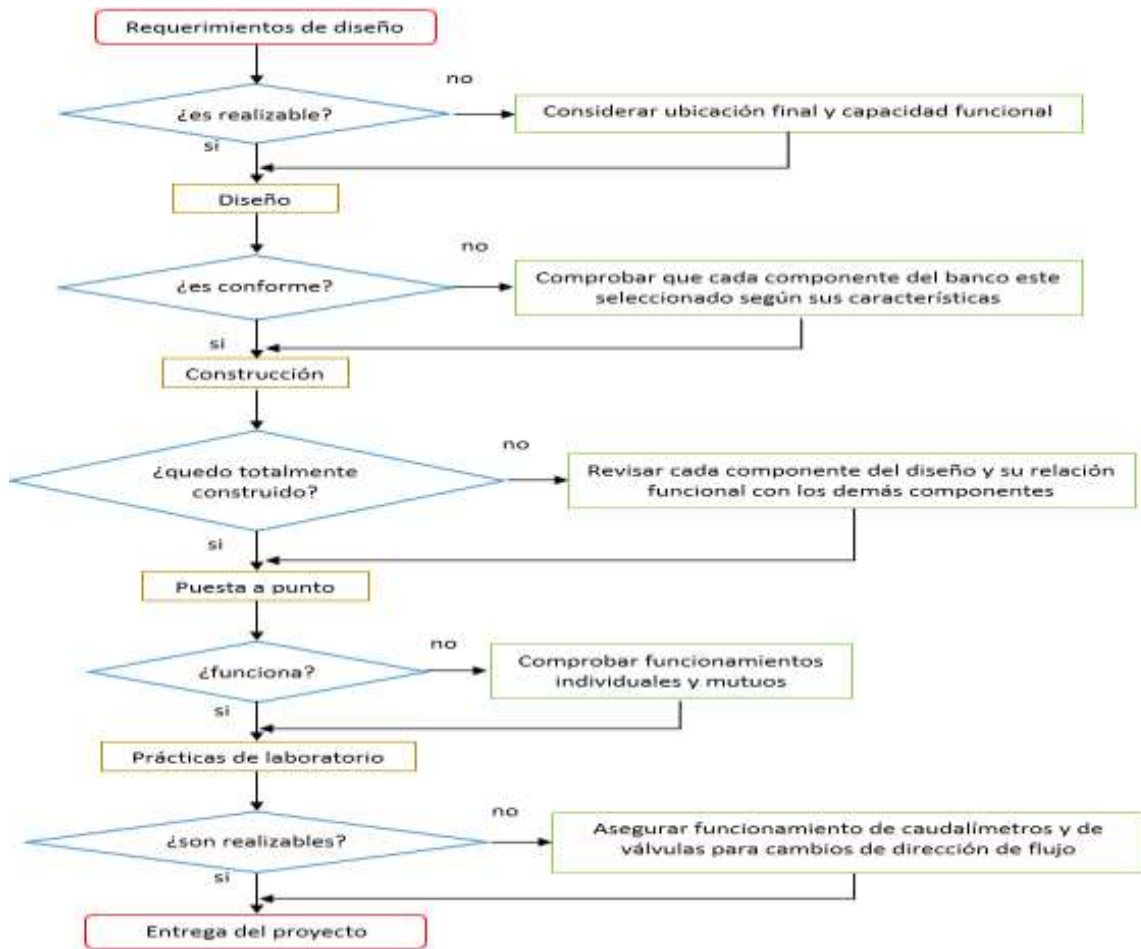
En la ausencia de un complemento práctico durante la adquisición de conocimientos teóricos respecto a los diversos tipos de intercambiadores de calor y su propia termodinámica, se considera la oportunidad de elaborar un sistema de aplicación de conocimientos teóricos de una forma más vivida y didáctica, donde se pueda visualizar el funcionamiento de este tipo de intercambiadores de calor con todas las variables físicas que la componen y que lo hacen tan importante en procesos industriales como en la industria farmacéutica, química, petroquímica, cosmética, alimenticia, cervecera y licores entre otros; esto a causa de sus beneficios particulares como ofrecer flujos de calor altos en relación con su volumen y peso, su facilidad para realizar acciones de limpieza, de fácil construcción y de múltiples dimensiones según necesidad específica [4]. Normalmente en la industria estos intercambiadores tienen coraza metálica lo que obstruye la visualización de sus componentes y sus funciones, se pueden apreciar únicamente cuando se realicen labores de mantenimiento, motivo por el cual este banco utilizará acrílico como material de diseño de la coraza permitiendo visualizar el interior del intercambiador.

En la actualidad La oferta pública existente para la adquisición de un banco de pruebas con fines educativos es realmente nula en Colombia, pues las empresas que construyen este intercambiador solo los ofrecen para destinos industriales, únicamente como referencia publicitaria está una empresa mexicana ubicada en el poblado de Tlalpan, México, que diseña y construye estos y muchos más bancos de pruebas para el sector educativo (Generatoris, <https://www.generatoris.com>) [5].

1.4 Metodología

En el proyecto se aplicó la metodología que se indica en el siguiente diagrama de flujo, para el diseño, construcción y funcionamiento del intercambiador de calor:

Figura 1. Diagrama de flujo del proyecto



Fuente: Los autores

Se clasificaron 5 apartados los cuales en donde se globaliza todo el proceso realizado de principio a fin para cumplir los objetivos propuestos, dichos apartados son:

Los requerimientos de diseño: se incluye una propuesta de valores y motivaciones iniciales que sirven de punto de partida para arrancar con cálculos constructivos.

Diseño: se contemplan las dimensiones físicas aproximadas del banco de acuerdo a su ubicación final, se proponen unos caudales básicos de 24 y 19 L/min para el agua y aceite respectivamente y unas variaciones de temperatura deseadas de 2°C para el agua y 9°C para el aceite. Al igual que unas consideraciones iniciales de máxima caída de presión de 2 psi para el agua y 9 psi para el aceite. Se adoptó un valor de 200W/m².°C para el coeficiente global de transferencia de calor. Se contempla el diseño de planos eléctricos que correspondan a la parte de alimentación de los componentes eléctricos junto con los planos termo hidráulicos y mecánicos de cada pieza y su conjunto. Se opta por usar una resistencia eléctrica de inmersión para calentar el aceite.

Construcción: En este apartado se plantea el proceso de construcción física del banco a partir de los cálculos obtenidos apoyándose de la oferta comercial de los componentes y que se asegure la parte visible al interior del intercambiador que asegura el usar acrílico en sus partes externas.

Puesta a punto: se contempla las pruebas funcionales de cada componente que así lo requiera y su acción en conjunto con los demás componentes del banco de pruebas.

Elaboración de guías: se proponen una serie de actividades a realizar de parte de los estudiantes que tengan relación con los objetivos específicos que las incluyen, para ello se indican un breve manual de funcionamiento del equipo y un marco teórico específico que sirve de apoyo para la realización de las dos guías, la primera donde se aprecien las variaciones de dirección de flujo y la segunda donde se reconozca los efectos de las variaciones de caudal en el funcionamiento del intercambiador de calor.

2. Marco teórico

2.1 Definición de calor

La palabra calor es una definición que en el lenguaje técnico normalmente se parece mucho a la definición de trabajo por ello al calor lo definiremos como sigue:

Calor: Transición de energía a través de la frontera de un sistema, que no se puede identificar con una fuerza mecánica que actúa a lo largo de una distancia.

En un determinado proceso el calor aparece cuando se presenta una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores. La dirección en la que se presenta la transición de energía siempre se da hacia la zona de menor temperatura. El calor emergerá de un sistema si el sistema está más caliente que sus alrededores; si es más frío que ellos, el calor entrará al sistema. [3].

El calor se identifica con el símbolo Q , mientras que al calor por unidad de masa con q . En el antiguo sistema métrico de unidades se usaba el término caloría para describir al calor, la cual se define como:

Caloría: Es la cantidad de calor requerida para elevar 1°C la temperatura de un gramo de agua, cuando el agua está a 4°C .

Con frecuencia se utiliza la kilocaloría, igual a 1000 calorías, esta unidad es usada normalmente para describir la energía asociada a los alimentos.

La caloría se relaciona con la unidad de energía, joule por el factor de conversión 4,1868 $\text{J} = 1$ caloría. Como el sistema internacional de unidades (SI) no utiliza la caloría como unidad propia, en los cálculos relacionados se usará Joules o kilojoules para describir la unidad de calor.

En el sistema inglés, la unidad utilizada para describir el calor es la unidad térmica británica (Btu), que se define como:

Btu: Es la cantidad de calor requerida para elevar 1°F la temperatura de 1 lbm de agua a 39°F.

2.2 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor se conoce como el mecanismo por el cual la energía calórica transita a través de la frontera de un sistema a causa de una diferencia de temperatura. Esta transferencia de calor se puede producir mediante tres mecanismos diferentes tales como conducción, convección y radiación [4].

2.2.1 Radiación

Este mecanismo se presenta cuando la transferencia de calor se da a través de ondas electromagnéticas a causa de las variaciones en las configuraciones electrónicas de los átomos, esto ocasiona que no sea necesario un contacto directo entre un objeto generador de calor y otro objeto con menos calor. Es el mecanismo de transmisión de calor más rápido llegando a igualar la velocidad de la luz sin sufrir afectaciones en el vacío.

La radiación está presente en todos los sólidos líquidos y gases donde emiten o reciben radiación en diferente medida pues todos los cuerpos que se encuentren a una temperatura mayor al cero absoluto (-273,15°C) emiten radiación térmica. [3]

2.2.2 Conducción

Este mecanismo consiste en la propagación de energía desde una partícula más energética hacia otra contigua menos energética, causada por la interacción entre dichas partículas al interior de una sustancia o un material y puede presentarse en sólidos, líquidos y gases. En el caso de los líquidos y gases, tal transferencia se origina debido a las colisiones y a la difusión de las moléculas en su movimiento imprevisible; para el caso de los sólidos, esta conducción se origina por la combinación del flujo de energía de los electrones libre y por las vibraciones moleculares.

Se tiene entonces la siguiente ecuación para la conducción térmica, denominada ley de Fourier en homenaje a Joseph Fourier quien la describió por primera vez en 1822:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (1.1)$$

Donde:

k : Conductividad termica del material

A : Área superficial perpendicular a la dirección de transferencia

dT/dx : Gradiente de temperatura

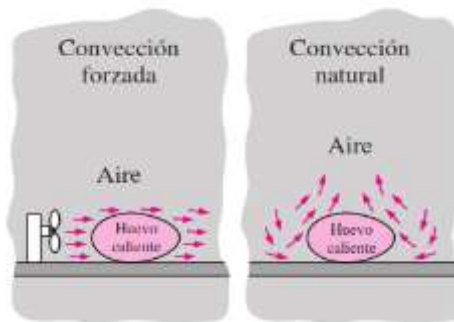
2.2.3 Convección

Este mecanismo de transferencia de calor se presenta cuando un líquido o un gas en movimiento están en contacto con una superficie sólida, combinando el movimiento de los fluidos con el efecto de la conducción. Es directa la proporcionalidad entre el aumento del movimiento del fluido respecto al aumento de la transferencia de calor por convección en el sistema, recalcando en la situación cuando el fluido no presenta movimiento, entonces este será un sistema con conducción de calor pura. Existen 2 casos de convección:

Convección forzada: Se presenta cuando el fluido se fuerza a fluir sobre la superficie solida utilizando un agente externo como un ventilador.

Convección natural: Se presenta cuando el fluido se mueve a causa de las fuerzas de empuje debido a las diferencias de densidades originadas por los cambios de temperatura en el fluido. Como se observa en la Figura 2.

Figura 2. Enfriamiento de un elemento por convección forzada y convección normal.



Fuente: [3]

2.3 Concepto de un intercambiador de calor

El intercambiador de calor es un dispositivo estacionario que permite el intercambio de calor entre dos fluidos en movimiento que tienen diferentes temperaturas y que se encuentran separados por una barrera sólida que evita que se mezclen entre sí [5]. En un intercambiador de calor se presentan los mecanismos de transferencia de calor, tanto de convección, entre el fluido y la barrera, como de conducción a través de la misma barrera.

2.4 Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se clasifican de acuerdo a la disposición del flujo y el tipo de construcción. De acuerdo al criterio del grado de contacto entre los dos medios en que se transmite la energía y comprender mejor las características de cada uno de ellos, así como las aplicaciones en las que se puede aprovechar mejor su disposición, a continuación, se analizarán los diferentes tipos de intercambiadores de calor.

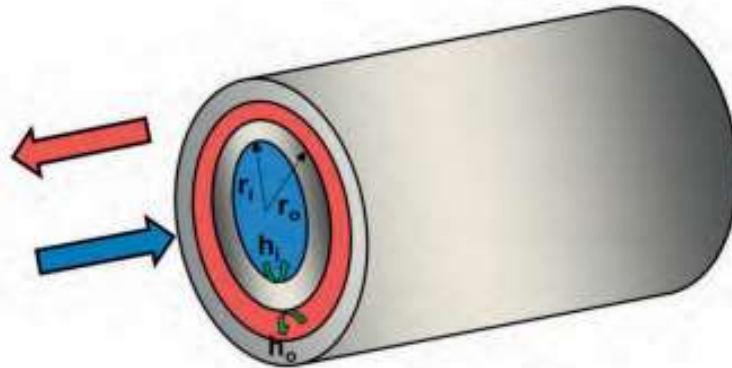
2.4.1 Tubo doble o tubos concéntricos

Los intercambiadores de doble tubo o de tubos concéntricos son dispositivos donde la transferencia de calor entre los dos fluidos se produce a través de una superficie plana o cilíndrica, sin que se presente un contacto directo o integración de los dos fluidos. El intercambio más simple que se puede observar es aquel en el que los fluidos caliente y frío se mueven en la misma dirección o direcciones opuestas en una construcción de tubos concéntricos.

Este tipo de intercambiador respecto a su construcción consiste en dos tubos de diferentes diámetros de tal forma que uno de los fluidos circula por el interior del tubo de menor diámetro y el segundo fluido lo hace por el área resultante entre los dos tubos. Esta disposición es adecuada para fluidos que están a altas presiones por ser más sencillo construir tubos con mayor resistencia y diámetros pequeños respecto a otras configuraciones de intercambiadores. Ver Figura 3.

En este tipo de configuración de doble tubo usualmente son empleados cuando el área total de transferencia de calor necesaria es menor a cincuenta metros cuadrados y, aun así, es común utilizar tubos con aletas para mejorar la transferencia de calor. [6]

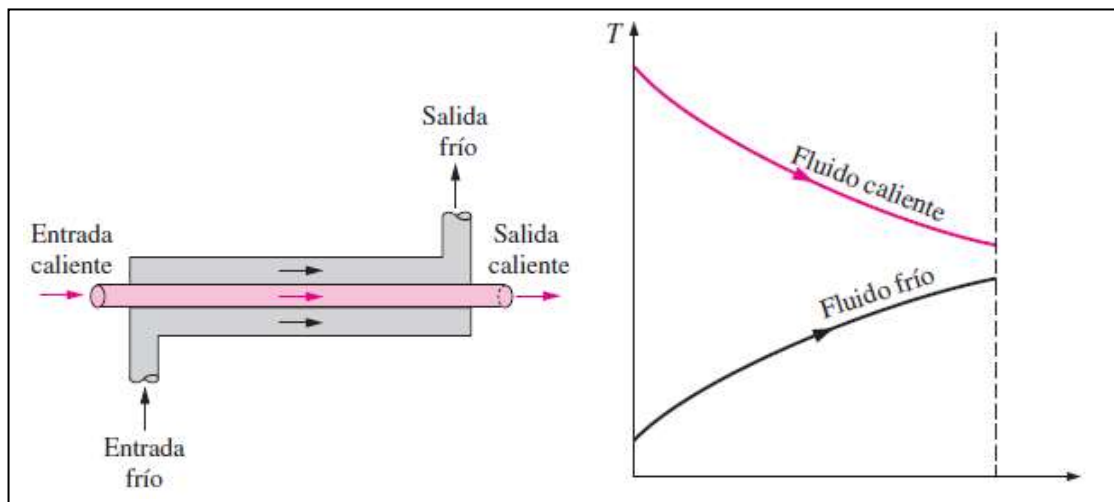
Figura 3. Intercambiador de calor de doble tubo o (tubos concéntricos).



Fuente: [6]

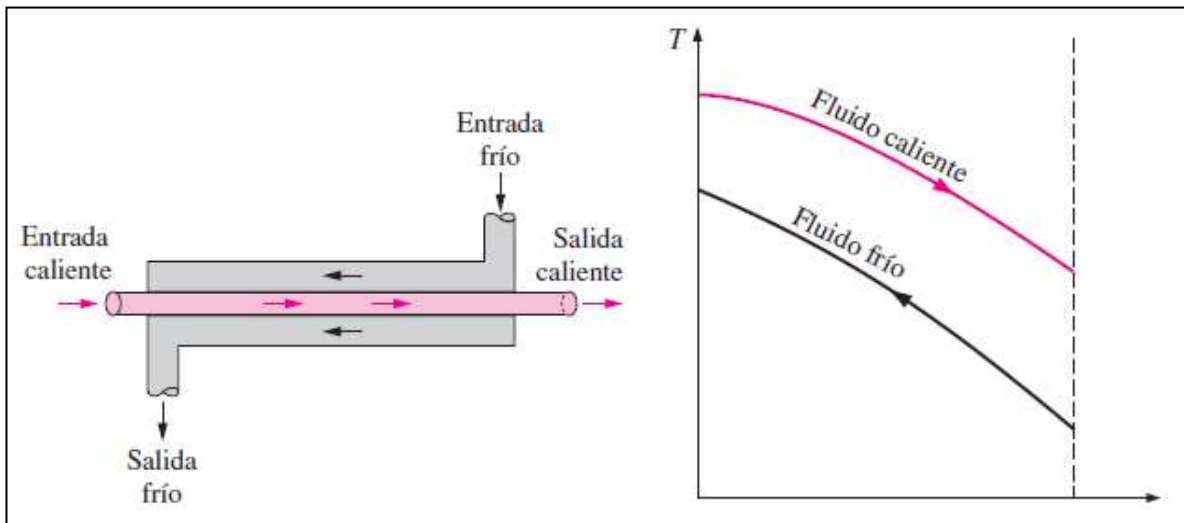
Según el sentido en que circulan los fluidos se considera una distribución en flujo paralelo o a contraflujo, esto significa que cuando los dos fluidos hacen su recorrido en el mismo sentido su configuración está dada para un flujo paralelo como se observa en la (Figura 4), por el contrario, cuando los fluidos viajan en sentidos contrarios su configuración es a contraflujo como se observa en la (Figura 5).

Figura 4. Régimen de temperaturas y flujo paralelo en un intercambiador de tubo doble



Fuente: [3]

Figura 5. Régimen de temperaturas a contraflujo en un intercambiador de tubo doble.



Fuente: [3]

Las diferencias de los intercambiadores de calor que presentan estas configuraciones en flujo paralelo y a contraflujo se estudiarán con más detalle en el capítulo correspondiente a la diferencia de temperatura media logarítmica (LTDM)

2.4.2 Placas y armazón

Los intercambiadores de calor de placas y armazón se componen generalmente de dos cámaras alternas, normalmente delgadas y constan de una serie de placas metálicas rectangulares comúnmente en acero inoxidable, estas placas presentan una disposición de pasos o canales de flujo formados por las placas corrugadas que al ser comprimidas se acoplan unas con otras y por medio de juntas elásticas realizan un sellado que no permiten el contacto directo de los dos fluidos, estas placas son alineadas y aseguradas por medio de tirantes laterales que encajan en un bastidor y permiten una unión solidaria de los componentes que conforman este tipo de intercambiadores de calor, tal como se observa en la Figura 6.

En este tipo de intercambiadores es muy práctico realizar un aumento en la demanda de transferencia de calor, para ello simplemente hay que aumentar el número de placas hasta obtener los valores deseados, esta característica lo hace muy conveniente en los intercambios producidos de líquido hacia líquido, teniendo en cuenta que las presiones de los dos fluidos que interactúan sean muy parecidas.

2.4.3 Compactos

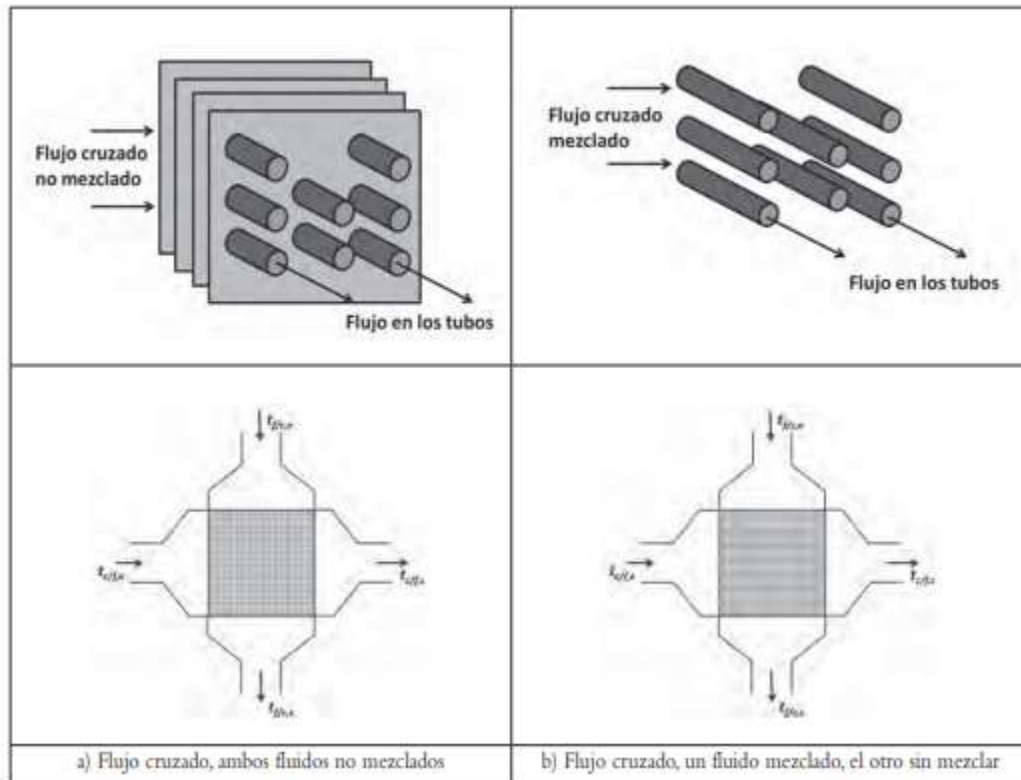
Los intercambiadores de calor compactos están diseñados para obtener una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen. El comportamiento de los dos fluidos en los intercambiadores compactos tiene direcciones ortogonales entre sí. Esta configuración de flujo es conocida como flujo cruzado y se clasifica como *flujo mezclado* y *no mezclado*. Ver Figura 7.

Flujo mezclado es donde uno de los fluidos fluye libremente en dirección ortogonal al otro sin restricciones.

Flujo no mezclado es donde se dispone de aletas de placas para guiar el flujo de uno de los fluidos por un espaciamiento particular entre ellas e impiden su movimiento en la dirección transversal (es decir, paralelo a los tubos)

Los radiadores de los automóviles presentan este tipo de intercambiadores compactos con disposición de fluidos no mezclados, otros mecanismos que también utilizan un intercambiador de tipo compacto son las turbinas de gas, las cuales contienen intercambiadores de calor de cerámica de vidrio, el regenerador del motor Stirling y el pulmón humano. Los intercambiadores compactos permiten lograr razones elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño y son de uso común en aplicaciones con limitaciones estrictas con respecto al peso y el volumen de esos aparatos. Los intercambiadores de calor compactos obtienen áreas superficiales considerables por medio de placas corrugadas muy delgadas y con un mínimo de espacio entre ellas y las paredes que están entre los dos fluidos. Los intercambiadores compactos son comúnmente utilizados para transferencia de calor de gas hacia gas y de gas hacia líquido (o líquido hacia gas), para contrarrestar el bajo coeficiente de transferencia de calor asociado con el flujo de gases mediante una mayor área superficial. [3]

Figura 7. Intercambiador de calor tipo compacto



Fuente: [6]

2.4.4 Regenerativos

Los intercambiadores regenerativos son aquellos en los que se usa un solo fluido y este acoge las dos temperaturas (Fluido caliente y fluido frío), dependiendo del proceso y el ciclo en el que se encuentre.

Este tipo de intercambiadores normalmente son utilizados en sistemas con altas temperaturas donde una fracción del fluido se remueve de la parte principal del proceso, para luego ser integrado nuevamente al sistema.

Como la parte del fluido que es removida del proceso contiene energía en forma de calor, el calor del fluido que abandona el sistema es reutilizado para recalentar el fluido de regreso, esta forma de aprovechamiento de energía evita disipar calor a un medio externo de menor temperatura y por el contrario produce un aumento en la eficiencia del intercambiador.

El intercambiador regenerativo del tipo estático básicamente es una masa porosa que tiene una gran capacidad de almacenamiento de calor, como la malla de alambre de cerámica. Los fluidos caliente y frío fluyen a través de esta masa porosa de manera alternada. El calor se transfiere del fluido caliente hacia la matriz del regenerador durante el flujo del mismo, y de la matriz hacia el fluido frío durante el paso de éste. Por tanto, la matriz sirve como un medio de almacenamiento temporal de calor.

El regenerador del tipo dinámico consta de un tambor giratorio y se establece un flujo continuo del fluido caliente y del frío a través de partes diferentes de ese tambor, de modo que diversas partes de este último pasan periódicamente a través de la corriente caliente, almacenando calor, y después a través de la corriente fría, rechazando este calor almacenado. Una vez más, el tambor sirve como el medio de transporte del calor de la corriente del fluido caliente hacia la del frío. [3]

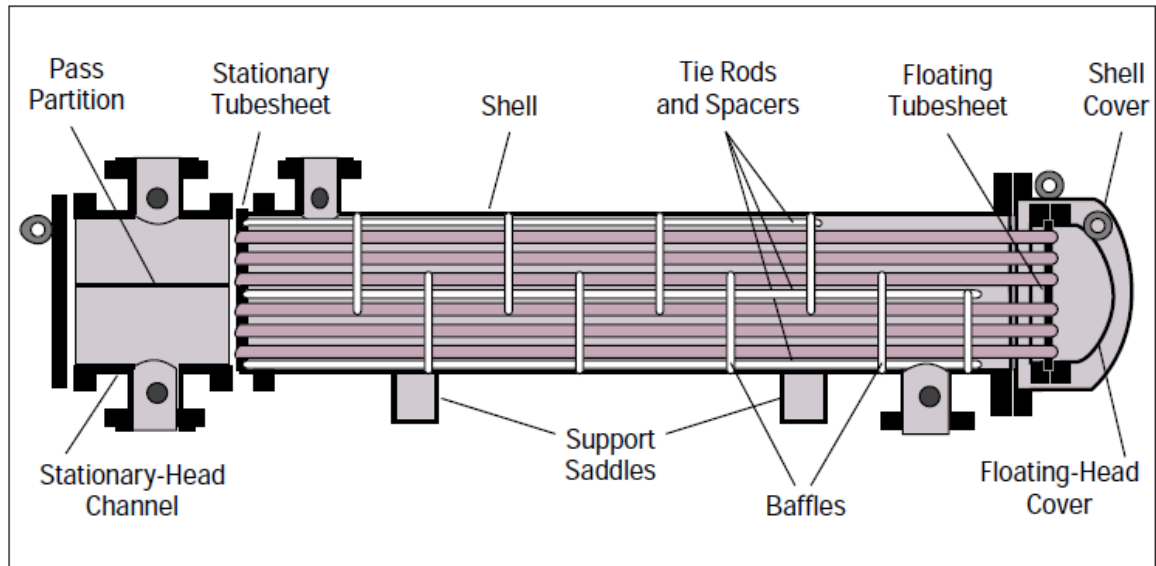
2.5 Conceptualización del intercambiador de tubos y coraza

Cuando se requiere de un intercambio de calor a una escala considerable y de acuerdo a requerimientos de diseño específicos para la industria, el más adecuado y utilizado para este fin es el intercambiador de tubos y coraza, este tipo de intercambiador está constituido por un arreglo tubular el cual logra obtener una gran cantidad de tubos en su interior y diversas dimensiones tanto en longitud como en diámetros de los mismos, además cuenta con una coraza que encierra los tubos y se extiende a lo largo de la superficie del haz tubular. En sus extremos se disponen de varios arreglos para contener los fluidos normalmente llamados cabezales. El proceso de intercambio de calor está dado por el movimiento de los fluidos al interior de los tubos y por toda el área superficial de la coraza, de acuerdo a los requerimientos de diseño el fluido caliente y frío pueden circular tanto en los tubos como en la coraza y viceversa.

En el interior de la coraza se suelen instalar unos espaciadores o deflectores en forma perpendicular al paquete de tubos, como se observa en la Figura 8. Estos deflectores tienen la finalidad de mantener los tubos en la disposición predeterminada, evitar vibraciones e inestabilidad del flujo.

Al igual que el intercambiador de tubos concéntricos este tipo también cuentan con regímenes de temperatura y flujos tanto en paralelo como a contraflujo.

Figura 8. Intercambiador de calor de tubos y coraza.



Fuente: [7]

Los componentes que integran este tipo de intercambiadores requieren de características específicas para el proceso destinado, sus componentes tienen diversas geometrías que proporcionan diferencias en el comportamiento de los fluidos y finalmente obtener la razón de transferencia de calor requerida. De este modo a continuación se estudian algunos de sus componentes principales.

Coraza: La coraza es un elemento cilíndrico normalmente metálico que se encuentra bajo presión interna y externa por acción de los fluidos, esta estructura permite la circulación de los fluidos y la transferencia de calor entre el haz tubular y la coraza.

Tubos: hay varias clases de metales que cumplen con características de conductividad térmica y que son utilizados como tubería para construcción intercambiadores de calor, algunos de ellos son: el cobre, acero inoxidable; latón, Cobre- níquel 70 – 30; aluminio, entre otros; el diámetro y espesor también pueden variar de acuerdo a los requerimientos de diseño.

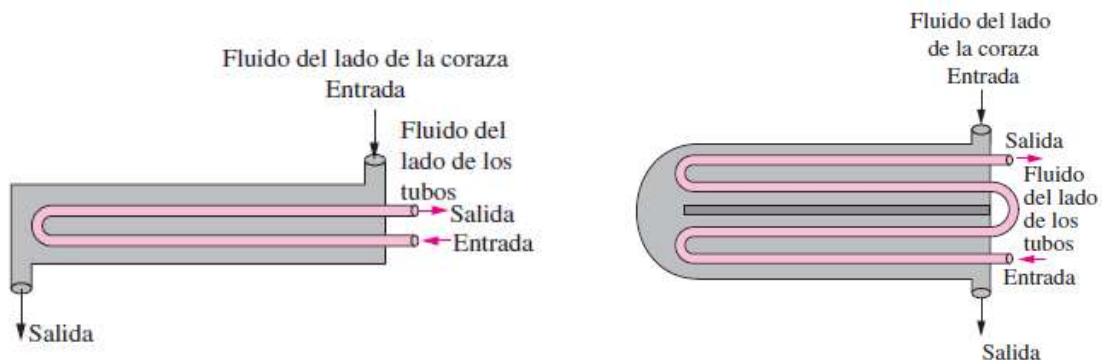
Para la disposición de los tubos al interior de la coraza, existen diferentes tipos de arreglos que permiten una distancia entre centros de los tubos (Pt) el cual está determinado como el diámetro externo del tubo más 0.25 pulgadas. Estos arreglos se presentan como arreglo triangular, cuadrado; cuadro rotado, cada una de ellas permite un mayor o menor número de tubos y espacio para limpieza.

Soportes laterales o espejos: los soportes laterales o espejos tienen como función centrar y afirmar el haz tubular, al contener numerosas perforaciones contribuyen con el orden de los tubos internos, además realizar un sello hermético o por medio de empaquetadura de acuerdo con el diseño y estructura del tipo de intercambiador.

Deflectores: Los deflectores son segmentos instalados al interior de la coraza que permiten mantener alineados los tubos a lo largo del intercambiador, están separados por distancias determinadas de acuerdo al diseño requerido, una función importante que cumplen estos deflectores es la de incidir turbulencia al exterior de los tubos y obtener coeficientes de transferencia de calor más altos.

Los intercambiadores de tubos y coraza se clasifican según el número de veces que cada fluido recorre el intercambiador. A cada uno de los recorridos se les denomina paso. En arreglos en los que los tubos hacen una U al interior de la coraza se les denomina como de un paso por coraza y dos pasos por tubos; hay disposiciones en las que se realizan dos pasos por coraza y cuatro por los tubos, etc. Como se observa en la siguiente figura:

Figura 9. Clasificación de los intercambiadores según el número de pasos.



Fuente: [3]

3. Diseño y construcción del intercambiador de tubo y coraza

3.1 Criterios de diseño para el banco intercambiador de calor

Los criterios tenidos en cuenta para determinar los requerimientos de diseño del banco intercambiador se enumeran a continuación:

Se estableció que el banco tuviera una finalidad didáctica y de aprendizaje de tal manera que se pudiera visualizar las partes que componen un intercambiador de calor de este tipo, para ello se optó por usar acrílico como material constructivo y poder así visualizar los componentes internos del sistema. Es importante que el banco del intercambiador tenga unas dimensiones acordes al laboratorio de máquinas térmicas e hidráulicas de la universidad Antonio Nariño en Bogotá sede sur y a los demás equipos ubicados allí, permitiendo así, poder manipularlo sin que se genere obstrucciones que impidan ponerlo en marcha y observar su funcionamiento.

Al plantear diseñar y construir un intercambiador de calor, se decidió que fuese del tipo tubo y coraza debido a su gran usabilidad en la industria donde se permite obtener diseños muy acordes a las necesidades de algún proceso industrial específico.

El caudal de ambos fluidos debe ser relativamente bajo, pues el circuito hidráulico para cada uno de los fluidos es considerablemente corto y se requiere que se pueda regular en un rango determinado para observar el funcionamiento del sistema con pequeñas variaciones de este parámetro. Teniendo en cuenta este requerimiento y las dimensiones y capacidades del banco, las motobombas utilizadas deben ser acordes en cuanto a prestaciones nominales tanto de voltaje, potencia y caudal máximo, específicamente 120 vac, 0,5 hp y 28 lpm respectivamente.

El calentamiento que se le dé al aceite para que actúe como fluido caliente en el sistema, no debe exceder mucho más allá los 50°C para poder tener un balance entre eficiencia energética y cálculos esperados.

Se decide usar dos fluidos distintos, específicamente agua y aceite hidráulico, debido a que poseen diferentes capacitancias térmicas y esta condición permite evidenciar más claramente el intercambio de calor entre fluidos.

Se requiere que el sistema hidráulico presente la posibilidad de tener configuraciones de flujo paralelo y contraflujo, pues así se pueden abordar los efectos de ambas configuraciones en los resultados de funcionamientos del banco de intercambiador de calor.

3.2 Métodos usados para el análisis de intercambiadores de calor

Para análisis de los intercambiadores de calor es necesario plantear las siguientes condiciones ideales que además de conseguirse aproximadamente de manera práctica, ayudan a reducir la complejidad en el análisis de estos sistemas [6], ha de considerarse entonces que:

- Son sistemas de flujo estacionario debido a su funcionamiento continuo sin alterar sus condiciones operativas.
- Aunque el calor específico de cada fluido varía según la temperatura, se puede considerar de valor constante.
- La superficie externa del intercambiador está perfectamente aislada térmicamente de tal forma que no existan pérdidas de calor con el ambiente.
- Tanto a la entrada como a la salida del intercambiador permanecen constantes las propiedades de los fluidos como los gastos de masa.
- Se puede despreciar la conducción axial de calor.
- El coeficiente global de transferencia de calor U , es constante a lo largo de todo el intercambiador.

- Son despreciables los cambios de energía potencial y cinética en ambos flujos.
- Todo intercambio de temperatura se realiza exclusivamente en el sentido de la normal respecto a la superficie de contacto.

Bajo estas condiciones se pueden utilizar los métodos LMTD o NTU para el análisis en estos intercambiadores.

3.2.1 Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD)

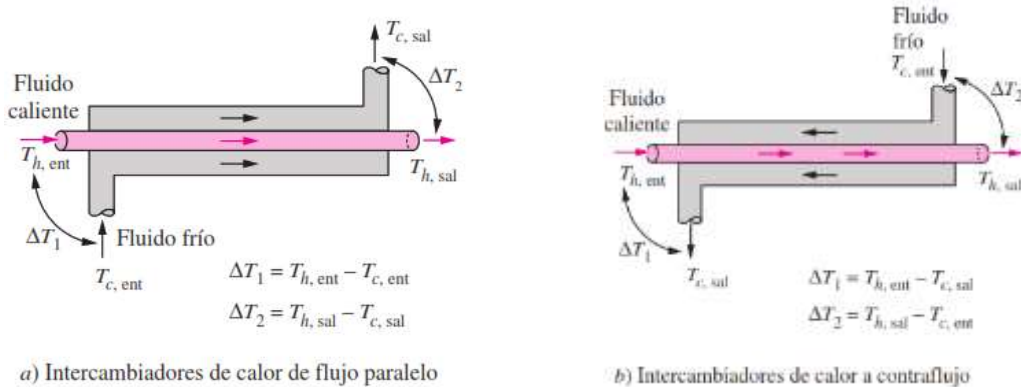
Este método resulta conveniente cuando se tienen los requerimientos de funcionamientos y se necesita llegar a diseñar constructivamente el intercambiador de calor, también es útil cuando se busca lograr un cambio específico de temperatura en alguno de los fluidos. Su fórmula base es la siguiente:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2.1)$$

Donde ΔT_1 y ΔT_2 es la diferencia de temperatura entre ambos fluidos en cada extremo. Esta diferencia de temperatura media logarítmica se consigue a partir de la temperatura real de los fluidos a través del intercambiador siendo así una concepción fiel de la diferencia de temperatura promedio entre ambos fluidos, como se aprecia en la Figura 10.

Es necesario hacer la distinción del cálculo de ΔT_{ml} para cuando en el intercambiador se presente flujo paralelo o contraflujo, para ello se considera los valores de ΔT_1 y ΔT_2 de la ecuación (2) con la siguiente figura según sea el sentido del flujo:

Figura 10. Representación de ΔT_1 y ΔT_2 para el caso de flujo paralelo y contraflujo.



Fuente: [3]

La ΔT_{ml} para el caso de contraflujo siempre será mayor que para el caso de flujo paralelo, requiriendo así un área superficial de transferencia de calor menor obteniendo un diseño más compacto cuando se esté a contraflujo los fluidos.

Para el método LMTD se pueden distinguir dos casos especiales:

Cuando se tiene una relación equitativa entre las diferencias de temperaturas ΔT a lo largo del intercambiador a contraflujo es porque la capacitancia térmica de ambos fluidos es la misma $C_{caliente} = C_{frio}$, lo que implica que $\Delta T_1 = \Delta T_2$ conduciendo a una indeterminación cuando se formule la $\Delta T_{ml} = 0/0$, pero aplicando el teorema de L'Hôpital se obtiene $\Delta T_{ml} = \Delta T_1 = \Delta T_2$.

Cuando se requiere calcular la diferencia de temperatura media logarítmica en intercambiadores de tubo y coraza o intercambiadores de flujo cruzado se considera un factor de corrección F aplicado a la fórmula de la siguiente ecuación para el caso de contraflujo:

$$\Delta T_{ml} = F \Delta T_{ml, cf} \quad (2.2)$$

Aspectos como las temperaturas de entrada y salida de los fluidos y la configuración geométrica del intercambiador, determinan el valor del factor de corrección. [3]

3.2.2 Número de unidades de transferencia de calor (NTU)

Este método también se conoce como el método de la efectividad de la transferencia de calor, y es de gran utilidad cuando se pretende hallar temperaturas de salida de los fluidos en un intercambiador de calor puesto que, si se usa el método LMTD para este caso, resulta en un análisis de naturaleza repetitiva y necesitada de tanteos. Entonces se hace necesario definir la efectividad del sistema

$$\text{Efectividad } \varepsilon = \frac{\text{flujo real de calor transferido}}{\text{flujo máximo de calor transferible}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (2.3)$$

El flujo real de calor transferido se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = C_f (T_{f,sal} - T_{f,ent}) = C_c (T_{c,ent} - T_{c,sal}) \quad (2.4)$$

Ahora, para hallar el valor máximo de flujo de calor transferible, se tiene en consideración que este hecho se presenta cuando el fluido caliente baje su temperatura igualando la temperatura del fluido frío y cuando el fluido frío aumente su temperatura hasta igualar la temperatura del fluido caliente, cuando las capacitancias térmicas de los fluidos son iguales, ambas condiciones se pueden dar simultáneamente, de lo contrario se alternan con la condición de que el fluido con menor capacitancia térmica tendrá un mayor cambio de temperatura experimentando en primer lugar una máxima diferencia de temperatura en donde se detendrá la transferencia de calor. Entonces, el flujo máximo de calor transferible o razón máxima de la transferencia de calor es:

$$\dot{Q}_{max} = c_{min} (T_{c,ent} - T_{f,ent}) \quad (2.5)$$

Desglosando la ecuación (4) se tiene que:

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{max} = \varepsilon c_{min} (T_{c,ent} - T_{f,ent}) \quad (2.6)$$

Con esta ecuación se evidencia la posibilidad de encontrar la razón de transferencia de calor del sistema conociendo las temperaturas de entrada de los fluidos en el intercambiador de calor.

En el análisis de la efectividad de los intercambiadores se tiene en cuenta el concepto adimensional NTU que es la abreviación para número de unidades de transferencia y se expresa con la siguiente fórmula:

$$NTU = \frac{U A_s}{c_{min}} \quad (2.7)$$

Siendo así, se evidencia que el NTU se relaciona con el área superficial de transferencia de calor indicando que a mayores valores del NTU, más grande debe ser el intercambiador.


3.3 Materiales seleccionados

3.3.1 Perfil metálico

El perfil metálico es utilizado para la fabricación de la estructura encargada de soportar los componentes que integran el banco intercambiador de calor. Este perfil por su forma cerrada y bajo peso cuenta con buen comportamiento a esfuerzos como pandeo y torsión, también permite facilidad en su instalación y uniones simples por medio de tornillería o

soldadura. Tiene una superficie exterior sin bordes o ángulos vivos lo cual ayuda a prevenir la corrosión y permite un mantenimiento más amigable.

Tabla 1. Perfil metálico estructural

Componente	Cantidad (m)	Imagen
Perfil metálico cuadrado 1"	12	

Fuente: Los autores

3.3.2 Acrílico

Para formar la coraza del intercambiador y demás componentes que lo integran, se optó por el acrílico, principalmente por ser un material translucido donde es posible visualizar el interior y así poder comprender el comportamiento de los fluidos, la disposición y material de los tubos, características de su construcción, y demás fenómenos que constituyen el intercambio de calor en un dispositivo como es un intercambiador de tubos y coraza.




Si bien el acrílico puede ser translucido, no es su única característica, este material ofrece una resistencia a la intemperie que no posee ningún otro material plástico e incluso ningún otro material que haya sido fabricado por el hombre.

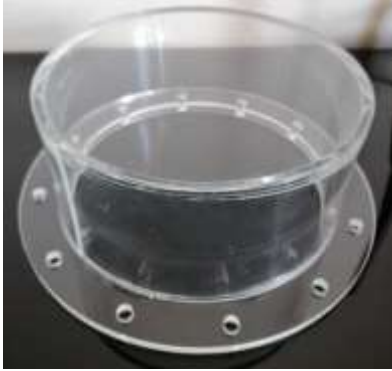
La resistencia química que ofrece es excelente a la mayoría de las sustancias incluyendo ácidos como el sulfúrico e hidrocarburos alifáticos como hexano, octano y nafta.

Una característica muy especial que tiene este material es que puede ser termoformado. Al calentar el acrílico a una temperatura entre 160 y 170 grados Celsius se vuelve flexible y se puede moldear de acuerdo a las necesidades específicas requeridas. Al enfriarse el material conservara la forma y características físicas.

Para la construcción de este proyecto y por las características mencionadas anteriormente de este material, los siguientes componentes fueron seleccionados en acrílico para su fabricación:

Tabla 2. Componentes en acrílico del intercambiador

Componente	Cantidad	Imagen
Coraza	1	
Tapas laterales	2	
Deflectores	4	

Cabezales	2	
-----------	---	--

Fuente: Los autores

3.3.3 Cobre

El cobre, por sus características, es un metal apropiado para la fabricación de tuberías para diversas aplicaciones entre ellas la conducción de fluidos, posee una larga vida útil; se adapta a las estructuras y espacio, al ser tan ligero facilita su manipulación, tiene muy buena resistencia a la presión, excelente resistencia a la corrosión; es un metal no inflamable, es un excelente conductor de calor, es más económico que otro tipo de metales para uso en tubería; posee grandes ventajas y propiedades que aseguran los procesos.

Para la fabricación del intercambiador se dispuso de tubería en cobre con un diámetro interno de $\frac{1}{4}$ de pulgada y 48 cm de longitud, en su interior circulara aceite a una temperatura máxima de 50 °C.

Tabla 3. Tubería en cobre

Componente	Cantidad	Imagen
Tubería interna	61	

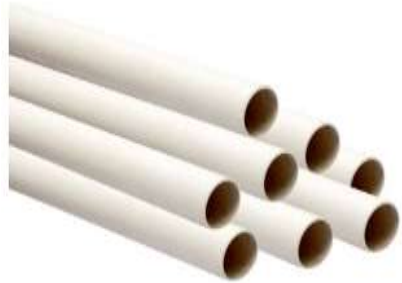
Fuente: Los autores

3.3.4 PVC

Las tuberías en PVC son muy utilizadas para instalaciones en interiores donde se requiere el flujo de agua. Como sus paredes son lisas no permiten sedimentación en su interior, es un material rígido y cuenta con una gran cantidad de accesorios que permiten diversas formas de realizar una instalación de acuerdo a las necesidades. Este tipo de tuberías puede conectarse mediante la aplicación de adhesivos especiales que forman una unión soldada químicamente con resultados satisfactorios.

En este proyecto, lo que comprendió el sistema hidráulico se dispuso de tubería en PVC de ½ pulgada, ya que por su resistencia mecánica, fácil manipulación e instalación es acorde a los fluidos que intervienen en el intercambiador.

Tabla 4. Tubería en PVC


Componente	Cantidad (m)	Imagen
Tubería en PVC	4	

Fuente: Los autores

3.3.5 Sistema eléctrico

En este sistema se incluyen elementos de protección que protegen los circuitos contra sobre corrientes y cortocircuitos abriendo rápidamente dicho circuito sin reconexión automática lo que permite verificar y corregir las fallas que causaron su activación.

Tabla 5. Componentes para sistema de potencia


Componente	Cantidad (m)	Imagen
Interruptor termomagnético	3	

Fuente: Los autores

3.3.6 Sistemas de control

Este sistema permite visualizar y controlar parámetros como temperatura y caudal que faciliten el análisis de variables que incidan en el funcionamiento del intercambiador de calor.

Tabla 6. Componentes de control e instrumentación

Componente	Cantidad (m)	Imagen
Caudalímetro	1	
Controlador de temperatura	1	

Termómetro	4	
Módulo Arduino	1	

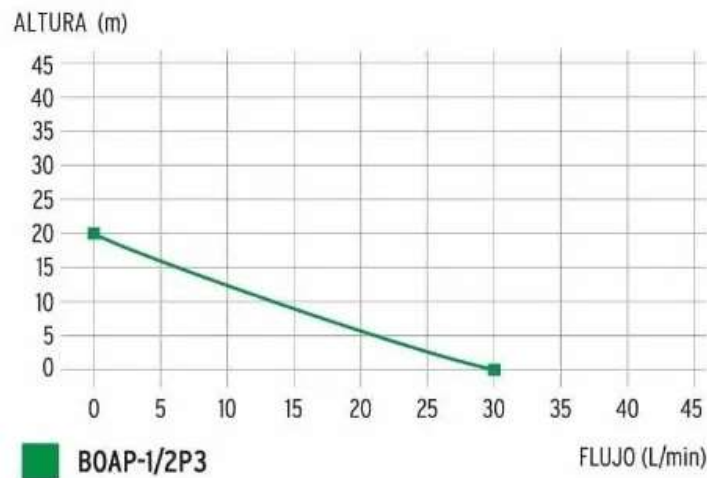
Fuente: Los autores

3.3.7 Bombas para fluidos

Los circuitos de agua y aceite, serán impulsados por medio de electrobombas periféricas con las siguientes características:

- Capacidad de caudal: 28 L/min.
- Voltaje de alimentación: 110 VAC / 60 Hz.
- Corriente: 4,6 Amperios.
- Potencia: 370 W / 0,5 HP.
- Rotor del motor: Aluminio
- Impulsor: Acero

Figura 11. Curva de rendimiento de la bomba de agua



Fuente: [8]

Tabla 7. Electrobomba sistema de agua

Componente	Cantidad	Imagen
Electrobomba periférica	2	

Fuente: Los autores

3.4 Características de los fluidos y de la tubería del intercambiador

3.4.1 Temperatura (T)

Básicamente se puede definir la temperatura como la propiedad que especifica que tan caliente está un elemento, cuerpo o sistema. En donde a mayor temperatura se indica que tal elemento, cuerpo o sistema estará más caliente y viceversa; entonces la temperatura solamente nos indica el grado de calentamiento [9].

En los requerimientos de este proyecto, se tiene las siguientes temperaturas:

Fluido caliente (aceite lubricante): 50 °C a la entrada del intercambiador.

Fluido caliente (aceite lubricante): 41 °C a la salida del intercambiador.

Fluido frío (agua): 15 °C a la entrada del intercambiador.

Fluido frío (agua): temperatura por determinar a partir de cálculos.

3.4.2 Flujo másico o gasto de masa (\dot{m})

El gasto de masa o flujo másico es la cantidad de materia que fluye a través de una sección o área superficial en un tiempo determinado. De este modo el gasto de masa de un fluido que fluye al interior de un tubo o ducto es proporcional al área de la sección transversal de ese tubo, la densidad, y la velocidad del fluido. Se expresa en kilogramos por segundo (kg/s), [3]

De acuerdo a las características de los fluidos utilizados en este proyecto los gastos de masa son:

- Fluido caliente (aceite a 50°C) 0,275 kg/s
- Fluido frío (agua a 15°C) 0,399 kg/s

3.4.3 Calor específico (c_p)

Es la cantidad de energía necesaria para elevar un grado la temperatura de una unidad de masa de un elemento o sustancia. A mayor valor de calor específico se traduce en una mayor energía requerida para aumentar la temperatura del elemento o sustancia. En el sistema internacional de medidas se expresa en julios por kilogramo por grado kelvin J/kg·K.

Para los fluidos utilizados en el proyecto se tienen los siguientes valores de calor específico dependiendo de la temperatura del fluido a la entrada del intercambiador:

- Fluido caliente (aceite lubricante a 50 °C): 2,006 kJ/kg. K tabla A-13. [3]
- Fluido frío (agua a 15 °C): 4,186 kJ/kg. K tabla A-9. [3]

3.4.4 Densidad (ρ)

La densidad es una propiedad física de la materia que expresa la relación que existe entre la masa de una sustancia por unidad de volumen y es dependiente de la presión y la temperatura. El comportamiento que presenta en los sólidos y líquidos respecto a la presión es prácticamente inalterable, ya que por sus características en estos estados son sustancias no compresibles, por otra parte, el comportamiento de esta propiedad en los gases en su mayoría es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura.

De acuerdo a las características de los fluidos utilizados en el proyecto y los valores de temperatura de entrada al intercambiador, las densidades utilizadas son:

- Fluido caliente (aceite a 50 °C) 869,95 kg/m³ Tabla A-13. [3]
- Fluido frío (agua a 15°C) 999,1 kg/m³ Tabla A-9. [3]

3.4.5 Viscosidad (μ)

Es una propiedad de los fluidos que indica la facilidad con la que fluye un fluido. Esta propiedad es de notoria relevancia al definir el carácter del flujo de los fluidos y la consecuente energía que pueda perder el fluido al estar en movimiento. [10]

Para los fluidos utilizados en el proyecto se tienen los siguientes valores de viscosidad dinámica (μ) dependiendo de la temperatura del fluido a la entrada del intercambiador:

- Fluido caliente (aceite hidráulico a 50 °C): 0,145845 kg/m.s Tabla A-13. [3]
- Fluido frío (agua a 15°C): 1,38 × 10⁻³ kg/m.s Tabla A-9. [3]

3.4.6 Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica es una constante de proporcionalidad que tiene cada material y especifica la medida de la capacidad que tiene un material para conducir calor en función de la temperatura en la que se realiza la medición, normalmente es realizada a 330 kelvin, para tener una base de comparación con otros materiales.

La razón de cambio en los valores de la conductividad térmica en algunos niveles de temperatura es despreciable para ciertos materiales, pero son valores muy significativos para el comportamiento de otros.

Esta propiedad se representa por la letra (k) y sus unidades son ($W/m \cdot ^\circ C$), al incluirla en los análisis termodinámicos y relacionarla con valores de espesor, área y deltas de temperaturas, se puede hallar razones de transferencia de calor en un sistema. [3]

Para este proyecto el material utilizado en el haz tubular es cobre, el cual cuenta con una conductividad térmica de $388 W/m \cdot ^\circ C$

3.5 Cálculos para el diseño del intercambiador

3.5.1 Razón de transferencia de calor (\dot{Q})

Es una medida de la cantidad de energía térmica que se transfiere de un medio más energético (caliente) a uno menos energético (frío) de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, entonces es una cantidad positiva y su valor se expresa en vatios. En el presente proyecto se usan dos ecuaciones para esta variable:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f c_{\rho,f} (T_{f,sal} - T_{f,ent}) = \dot{m}_c c_{\rho,c} (T_{c,ent} - T_{c,sal}) \quad (2.8)$$

La razón de transferencia de calor máxima \dot{Q}_{max} , indica el máximo valor posible de transferencia de calor posible que se puede presentar en el sistema. Su halla con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{c,ent} - T_{f,ent}) \quad (2.9)$$

En este proyecto se contemplan los siguientes valores de transferencia de calor:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c c_{\rho,c} (T_{c,ent} - T_{c,sal})$$

$$\dot{Q} = 0,275 \text{ kg/s} \times 1,987 \text{ kJ/kg } ^\circ C (50 ^\circ C - 41 ^\circ C) = 4,927 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{max} = 0,547 \text{ kW/} ^\circ C (50 ^\circ C - 15 ^\circ C) = 19,145 \text{ kW}$$

Donde:

\dot{Q}_{max} : Razón de transferencia de calor máxima

\dot{m}_c : Flujo masico del aceite a 50 °C

$c_{\rho,c}$: Calor especifico del aceite a temperatura media aritmetica 45,5 °C

$T_{c,ent}$: Temperatura del aceite a la entrada del intercambiador

$T_{f,sal}$: Temperatura del agua a la salida del intercambiador

C_{min} : Capacitancia térmica mínima

3.5.2 Calculo de la temperatura del agua a la salida ($T_{f,sal}$)

De acuerdo a los requerimientos de diseño, el agua a la salida del intercambiador es una de las incógnitas, para obtener este valor hacemos uso de la formula general de balance térmico o razón de transferencia de calor, para luego despejar la temperatura de salida y así definir esta variable de temperatura.

$$\dot{Q} = [\dot{m}_f c_{\rho,f} (T_{f,sal} - T_{f,ent})] \quad (2.8)$$

$$T_{f,sal} = T_{f,ent} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_f c_{\rho,f}}$$

$$T_{f,sal} = 15 \text{ °C} + \frac{4,927 \text{ kW}}{0,399 \text{ kg/s} \times 4,185 \text{ kJ/kg} \cdot \text{°C}} = 17,95 \text{ °C}$$

Donde:

\dot{Q} : Razón de transferencia de calor

\dot{m}_f : Flujo masico del agua a 15 °C

$c_{\rho,f}$: Calor especifico del agua a 15 °C

$T_{f,ent}$: Temperatura del agua a la entrada del intercambiador

$T_{f,sal}$: Temperatura del agua a la salida del intercambiador

3.5.3 Calculo LMTD en flujo paralelo y a contraflujo

La diferencia de temperatura media logarítmica es la forma apropiada de representar la diferencia promedio de las temperaturas de los fluidos caliente y frío, para realizar los análisis de los intercambiadores tanto en flujo paralelo como a contraflujo. Para obtener estos valores en el proyecto se hace uso de los requerimientos de temperatura dados en este intercambiador de acuerdo al arreglo de los fluidos.

Calculo del LMTD a contraflujo.

$$\Delta T_1 = (T_{c,ent} - T_{f,sal}) \quad (2.10)$$

$$\Delta T_2 = (T_{c,sal} - T_{f,ent}) \quad (2.11)$$

$$\Delta T_1 = (50 - 17,95)^\circ C = 32,05^\circ C$$

$$\Delta T_2 = (41 - 15)^\circ C = 26^\circ C$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \quad (2.12)$$

$$\Delta T_{ml,CF} = \frac{32,05 - 26}{\ln \frac{32,05}{26}} = 28,92^\circ C$$

Donde:

ΔT_1 : Diferencia de temperatura de los fluidos respecto a la entrada y salida

ΔT_{ml} : Diferencia de temperatura media logarítmica

Calculo del LMTD en flujo paralelo.

$$\Delta T_1 = (T_{c,ent} - T_{f,ent}) \quad (2.13)$$

$$\Delta T_2 = (T_{c,sal} - T_{f,sal}) \quad (2.14)$$

$$\Delta T_1 = (50 - 15)^\circ C = 35^\circ C$$

$$\Delta T_2 = (41 - 17,95)^\circ C = 23,05^\circ C$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \quad (2.12)$$

$$\Delta T_{ml,FP} = \frac{35 - 23,05}{\ln \frac{35}{23,05}} = 28,61 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde:

ΔT_1 : Diferencia de temperatura de los fluidos respecto a la entrada y salida

ΔT_{ml} : Diferencia de temperatura media logaritmica

3.5.4 Factor de corrección

El factor de corrección se da para los intercambiadores de calor por medio del cálculo de los parámetros adimensionales P – R y de acuerdo a los datos obtenidos por medio de graficas destinadas para cada tipo de arreglo del intercambiador. El valor obtenido de las gráficas corresponde al factor de corrección que normalmente es muy cercano a 1.

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (2.15)$$

$$P = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad (2.16)$$

$$R = \frac{(15 - 17,95)^\circ\text{C}}{(41 - 50)^\circ\text{C}} = 0,327$$

$$P = \frac{(41 - 50)^\circ\text{C}}{(15 - 50)^\circ\text{C}} = 0,257$$

Donde:

T_1 : Temperatura del agua a la entrada de la coraza

T_2 : Temperatura del agua a la salida de la coraza

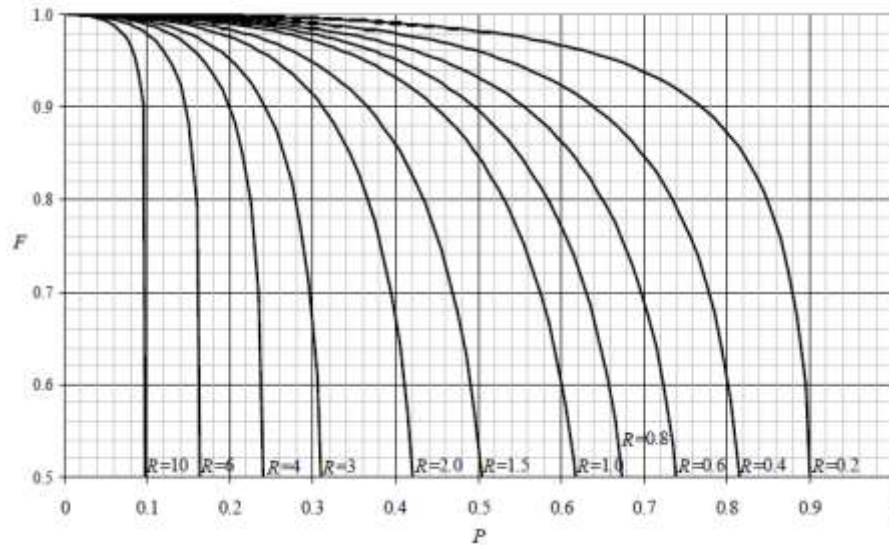
t_1 : Temperatura del aceite a la entrada de los tubos

t_2 : Temperatura del aceite a la salida de los tubos

Con los valores obtenidos de P – R identificamos en la

Figura 12, el valor correspondiente al factor de corrección para el intercambiador a utilizar, el cual para este proyecto tiene un valor de 0,99. El valor F es cercano a uno puesto que no hay cambios de fase como se presenta en los condensadores y las calderas donde R tiende a infinito o es igual a cero.

Figura 12. Factor de corrección para intercambiadores



Fuente. [12]

3.5.5 Diferencia de temperatura media (DT_m)

La diferencia de temperatura media es el resultado del producto de la diferencia de temperatura media logarítmica, respecto al factor de corrección del intercambiador y la disposición del flujo de operación.

$$DT_m = F \times LMTD \tag{2.17}$$

$$DT_{m,CF} = 0,99 \times 28,92 \text{ }^\circ\text{C} = 28,63 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$DT_{m,FP} = 0,99 \times 28,61 \text{ }^\circ\text{C} = 28,33 \text{ }^\circ\text{C}$$

Donde:

$DT_{m,CF}$: Diferencia de temperatura media a contraflujo

$DT_{m,FP}$: Diferencia de temperatura media en flujo paralelo

F : Factor de corrección

$LMTD$: Diferencia de temperatura media logaritmica

3.5.6 Área superficial de transferencia de calor (A)

Indica el área total externa de los tubos y que está en contacto con el fluido que recorre la coraza. Se puede hallar través de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U DT_{m,CF}} \quad (2.18)$$

Para el proyecto se tiene:

$$A = \frac{4,927 \text{ kW}}{200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 28,63 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,860 \text{ m}^2$$

Donde:

A : Área superficial de transferencia de calor

\dot{Q} : Razón de transferencia de calor

$DT_{m,CF}$: Diferencia de temperatura media a contraflujo

U : Coeficiente total de transferencia de calor

De acuerdo a la literatura el valor de U es asumido de la siguiente tabla, para fluidos caliente y frio seleccionados en este proyecto y tomando un valor intermedio respecto a los valores propuestos para intercambiadores de calor de tubos y coraza que se observan en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de coeficiente de transferencia de calor total

Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	U ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)
Organic solvents	Water	250–750
Light oils	Water	350–900
Heavy oils	Water	60–300
Gases	Water	20–300
Organic solvents	Brine	150–500
Water	Brine	600–1200
Gases	Brine	15–250

Fuente: [11]

3.5.7 Cálculo del número de tubos (N_t)

Para obtener un número aproximado de tubos en el intercambiador, se realiza el cálculo de acuerdo a los requerimientos de diseño y el área superficial de transferencia de calor, mediante la siguiente ecuación:

$$N_t = \frac{A}{\pi d_o L} \quad (2.19)$$

$$N_t = \frac{0,860 \text{ m}^2}{\pi 0,009525 \text{ m} \times 0,48 \text{ m}} = 61$$

Donde:

N_t : Número de tubos en el intercambiador

A : Área superficial de transferencia de calor

d_o : Diámetro externo del tubo

L : Longitud del tubo

3.5.8 Distancia entre centros de tubos (P_t)

El diámetro pitch, es el espacio o distancia mínima que hay entre centros de tubos adyacentes y es un factor importante para el diseño de la coraza ya que dependiendo de la medida obtenida entre centros de tubos, se puede determinar el diámetro de la coraza, también permite definir el espacio a mecanizar o perforar en las tapas laterales evitando distancias muy próximas que puedan debilitar la estructura del haz tubular.

$$P_t = 1,25 d_o \quad (2.20)$$

$$P_t = 1,25 \times 0,009525 \text{ m} = 0,012 \text{ m}$$

3.5.9 Diámetro del paquete de tubos (D_b)

Para obtener el diámetro del paquete de tubos es necesario el apoyo de tablas con valores establecidos para los diferentes tipos de arreglos o distribución de los tubos al interior de la coraza. Para la fabricación de este intercambiador se dispuso del arreglo cuadrado a 90° con los valores de las constantes que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9. Constantes para arreglo cuadrado del paquete de tubos.

No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

Fuente. [11]

$$D_b = d_o \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad (2.21)$$

$$D_b = 0,009525 \text{ m} \left(\frac{60}{0,215} \right)^{1/2,207} = 0,122 \text{ m}$$

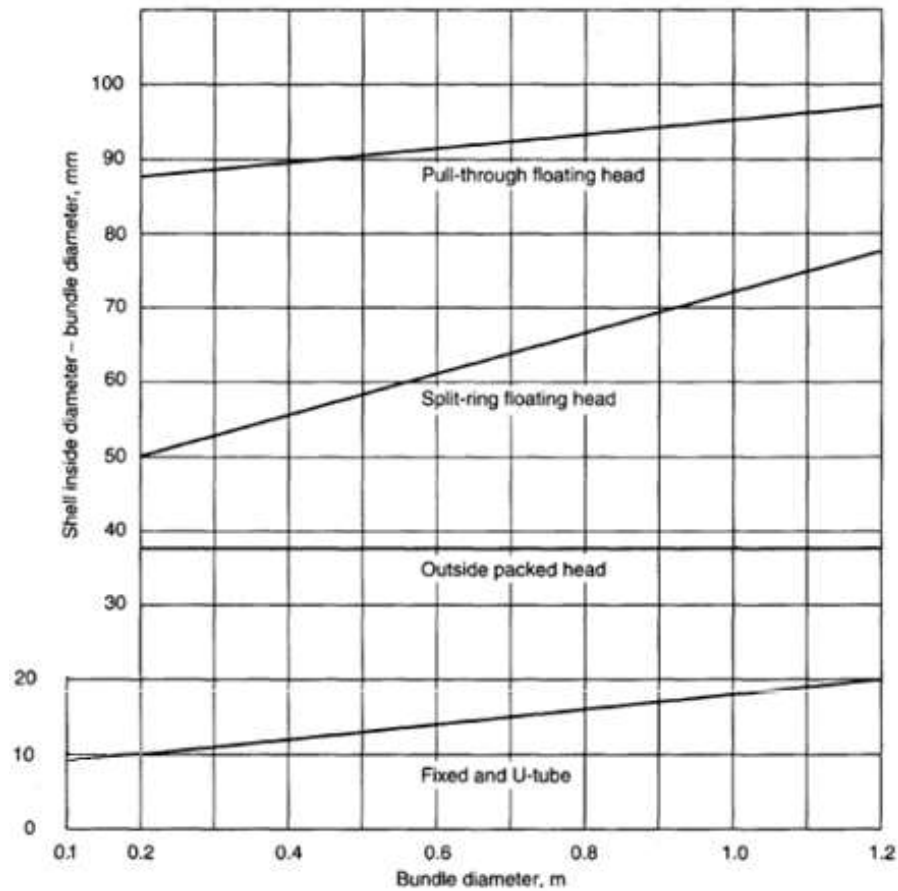
Donde:

 d_o : Diámetro externo del tubo N_t : Número de tubos en el intercambiador $K_1 - n_1$: Constante respecto al arreglo de los tubos y número de pasos

3.5.10 Tolerancia entre coraza y paquete de tubos (BDC)

El BDC (Bundle Diameter Clearance) representa la tolerancia que debe conservar entre el diámetro interno de la coraza y el paquete de tubos, lo cual permite el ingreso de los tubos al interior de la coraza. Este valor es obtenido por graficas respecto al diámetro del paquete de tubos y el tipo de cabezal a utilizar en el intercambiador. Como se puede evidenciar en la Figura 13, correspondiente al paquete de tubos respecto al tipo de cabezal.

Figura 13. Grafica de paquete de tubos respecto a tipo cabezales



Fuente: Adaptado de [11]

De acuerdo al diámetro obtenido del paquete de tubos para este intercambiador y el tipo de cabezal seleccionado se adquiere un valor para BDC de 0.00922 m.

Como el diseño del intercambiador para este proyecto no tiene dimensiones normalizadas, se hace necesario extrapolar los datos para obtener los valores de BDC encontrados.

3.5.11 Diámetro interno de la coraza (D_s)

El diámetro interno de la coraza se halla desarrollando la ecuación (23), la cual es simplemente la suma de los valores obtenidos del paquete de tubos y el BDC.

$$D_s = D_b + BDC \tag{2.22}$$

$$D_s = 0,122 \text{ m} + 0,00922 = 0,13122 \text{ m} \approx 0,132 \text{ m}$$

3.5.12 Distancia entre deflectores (B_s)

Para mantener la velocidad del fluido y prevenir fallas por vibración en los tubos se requiere un espacio longitudinal entre deflectores mínimo de una quinta parte del diámetro interno de la coraza o dos pulgadas, lo que sea mayor, en cuanto a la distancia máxima no puede exceder lo comprendido al diámetro interno de la coraza. Para lo comprendido al corte del deflector que permite aumentar la transferencia de calor en el lado de la coraza puede variar entre el 15% y 45% del diámetro interno de la coraza, de acuerdo a las variables del proceso, realizar un corte entre el 20% y el 35% es lo más recomendable. [7].

Para obtener la distancia entre deflectores se desarrolla la siguiente ecuación:

$$B_s = 0,40 \times D_s \quad (2.23)$$

$$B_s = 0,40 \times 0,132 \text{ m} = 0,053 \text{ m}$$

Donde:

B_s : Distancia longitudinal entre deflectores

D_s : Diámetro interno de la coraza

3.5.13 Área de flujo cruzado (A_s)

$$A_s = \frac{(P_t - d_o) D_s B_s}{P_t} \quad (2.24)$$

$$A_s = \frac{(0,012 \text{ m} - 0,009525 \text{ m}) 0,132 \text{ m} \times 0,053 \text{ m}}{0,012 \text{ m}} = 0,0014 \text{ m}^2$$

3.5.14 Velocidad másica al interior de la coraza (G_s)

Para hallar la velocidad del fluido al interior de la coraza, resolvemos la ecuación (26), por medio del flujo másico del agua y el área de flujo cruzado.

$$G_s = \frac{\dot{m}}{A_s} \quad (2.25)$$

$$G_s = \frac{0,399 \text{ kg/s}}{0,0014 \text{ m}^2} = 290 \text{ kg/s.m}^2$$

3.5.15 Diámetro equivalente de transferencia de calor (d_e)

El diámetro equivalente de transferencia de calor está determinado por el tipo de arreglo en los tubos, para los requerimientos de diseño en este proyecto se dispuso del arreglo cuadrado a 90°, el cual es una buena opción cuando se quiere evitar caídas considerables de la presión. Se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$d_e = \frac{4\left(p_t^2 - \frac{\pi d_o^2}{4}\right)}{\pi d_o} \quad (2.26)$$

$$d_e = \frac{4\left(0,012 \text{ m} - \frac{\pi (0,009525 \text{ m})^2}{4}\right)}{\pi 0,009525 \text{ m}} = 0,00941 \text{ m}$$

Donde:

p_t : Distancia entre centros de los tubos

d_o : Diámetro externo del tubo

3.5.16 Temperatura media aritmética del agua ($T_{f,ma}$)

La temperatura media aritmética del agua a lo largo de la coraza, es el resultado del promedio de las temperaturas de entra y salida del fluido en el intercambiador.

$$T_{f,ma} = \frac{(T_{f,ent} + T_{f,sal})}{2} \quad (2.27)$$

$$T_{f,ma} = \frac{(15 \text{ °C} + 17,95 \text{ °C})}{2} = 16,47 \text{ °C}$$

Donde:

$T_{f,ma}$: Temperatura media aritmetica del agua

$T_{f,ent}$: Temperatura de entrada del agua

$T_{f,sal}$: Temperatura de salida del agua

3.5.17 Número de Reynolds del lado coraza (Re_{agua})

$$Re_{coraza} = \frac{G_s d_e}{\mu} \quad (2.28)$$

$$Re_{coraza} = \frac{290 \text{ kg/s.m}^2 \cdot 0,00941 \text{ m}}{0,00111 \text{ kg/m.s}} = 2451,09$$

Donde:

G_s : Velocidad masica del agua

d_e : Diámetro equivalente de transferencia de calor

μ : Viscosidad dinámica del agua a temperatura media aritmetica

3.5.18 Número de Prandtl (Pr_{agua})

$$Pr_{agua} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (2.29)$$

$$Pr_{agua} = \frac{0,00111 \text{ kg/m.s} \cdot 4185,2 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}}{0,5907 \text{ W/m.}^\circ\text{C}} = 7,88$$

Donde:

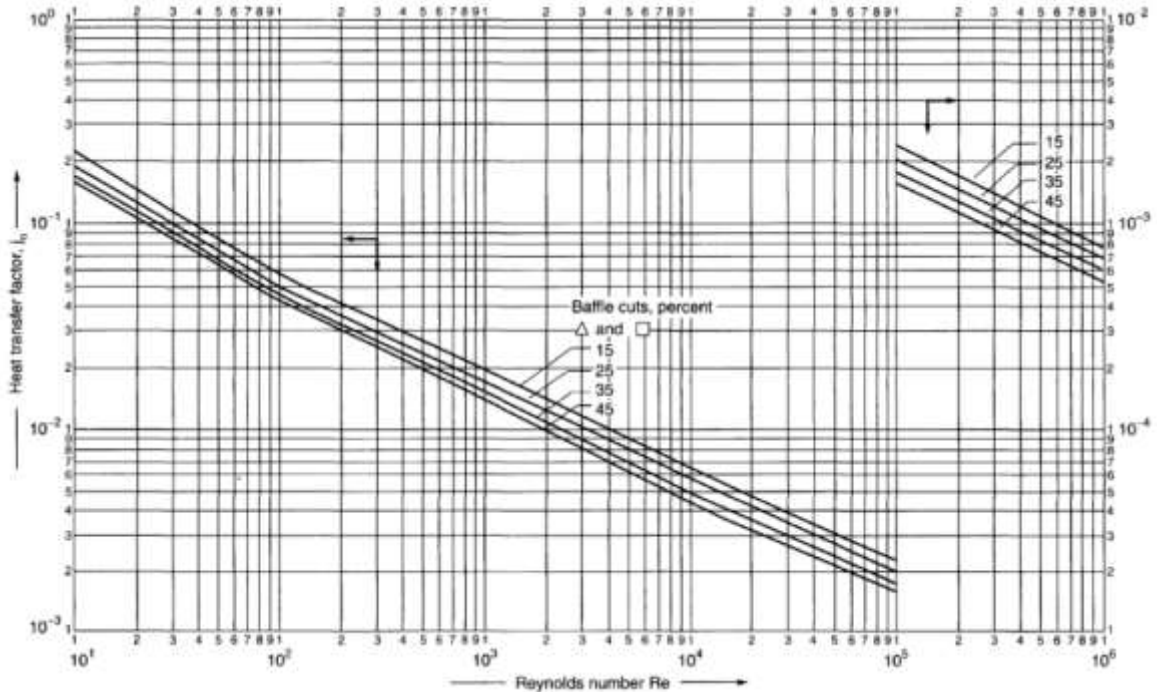
μ : Viscosidad dinámica del agua a temperatura media aritmetica

c_p : Calor especifico del agua

k : Conductividad termica del agua a temperatura media aritmetica

3.5.19 Factor de Chilton Colburn (j_h)

Figura 14. Factor de Colburn respecto al número de Reynolds



Fuente: [11]

Con un número de Reynolds de 2451 para el agua en la coraza y un 35% de corte en los deflectores, obtenemos un factor. $j_h = 0,0095$

3.5.20 Número de Nusselt (Nu_{agua})

$$Nu_{agua} = j_h Re Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{Tma,cf}} \right)^{0,14} \quad (2.30)$$

$$Nu_{agua} = 0,0095 (2451,09) (7,88)^{1/3} \left(\frac{0,00111 \text{ kg/m.s}}{0,00078 \text{ kg/m.s}} \right)^{0,14} = 48,661$$

Donde:

j_h : Factor de Colburn

Re : Número de Reynolds del agua

Pr : Número de Prandlt del agua

μ : Viscosidad dinámica del agua a temperatura media aritmética

$\mu_{Tma,cf}$: Viscosidad dinámica a temperatura media aritmética entre los dos fluidos

3.5.21 Numero de pasos por los tubos

Una de las características que tienen los intercambiadores de calor de tubos y coraza son el número de pasos que realizan los fluidos tanto en coraza como al interior de los tubos, esta característica es un criterio por la cual también se clasifican los intercambiadores de calor de acuerdo al arreglo con el que dispongan. En este proyecto como el diseño del intercambiador de calor cuenta con un paso de agua por coraza y un paso de aceite por los tubos, se considera que el haz tubular será de 61 pasos por los tubos, con un arreglo cuadrado de 61 tubos. $N_{tpp} = N_t$. De acuerdo a la siguiente ecuación:

$$N_{tpp} = \frac{N_t}{\text{Número de pasos}} \quad (2.31)$$

$$N_{tpp} = \frac{61}{1} = 61$$

3.5.22 Velocidad másica al interior de los tubos (G_m)

Para hallar la velocidad del fluido en los tubos, resolvemos la ecuación (15), donde el valor de la densidad del aceite que se utilizara es obtenido a temperatura media aritmética.

$$G_m = \frac{\dot{m}}{N_{tpp} \pi (d_i^2/4)} \quad (2.32)$$

$$V = \frac{0,275 \text{ kg/s}}{(61) \pi [(0,00635 \text{ m})^2/4]} = 145,23 \text{ kg/s.m}^2$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico del aceite

N_{tpp} : Número de pasos por los tubos

d_i^2 : Diámetro interno del tubo elevado a la potencia

3.5.23 Temperatura media aritmética del aceite ($T_{c,ma}$)

La temperatura media aritmética del aceite a lo largo de los tubos, es el resultado del promedio de las temperaturas de entra y salida del fluido en el intercambiador.

$$T_{c,ma} = \frac{(T_{c,ent} + T_{c,sal})}{2} \quad (2.33)$$

$$T_{c,ma} = \frac{(50\text{ °C} + 41\text{ °C})}{2} = 45,5\text{ °C}$$

Donde:

$T_{c,ma}$: *Temperatura media aritmetica del aceite*

$T_{c,ent}$: *Temperatura de entrada del aceite*

$T_{c,sal}$: *Temperatura de salida del aceite*

3.5.24 Velocidad del aceite (v)

$$v = \frac{G_m}{\rho_{Tma}} \quad (2.34)$$

$$v = \frac{145,23\text{ kg/s.m}^2}{872,673\text{ kg/m}^3} = 0,1664\text{ m/s}$$

Donde:

G_m : *Velocidad másica del aceite*

ρ_{Tma} : *Densidad del aceite a temperatura media aritmética*

3.5.25 Número de Prandtl (Pr_{aceite})

El número de Prandtl es un numero adimensional que describe el espesor relativo de las capas límites de velocidad y la capa térmica, es la razón entre la viscosidad dinámica por el calor especifico y la conductividad térmica.

Para este caso como se está evaluando el fluido al interior de los tubos, se requiere utilizar las variables a temperatura media aritmética.

$$Pr_{aceite} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (2.29)$$

$$Pr_{aceite} = \frac{0,1781 \text{ kg/m.s } 1987,1 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}}{0,1433 \text{ W/m.}^\circ\text{C}} = 2470,767$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica del aceite a temperatura media aritmética

c_p : Calor específico del aceite

k : Conductividad térmica del aceite a temperatura media aritmética

3.5.26 Número de Reynolds (Re_{aceite})

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que relaciona las características físicas de los fluidos y se utiliza para establecer el comportamiento del flujo en determinado proceso, es decir si el fluido presenta un flujo laminar o turbulento. Para un número de Reynolds $Re < 2300$, el flujo es laminar, mientras que un número de Reynolds mayor a $Re > 4000$, el flujo es turbulento. [3]

Para determinar el número de Reynolds a utilizar en este proyecto, se dispone de la siguiente ecuación, donde el valor de la viscosidad dinámica utilizada es a la temperatura promedio del aceite en el interior de los tubos.

$$Re_{aceite} = \frac{\rho d_i v}{\mu} \quad (2.35)$$

$$Re = \frac{872,673 \text{ kg/m}^3 0,00635 \text{ m } 0,1664 \text{ m/s}}{(0,178180 \text{ kg/m.s})} = 5,176$$

Como el resultado del número de Reynolds es inferior a $Re < 2300$, el flujo de aceite al interior de los tubos presenta un régimen laminar.

Donde:

ρ : Densidad del aceite

d_i : Diámetro interno de los tubos

v : Velocidad del aceite

μ : Viscosidad dinámica del aceite a temperatura media aritmética

3.5.27 Coeficiente de transferencia de calor interno (h_{tubos})

El coeficiente de transferencia de calor por convección interno es la cantidad de calor que se transmite al interior de los tubos desde el fluido hacia la pared del tubo en cobre.

Como el flujo del aceite tiene comportamiento laminar, el cálculo del coeficiente de calor por convección interno se resuelve con la siguiente ecuación:

$$h_{tubos} = 1,86 \frac{k}{d_i} (Re Pr)^{0,33} \left(\frac{d_i}{L}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_{Tma,cf}}\right)^{0,14} \quad (2.36)$$

$$h_{tubos} = 1,86 \left(\frac{0,1433 \text{ W/m} \cdot \text{°C}}{0,00635 \text{ m}}\right) (5,176 \times 2470,767)^{0,33} \left(\frac{0,00635 \text{ m}}{0,48 \text{ m}}\right)^{0,33} \left(\frac{0,178180 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{0,496986 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}\right)^{0,14} =$$

$$h_{tubos} = 198 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Donde:

k : Conductividad térmica del aceite

d_i : Diámetro interno de la tubería

Re : Número de Reynolds del aceite

Pr : Número de Prandtl del aceite

L : Longitud del tubo

μ : Viscosidad dinámica del aceite a temperatura media aritmética

$\mu_{Tma,cf}$: Viscosidad dinámica a temperatura media aritmética entre los dos fluidos

3.5.28 Coeficiente de transferencia de calor externo (h_{coraza})

$$h_{coraza} = \frac{Nu k}{d_e} \quad (2.37)$$

$$h_{coraza} = \frac{48,661 (0,59075 \text{ W/m} \cdot \text{°C})}{0,00941 \text{ m}} = 3056 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Donde:

Nu : Número de Nusselt del agua

k : Conductividad térmica del agua a temperatura media aritmética

d_e : Diámetro equivalente de transferencia de calor

3.5.29 Coeficiente de transferencia total calculado (U_c)

Como el coeficiente de transferencia de calor total que se utilizó anteriormente es una estimación que nos permitió obtener el área de transferencia de calor, ahora se hace necesario calcular el coeficiente de transferencia de calor total calculado, de acuerdo a los datos obtenidos con la estimación inicial y así asegurar un comportamiento efectivo del intercambiador de calor. Para ello utilizamos la siguiente ecuación, donde se tienen en cuenta los factores de incrustación de los fluidos. [3]. Tabla 11-2.

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{di}} + \frac{d_i \ln(d_o/d_i)}{2k_w} + \frac{d_i}{d_o h_{do}} + \frac{d_i}{d_o h_o}} \quad (2.38)$$

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{198 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}} + \frac{1}{0.000176 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}} + \frac{0.00635 \text{ m} \times \ln(0.009525 \text{ m}/0.00635 \text{ m})}{2(388 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})} + \frac{0.00635 \text{ m}}{0.009525 \text{ m} \times 0.0001 \text{ m}} + \frac{0.00635 \text{ m}}{0.009525 \text{ m} \times 3056 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}}$$

$$U_c = 179,98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Donde:

h_i : Coeficiente de transferencia de calor interno

h_{di} : Factor de incrustación interno

d_i : Diámetro interno del tubo

d_o : Diámetro externo del tubo

k_w : Coeficiente de transferencia de calor del cobre

h_{do} : Factor de incrustación externo

El valor del coeficiente de transferencia de calor total por convección es el de menor valor entre h_i y h_o , por lo tanto $U_c = U_i$.

3.5.30 Coeficiente de transferencia total externo (U_o)

El coeficiente de transferencia de calor total por convección de la parte externa se obtiene de acuerdo a la ecuación (40), la cual se basa en el flujo exterior de los tubos y teniendo presente los valores de incrustación dados para los fluidos utilizados en el intercambiador.

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{do}} + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k_w} + \frac{d_o}{d_i h_o} + \frac{d_o}{d_i h_{di}}} \quad (2.39)$$

$$U_c = \frac{1}{3056 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} + 0.0001 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} + \frac{0.009525 \text{ m} \times \ln(0.009525 \text{ m}/0.00635 \text{ m})}{2 (388 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})} + \frac{0.009525 \text{ m}}{0.00635 \text{ m} \times 3056 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}} + \frac{0.009525 \text{ m}}{0.00635 \text{ m} \times 0.000176 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}}}$$

$$U_o = 909,98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

3.5.31 Área de transferencia de calor interna (A_i)

Para obtener el área de transferencia de calor por convección interno se requiere utilizar el diámetro interno y la longitud de los tubos de cobre del intercambiador, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$A_i = \pi \frac{d_i}{L} \quad (2.40)$$

$$A_i = \pi \frac{0,00635 \text{ m}}{0,48 \text{ m}} = 0,00958 \text{ m}^2$$

3.5.32 Área de transferencia de calor externa (A_o)

Para obtener el área de transferencia de calor por convección externo se requiere utilizar el diámetro externo y la longitud de los tubos de cobre del intercambiador, conforme a la ecuación (41).

$$A_o = \pi \frac{d_o}{L}$$

$$A_o = \pi \frac{0,009525 \text{ m}}{0,48 \text{ m}} = 0,01436 \text{ m}^2$$

3.5.33 Relación de transferencia de calor ($U \times A$)

$$U_i \times A_i = 172 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$U_o \times A_o = 13,07 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}$$

Donde:

U_i : Coeficiente de transferencia de calor total interno

A_i : Área de transferencia de calor interno

U_o : Coeficiente de transferencia de calor total externo

A_o : Área de transferencia de calor externa

3.5.34 Capacitancia térmica (C)

Es la capacidad que tiene un fluido para transportar energía térmica. Para el caso puntual de un intercambiador de calor, la capacitancia térmica indica la velocidad de transferencia de calor requerida para aumentar 1°C la temperatura del fluido en movimiento dentro del sistema. Depende proporcionalmente del calor específico del fluido a determinada temperatura y del gasto de masa del mismo fluido. Su fórmula es:

$$C = \dot{m}c_p \quad (2.41)$$

A partir de los datos obtenidos anteriormente, el calor específico para los fluidos usados en el proyecto es:

$$C_{agua} = 0,399 \text{ kg/s} \times 4,186 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} = 1,673 \text{ kW}/^\circ\text{C}$$

$$C_{aceite} = 0,275 \text{ kg/s} \times 1,987 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} = 0,547 \text{ kW}/^\circ\text{C}$$

3.5.35 Relación de capacidades (c)

Es una cantidad adimensional, útil en el análisis de intercambiadores de calor e indica la razón entre la capacitancia térmica mínima y la máxima de los dos fluidos del sistema. Su fórmula es:

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (2.42)$$

Para este proyecto, se tiene como C_{min} al aceite y como C_{max} al agua, entonces la relación de capacidades es:

$$c = \frac{0,547 \text{ kW}/^{\circ}\text{C}}{1,673 \text{ kW}/^{\circ}\text{C}} = 0,327$$

3.5.36 Efectividad (ϵ)

Es una medida de la capacidad que se está empleando del intercambiador, respecto a la máxima capacidad de funcionamiento del mismo intercambiador. Se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (2.43)$$

$$\epsilon = \frac{4,927 \text{ kW}}{19,160 \text{ kW}} = 0,2571 \approx 26\%$$

3.5.37 Calculo de NTU

El número de unidades de transferencia NTU, es un parámetro adimensional que relaciona la efectividad de los intercambiadores de calor y el área superficial de transferencia del intercambiador. Para el cálculo de este valor en el proyecto, asumimos el valor del coeficiente de transferencia de calor total, como $U = 200 \text{ W}/\text{m}^2$.

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} \quad (2.44)$$

$$NTU = \frac{(200 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})(0,860 \text{ m}^2)}{547 \text{ W}/^{\circ}\text{C}} = 0,314$$

Donde:

NTU : Numero de unidades de transferenciade calor

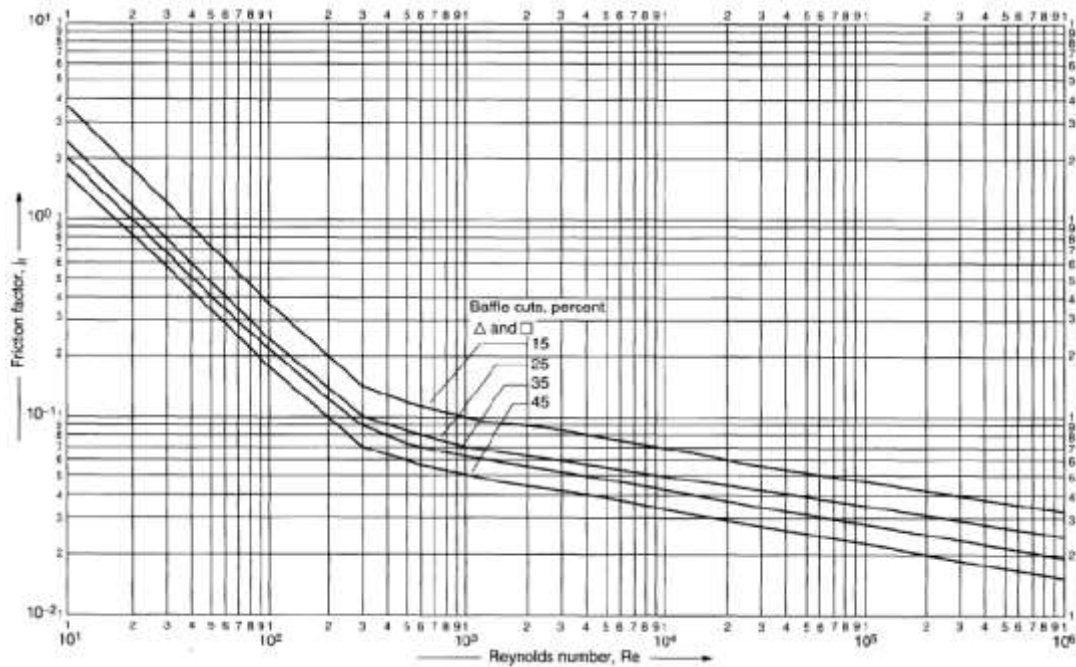
U : Coeficiente global de transferencia de calor

A_s : Area superficial

C_{min} : Capacitancia termica minima

3.5.38 Factor de fricción del agua (j_f)

Figura 15. Factor de fricción del agua respecto al número de Reynolds



Fuente: [11]

Con un número de Reynolds de 2451 para el agua en la coraza y un 35% de corte en los deflectores, obtenemos un factor de fricción. $j_f = 5,5 \times 10^{-2}$

3.5.39 Caída de presión del agua (ΔP_{agua})

$$\Delta P_{agua} = 8j_f \left(\frac{D_s}{d_e}\right) \left(\frac{L}{B_s}\right) \frac{\rho v_f^2}{2} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{Tma,cf}}\right)^{-0,14} \quad (2.45)$$

$$\Delta P_{agua} = 8(0,055) \left(\frac{0,131 \text{ m}}{0,00941 \text{ m}}\right) \left(\frac{0,48 \text{ m}}{0,053 \text{ m}}\right) \frac{998,806 \text{ kg/m}^3 \times 0,054 \text{ m/s}}{2} \left(\frac{0,00111 \text{ kg/m.s}}{0,00078 \text{ kg/m.s}}\right)^{-0,14}$$

$$\Delta P_{agua} = 78,49 \text{ kg/m.s}^2$$

Donde:

j_f : Factor de fricción al interior de la coraza

D_s : Diámetro interno de la coraza

d_e : *Diametro equivalente de transferencia*

L : *Longitud de los tubos*

B_s : *Longitud entre deflectores*

ρ : *Densidad del agua*

v_f : *Velocidad del agua*

μ_f : *Viscosidad dinamica del agua a temperatura media aritmética*

$\mu_{Tma,cf}$: *Viscosidad dinámica a temperatura media aritmética entre los dos fluidos*

3.5.40 Caída de presión del aceite (ΔP_{aceite})

$$\Delta P_{aceite} = \left(1,5 + N_t \left[2,5 + \frac{8j_f L}{d_i} + \left(\frac{\mu_c}{\mu_{Tma,cf}} \right)^{-m} \right] \right) \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.46)$$

$$\Delta P_{aceite} = \left(1,5 + 61 \left[2,5 + \frac{8(0,055)(0,48 \text{ m})}{0,00635 \text{ m}} + \left(\frac{0,1781 \text{ kg/m.s}}{0,4969 \text{ kg/m.s}} \right)^{-0,14} \right] \right) \frac{872,673 \text{ kg/m.s} (0,1664 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$\Delta P_{aceite} = 26720,33 \text{ kg/m.s}^2$$

Donde:

N_t : *Número de tubos*

j_f : *Factor de fricción al interior de los tubos*

L : *Longitud de los tubos*

d_i : *Diámetro interno de los tubos*

μ_c : *Viscosidad dinamica del aceite a temperatura media aritmética*

$\mu_{Tma,cf}$: *Viscosidad dinámica a temperatura media aritmética entre los dos fluidos*

ρ : *Densidad del aceite*

v : *Velocidad del aceite*

La caída de presión en el aceite debido al paso por el intercambiador de calor es de 26,720 kPa o su equivalente a 3,87 psi.

3.6 Diseño propuesto del intercambiador de calor

Teniendo en cuenta la información recopilada en este documento, con los requerimientos iniciales de diseño, con la selección del tipo de intercambiador propuesta, con los cálculos detallados realizados y su correspondencia con la disponibilidad comercial de materiales existentes, a continuación, se muestra la propuesta de diseño del intercambiador de calor de tubo y coraza escogida para este proyecto.

Se tomó la decisión de optar por el diseño indicado en este apartado a razón de poder cumplir los requerimientos originalmente planteados que se consideraron importantes en consolidar, tales como una variación mínima de 2°C en el fluido frío y de hasta 9°C en el fluido caliente, el poder usar tubería de cobre como vía de circulación para el aceite caliente y poder tener una apreciación visual interna de un intercambiador de calor usando acrílico como material de fabricación de la coraza. Como referencia constructiva se tomó en cuenta los diseños mostrados en las Figura 16 Y Figura 17 del mismo tipo de intercambiador de calor y que fueron destinados como proyectos de grado universitario.

Figura 16. Intercambiador de calor de tubo y coraza



Fuente: [2]

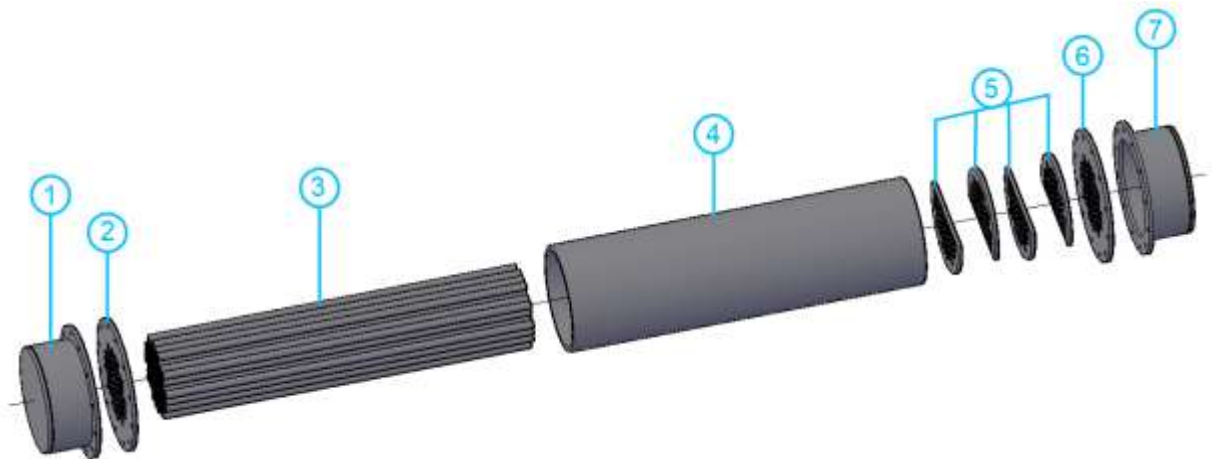
Figura 17. Intercambiador de calor de tubo y coraza



Fuente: [13]

Dado lo anterior y procurando cumplir con los requerimientos propuestos, se propone el siguiente intercambiador de calor de tubo y coraza de acuerdo al análisis realizado en conjunto de los requerimientos iniciales, luego plasmándolos en cálculos detallados en donde se obtuvieron medidas exactas en cuanto a dimensiones de coraza, de baffles, de espacio entre baffles, de cantidad de tubos, diámetros internos y externos de tubos; después fue necesario aterrizar esos cálculos con dimensiones comerciales estándar de tubería y tan solo esa modificación conllevó a adecuar las medidas de los componentes en acrílico que si permitían mayor libertad de diseño.

Figura 18. Explosionado del intercambiador de calor.



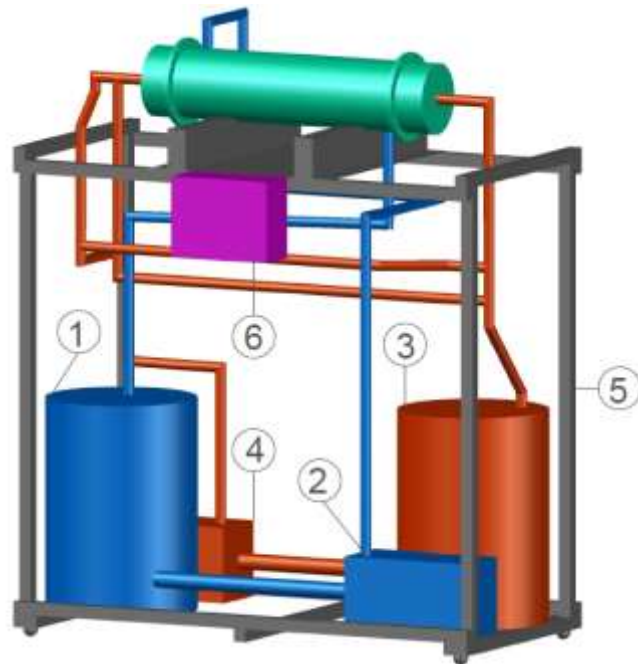
Fuente: Los autores

A continuación, se detallan las partes de intercambiador como lo muestra la Figura 18.

1. Cabezal en acrílico del lado izquierdo.
2. Tapa en acrílico del lado izquierdo.
3. Conjunto de 61 tubos de cobre de 1/4" de diámetro interno.
4. Coraza en acrílico.
5. Juego de deflectores en acrílico.
6. Tapa en acrílico del lado derecho.
7. Cabezal en acrílico del lado derecho.

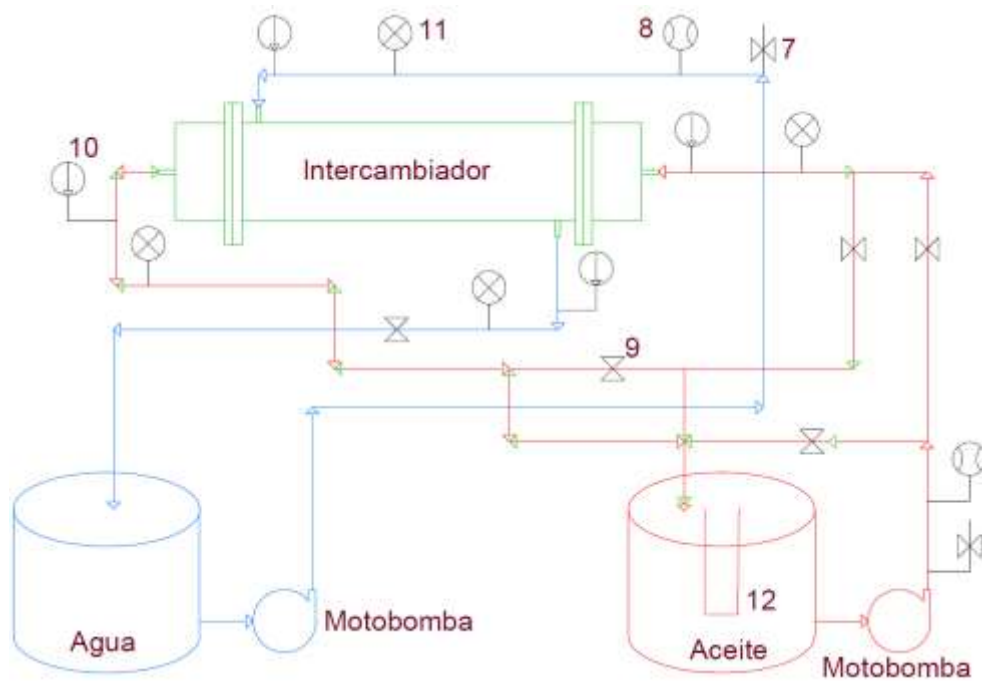
El intercambiador mostrado anteriormente viene montado en el sistema que se observa en la siguiente figura:

Figura 19. Banco del intercambiador.



Fuente: Los autores

Figura 20 Diagrama termohidráulico.



Fuente: Los autores

De acuerdo a la Figura 19 y Figura 20, el banco del intercambiador de calor consta de las siguientes partes:

1. Tanque fluido frio: contiene agua a temperatura ambiente, aproximadamente 15°C que participa como fluido frio.
2. Motobomba para fluido frio: Impulsa agua a temperatura ambiente desde el tanque depósito hacia el intercambiador y de nuevo al depósito.
3. Tanque fluido caliente: Contiene aceite hidráulico el cual es calentado a 50°C con una resistencia eléctrica de inmersión la cual esta verticalmente dispuesta en el eje central del tanque.
4. Motobomba para fluido caliente: Impulsa aceite con una temperatura controlada de 50°C desde el tanque depósito hacia el intercambiador y de nuevo al depósito.
5. Estructura: Se escogió perfiles metálicos para soportar los componentes más pesados del sistema.
6. Tablero eléctrico: En esta caja se ubica la conexión eléctrica de potencia, la de control y la visualización de las temperaturas y los caudales de cada fluido.
7. Válvulas reguladoras: Válvulas específicamente diseñadas para regular el caudal a través de la tubería.
8. Caudalímetros: Sensores ubicados en forma axial respecto a la tubería y son encargados de enviar señal al microprocesador según fluya a través del fluido.
9. Válvulas hidráulicas: Válvulas del tipo on-off, encargadas de cortar totalmente el flujo o abrirlo completamente.
10. Termómetros: Sensores digitales de temperatura del fluido.
11. Manómetros: Indican la presión del sistema a la entra y salida del intercambiador.
12. Resistencia eléctrica: Resistencia de tipo inmersión, de 600 vatios de potencia, destinada a calentar el aceite hasta los valores configurados en el termostato.

Los planos detallados del intercambiador de calor de tubo y coraza de este proyecto, se muestran en el anexo A.

4. Construcción del intercambiador

4.1 Fabricación de estructura

Para la fabricación de la estructura que soporta los componentes que integran el intercambiador de calor, se utilizó perfil metálico cuadrado de 1 pulgada con soportes laterales y verticales de 0,90 metros de longitud y una profundidad de 0,5 metros. La unión de todos los perfiles es realizada por medio de tornillos M8 con la finalidad de obtener un banco totalmente desarmable.

Figura 21 Proceso de ensamble de estructura y ajuste de perfiles



Fuente: Los autores

Para facilitar su movimiento cuenta con rodachinas que soportan hasta 20 kilos cada una, dos de ellas con sistema de bloqueo para su respectivo anclaje. El ensamblaje de la estructura que se observa en la Figura 21, es desarrollado conforme a los planos estructurales diseñados para garantizar la seguridad y estabilidad del banco termodinámico.

Figura 22 Estructura terminada con sistema de bloqueo



Fuente: Los autores

4.2 Armado de equipos e intercambiador

Los componentes que integran el intercambiador fueron fabricados por medio de termoformados en lámina acrílica transparente de 5mm, en su interior se instalan los 61 tubos en cobre de 3/8 de pulgada, los cuales atraviesan los deflectores y son posicionados por medio de las tapas laterales. Los cabezales son ajustados a las tapas laterales con tornillos M6 y por medio de empaque se realiza el sello correspondiente entre estas dos superficies

Figura 23. Instalación de tubería en los deflectores



Fuente: Los autores

4.3 Instalación de tanques y motobombas

Los tanques de agua y aceite se disponen en la parte inferior de la estructura con una distribución cruzada para conservar el centro de masa. Las bombas son instaladas y aseguradas en la base de la estructura, la conexión de la succión de las bombas se realiza en la parte inferior de los tanques, con el fin de mantener en todo momento la tubería de succión con presencia de fluido y así evitar aire en el sistema y posibles daños en las bombas.

Figura 24. Instalación de tanques y motobombas

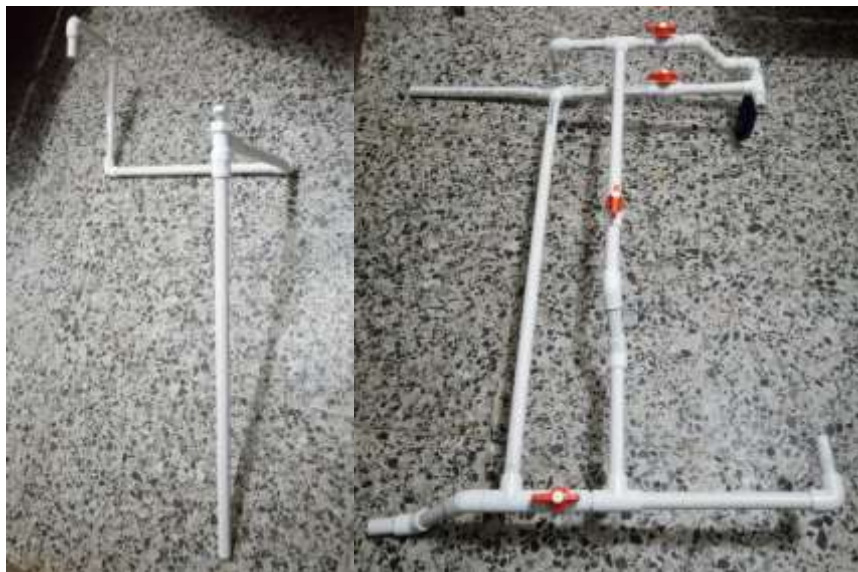


Fuente: Los autores

4.4 Armado, distribución e instalación de tuberías

Los circuitos hidráulicos fueron contruidos con tubería en PVC de 1 pulgada a la succión de las bombas y a la descarga se disminuye la tubería por medio de reducción de $\frac{1}{2}$ pulgada y a partir de ahí se distribuye el circuito hidráulico conservando el diámetro en todo el banco. En cada circuito se instalan válvulas de bola para realizar aperturas y cierres correspondientes de acuerdo a la configuración de flujo, también son instaladas dos válvulas reguladoras de flujo en cada sistema conforme a los planos del diseño hidráulico.

Figura 25. Distribución de tuberías



Fuente: Los autores

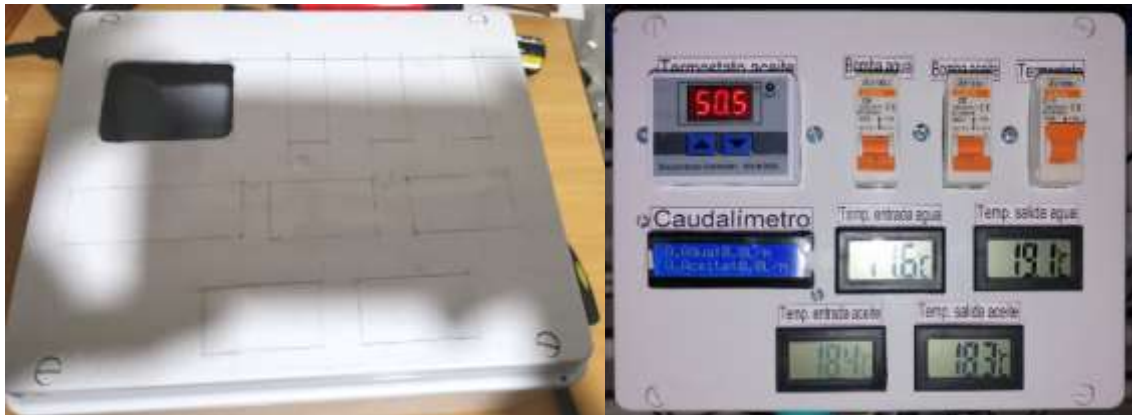
4.5 Instalación del sistema eléctrico

El sistema eléctrico de este intercambiador se divide en la parte de potencia, la parte de control y la de instrumentación, a continuación, se describe cada una de ellas:

- El sistema eléctrico de potencia está comprendido por la alimentación de 3 elementos a una tensión de 120vac, la resistencia eléctrica con un consumo nominal de 9 amperios, dos motobombas con un consumo nominal de 4,6 amperios, cada elemento nombrado anteriormente viene con su respectiva conexión a tierra y protección termomagnética independiente. Se usa cable aislado calibre 12 awg para la alimentación del tablero eléctrico y cable 16 awg para energizar estos elementos.
- El sistema eléctrico de control está comprendido por un termostato con sensor de temperatura directa en depósito de aceite, con configuración alta de temperatura de 50°C y de baja de 48°C.
- En cuanto a la instrumentación se dispone de 4 termómetros digitales para sensar temperaturas de los fluidos antes de ingresar al intercambiador y también a su salida, estos termómetros tienen alimentación independiente a través de batería. Está instalado un caudalímetro para cada fluido con el fin de medir la rapidez del flujo de

volumen de cada fluido antes de ingresar al intercambiador, este sensor se apoya en el sistema Arduino para informar la medición mediante una pantalla lcd ubicada en el tablero eléctrico.

Figura 26. Instalación de sistemas de control en caja eléctrica



Fuente: Los autores

4.6 Ensamble final de estructura e intercambiador

Una vez ensamblado tanto el intercambiador como la estructura, se procede a realizar la unión solidaria de los componentes que integran el banco, en la figura 22 se puede apreciar la construcción final del banco de pruebas termodinámico con un intercambiador de tubos y coraza.

Figura 27. Ensamble final del banco propuesto



Fuente: Los autores

5. Análisis y resultados

Al inicio del proyecto se plantearon unos requisitos iniciales en donde se partía del conocimiento de tres temperaturas de las cuatro que contempla la entrada y salida de cada fluido en el intercambiador. Aplicando la fórmula de conservación de la energía, se determinó la temperatura del agua a la salida del intercambiador, desde allí los cálculos fueron bastante detallados pues se conocían las especificaciones de cada fluido, tales como flujo másico y calor específico, después bajo información técnica detallada se obtuvieron una serie de fórmulas las cuales con unos calibres propuestos de diámetros de tubería y longitud de coraza, arrojaron valores para diversidad de parámetros, entre ellos, diámetros interno de coraza, cantidad de tubos, espacio entre tubos, diseño de deflectores y espaciado entre sí, además de regímenes de flujo para cada fluido.

Después de obtener unos valores del coeficiente global de transferencia de calor cercanos a los $200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, se procedió a ubicar medidas comerciales exactas de tubería pues es este valor el que más se depende de la oferta existente. Los calibres de tuberías encontrados fueron muy cercanos a los propuestos y no se presentaron mayores modificaciones en cuanto a valores propuestos versus valores reales. En adelante se procedió con la construcción del banco de intercambiador de calor.

En la Tabla 10, se recopilan los datos más relevantes que presentaron variación desde su pre diseño hasta su funcionamiento, buscando tener la mejor relación entre una propuesta inicial y un equipo físico funcional.

Tabla 10. Datos de los parámetros del intercambiador.

Descripción	Pre diseño	Calculado	Construcción	Funcionamiento
Tubería	1/2"	3/8"	3/8"	
Longitud de tubería	53 cm	48 cm	48 cm	
Diámetro de coraza	5"	5,2"	5,2"	
Temperatura máxima aceite	40 °C	50 °C	55 °C	38 °C
Temperatura mínima agua	15 °C	15 °C		17,5 °C
Flujo máximo de agua	24 L/m	24 L/m	18 L/m	17,7 L/m
Flujo máximo de aceite	19 L/m	19 L/m	18 L/m	15,2 L/m
Flujo mínimo de agua				7,5 L/m
Flujo mínimo de aceite				7,8 L/m
ΔT Aceite	9 °C	9 °C		7 °C
ΔT Agua	2 °C	2 °C		2 °C
U	200 W/m ² °C	200 W/m ² °C	180 W/m ² °C	

Fuente: Los autores

6. Guías de laboratorio

En los anexos se encuentran las guías de laboratorio del presente proyecto, las cuales se enumeran y describen a continuación:

- Guía de laboratorio #1: Caracterización de un intercambiador de calor de tubo y coraza a contraflujo y a flujo paralelo. Con el desarrollo de esta guía se pretende que el estudiante reconozca las dos posibles variaciones en dirección de flujo en un intercambiador de calor, tendrá que realizar una serie de cálculos de medidas definidas que influyen directamente en el diseño de un intercambiador, también el alumno podrá observar el funcionamiento del intercambiador y manipular unas determinadas válvulas para obtener dichos cambios de dirección de flujo. Con la información recolectada, el estudiante estará en capacidad de comprender las ventajas o desventajas que ofrece seleccionar un tipo de flujo al momento de diseñar un intercambiador de calor de tubo y coraza.
- Guía de laboratorio #2: Consecuencias de la variación de caudal de los fluidos que componen el intercambiador de calor de tubo y coraza. Con el desarrollo de esta guía se pretende que el estudiante conozca el funcionamiento general de un intercambiador de calor, que visualice en la instrumentación instalada, las temperaturas y caudales de los fluidos que componen el sistema; específicamente se podrá manipular dos válvulas reguladoras de caudal para que mediante la modificación de este parámetro, se pueda observar las variaciones resultantes en las temperaturas de salida, para apoyar y complementar esta actividad se declaran determinadas fórmulas matemáticas para que teóricamente se contrasten los resultados y poder así llegar a conclusiones concisas acerca del efecto de la variación de caudal de los fluidos en el funcionamiento de un intercambiador de calor de tubo y coraza.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

El proceso de diseño y posteriormente la construcción del intercambiador de calor de tubos y coraza, tuvo consigo una serie de acciones previas a realizar, entre ellas se encuentra una muy importante que fue la investigación a profundidad sobre estos dispositivos, el conocer su funcionamiento y correlacionar los diferentes tipos de intercambiadores que existen en la industria, fue una parte muy importante para el desarrollo, diseño y construcción del intercambiador de calor que se llevó a cabo durante este proyecto, esta adquisición de conocimientos permitió abordar este proyecto de forma estructurada, adecuada; organizada, técnica y profesionalmente. Durante el desarrollo surgieron algunas variaciones en los componentes que produjeron alteraciones en el diseño inicial, que fueron superadas gracias a la investigación y dedicación, lo cual se ve reflejado en los resultados semejantes a lo planteado inicialmente.

- La parte fundamental de este proyecto se basó en el diseño térmico y mecánico donde se hizo necesario el estudio y análisis de los materiales a utilizar ya que por las características físicas con las que cuenta cada uno de ellos, logra diversificar los cálculos y por ende alterar el diseño y los resultados esperados. Por esta razón en la realización de los cálculos se invirtió un tiempo considerable con el ánimo de mitigar alteraciones que afectaran el diseño propuesto.
- En la construcción del banco de pruebas termodinámico se utilizaron materiales con características seleccionadas de acuerdo a los requerimientos de diseño y que se encuentran en una gran variedad en el mercado. Para lo comprendido al intercambiador y de acuerdo al objetivo de poder observar el funcionamiento en su interior, fue muy acertado la utilización de acrílico para su construcción, es así como se logró obtener

un banco de pruebas termodinámico funcional, que contribuirá en el desarrollo de prácticas de laboratorio en las asignaturas relacionadas a termodinámica y transferencia de calor.

- Como el banco termodinámico se fabricó respecto a unos requerimientos iniciales de diseño y al abordar la fase de cálculos térmicos de forma consiente, metodológica y ordenada, se obtuvo un proceso de alistamiento y pruebas de sistemas sin contratiempos donde por medio de apertura y cierre de válvulas se realizó la configuración de los flujos y caudales requeridos, adicionalmente la instrumentación instalada permite la visualización de las variables que intervienen en el proceso.
- Uno de los objetivos al realizar la fabricación del banco termodinámico con un sistema de intercambio de calor de tubo y coraza fue la de comprender mejor el funcionamiento de este tipo de dispositivos y para ello se diseñaron dos modelos de prácticas de laboratorio donde los estudiantes tendrán la posibilidad de interactuar con el equipo, cambiar su configuración de flujo y realizar cálculos que les permitirán afianzar los conocimientos teóricos y llevarlos a la práctica.

7.2 Recomendaciones

Durante el proceso de alistamiento y puesta a punto del banco termodinámico, se observaron algunas oportunidades de mejora que pueden facilitar y optimizar su funcionamiento. A continuación, se describen algunas de ellas.

- Para la medición de temperaturas se utilizaron termómetros con batería para su funcionamiento, lo cual presenta una oportunidad de mejora, ya que estos elementos por medio de una correcta manipulación pueden ser adaptados a una fuente de 110V que le permita mantener energizado una vez encendido el banco y no depender de una fuente alterna como son las baterías.
- Cuando el banco termodinámico se trabaja un tiempo considerable, las temperaturas de los fluidos tienden a equilibrarse debido a la temperatura que mantiene el aceite y su paso por el intercambiador calor. Para mejorar este proceso es necesario adaptar un mecanismo que disminuya la temperatura del agua antes de que retorne al tanque de almacenamiento. Para este caso se puede optar por un radiador o una torre de

enfriamiento que disminuyan la temperatura del fluido y así poder realizar un ciclo ininterrumpido en el banco de pruebas termodinámico. Por otra parte se puede incluir la adaptación de un tanque de mayor área transversal y aumentar la altura en la caída de agua de retorno.

- Con el objetivo de ampliar las practicas a realizar en este banco termodinámico, se puede automatizar el proceso integrando un PLC y un sistema de electroválvulas en las tuberías, lo cual permitiría realizar cambios de flujo, encender o apagar las bombas y una visualización completa de todas las variables del proceso por medio de una pantalla HMI.

8. Bibliografía

- [1] J. I. Carrero Mantilla, Equipos de transferencia de calor: una guía de estudio, Bogotá D.C: UNIBIBLOS, 2008.
- [2] A. M. Iriarte Pupo y N. D. Galvan Pimienta, Diseño y construcción de un banco de prueba de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para la universidad Autónoma, Barranquilla, 2006, pp. 33 - 56.
- [3] Y. A. Cengel, TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Un enfoque práctico, vol. III, P. E. Roig Vázquez y A. L. Delgado Rodríguez, Edits., México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2007, pp. 610-645.
- [4] K. J. Wark y D. E. Richards, Termodinámica, Sexta edición ed., McGRAW-HILL, 2001, p. 53.
- [5] D. P. INCROPERA y D. P. DeWITT, Fundamentos de transferencia de calor, Cuarta edición ed., P. E. ROIG VÁZQUEZ, Ed., PEARSON EDUCACIÓN, 1999.
- [6] M. J. Montes Pita, M. Muñoz Domínguez y A. Rovira De Antonio, Ingeniería Térmica, vol. I, Madrid, 2014, pp. 177-233.
- [7] R. Mukherjee,, «Effectively Design Shell-and-Tube Heat Exchangers,» *CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS*, pp. 1-17, Febrero 1998.
- [8] D. M. Ortiz y C. Oviedo , «Diseño y construcción de un intercambiador de calor de coraza y tubos,» Barranquilla, 2018.
- [9] K. C. Rolle, Termodinámica, Sexta edición ed., P. M. Guerrero Rosas, Ed., PEARSON EDUCACIÓN, 2006, p. 58.
- [10] R. L. Mott, Diseño de elementos de máquinas, Cuarta ed., vol. IV, P. M. Guerrero Rosas, Ed., PEARSON EDUCACIÓN, 2006, pp. 676-680.
- [11] Reyad Shawabkeh, «Steps of desing of Heat Exchanger,» 2015.

[12] J. Saari, «HEAT EXCHANGER DIMENSIONING,» 2010.

[13] J. L. Parra Higueta y R. A. Leon Quintero, «BANCO DIDACTICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR (TUBOS Y CORAZA) PARA LABORATORIO ITM,» 2017.

[14] M. Ramirez Nivia, Simulación, montaje y puesta en marcha de un intercambiador de calor tipo coraza y tubos de cabezales flotantes con configuración de haces de tubos variables para fines educativos, Bogotá D.C, 2004, pp. 20 - 35.

A. Anexo: Guías de laboratorio

1. Determinación de la práctica de laboratorio:

Guía de laboratorio # 1:	Caracterización de un intercambiador de calor de tubo y coraza a contraflujo y a flujo paralelo.
Facultad:	FIMEB
Profesor:	
Materia:	
Fecha:	

2. Objetivo:

Caracterizar las diferentes configuraciones de flujo en un intercambiador de calor de tubo y coraza, aplicando adecuadamente las ecuaciones correspondientes que pueden ser determinantes al momento de diseñar un intercambiador de calor de este tipo.

3. Recursos:

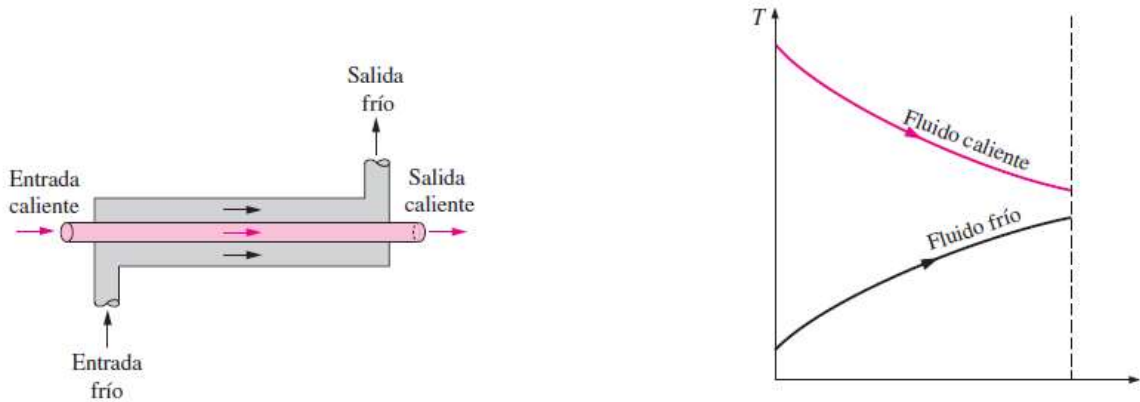
- Guía de laboratorio #1.
- Banco de intercambiador de calor tipo tubos y coraza.
- Especificaciones del banco de intercambiador de calor tipo tubos y coraza.

4. Marco teórico:

En este tipo de intercambiador de calor se pueden presentar dos condiciones de flujo entre los fluidos que lo componen:

- Flujo paralelo: Se presenta cuando ambos fluidos se mueven en el mismo sentido a través del elemento que los contiene, en este caso es la coraza de acrílico para el agua y los tubos de cobre para el aceite. Se reconoce visualmente esta configuración si el fluido caliente y el fluido frío ingresan al intercambiador desde el mismo extremo. En la figura 1 se indica la forma general de dos fluidos moviéndose de forma paralela y su variación de temperatura a través del sistema.

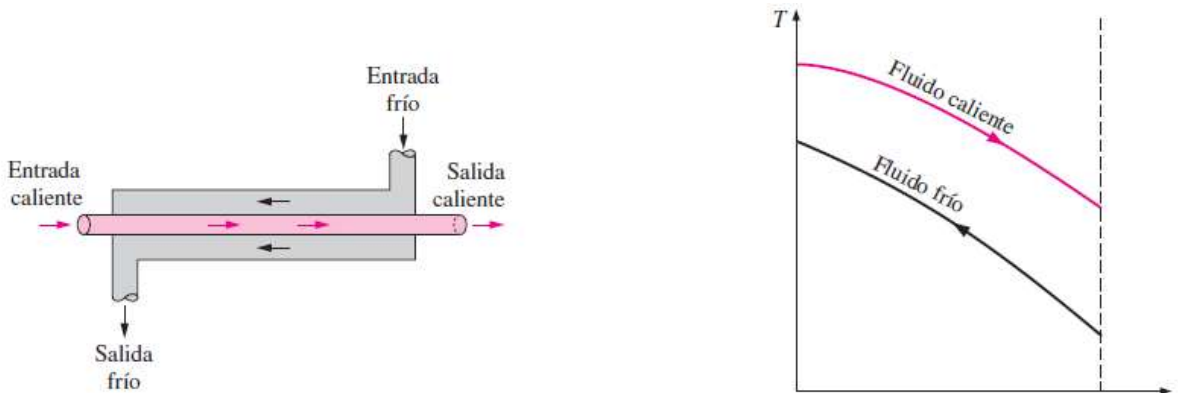
Figura 1. Ejemplificación y comportamiento del flujo paralelo en un intercambiador de calor.



Fuente: Transferencia de calor y masa, Y.A. Cengel, 2007.

- **Contraflujo:** Se presenta cuando ambos fluidos se mueven en sentidos opuestos a través del elemento que los contiene, en este caso es la coraza de acrílico para el agua y los tubos de cobre para el aceite. Se reconoce visualmente esta configuración si el fluido caliente y el fluido frío ingresan al intercambiador desde extremos opuestos. En la figura 2 se indica la forma general de dos fluidos moviéndose a contraflujo y su variación de temperatura a través del sistema.

Figura 2. Ejemplificación y comportamiento a contraflujo en un intercambiador de calor.



Fuente: Transferencia de calor y masa, Y.A. Cengel, 2007.

Se resumen a continuación las ecuaciones relacionadas directa e indirectamente con las variantes de dirección de flujo en el sistema:

- **Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD):**
$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Donde: $\Delta T_1 = (T_{c,ent} - T_{f,sal})$ y $\Delta T_2 = (T_{c,sal} - T_{f,ent})$ para contraflujo

$\Delta T_1 = (T_{c,ent} - T_{f,ent})$ y $\Delta T_2 = (T_{c,sal} - T_{f,sal})$ para flujo paralelo

Siendo:

$T_{f,ent}$: *Temperatura del fluido frio a la entrada del intercambiador*

$T_{f,sal}$: *Temperatura del fluido frio a la salida del intercambiador*

$T_{c,ent}$: *Temperatura del fluido caliente a la entrada del intercambiador*

$T_{c,sal}$: *Temperatura del fluido caliente a la salida del intercambiador*

Este valor cambia de acuerdo al flujo que se adopte en el intercambiador de calor, entonces este valor modifica consecuentemente los demás cálculos de diseño. A continuación, se indican los valores de diseño que se relacionan con la LMTD:

- Factor de corrección (F): se aplica según la configuración de diseño del intercambiador. En este caso aplica la siguiente formula y con los valores de R y P obtenidos, se procede a encontrar F a través de la gráfica:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)}$$

$$P = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

Donde:

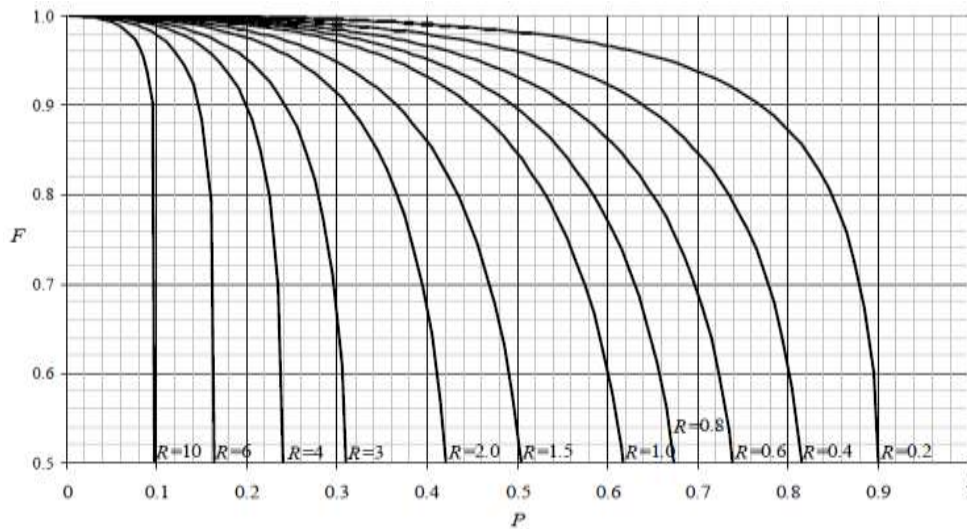
T_1 : *Temperatura del agua a la entrada de la coraza*

T_2 : *Temperatura del agua a la salida de la coraza*

t_1 : *Temperatura del aceite a la entrada de los tubos*

t_2 : *Temperatura del aceite a la salida de los tubos*

Figura 3. Factor de corrección para intercambiadores de tubo y coraza



Fuente: Heat exchanger dimensioning, Saari Jussi, 2010.

- Diferencia media de temperatura (DT_m): $DT_m = F \times LMTD$

- Área superficial de transferencia de calor (A): $A = \frac{\dot{Q}}{U DT_m}$

Donde:

\dot{Q} : Razón de transferencia de calor

U : Coeficiente total de transferencia de calor

- Numero de tubos (N_t): $N_t = \frac{A}{\pi d_o L}$, donde:

A : Área superficial de transferencia de calor

d_o : Diámetro externo del tubo

L : Longitud del tubo

- Diámetro del paquete de tubos (D_b): $D_b = d_o \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$, donde K y n se obtienen de la siguiente tabla para una configuración cuadrada entre tubos.

Tabla 1. Constantes para arreglo cuadrado del paquete de tubos

No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

Fuente: Steps of desing of Heat Exchanger, Reyad Shawabkeh, 2015.

- Diámetro interno de la coraza (D_s): $D_s = D_b + BDC$

Donde BDC (bundle diameter clearance) indica la tolerancia entre el diámetro de paquete de tubos y el diámetro interno de la coraza. Para este intercambiador se asignó un valor de 0,00922 m.

- Distancia entre deflectores (B_s): $B_s = 0,40 \times D_s$

A continuación, se anexan algunas especificaciones constructivas del intercambiador de calor:

Tabla 2. Especificaciones constructivas del intercambiador de calor.

Limites de caudales para ambos fluidos	8 hasta 18 (L/min)
Diámetro interno tubería	0,00635 m
Diámetro externo tubería	0,009525 m
Longitud tubería	0,48 m
Material de los tubos	cobre
Coef. Global de transferencia de calor (asumido)	200 W/m ² . °C

Fuente. Los autores

5. Procedimiento para el funcionamiento del intercambiador de calor:

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para el correcto funcionamiento del equipo durante el desarrollo de este laboratorio:

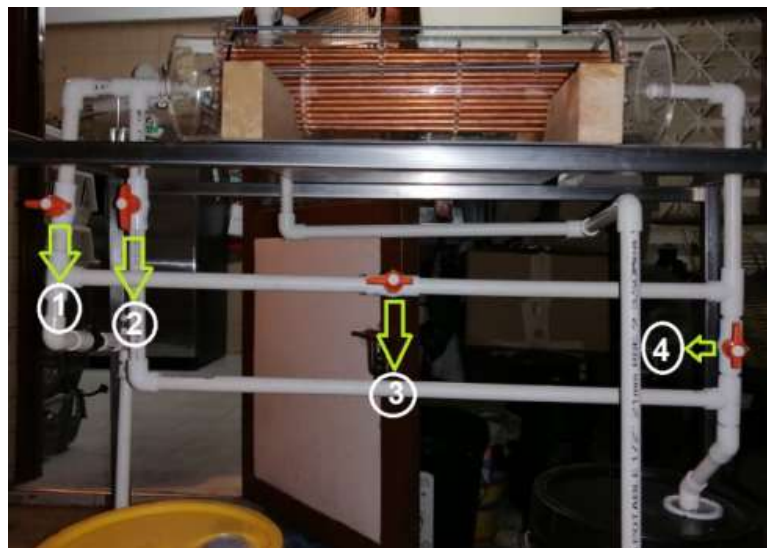
- ✓ Conectar la clavija del banco de prueba del intercambiador de calor al tomacorriente de 120vac más cercano.

- ✓ Energizar el controlador de temperatura del aceite, activando el interruptor termomagnético correspondiente ubicado en el tablero de control. En ese momento se iniciará el calentamiento del fluido y automáticamente permanecerá en los 50 °C
- ✓ Colocar las pilas a los termómetros.
- ✓ Poner en funcionamiento la circulación del fluido frío (agua) activando la bomba a través del interruptor termomagnético el cual está debidamente marcado en el tablero de control.
- ✓ Cuando el controlador de temperatura indique que el fluido caliente (aceite) se encuentra a una temperatura de 50°C se puede proceder a circular dicho fluido, activando el interruptor termomagnético el cual está debidamente marcado en el tablero de control.

En este intercambiador de calor de tubo y coraza, únicamente el fluido que se permite modificar su dirección de movimiento es el fluido caliente, es decir el aceite que fluye dentro de la tubería de cobre. A continuación, se explicará la forma en la que se deben operar un grupo de válvulas para controlar la dirección de flujo:

Para obtener la configuración de flujo paralelo, antes de energizar el equipo, realizar las siguientes operaciones y/o verificaciones, apoyándose en la figura que identifica las válvulas a manipular:

Figura 4. Válvulas para configuración de flujo



Fuente: Los autores

- ✓ Cerrar las válvulas de bola: #2, #3,
- ✓ Abrir las válvulas de bola: #1, #4

Para obtener la configuración a contraflujo, antes de energizar el equipo, realizar las siguientes operaciones y/o verificaciones, apoyándose en la figura que identifica las válvulas a manipular:

- ✓ Cerrar las válvulas de bola: #1, #4
- ✓ Abrir las válvulas de bola: #2, #3

Nota: en el tablero las marquillas están indicado la dirección de flujo paralelo para el aceite, al momento de realizar el cambio a contraflujo se deben interpretar la marquilla de entrada por salida y viceversa.

6. Desarrollo de la guía:

Apoyándose en las ecuaciones indicadas en el marco teórico, en la tabla de especificaciones del equipo y en el procedimiento de funcionamiento del intercambiador de calor, el estudiante deberá proceder a obtener los siguientes cálculos de diseño:

	Flujo paralelo	Contraflujo
Diferencia media de temperatura logarítmica (LMTD)		
Diferencia media de temperatura (DT _m)		
Numero de tubos (N _t)		
Área superficial de transferencia de calor (A)		
Distancia del paquete de tubos (D _b)		
Diámetro interno de coraza (D _s)		
Distancia entre deflectores (B _s)		

Con los datos recolectados y los cálculos realizados, el estudiante debe analizar el impacto que tiene el sentido de flujo de los fluidos dentro de un intercambiador de calor de tubo y coraza, particularmente en el diseño del mismo.

1. Determinación de la práctica de laboratorio:

Guía de laboratorio # 2:	Consecuencia de la variación de caudal de los fluidos que componen el intercambiador de calor de tubo y coraza.
Facultad:	FIMEB
Profesor:	
Materia:	
Fecha:	

2. Objetivo:

Reconocer el efecto que causa en un intercambiador de calor de tubo y coraza el variar los flujos de los fluidos que lo componen, de manera independiente y de forma simultánea, apoyándose en fórmulas matemáticas directamente implicadas con el caudal de los fluidos del sistema.

3. Recursos:

- Guía de laboratorio #2.
- Banco de intercambiador de calor tipo tubos y coraza.
- Especificaciones del banco de intercambiador de calor tipo tubos y coraza.

4. Marco teórico:

El caudal o la rapidez del flujo de volumen se conocen como la cantidad de fluido por unidad de tiempo que se mueve a lo largo de una sección; para el caso de un fluido a través de un tubo, esta sección será el área transversal de dicha tubería. Su fórmula es la siguiente.

$$\dot{V} = V \times A [m^3/s]$$

Donde V es la velocidad promedio a la que se mueve el fluido y A corresponde al área de la sección transversal de la tubería.

Un término muy importante en el diseño de intercambiadores de calor es el de flujo másico o rapidez de flujo de masa el cual indica la cantidad de masa respecto al tiempo de fluido que se mueve a lo largo de una sección. Su fórmula es la siguiente:

$\dot{m} = \rho \times \dot{V}$, donde ρ es la densidad del fluido.

El flujo másico está directamente relacionado con las variaciones de caudal de los fluidos del intercambiador de calor de tubo y coraza, a continuación, se especifican otros valores derivados del flujo másico y que hacen parte del comportamiento y del diseño de éste tipo de intercambiadores:

- Capacitancia térmica (C) = $\dot{m} \times c_p$, donde c_p es el calor específico del fluido.
- Razón de transferencia de calor (\dot{Q}):

$$\dot{Q} = C_f(T_{f,sal} - T_{f,ent}) = C_c(T_{c,ent} - T_{c,sal})$$

Donde

C_f : *Capacitancia térmica del fluido frio*

C_c : *Capacitancia térmica del fluido caliente*

$T_{c,ent}$: *Temperatura del aceite a la entrada del intercambiador*

$T_{c,sal}$: *Temperatura del aceite a la salida del intercambiador*

$T_{f,ent}$: *Temperatura del agua a la entrada del intercambiador*

$T_{f,sal}$: *Temperatura del agua a la salida del intercambiador*

- Área superficial de transferencia de calor (A): $A = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_m}$

Donde:

ΔT_m : *Diferencia media de temperatura*

U : *Coeficiente total de transferencia de calor*

- Numero de tubos (Nt): $N_t = \frac{A}{\pi d_o L}$

Donde:

d_o : *Diámetro externo del tubo*

L : Longitud del tubo

- Diámetro del paquete de tubos (D_b): $D_b = d_o \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$, donde K y n se obtienen de la siguiente tabla para una configuración cuadrada entre tubos.

Tabla 1. Constantes para arreglo cuadrado del paquete de tubos

No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

Fuente: Steps of desing of Heat Exchanger, Reyad Shawabkeh, 2015.

- Diámetro interno de la coraza (D_s): $D_s = D_b + BDC$

Donde BDC (bundle diameter clearance) indica la tolerancia entre el diámetro de paquete de tubos y el diámetro interno de la coraza. Para este intercambiador se asignó un valor de 0,00922 m.

- Distancia entre deflectores (B_s): $B_s = 0.40 \times D_s$
- Velocidad másica al interior de la coraza (G_s): $G_s = \frac{\dot{m}}{A_s}$
- Numero de Reynolds en el lado de la coraza (Re_{agua}): $Re_{agua} = \frac{G_s d_e}{\mu}$

Donde:

d_e : Diámetro equivalente de transferencia de calor

μ : Viscosidad dinámica del agua a temperatura media aritmetica

- Velocidad másica al interior de los tubos (G_m): $G_m = \frac{\dot{m}}{N_{tpp} \pi (d_i^2/4)}$

Donde:

N_{tpp} : Número de pasos por los tubos

d_i : Diámetro interno del tubo

A continuación, se anexan algunas especificaciones constructivas del intercambiador de calor:

Tabla 2. Especificaciones constructivas del intercambiador de calor.

Limites de caudales para ambos fluidos	8 hasta 18 (L/min)
Diametro interno tubería	0,00635 m
Diametro externo tubería	0,009525 m
Longitud tubería	0,48 m
Material de los tubos	cobre
Coef. Global de transferencia de calor (asumido)	200 W/m ² . °C

Fuente. Los autores

5. Procedimiento para el funcionamiento del intercambiador de calor:

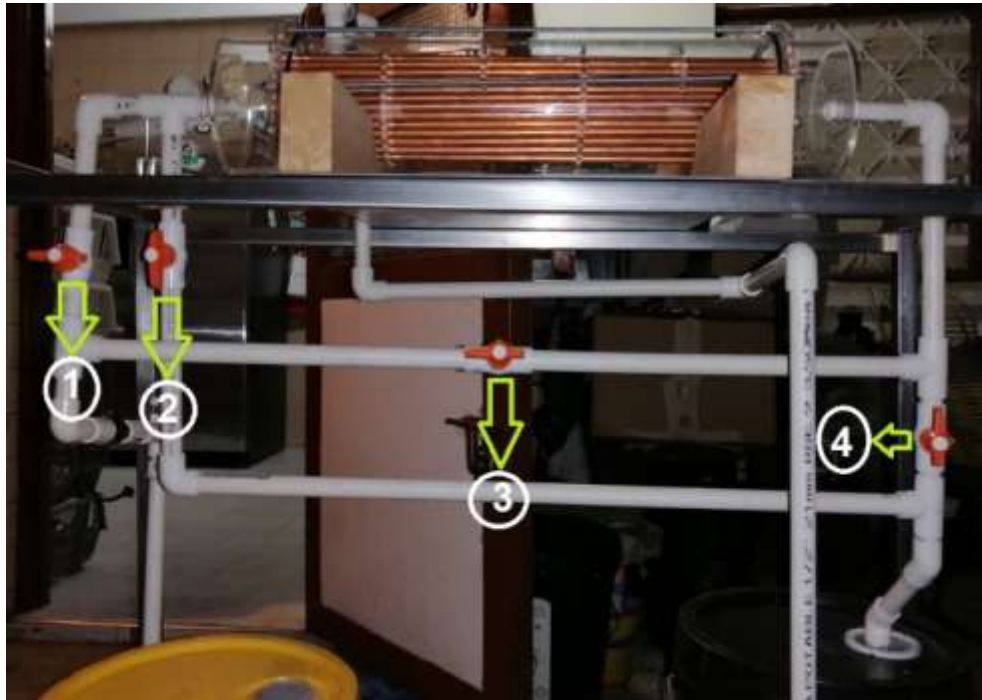
A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para el correcto funcionamiento del equipo durante el desarrollo de este laboratorio:

- ✓ Conectar la clavija del banco de prueba del intercambiador de calor al tomacorriente de 120vac más cercano.
- ✓ Energizar el controlador de temperatura del aceite, activando el interruptor termomagnético correspondiente ubicado en el tablero de control. En ese momento se iniciará el calentamiento del fluido y automáticamente permanecerá en los 50 °C.
- ✓ Colocar las pilas a los termómetros.
- ✓ Poner en funcionamiento la circulación del fluido frío (agua) activando la bomba a través del interruptor termomagnético el cual está debidamente marcado en el tablero de control.
- ✓ Cuando el controlador de temperatura indique que el fluido caliente (aceite) se encuentra a una temperatura de 50°C se puede proceder a circular dicho fluido, activando el interruptor termomagnético el cual está debidamente marcado en el tablero de control.

En este intercambiador de calor de tubo y coraza, únicamente el fluido que se permite modificar su dirección de movimiento es el fluido caliente, es decir el aceite que fluye dentro de la tubería de cobre. A continuación, se explicará la forma en la que se deben operar un grupo de válvulas para controlar la dirección de flujo:

Para obtener la configuración de flujo paralelo, antes de energizar el equipo, realizar las siguientes operaciones y/o verificaciones, apoyándose en la figura que identifica las válvulas a manipular:

Figura 1. Válvulas para configuración de flujo



Fuente: Los autores

- ✓ Cerrar las válvulas de bola: #2, #3
- ✓ Abrir las válvulas de bola: #1, #4

Para obtener la configuración a contraflujo, antes de energizar el equipo, realizar las siguientes operaciones y/o verificaciones, apoyándose en la figura que identifica las válvulas a manipular:

- ✓ Cerrar las válvulas de bola: #1, #4
- ✓ Abrir las válvulas de bola: #2, #3

6. Desarrollo de la guía:

- i) En la siguiente tabla se debe consignar los valores de temperatura solicitados que se obtienen de los termómetros y de los valores de caudal para cada fluido que se ajustan con las válvulas reguladoras R1 para el agua y R2 para el aceite. Se debe tener en cuenta la condición de operación de la regulación de caudal para cada fluido que este dentro del rango de 8 – 18 L/min, donde el límite inferior está dado por una mínima operación de la bomba sin generar sobre esfuerzos y el límite superior lo da la válvula reguladora. Realizar el cálculo solicitado a partir de la ecuación de la razón de transferencia de calor \dot{Q} y analizar el efecto que tiene la variación de caudal de los fluidos respecto a las temperaturas de salida en un intercambiador de calor de tubo y coraza.

		Caudal agua	Caudal aceite
Temperatura entrada agua			
Temperatura entrada aceite			
Temperatura salida aceite			
Temperatura calculada en salida de agua			
Temperatura real en salida de agua			

Temperatura entrada agua			
Temperatura entrada aceite			
Temperatura salida aceite			
Temperatura calculada en salida de agua			
Temperatura real en salida de agua			

Temperatura entrada agua			
Temperatura entrada aceite			
Temperatura salida aceite			
Temperatura calculada en salida de agua			
Temperatura real en salida de agua			

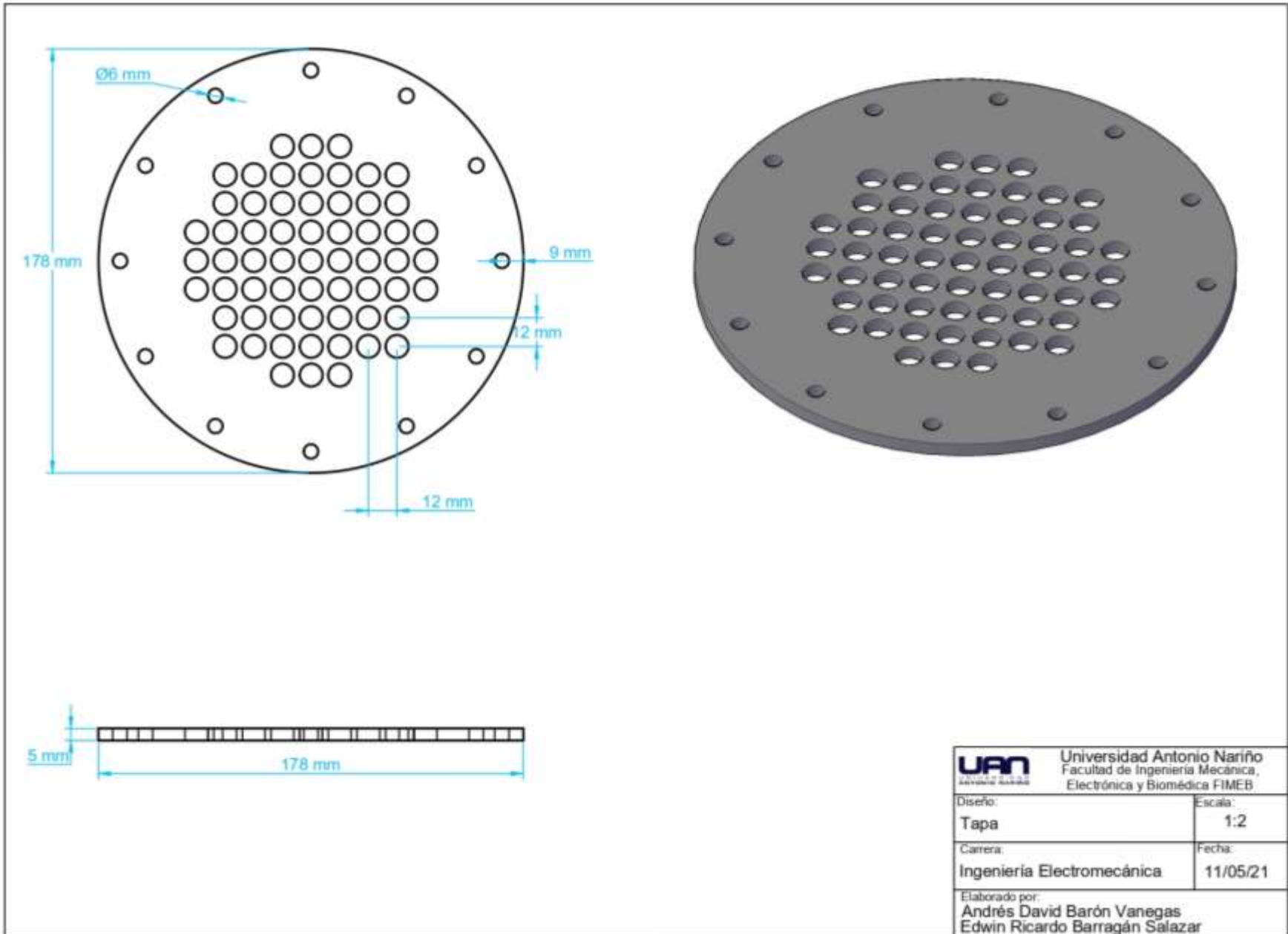
- ii) Apoyándose en las ecuaciones indicadas en el marco teórico, en la tabla de especificaciones del equipo y en el procedimiento de funcionamiento del intercambiador de calor, el estudiante deberá proceder a obtener los siguientes cálculos de diseño:

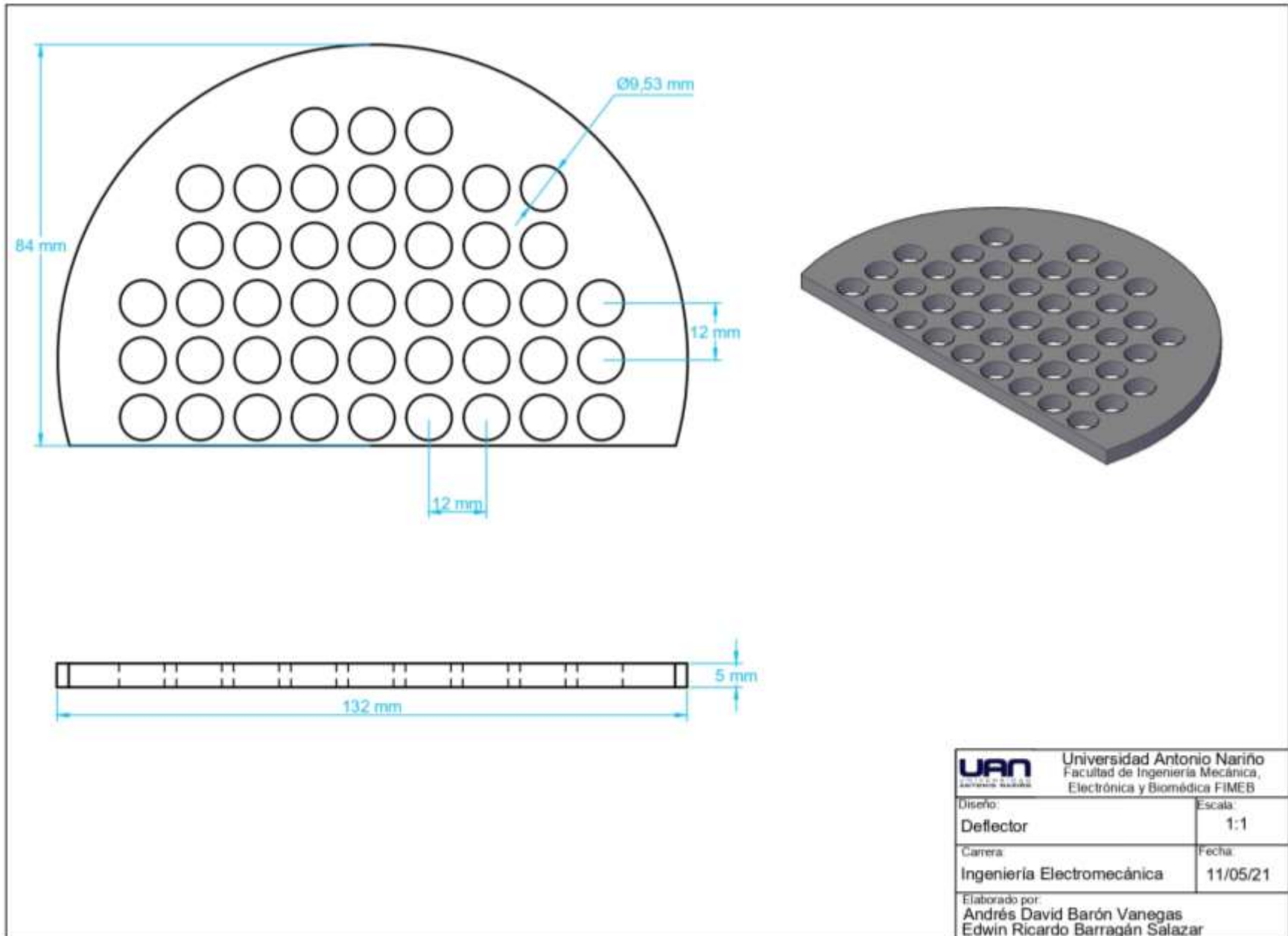
	Caudal agua	Caudal aceite	Caudal agua	Caudal aceite	Caudal agua	Caudal aceite
Caudal (V)						
Flujo másico (\dot{m})						
Capacitancia térmica (C)						
Razón de transferencia de calor (Q)						
Área superficial de transferencia de calor (A)						
Número de tubos (Nt)						
Diámetro de paquete de tubos (Db)						
Diámetro interno de la coraza (Ds)						
Distancia entre deflectores (Bs)						
Velocidad másica al interior de la coraza (Gs)						
Número de Reynolds en coraza (Re_{agua})						
Velocidad másica al interior de los tubos (Gm)						

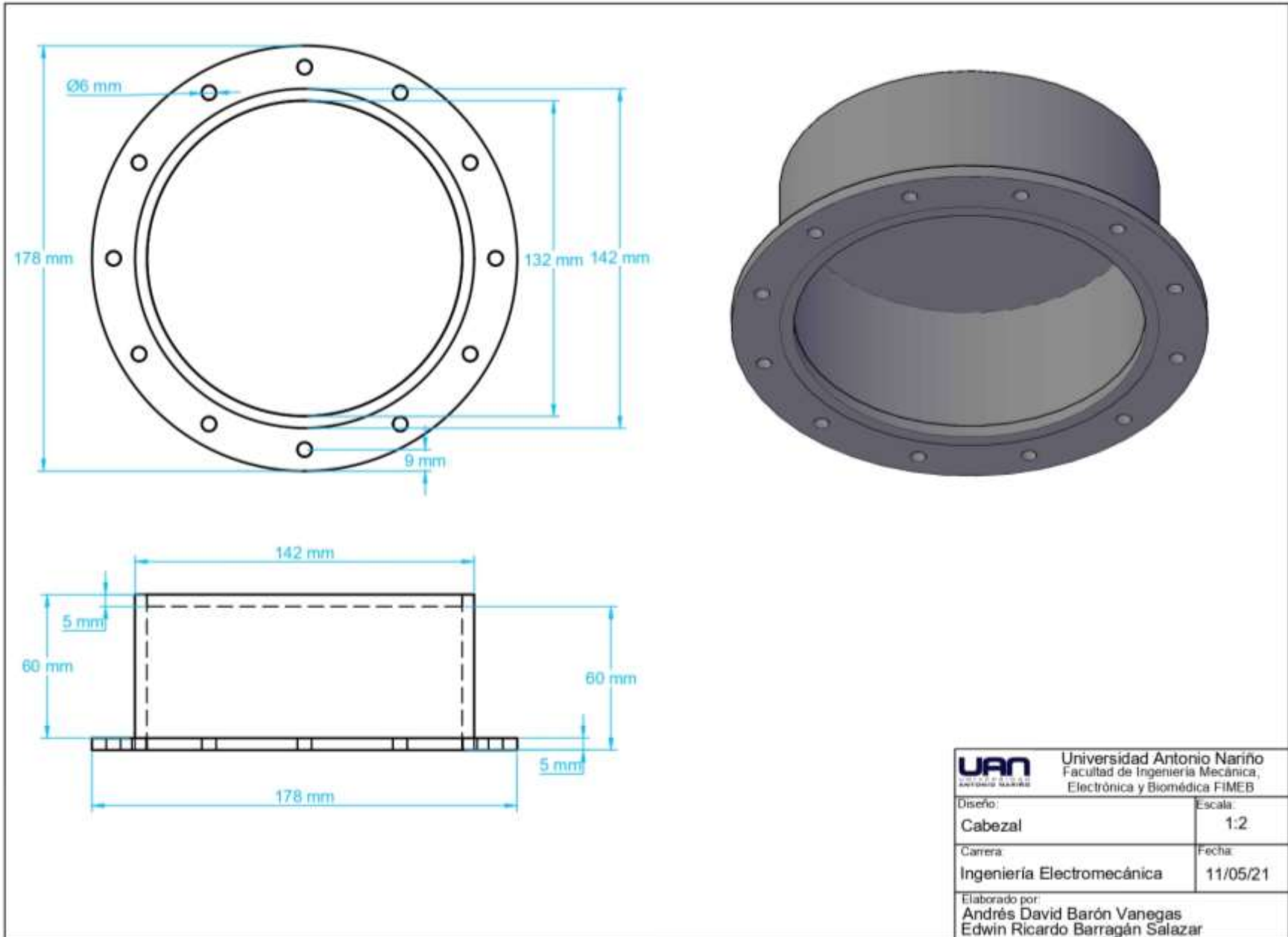
Con los datos recolectados y los cálculos realizados, el estudiante debe analizar el efecto que tiene el caudal de los fluidos dentro de un intercambiador de calor de tubo y coraza, en cuanto a las temperaturas de salida y en factores constructivos.

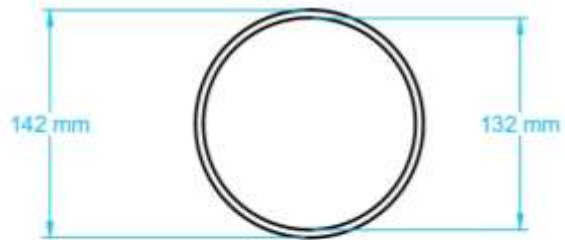
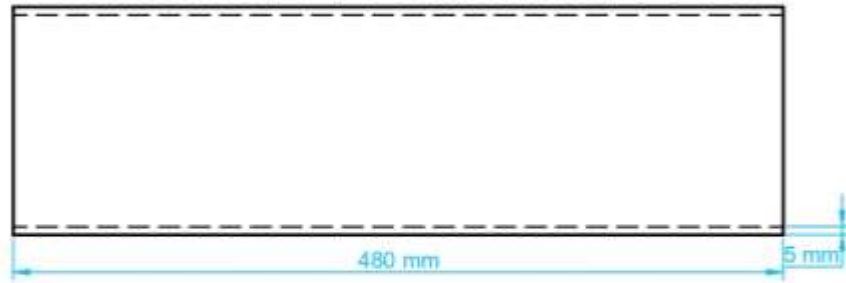
B. Anexo: Planos de construcción

El diseño de planos es realizado por medio del software AutoCAD.

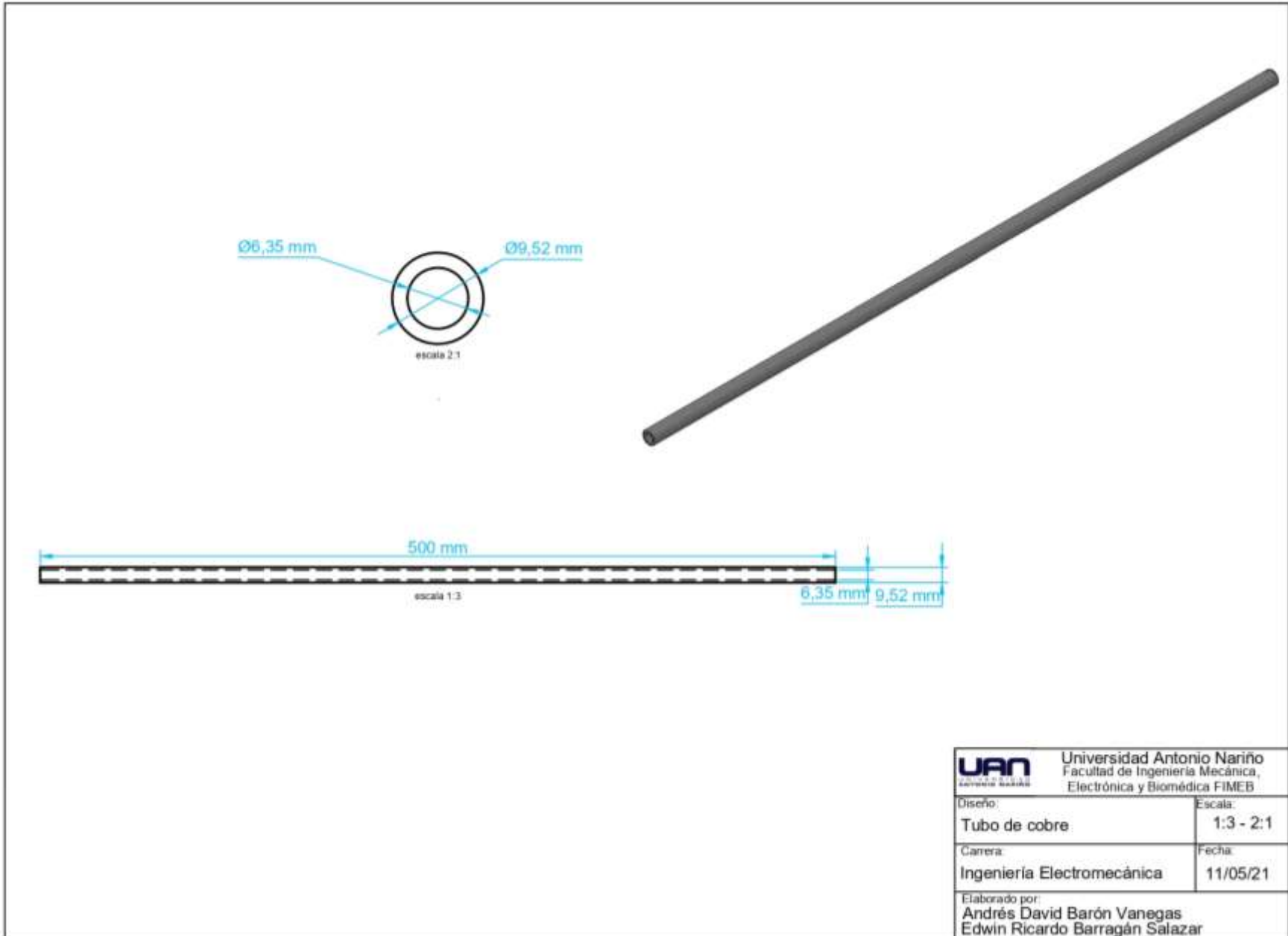




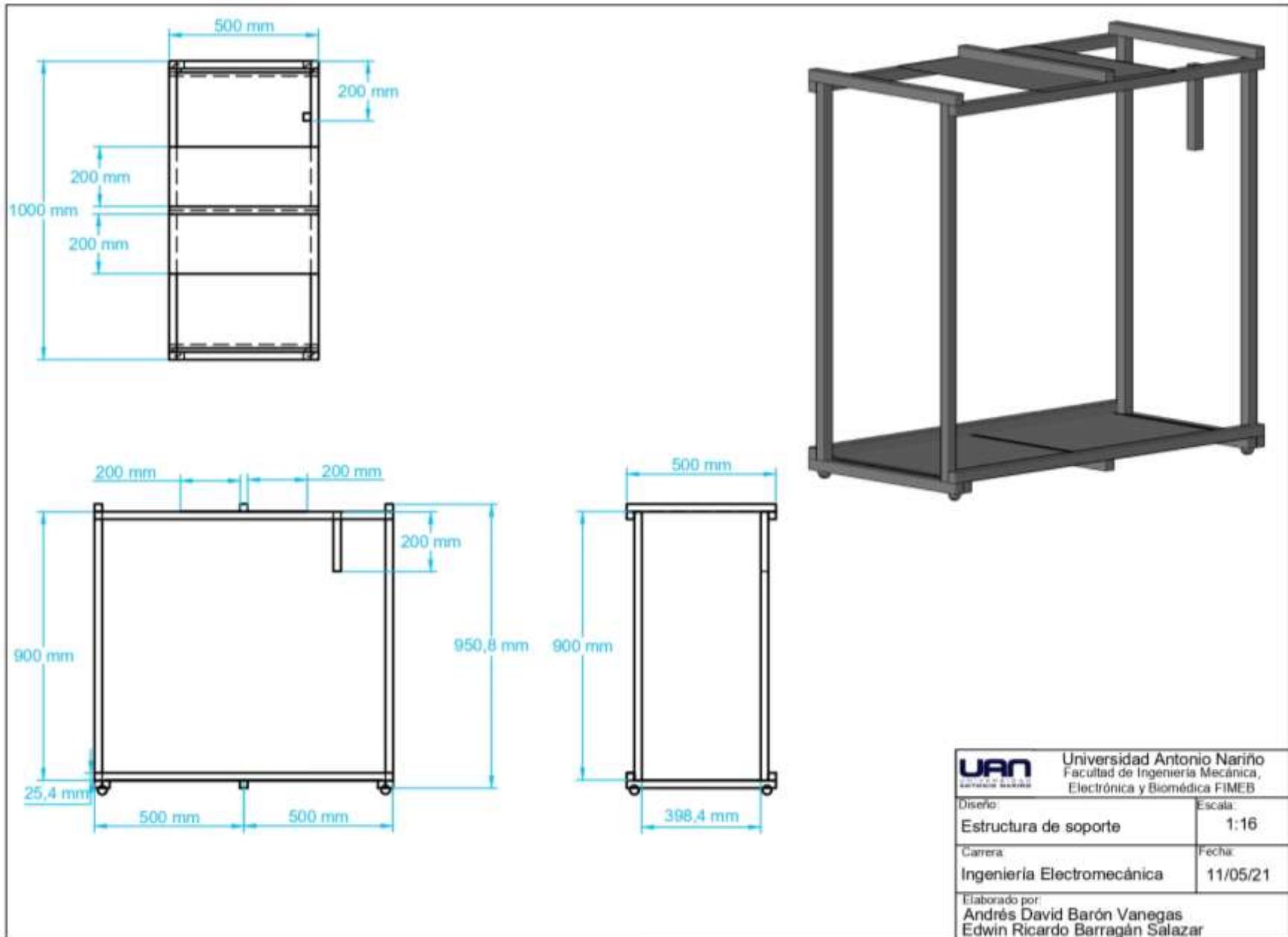




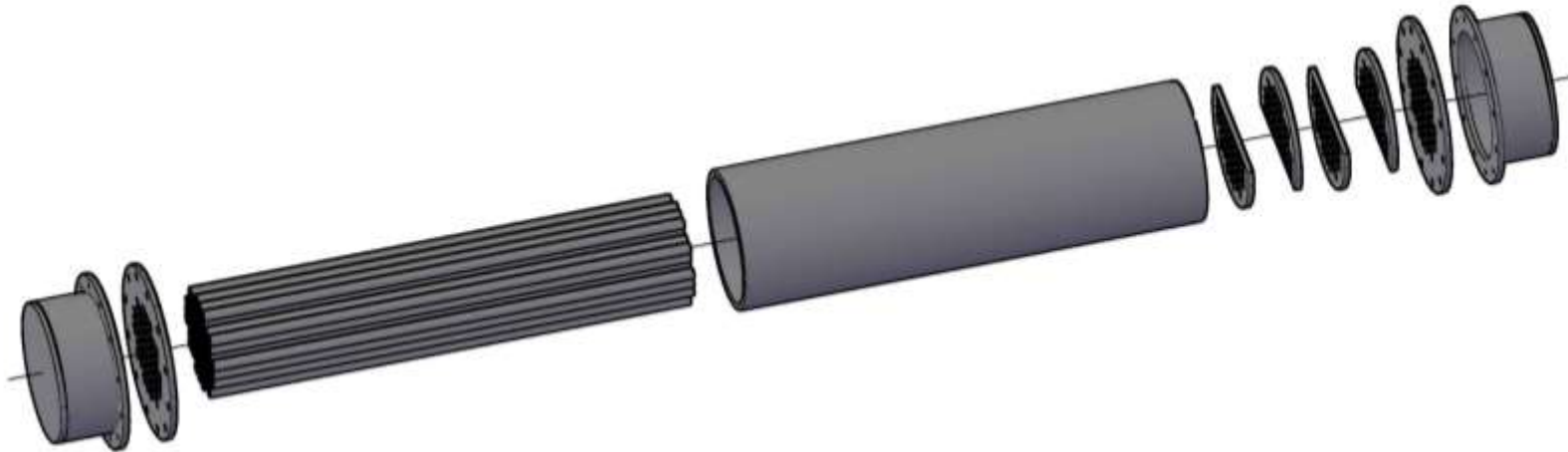
 Universidad Antonio Nariño Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica FIMEB	
Diseño: Coraza	Escala: 1:4
Carrera: Ingeniería Electromecánica	Fecha: 11/05/21
Elaborado por: Andrés David Barón Vanegas Edwin Ricardo Barragán Salazar	



 Universidad Antonio Nariño Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica FIMEB	
Diseño: Tubo de cobre	Escala: 1:3 - 2:1
Carrera: Ingeniería Electromecánica	Fecha: 11/05/21
Elaborado por: Andrés David Barón Vanegas Edwin Ricardo Barragán Salazar	



111 Diseño y construcción de un banco de pruebas termodinámico con un sistema
intercambiador de calor de tubos y coraza



UAN UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO		Universidad Antonio Nariño Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica FIMEB	
Diseño:	Intercambiador	Escala:	n/a
Cartera:	Ingeniería Electromecánica	Fecha:	11/05/21
Elaborado por: Andrés David Barón Vanegas Edwin Ricardo Barragán Salazar			

