BANCO DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

Autores

Deivid Alberto Bonilla Correa

Elvin Daniel Benitez Guevara

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Ingeniería Mecánica Por Ciclos Propedéuticos

Facultad Tecnológica

Bogotá D.C.

Bogotá D.C. 06 Marzo, 2024.

BANCO DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

Autores

Deivid Bonilla (deabonillac@udistrital.edu.co)

Elvin Benitez (edbenitez@udistrital.edu.co)

Monografía

Presentado para optar al título de: Ingeniero Mecánico

Director

Camilo Andrés Arias Henao

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Ingeniería Mecánica Por Ciclos Propedéuticos

Facultad Tecnológica

Bogotá D.C.

Bogotá D.C. 06 Marzo, 2024.

Tabla de contenido

1 Resumen 12

2 Introducción 13

3 Planteamiento del problema 15

4 Justificación 16

5 Objetivos 19

5.1. Objetivo General 19

5.2. Objetivos específicos 19

6 Marco de referencia 20

6.1. Antecedentes (Estado del arte) 20

7 Marco teórico 25

7.1. Definición de calor 25

7.2. Mecanismos de transferencia de calor 25

7.2.1. Conducción 25

7.2.2. Convección 26

7.2.3. Radiación 26

7.3. Intercambiador de calor de tubos y coraza 26

7.4. Intercambiador de calor de flujo en contra corriente 27

7.5. Componentes del intercambiador de calor de coraza y tubos 27

7.5.1. Coraza [1] 28

7.5.2. Bridas [2] – Tapas [3] 28

7.5.3. Sistema de sellado [4] 28

7.5.4. Tubería [5] 28

7.5.5. Bafles [6] 28
7.5.6. Entrada [7] y salida [8] de la coraza 29
7.5.7. Entrada [9] y salida [10] de las tuberías 29
7.5.8. Empaque [11] 29
7.6. Componentes externos al intercambiador de calor 29
7.6.1. Tubería 29
7.6.2. Tanques de almacenamiento 30
7.6.3. Bombas hidráulicas 30
7.6.4. Sistema de control 30
7.7. Propiedades medibles en el intercambiador de calor 31
7.7.1. Caudal 31
7.7.2. Flujo másico 31
7.7.3. Temperatura 31
7.7.4. Capacidad calorífica 31
7.7.5. Numero de Reynolds 32
7.8. Consideraciones de Diseño 32
7.8.1. Condiciones iniciales de intercambiador 32
7.8.2. Coeficiente global de transferencia de calor (U) 32
7.8.3. Calor real durante la transferencia 33
7.8.4. Temperatura de salida esperada fluido frio 33
7.8.5. Temperatura media logarítmica (LMTD) 34
7.8.6. Propiedades térmicas de entrada de los fluidos 35
7.8.7. Área de transferencia requerida 37
7.8.8. Tubería interna 37

7.7.1. Selección de los tubos 39
7.7.2. Definición de diámetro de coraza 40
7.7.3. Ajuste de U 41
7.7.4. Número de Reynolds 42
7.7.5. Selección de los bafles 44
8.1.1. Presión dentro de la tubería 46
8.2. Lineamientos de diseño 47
8.2.1. Deposición del fluido 47
9. Metodología 47
9.1. Dimensionamiento 48
9.1.1. Número de tubos y coraza 48
9.1.2. Ventana de la coraza 48
9.1.3. Definición de numero de bafles requeridos 49
9.1.4. Dimensionamiento de tapas 50
9.1.5. Dimensionamiento de los tanques de almacenamiento 50
9.1.6. Dimensionamiento de componentes hidráulicos 51
9.1.7. Dimensionamiento de la estructura. 53
9.1.8. Materiales usados por parte 54
8.1. Construcción y ensamble 55
8.1.1. Intercambiador 55
8.1.2. Tubería 56
8.1.3. Ventana 58
8.1.4. Estructura 59
8.1.5. Sistema hidráulico 62

8.1.6. Sistema de control – eléctrico 65
8.1.7. Panel de control 66
8.1.8. Variables a medir 66
8.1.9. Dispositivos de control en el proceso 67
8.1.10. Interruptores y actuadores del centro de control 69
8.1.11. Fuentes de energía 70
8.1.12. Componentes, diagrama eléctrico 71
8.1.13. Diagrama unifilar 73
8.1.14. Costos 74
9. Pruebas y simulaciones 76
9.1. Alistamientos previos 76
9.2. Funcionamiento del sistema eléctrico 78
9.3. Funcionamiento del intercambiador 80
9.3.1. PRUEBA 1: Apertura 25 % de agua caliente y 25% de agua fría: 81
9.3.2. PRUEBA 2: Apertura 50% de agua caliente y 100% de agua fría: 82
9.3.3. PRUEBA 3: Apertura 25% de agua caliente y 100% de agua fría: 84
9.3.4. PRUEBA 4: Apertura 50% de agua caliente y 50% de agua fría: 85
9.3.5. Prueba 5: Apertura 100% de agua caliente y 100% de agua fría: 86
10. Encuesta de retroalimentación. 88
11. Resultados 91
12. Conclusiones 100
13. Referencias 102

Tabla de Figuras

Figura 1. intercambiador de acrílico, Parra et. al (2017) 27

Figura 2. Esquema de flujo directo y cruzado. Creación propia.....34

Figura 3. Aproximación del factor NTU, Cengel (2007).....36

Figura 4. Configuración de las tuberías en la construcción de intercambiadores de calor. R.W. Serth. (2007 38

Figura 5. Selección de diámetro de tubo según disposición de tubos. R.W. Serth. (2007 .38

Figura 6. Calibre de tubería R.W. Serth. (2007).....39

Figura 7. Número de tubos por diámetro de tubería R.W. Serth. (2007). 40

Figura 8. Separación de bafles. 44

Figura 9. Calibre de los bafles según el diámetro y el espaciado de los bafles (S.E.Serth)45

Figura 10.Modelo CAD del intercambiador propuesto. Creación propia.....45

Figura 11. Creación propia, determinación mediante simulación de intercambio de calor en Solid Works.....49

Figura 12. Esquema simplificado de las tapas del intercambiador de calor, creación propia 50

Figura 13. Tanques de almacenamiento de agua caliente y fría, respectivamente. 51

Figura 14. Sistema hidráulico de alimentación y salida del intercambiador de calor.....52

Figura 15. Diseño de estructura metálica. creación propia.....53

Figura 16. Diseño propio de intercambiador de calor con ventana. 54

Figura 17. Diseño esperado de la construcción, modelado en Solid Works.....55

Figura 18. A. Construcción de la coraza. B. Ensamble de coraza y ajuste de tornillería con las tapas. C. Ensamble terminado, proceso de Cincado aplicado. 56

Figura 19. A. Ubicación de tubos y bafles de manera superficial. B. Soldadura de los tubos a los bafles de soporte externos. C. Ensamble completo de la tubería dentro del intercambiador. 57

Figura 20. A. Ventana instalada con tornillería y silicona aislante. B. Vista previa del interior del intercambiador con ventana. C. Detalle de ajuste realizado con Silicona y tornillería. D. Visualización previa al sello de la tubería. 58

Figura 21. Estructura ensamblada y soldada, en proceso de pintura. 59

Figura 22. Visualización del factor de seguridad en la estructura. 60

Figura 23. Deformación presente en la estructura en la estructura. 60

Figura 24. Modelo frontal proyectado previo a la construcción. 61

Figura 25. Avance del modelo construido. 62

Figura 26. Distribución de flujo de agua a lo largo del intercambiador de calor. 63

Figura 27. Sistema hidráulico del modelo físico. 64

Figura 28. A. Visual de la conexión y accesorios de las bombas al intercambiador. B, Configuración final de los componentes del sistema hidráulico. C, termopar conectado a las entradas y salidas del intercambiador. D, salidas y entradas de la tubería conectadas a los tanques de agua caliente y fría. 64

Figura 29. Instalación del sistema de control. 65

Figura 30. Actuadores y pantallas de control del sistema de control. 66

Figura 31. Montaje exterior del sistema de control, creación propia. 71

Figura 32. Diagrama unifilar de las resistencias eléctricas, creación propia 72

Figura 33. Diagrama unifilar del centro de control electrónico, creación propia. 73

Figura 34. Montaje hidráulico 77

Figura 35. Simulación para un caudal de 25% Caliente – 25% frío. 81

Figura 36. Toma de temperaturas práctica 1. 81
Figura 37. Simulación para un caudal 50% caliente – 100% frío. 82
Figura 38. Toma de temperaturas práctica 2. 83
Figura 39. Simulación para un caudal 25% Caliente – 100% frío. 84
Figura 40. Toma de temperaturas práctica 3. 84
Figura 41. Simulación para un caudal 50% Caliente – 50% frío. 85
Figura 42. Toma de temperaturas práctica 4. 85
Figura 43. Simulación para un caudal 100% Caliente – 100% frío. 86
Figura 44. Toma de temperaturas práctica 5. 87
Figura 45. Pregunta 1, encuesta de retroalimentación. 88
Figura 46. Pregunta 2, encuesta de retroalimentación 89
Figura 47. Pregunta 3, encuesta de retroalimentación. 89
Figura 48. Pregunta 4, encuesta de retroalimentación. 89
Figura 49. Pregunta 5, encuesta de retroalimentación. 90

Tabla de Gráficos

Gráfico 1. Comparativa de resultados 1. Práctica 1. 92
Gráfico 2. Comparativa de resultados Práctica 2. 93
Gráfico 3. Comparativa de resultados Práctica 3. 94
Gráfico 4. Comparativa de resultados Práctica 4. 95
Gráfico 5. Comparativa de resultados Práctica 5. 96
Gráfico 6. Análisis conjunto pruebas prácticas. 97
Gráfico 7. Análisis conjunto pruebas simuladas. 98

Listado de tablas

Tabla 1. Condiciones iniciales de temperatura.....32

Tabla 2. Valores típicos promedio de transferencia de calor para intercambiadores de calor de tubos,(Cengel, 2007). 33

Tabla 3. Propiedades del agua a condiciones estándar.....35

Tabla 4. Lista de materiales usados por elemento.....54

Tabla 5. Relación de transferencia de calor prueba 1 82

Tabla 6. Evaluación del desempeño para la prueba 1. 82

Tabla 7. Relación de transferencia de calor prueba 2 83

Tabla 8. Evaluación del desempeño para la prueba 2. 83

Tabla 9.Relación de transferencia de calor prueba 3 84

Tabla 10. Evaluación del desempeño para la prueba 3. 85

Tabla 11. Relación de transferencia de calor prueba 4 86

Tabla 12. Evaluación del desempeño para la prueba 4. 86

Tabla 13. Relación de transferencia de calor prueba 5 87

Tabla 14. Evaluación del desempeño para la prueba 5. 87

Simbología

	Descripción	Unidad
A	Área	m^2
Cp	Calor específico	J/kg*K
L	Longitud de la tubería	m
As	Área superficial de transferencia	m^2
Q	Calor de transferencia	kW
U	Coeficiente global transferencia de calor	W/(m2°C)
$\dot{m}$	Flujo másico	Kg/s
ΔT	Diferencia de temperatura	°C
LMTD	Temperatura media logarítmica	K
mc	Flujo másico fluido caliente	Kg/s
mf	Flujo másico fluido frío	Kg/s
Cmin	Capacidad calorífica mínima	J/sK
Cmax	Capacidad calorífica máxima	J/sK
C	Capacidad calorífica adimensional	-
Cpc	Calor específico fluido caliente	J/kg*K
Cpf	Calor específico fluido frío	J/kg*K
Tfe	Temperatura fría de entrada	°C
Tfs	Temperatura fría de salida	°C
np	Número de pasos	-
Nt	Número de tubos	-
F	Factor de fricción	-
Di	Diámetro de la tubería	m
s	Gravedad especifica del fluido	Kg/m^3
ϕ	Factor de corrección de la viscosidad	-

1 Resumen

Este trabajo tiene como finalidad realizar la implementación de un modelo físico de intercambiador de calor para el Laboratorio de Ciencias Térmicas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ya que no se cuenta con un dispositivo similar dentro de las instalaciones. El diseño propuesto parte de un análisis a modelos previamente planteados por otras universidades, proyectos de grado y fuentes comerciales, se usaron herramientas computacionales para realizar el modelamiento de las condiciones de trabajo del sistema, para su posterior construcción.

Para el proceso de construcción, el proceso de montaje tuvo en cuenta la configuración de estructuras metálicas, conexiones eléctricas e hidráulicas, los tipos de materiales a escoger, según la necesidad de la aplicación y los elementos disponibles comercialmente. Los resultados obtenidos, buscan a ser comparados, entre las simulaciones realizadas en software y la toma de medidas del modelo físico, para determinar la efectividad del modelo, y evaluar la viabilidad de los materiales usados, los elementos que componen el intercambiador y los componentes del sistema de control electrónico implementado.

Este proyecto permite a los estudiantes enfocar y materializar sus conocimientos en termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor mediante su uso y manipulación con el fin de mejorar el proceso de aprendizaje y la apropiación de las aulas de una manera diferente y más didáctica acorde a las necesidades de la industria mecánica.

Palabras claves: Intercambiador de calor, Temperatura, Control lógico, Banco de laboratorio, Agua, transferencia térmica.

2 Introducción

El uso de tecnología enfocada a la educación y formación universitaria en sistemas térmicos y de transferencia de calor se ha convertido en una necesidad dentro de los espacios de investigación de la facultad, una revisión realizada por la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia (Oviedo-Trespalacios, 2015), demuestra la importancia del crecimiento de la curva de aprendizaje cuando se realizan pruebas de laboratorio para estudiantes de ingeniería; esta revisión busca enfocar su atención a la metodología impartida por métodos que permitan al estudiante adquirir un conocimiento que perdure en el tiempo. El rol que juegan las prácticas de laboratorio es vital para el entrenamiento de profesionales en ingeniería y el desarrollo de sus habilidades cognitivas.

La formación guiada mediante procesos de práctica de laboratorio está ligada a los recursos tecnológicos disponibles, ya que permite desarrollar y crear nuevos espacios de aprendizaje los cuales promueven la autonomía de los estudiantes. Las interacciones sociales en grupos de trabajo pequeños aumentan el conocimiento que se podría obtener de manera individual, promueve el dialogo, la discusión, la escucha constante y la retroalimentación mutua en la dirección del crecimiento como profesional, (Oviedo-Trespalacios, 2015). Es por esto que se busca disponer el proyecto propuesto al servicio de la comunidad estudiantil, la cual merece tener espacios diversos en técnicas y tecnologías actuales, mejorando así el nivel de conocimiento alcanzado más allá de un cumplimiento académico.

Teniendo en cuenta las necesidades que este tipo de dispositivos suple, con un banco de laboratorio de tubos y carcaza, la universidad podrá orientar de manera eficaz a los estudiantes, en

el uso de esta tecnología en la industria. La construcción de este dispositivo permite introducir a los estudiantes en la manipulación, control y supervisión de este sistema, busca simular las condiciones de dispositivos como este ampliamente en la industria, también ejemplificar como estos sistemas y las múltiples conexiones mecánicas y electrónicas cohesionan de manera precisa entre los elementos, la de un banco físico es por lo tanto esencial para este propósito.

El estudiante podrá encontrar en este proyecto una base para futuras aplicaciones industriales, la posibilidad de manipular y regular un sistema robusto y de especificaciones técnicas establecidas, también permite explicar las razones por las que cada elemento es indispensable y así detectar que procesos pueden ser mejorados en pro del funcionamiento del intercambiador. Para llevar consigo un control de las actividades propuestas, se cuenta con manuales de operación que buscan guiar tanto la manipulación de la máquina como la búsqueda de soluciones y pasos dados a las prácticas propuestas en el laboratorio, estos manuales se encuentran abiertos a mejoras dadas las necesidades de los estudiantes.

3 Planteamiento del problema

Actualmente, la facultad tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas no cuenta con un banco de laboratorio relacionado con intercambiadores de calor de coraza y tubos, este tipo de bancos de pruebas de laboratorio, posibilita la interpretación y aplicación de los conocimientos teóricos adquiridos en ciencias térmicas, sin embargo, al no haber uno presente limita la interacción de los estudiantes en el momento de identificarlos dentro de un proceso, al no entender su funcionamiento y desconocer sus principales aplicaciones.

Dentro de la planta física de laboratorios, se cuenta con un dispositivo relacionado a transferencia de calor denominado: Intercambiador de Calor en Flujo Cruzado P.A. Hilton H352, de acuerdo a la página de laboratorios de la universidad este elemento fue diseñado para permitir a los estudiantes investigar didácticamente tasas de convección libre y forzada variando la velocidad del aire o también variando la velocidad de calor agregada al sistema, sin embargo, el estudio de intercambiadores de calor mediante el uso de fluidos líquidos no está presente; Laboratorios y Talleres de Mecánica, (2022).

En la búsqueda de mejorar y contribuir en la creación de bancos de laboratorios que se adapten a las necesidades de los estudiantes, se lleva a cabo el diseño y la construcción de un banco de laboratorio con los implementos necesarios para monitorear, interactuar y conocer el funcionamiento del mismo, lo cual resultaría en una mejoría dentro de los procesos de aprendizaje, fortaleciendo la autonomía y la discusión; este es el caso del Instituto Técnico Metropolitano el cual construyó un intercambiador de pruebas didáctico con el objetivo de integrar a los docentes para lograr incentivar y generar diferentes estrategias de aprendizaje dentro de las aulas. (Parra, J. *et al.*, 2017),

4 Justificación

Los beneficios que conlleva la adquisición de bancos de laboratorio de intercambiadores de calor son muy amplios en un espacio académico, ya que es en la academia donde se desarrollan gran cantidad de iniciativas y proyectos que buscan mejorar procesos en la industria, el fortalecimiento de las plantas físicas en un esfuerzo necesario para las universidades con el fin de producir conocimiento y de igual manera alentar a los estudiantes a contribuir en el crecimiento de la facultad en la intervención de proyectos, por lo tanto las ganancias obtenidas en la implementación de laboratorios va más allá de un inversión monetaria, sino también enriquece el conocimiento y el nivel de aprendizaje junto con las competencias de los estudiantes y egresados.

Los intercambiadores de calor de coraza y tubos son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones industriales debido a su eficiencia en transferencia de calor, muchos de estos campos son de gran interés para los egresados, industrias de refinación, de generación de energía, químicas, Alimentaria y de bebidas, farmacéutica, de gas natural, calefacción y refrigeración de edificios; estas a su vez se encuentran en la constante búsqueda de personal capacitado en estos equipos para fortalecer su planta y a su vez, el egresado cuenta con la posibilidad de contribuir con sus conocimientos en la mejora de los procesos ya existentes.

En la búsqueda de instituciones que han aplicado este método de enseñanza introduciendo bancos de pruebas y laboratorios acorde a la demanda de habilidades creciente en la industria; la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo en Perú, (Bach. D *et al*., 2021) ha implementado un módulo de intercambiador de calor, buscando una mejora continua en el aprendizaje de los estudiantes, enfocados en diseñar un sistema sencillo funcional y económico con el que se cumplió

el objetivo de mejorar la calidad y las prácticas realizadas en la universidad para materias relacionadas con la transferencia de calor. Así mismo, la universidad Santo Tomás, (Cruz. G, 2014), buscó promover e implementar la fabricación de un sistema de intercambiador de calor que integra módulos de tubos concéntricos y otro de coraza y tubos, con esto buscaban un sistema más robusto que permitiera una interacción a mayor escala, más clara para los estudiantes y dotando los laboratorios para que los usuarios analicen los aspectos que intervienen en una práctica real y de igual manera permita brindar un apoyo a los docentes con nuevas herramientas de enseñanza; el laboratorio trabaja con fluidos líquidos y reemplazó un laboratorio ya existente de un intercambiador de tubos y coraza ya que funcionaba con vapor y no se contaba con la infraestructura para ello, así que en pro de mejorar la planta física, desarrollaron este sistema y lo implementaron, fortaleciendo las competencias de los ingenieros mecánicos en formación.

Es importante lograr que los estudiantes descubran por sí mismos su estrategia de aprendizaje la cual usarán para obtener y asumir responsabilidades de acuerdo con los logros obtenidos. En el caso de la Universidad Distrital, muchos de los dispositivos de laboratorio son iniciativas y propuestas de grado por parte de los estudiantes, quienes buscan contribuir a la diversificación de la planta física, funcional y operativa, de esta manera se puede mejorar el nivel de conocimiento y desarrollo y competencia en materia de investigación y desarrollo de proyectos.

La fabricación de intercambiadores de calor, es algo que es opcional dado el costo en la implementación de los mismos, en general, la decisión entre construir un intercambiador de calor a medida y comprar módulos prefabricados dependerá de las necesidades específicas del proyecto, los recursos disponibles y las consideraciones de costo a corto y largo plazo. En algunos casos, la construcción a medida puede ofrecer una solución más adecuada y rentable, por otro lado, la

compra de módulos prefabricados puede ser la opción más práctica y económica, para este caso de estudio, se busca construir un banco de laboratorio, dando un enfoque didáctico al mismo, basado en modelos actuales ya implementados, y los desarrollos recientes encontrados, produciendo un equipo único para la Universidad Distrital.

5 Objetivos

5.1. Objetivo General

Implementar un banco de intercambiador de calor de tubos y coraza para el laboratorio de ciencias térmicas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

5.2. Objetivos específicos

1. Establecer los parámetros técnicos de funcionamiento y la configuración de los elementos que componen el sistema del intercambiador.
2. Construir el modelo físico del banco de laboratorio y su interfaz de control.
3. Crear guías y manuales de laboratorio orientados a la correcta manipulación del equipo.

6 Marco de referencia

6.1. Antecedentes (Estado del arte)

Los proyectos desarrollos actualmente en la construcción y diseño de intercambiadores de calor en Colombia y países latinoamericanos, incluyen todo tipo de autores, usualmente estudiantes que proponen diferentes modelos, su construcción y/o caracterización, el objetivo de cada uno de estos proyectos es mejorar los dispositivos presentes en los laboratorios de universidades y brindar un dispositivo de enseñanza para los distintos centros educativos, A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos.

El Instituto Tecnológico Metropolitano, construyó un intercambiador de calor de tubos y coraza didáctico, para analizar el cambio de temperatura dentro del sistema (Parra, J. *et al.*, 2017), Este artículo destaca los fundamentos de diseño para la construcción de bancos de laboratorio. Proporciona pautas y mejores prácticas para la distribución del espacio, la selección de materiales y mobiliario, así como la consideración de requisitos de seguridad y ergonomía; utiliza 2 tipos de tanques a los que se dirige el líquido a diferentes temperaturas y un tablero eléctrico sencillo con el cual se controla el funcionamiento de las bombas y el caudal del fluido tanto interno como externo; con este proyecto se logró orientar la construcción de guías de laboratorio y manuales de operación para así mantener una fácil manipulación por parte de los estudiantes.

Para Pulido, G. (2019), Este artículo se enfoca en la construcción de bancos de laboratorio específicos para aplicaciones térmicas solares. Describe los requerimientos particulares de estos espacios, como el control de temperatura, humedad y esterilidad, así como la integración de calentadores solares y tres tipos de intercambiadores para su uso en los laboratorios de la

Universidad Autónoma de Occidente; Analiza el desempeño por medio de pruebas de simulación en el programa ANSYS. El proyecto incluye el diseño del sistema térmico, hidráulico y estructural de cada componente, a partir del modelo CAE, se obtuvieron datos de funcionamiento con un margen de error relativamente bajo, dando viabilidad a la propuesta y los valores establecidos para su operación, a su vez, un análisis económico fue realizado, comparando sistemas de intercambiadores de calor de placas y de coraza y tubos, con control remoto y control manual, como resultado, los intercambiadores de coraza son los de menor costo en ambos casos. Este proyecto nos permitió evaluar las mejores formas de lograr una simulación de calidad y lograr obtener diferentes tipos de resultados mediante su regulación en el programa ANSYS.

En la universidad Antonio Nariño, Ricardo, E. *et al.* (2021) se realizó una propuesta de diseño de intercambiador de calor computarizado, Este estudio analiza los avances en la integración de tecnologías digitales en los bancos de laboratorio. Se centra en el uso de métodos de modelamiento matemático para optimizar la trazabilidad en los experimentos, previo a la construcción de los mismos, este modelo nos sirvió de inspiración para interpretar como el sistema de flujo de agua debería ser diseñado, teniendo en cuenta que este modelo fue ;construido de manera meramente teórica a diferencia del nuestro; los autores sugieren que se implemente un sistema integrado de PLC y un sistema de electroválvulas en las tuberías, lo cual permitiría realizar cambios de flujo. Este proyecto considera de suma importancia conocer y establecer el funcionamiento del sistema previo a la realización de un modelo físico, ya que debido al desconocimiento se puede poner en riesgo es diseño original y por consiguiente los resultados esperados, finalmente obtuvieron un modelo de calidad que le permite a los estudiantes variar los parámetros de operación y modelar el sistema para prácticas de laboratorio.

Por el camino del diseño, propuestas dirigidas a la industria han sido tratadas también desde la academia, es el caso de Diaz, Óscar (2018), España; Este proyecto permite evaluar los parámetros técnicos más relevantes dentro de la construcción del intercambiador, elementos como el grosor de los materiales, las variables medibles y algunas consideraciones en cuanto a los materiales usados. Presenta una propuesta de intercambiador de tubos y carcasa para una planta química asociada a una fundición pirometalúrgica, el cual busca el recircula miento de gases que contienen ácido sulfúrico al 20% de concentración, este es el diseño basado en uno de los intercambiadores ubicado en una línea de 3, dentro del tratamiento del fluido en el proceso. El autor busca resaltar el diseño propio basado en los códigos de diseño TEMA y ASME, creados por fabricantes americanos para estandarizar las dimensiones y protocolos en este tipo de equipos; con este modelo propone un diseño final, el cual se destaca como un equipo a presión y el cual precisa el cálculo térmico para poder garantizar el buen funcionamiento del intercambiador de calor.

Dentro del ámbito nacional, en la universidad Santo Tomás, Cruz, G. (2014), Bogotá, el autor construye un banco a mayor escala que permite el intercambio de calor entre agua y aceite y a su vez, buscando analizar a lo largo del recorrido del fluido, las temperaturas y propiedades características del fluido, el banco cuenta con un intercambiador de calor de coraza y tubos, el cual se utiliza para calentar el aceite, mediante convección, este sistema cuenta con un sistema de control integrado y una combinación de válvulas de regulación usadas para limitar el paso del aceite. Este proyecto logró intervenir e implementar el banco de laboratorios para que el estudiante interactuar directamente con el equipo, el rango de error se encuentra por debajo del 20% así que la confiabilidad incrementa. Este tipo de estructuras contribuye a identificar procesos de transferencia que pueden ser externos a los encontrados usualmente en intercambiadores de tubos, aun siendo un proyecto diferente a los demás brinda contexto de otro tipo de estructuras con fluidos distintos.

Este informe destaca las tendencias emergentes en el diseño y construcción de bancos de laboratorio colaborativos en México. Los espacios de trabajo flexibles, la integración de tecnologías de control son aspectos resaltados, promoviendo la multidisciplinariedad; esto hace parte del proyecto y propuesta de Venegas, C. (2012) el cual habla de la variedad de dispositivos de transferencia de calor producidos por la empresa Generatoris S.A, la cual se encarga de fabricar todo tipo de estructuras con diferentes configuraciones lo más llamativo, son los sistemas que apuntan a la refrigeración del fluido y un centro de mando de control el cual recopila los datos de las pruebas y permite extraer de manera clara las mediciones tomadas; esto se busca implementar en el proyecto de esta manera, se pueden extraer datos de las pruebas sin necesidad de realizar un monitoreo visual del ciclo de trabajo.

También, partiendo de modelos comercialmente establecidos, podemos encontrar intercambiadores de calor de coraza y tubos para enfriamiento de aire mediante aceite o líquidos, los cuales son de bajo mantenimiento, brindando una alta calidad durante el proceso, una mayor durabilidad y un mínimo espació de almacenamiento al ser compactos, (Kelvion, 2024), ubicados en Estados Unidos. Por otro lado, la empresa Alfa Laval Corporate, (2024); ofrece soluciones en intercambiadores de diferentes tipos de intercambiadores, ya sean de un solo paso, enfocados en la refrigeración mediante líquidos o gases y de doble paso, los segundos están enfocados en la condensación de fluidos, esta empresa ubicada en Suecia, estos 2 fabricantes están encargados de la producción a nivel industrial de este tipo de equipos. Ahora bien, modelos didácticos y a escala usados en laboratorios son realizados en Inglaterra (PA Hilton, 2022), el cual fabrica un intercambiador de calor de 2 bafles y 7 tubos que compone su estructura interna, estos están diseñados para operar con agua fría y vapor de agua o agua recalentada, un modelo monitoreado

por medio de termopares a la entrada y salida, un modelo en su constitución similar al propuesto en este trabajo y que de manera simplifica logra plasmar el modo operativo de este sistema.

En general, el análisis de las referencias citadas revela una variedad de aspectos a considerar en la construcción de bancos de laboratorio, como el diseño espacial, la integración de tecnologías digitales, la seguridad y salud ocupacional, las distintas aplicaciones, la sostenibilidad, la promoción de la colaboración y la innovación. Estos hallazgos son de utilidad para desarrollar un banco de laboratorio eficiente, seguro y adaptado a las necesidades específicas de la investigación o los procedimientos experimentales a realizar.

El diseño de este tipo de artefactos debe ser evaluado desde el proceso de diseño preliminar, para así durante la etapa de fabricación y ensamble sean correctas y acordes a los diseños propuestos, es importante resaltar la correcta selección de materiales que permitan mantener una durabilidad en el tiempo y mantener niveles apropiados y constantes en la transferencia de calor y/o posean un buen rendimiento, ya que así se puede prolongar la vida útil del dispositivo y se puede realizar un mejor mantenimiento y control si es necesario.

7 Marco teórico

El estudio de los intercambiadores de calor, requiere de conocimiento previo para entender el sistema y medios por los cuales operan, para esto se introducen los conceptos esenciales en su funcionamiento que a su vez son las bases dentro de los procesos de transferencia de calor, estos también nos permiten interpretar los datos obtenidos y a contextualizar la práctica y los conocimientos adquiridos en la academia.

7.1. Definición de calor

El calor es definido como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro debido a la diferencia de temperatura, el estudio del calor, a nivel de la ingeniería, se suele realizar en dos enfoques diferentes: el termodinámico y el de la transferencia de calor. El enfoque termodinámico determina, que el calor se puede transferir mediante las interacciones de un sistema con sus alrededores; el enfoque de transferencia de calor trata los estados finales y de los estados de equilibrio durante el cual ocurre una interacción y no proporciona información alguna sobre el área de la transferencia de energía o el tiempo en el cual ocurre, como lo explica Guillen (2020).

7.2. Mecanismos de transferencia de calor

7.2.1. Conducción

El fenómeno de transferencia de calor por conducción constituye un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso mediante la comunicación molecular, esta transferencia de energía se da en las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia, debido a sus interacciones o al movimiento entre las mismas

7.2.2. Convección

El fenómeno de transferencia de calor por convección es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) en contacto sobre una superficie. El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor, ya que pone en contacto porciones más calientes y más frías del fluido con la superficie, iniciando valores más altos de conducción; por lo tanto, entre más alta es la velocidad del fluido, mayor es la velocidad de la transferencia de calor.

7.2.3. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor, como una superficie sólida o el movimiento de un fluido. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío, esta es la manera en la que la energía del sol llega a la tierra

7.3. Intercambiador de calor de tubos y coraza

Los intercambiadores de calor son dispositivos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí [9]. Los procesos de generación de energía, refrigeración, calefacción, acondicionamiento de aire, elaboración de alimentos, elaboración de productos químicos, refinación de petróleo, y el funcionamiento de casi todos los vehículos dependen de diversos tipos de intercambiadores de calor [4]. En un intercambiador la transferencia de calor suele comprender convección en cada

fluido y conducción a través de la pared que los separa, así los posibles efectos de la radiación se ven inmersos en los efectos de la convección

7.4. Intercambiador de calor de flujo en contra corriente

El flujo en sentido contrario, funciona de manera opuesta, la entrada de fluido se genera mediante diferentes extremos ubicados de manera opuesta, el flujo se comporta de manera constante con la diferencia de que el fluido caliente saldrá en el sentido del extremo del fluido frío de entrada y el fluido frío saldrá en el sentido de la entrada caliente, este sistema es eficiente, ya que el diferencial de temperaturas que se puede alcanzar puede llegar a ser mayor que un intercambiador de flujo paralelo Figura 2.

7.5. Componentes del intercambiador de calor de coraza y tubos

A continuación, encontramos un esquema de los componentes más importantes dentro de un intercambiador de coraza y tubos y que hacen parte del montaje propuesto en este proyecto y la explicación de la importancia de cada uno, (Figura 1).

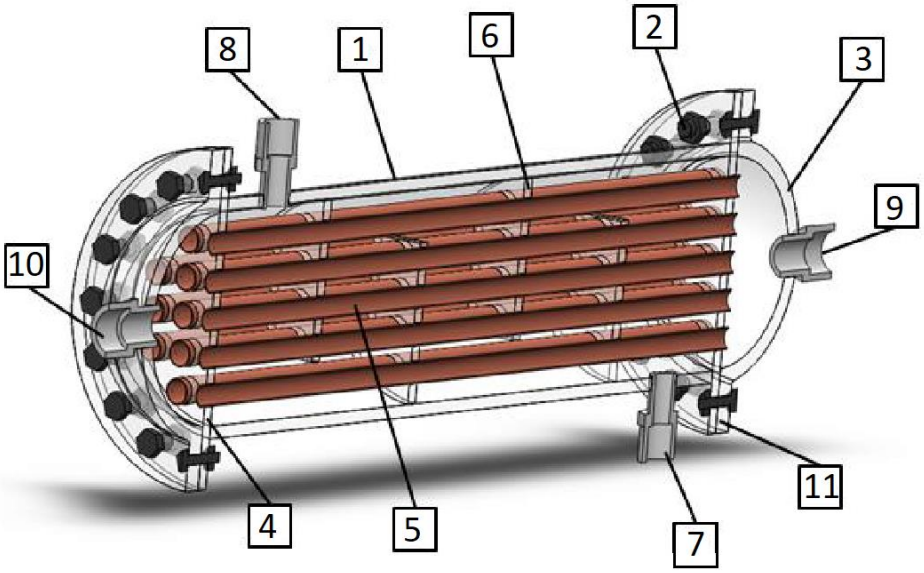


Figura 1. intercambiador de acrílico, Parra et. al (2017)

7.5.1. Coraza [1]

Es la estructura metálica que contiene todos los componentes internos del intercambiador, contiene el fluido caliente en este proyecto y permite almacenar la mayor cantidad de fluido, por lo tanto, el tanque de almacenamiento será de mayor dimensión, permite de igual manera mediante las boquillas regular la entrada y salida del fluido caliente y frío.

7.5.2. Bridas [2] – Tapas [3]

Las uniones entre las tapas y la coraza se realizan mediante una brida unificada, la cual permite sellar la coraza y los extremos, estas permiten el ingreso y salida del fluido tanto frio como caliente.

7.5.3. Sistema de sellado [4]

El sistema de sellado en la coraza y tapas está compuesto por una lámina de aluminio que a su vez permite la alineación interna de la tubería, junto con un caucho de alta densidad y un sellante térmico que permiten generar una uniformidad en la unión y evitar las fugas.

7.5.4. Tubería [5]

Están compuestos dependiendo de las dimensiones del intercambiador por una cantidad definida por el área de transferencia de calor definida para el fluido interno; necesariamente tiene que estar compuesta de materiales conductores que permitan la interacción entre los 2 fluidos, a su vez, deben tener una buena resistencia a la corrosión y ser de fácil mantenimiento.

7.5.5. Bafles [6]

Estos bafles, son elementos de sujeción y alineación para la tubería, permiten tener una alineación correcta a lo largo de cada división, pero su función principal es generar un movimiento

escalonado o en zigzag en el fluido, de esa manera el fluido toma un mayor tiempo para salir del intercambiador y permite un mayor tiempo de exposición.

7.5.6. Entrada [7] y salida [8] de la coraza

Están conectadas tanto a la entrada del tanque de agua caliente, como a la salida del intercambiador que desemboca en el tanque caliente de igual manera así mismo esta entrada permite el paso a la mayor cantidad de fluido almacenado dentro del sistema.

7.5.7. Entrada [9] y salida [10] de las tuberías

El compartimiento de las tuberías, tiene una entrada y salida independiente a la de coraza, los tubos se encuentran alimentados por el tanque de agua fría, a diferencia de la coraza, estas entradas manejan un volumen menor de fluido, pero este recorre más rápidamente el sistema.

7.5.8. Empaque [11]

Este se utilizó en caucho y una unión de adhesivo termo resistente, para permitir un sellado correcto entre as bridas y las tapas del intercambiador.

7.6. Componentes externos al intercambiador de calor

Estos son elementos complementarios al sistema principal del intercambiador, como alimentación, entradas de señales, sistemas de control y almacenamiento. (Figura 17).

7.6.1. Tubería

La alimentación del fluido, requiere de una tubería con las dimensiones adecuadas para el caudal tanto de entrada como de salida, este elemento permite tanto la alimentación como la descarga de fluido, recirculando el fluido al tanque de almacenamiento, también permite adaptar elementos de control, como termocuplas, medidores de caudal y flujo, entre otros.

7.6.2. Tanques de almacenamiento

Los tanques son elementos importantes, ya que deben tener la capacidad mínima de fluido para la coraza y la tubería, pero también deben contar con un aislamiento térmico ya que tienen adaptadas resistencias térmicas que buscan incrementar la temperatura del fluido que entra por el extremo caliente del intercambiador, por lo tanto, la estabilidad térmica y la afectación del medio debe ser la menor para evitar problemas de histéresis. Los tanques cuentan con un volumen de agua máximo permisible de 62 Litros y 25 litros para el tanque de agua caliente y frio, respectivamente como se explica en el numeral 9.5.1. (Figura 13)

7.6.3. Bombas hidráulicas

Las bombas son primordiales en el proceso, ya que el movimiento producido dentro del intercambiador y sus canales, depende del funcionamiento de este elemento, se hace necesario cuando la entrada del fluido no se produce por efecto de la gravedad, sino en contra de esta, la altura que logre alcanzar es determinante en su selección; las condiciones del sistema también pueden ser limitadas por las condiciones de operación de las bombas, según el tipo de fluido, densidad, temperatura y dimensiones.

7.6.4. Sistema de control

Los elementos de control, están adaptados a las entradas y salidas del intercambiador, así como en los tanques de almacenamiento, podemos encontrar termopares para el control de las temperaturas; sensores de control de flujo, para medir el caudal y las condiciones de movimiento del fluido; el control electrónico programable, permite analizar los datos obtenidos mediante las señales de temperatura, los tiempos de operación y los limites permisibles en el sistema, para así

tomar decisiones en la marcha, permite interpretar el estado actual y busca mantener el sistema en las condiciones favorables para la transferencia de calor.

7.7. Propiedades medibles en el intercambiador de calor

7.7.1. Caudal

La medida volumétrica que circula por el intercambiador de calor en una unidad de tiempo es determinante para definir las dimensiones, la cantidad de fluido a usar y las condiciones térmicas de trabajo del sistema, buscando obtener mayores eficiencias.

7.7.2. Flujo másico

El número de moléculas que se fluyen en el sistema, nos permite evaluar las condiciones del fluido a trabajar, su densidad, su limpieza y también su variación sustancial con la presión y la temperatura.

7.7.3. Temperatura

Es la variable determinante el sistema, ya que se busca disminuir la temperatura de un fluido caliente y a su vez, el diferencial de temperatura permite definir la eficiencia que se está alcanza con el sistema propuesto, tanto los materiales, como el tipo de fluido, las condiciones de operación, el sistema de flujo a elegir y el tamaño que debe tener el intercambiador de calor para producir un gradiente de temperaturas al final del proceso, en este documento se evalúa en grados Celsius.

7.7.4. Capacidad calorífica

Definida como el cociente entre la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo o sistema en proceso cualquiera y el cambio de temperatura que experimenta.

7.7.5. Número de Reynolds

Este número nos permite obtener una relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas de un fluido, de tal forma que permite determinar si un flujo es laminar o turbulento, lo cual interviene directamente en el funcionamiento correcto del intercambiador de calor.

7.8. Consideraciones de Diseño

7.8.1. Condiciones iniciales de intercambiador

Estas condiciones son referentes a los valores T1 y T2 a las temperaturas de entrada y salida teóricas respectivamente del agua caliente y T3 es la temperatura de entrada del agua fría, estas temperatura son debido a las condiciones de la bomba 30L/min = 0,5 Kg/s Bomba Pretul, Temperatura de T1= Dada por ficha de bomba 40°C, se opta por manejar una temperatura máxima de50°C ya que el uso no es contante y no afecta los empaques por la temperatura, la temperatura del agua fría hace referencia a la temperatura promedio en Bogotá.

Tabla 1. Condiciones iniciales de temperatura

AGUA CALIENTE			**AGUA FRIA**	
Kg/s	0,375		Kg/s	0,5
T1 °C	50		T3 °C	20
T2 °C	35			

7.8.2. Coeficiente global de transferencia de calor (U)

El coeficiente total de transferencia de calor, o valor U, se refiere a qué tan bien se conduce el calor a través de una serie de medios resistentes, en este caso 2 fluidos y sus fronteras. Sus unidades son W/(m^2°C) o [Btu/(hr-ft^2°F)].

Tabla 2. Valores típicos promedio de transferencia de calor para intercambiadores de calor de tubos,(Cengel, 2007).

Fluido en la cámara	Fluido en la tubería	Coeficiente promedio de transferencia de calor (U = W/m2 · °C)
Agua	Agua	850-1700

Para poder realizar nuestro análisis, usamos el promedio del U en la Tabla 2, para agua.

$$\boldsymbol{U = \frac{1275\ W}{m^2 * C}}$$

7.8.3. Calor real durante la transferencia

Calor transferido del fluido caliente a la temperatura media:

$$\boldsymbol{Q = \dot{m} * Cp * \Delta T}$$

$$Cp_{50°C} = 4178 \frac{J}{Kg * K}$$

$$Q = 0{,}5\ \frac{Kg}{s} * 4178 \frac{J}{Kg * K} * (323{,}15\ °K - 308{,}15 °K)$$

$$\boldsymbol{Q = 31335\ W \rightarrow 31{,}335\ KW}$$

7.8.4. Temperatura de salida esperada fluido frio

$$\boldsymbol{Q = \dot{m} * Cp * \Delta T}$$

$$Q = \dot{m} * Cp * (T2 - T1)$$

$$T2_{\,frio} = \frac{Q}{(U * A)} + T1_{\,frio}$$

$$T2_{\,frio} = \frac{23501{,}25\ \frac{J}{S}}{\left(0{,}5 \frac{Kg}{s} * 4182\ \frac{J}{Kg * K}\right)} + 293{,}15\ K$$

$$\boldsymbol{T2_{\,frio} = 304{,}3892\ K \rightarrow 31{,}2392\ °C}$$

7.8.5. Temperatura media logarítmica (LMTD)

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

$$\Delta T_1 = (323{,}15\ K - 304{,}3892\ K\ \ )$$

$$\Delta T_1 = 18{,}7608\ K$$

$$\Delta T_2 = (308{,}15\ K - 293{,}15\ K\ )$$

$$\Delta T_2 = 15\ K$$

Se utiliza la fórmula de contra flujo, ya que nuestro sistemas es de intercambio cruzado. Figura 2.

$$\Delta T_{ln} = \frac{15K - 18{,}7608\ \ K}{ln\left(\frac{15\ K}{18{,}7608\ \ K}\right)}$$

$$\Delta T_{ln} = 16{,}8103\ K$$

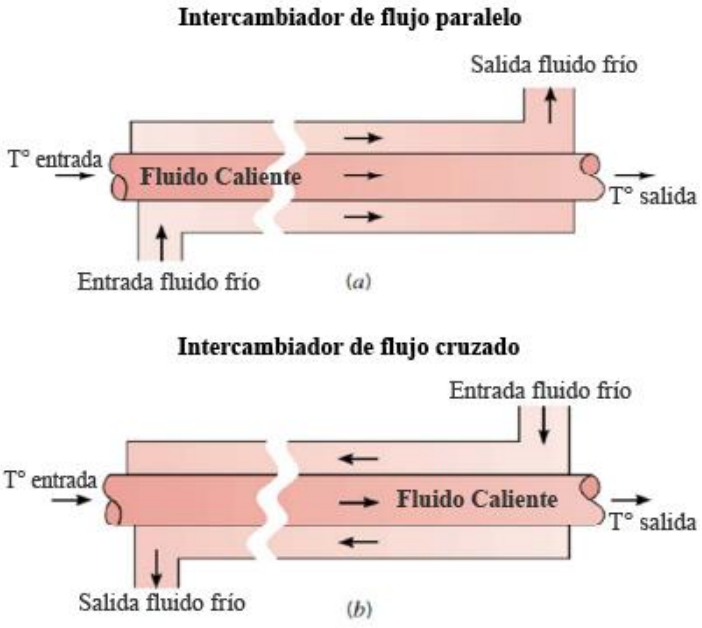


Figura 2. Esquema de flujo directo y cruzado. Creación propia.

7.8.6. Propiedades térmicas de entrada de los fluidos

Estas propiedades están definidas para las condiciones máximas y mínimas de la temperatura del agua.

Tabla 3. Propiedades del agua a condiciones estándar.

PROPIEDADES	AGUA CALIENTE (50°C)	AGUA CALIENTE (35°C)	AGUA FRIA (20°C)
Cp. (J/Kg/K)	4181	4178	4182
μ (Kg/m*s^2)	1.002X10^-3	0.720X10^-3	0.547X10^-3
k (W/ m*K)	0,647	0.623	0,597
ρ (KG/M^3)	988,1	994	998,2

a) Para definir los valores de efectividad, se deben definir las siguientes variables:

$$\dot{Q}_{frio} = \dot{Q}_{caliente}$$

$$\dot{m}_f * Cp_f * (Tf_s - Tf_e) = \dot{m}_c * Cp_c * (Tc_e - Tc_s)$$

$$\frac{0.5Kg}{s} * 4182\frac{J}{KgK} * (33 - 20) = \dot{m}_c * 4178\frac{J}{KgK} * (50 - 35)$$

$$\dot{m}_c = \frac{\left(0.5\frac{Kg}{s} * 4182\frac{J}{KgK} * (33 - 20)\right)}{4178\frac{J}{KgK} * (50 - 35)}$$

$$\dot{m}_c = 0.433\frac{Kg}{s} \quad \textit{Flujo másico esperado para el agua caliente}$$

Lo que indica que para la temperatura media esperada y el flujo másico de entrada de 0.5 kg/s en desde el tanque de agua fría, se espera que el flujo másico a la entrada del agua caliente sea de menor proporción.

NOTA : se toma la temperatura de salida de agua fría, como 33°C dado que en la realidad la temperatura del agua fría de salida suele ser menor al estar en contacto con las tuberías.

$$(31.23°C)\quad C_f = \dot{m}_f * Cp_f = 0.5\frac{\dot{K}g}{s} * 4178\frac{J}{kgK} = 2089\frac{J}{sK}$$

$$(50°C)\quad C_c = \dot{m}_c * Cp_c = 0.433\frac{Kg}{s} * 4181\frac{J}{kgK} = 1810.373$$

$$C_c = Cmin = 1810.373\frac{J}{sK}$$

b) Ahora se define la razón máxima posible de transferencia (Qmax)

$$\dot{Q_{max}} = Cmin * (Tc_e - Tf_e)$$

$$\dot{Q_{max}} = 1810.373 \frac{J}{sK} * (50 - 20)K$$

$$\boldsymbol{\dot{Q_{max}} = 54311.19 \frac{J}{s} = 54.311\ kW}$$

c) Efectividad**:**

$$\boldsymbol{\varepsilon = \frac{Q_{real}}{\dot{Q_{max}}} = \frac{31.335\ kW}{54.311\ kW} = 0.57}$$

d) Relación de capacidades

$$\boldsymbol{C = \frac{Cmin}{Cmax} = \frac{1810.373 \frac{J}{sK}}{2089 \frac{J}{sK}} = 0.86}$$

e) Determinar factor NTU

Mediante aproximación por medio dela siguiente curva, tomando la efectividad y la capacidad se aproxima a 1.

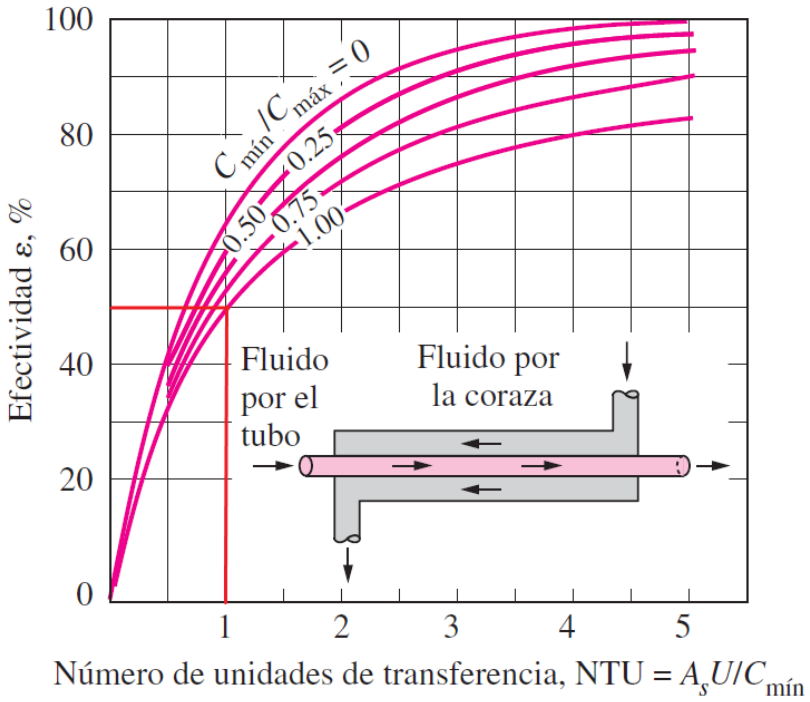


Figura 3. Aproximación del factor NTU, Cengel (2007)

7.8.7. Área de transferencia requerida

El sistema opera con agua como fluido de trabajo, se toma un valor promedio de transferencia de calor para intercambiadores de calor de tubos y coraza, este sería el valor promedio por área de flujo, pero que también es el calor presente durante el transporte mediante convección en las fronteras hacia el fluido de trabajo externo a los tubos, se obtiene el valor equivalente en sistema internacional.

Teniendo en cuenta los cálculos de dimensionamiento previamente determinados, se dispone encontrar un área de flujo, por la que la transferencia será dependiente del diferencial de calor de transferencia, el coeficiente global y la temperatura media logarítmica. esta área es entonces el área superficial para la distribución de la tubería, este cálculo solo tiene en cuenta la dimensión sugerida del área de transferencia, mas no de las tapas y accesorios.

$$NTU = \frac{UA_s}{Cmin}$$

$$A_s = NTU * \frac{Cmin}{U} = 1 * \frac{1810.373 \frac{J}{sK}}{1275 \frac{W}{m^2 * C}} = \mathbf{1,42\ m^2 = A_s}$$

7.8.8. Tubería interna

Las Matrices pueden ser generalmente cuadradas o triangulares, también las cuadriculadas y triangulares rotadas, estas últimas permiten tener una mayor agrupación entre los tubos, lo que se traduce en una mayor superficie de transferencia de calor, así mismo una mayor caída de presión y un mayor coeficiente de transferencia. Sin embargo, esta configuración no permite una limpieza sencilla del sistema; la distribución de tubos cuadrada rotada permite tener una mejora en el coeficiente de transferencia y así como en la caída de presión comparada con un arreglo cuadrado

regular, las distancias promedio entre tubos se encuentran alrededor de 1 in para tubos de 3/4 y de 1.25 in para tubos de 1 pulgada. El coeficiente global de transferencia de calor tiene en cuenta los coeficientes de transferencia de calor individuales de cada corriente y la resistencia del material de la tubería, por lo que una correcta distribución de tubos, permite disminuir la resistencia del material, durante la transferencia de calor

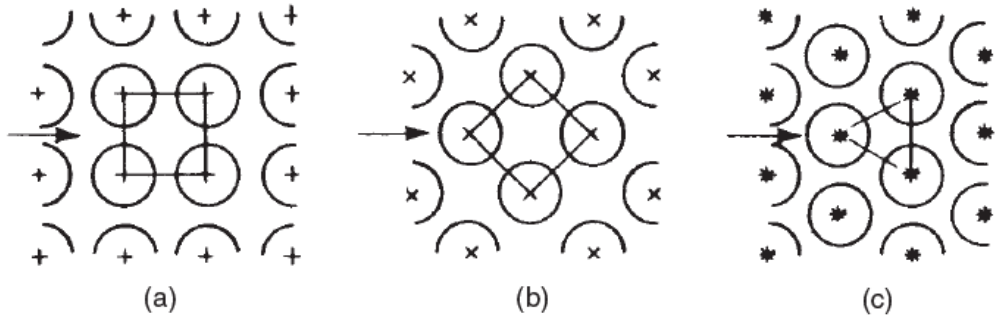


Figura 4. Configuración de las tuberías en la construcción de intercambiadores de calor. R.W. Serth. (2007

Tube OD	Pitch	Plain tube C′, in.	Plain tube d_e, in.	Low fin 19 fins/in. C′, in.	Low fin 19 fins/in. d_e, in.	Low fin 16 fins/in. C′, in.	Low fin 16 fins/in. d_e, in.
3/4"	1" □	0.250	0.95	0.34	1.27	0.325	1.21
1"	1–1/4" □	0.250	0.99	0.34	1.27	0.32	1.21
1–1/4"	1–9/16" □	0.3125	1.23				
1–1/2"	1–7/8" □	0.375	1.48				
5/8"	13/16" △	0.1875	0.535	0.278	0.82	0.2655	0.78
3/4"	15/16" △	0.1875	0.55	0.278	0.80	0.2655	0.75
3/4"	1" △	0.250	0.73	0.34	1.00	0.325	0.95
1"	1–1/4" △	0.250	0.72	0.34	0.97	0.32	0.91
1–1/4"	1–9/16" △	0.3125	0.91				
1–1/2"	1–7/8" △	0.375	1.08				

Figura 5. Selección de diámetro de tubo según disposición de tubos. R.W. Serth. (2007)

7.7.1. Selección de los tubos

Para tener un cálculo acertado a las dimensiones de la tubería, se debe tener el espesor de tubería o calibre el elegir, en este caso la tubería será de calibre 16, por lo que hay que descontar su espesor.

Table B.1 *Dimensions of Heat Exchanger and Condenser Tubing*
(a) The Birmingham Wire Gage Scale

BWG	Thickness (in.)
7	0.180
8	0.165
10	0.134
11	0.120
12	0.109
13	0.095
14	0.083
15	0.072
16	0.065
17	0.058
18	0.049
20	0.035
22	0.028
24	0.022
26	0.018

Figura 6. Calibre de tubería R.W. Serth. (2007)

$$\boldsymbol{Espesor\ de\ la\ tuberia: 0.065\ in = 1.651\ mm}$$

La relación del espesor del calibre de la tubería es inversamente proporcional al coeficiente global de transferencia de calor, dado que una menor resistencia resulta en una mejor transferencia entre los fluidos. Número de tubos requeridos en el intercambiador

El numero aproximado de tubos esta definido como razón entre el área de transferencia requerida y el área superficial de un tubo

$$\#_{\boldsymbol{Tubos}} = \frac{A_s}{\pi * \emptyset_{Tubo} * L_{.Tubo}}$$

$$\#_{Tubos} = \frac{1{,}42\ m^2}{\pi * (0{,}01905 - 2 * 0{,}001651)m * 1m}$$

$$\#_{Tubos} = \frac{1{,}42\ m^2}{\pi * 0{,}01574\ m * 1m}$$

$$\#_{\boldsymbol{Tubos}} = \boldsymbol{28.7 \approx 28}$$

7.7.2. Definición de diámetro de coraza

Ahora basándose en las dimensiones propuestas por R.W.Serth (2007), para tuberías de diámetro 8 pulgadas se encuentra una distribución propuesta de 28 tubos, la cual es razonable con el cálculo teórico anteriormente realizado de 33 tubos, este valor se determinó teniendo en consideración el tamaño de tubería comercialmente viable para la construcción, con la que se busca ajustar las dimensiones del intercambiador.

Table C.3 *Tube Counts for 3/4-in. OD Tubes on 1-in. Square Pitch*

Shell ID (in.)	TEMA P or S				TEMA U		
	Number of passes				Number of passes		
	1	2	4	6	2	4	6
8	28	26	16	12	28	24	12
10	52	48	44	24	52	44	32
12	80	76	66	56	78	72	70
13¼	104	90	70	80	96	92	90
15¼	136	128	128	114	136	132	120
17¼	181	174	154	160	176	176	160
19¼	222	220	204	198	224	224	224
21¼	289	272	262	260	284	280	274
23¼	345	332	310	308	348	336	328
25	398	386	366	344	408	392	378
27	477	456	432	424	480	468	460
29	554	532	510	496	562	548	530
31	637	624	588	576	648	636	620
33	730	712	682	668	748	728	718
35	828	812	780	760	848	820	816
37	937	918	882	872	952	932	918
39	1048	1028	996	972	1056	1044	1020
42	1224	1200	1170	1140	1244	1224	1212
45	1421	1394	1350	1336	1436	1408	1398
48	1628	1598	1548	1536	1640	1628	1602
54	2096	2048	2010	1992	2108	2084	2068
60	2585	2552	2512	2476	2614	2584	2558

Figura 7. Número de tubos por diámetro de tubería R.W. Serth. (2007).

- $\emptyset_{Coraza} = 8\ in$
- $\#_{Tubos} = \mathbf{28}$

7.7.3. Ajuste de U

Se realiza el cálculo de U con el objetivo de observar la variación causada por el cambio de número de tubos realizada

$$\#_{\boldsymbol{Tubos}} = \frac{A_s}{\pi * \emptyset_{Tubo} * L_{\cdot Tubo}}$$

$$\#_{\boldsymbol{Tubos}} = \frac{NTU * \frac{Cmin}{U}}{\pi * \emptyset_{Tubo} * L_{\cdot Tubo}}$$

$$U = \frac{NTU * \ Cmin}{\#_{Tubos} * \pi * \emptyset_{Tubo} * L_{\cdot Tubo}}$$

$$U = \frac{1 * 1810.373 \frac{J}{sK}}{28 * \pi * \ 0{,}01574 \ m * 1m}$$

$$\boldsymbol{U = 1307,54 \ \frac{W}{m^2 * C}}$$

Se puede observar un aumento del **15,56%** en el aumento del U teórico propuesto inicialmente

Velocidad

La velocidad que puede alcanzar el agua a través del sistema que a la vez está impulsada por la bombas hidráulicas, está determinada por el flujo másico, el número de pasos (np) y el número de tubos (nt), así como a las dimensiones de la tubería que proviene de los tanques, esta será directamente proporcional a la variación de caudal que se realice mediante el movimiento de las válvulas de accionamiento. NOTA: En este punto no se ha determinado aún el número de pasos, por lo que se toma un np =1.

$$V = \frac{\dot{m}\left(\frac{n_p}{n_t}\right)}{\frac{\rho \pi D_i^2}{4}}$$

$$V = \frac{0{,}5\,\frac{Kg}{s} * \left(\frac{1}{28}\right)}{\frac{988{,}1\,\frac{Kg}{m^3} * \pi * (0{,}015m)^2}{4}}$$

$$\boldsymbol{V = 0,1022\ m/s}$$

7.7.4. Número de Reynolds

Para sistemas de baja viscosidad, es altamente deseado mantener un flujo turbulento a lo largo de los tubos es la manera más efectiva para la transferencia de calor, pero esto no es práctico para sistemas con fluidos viscosos. Una vez determinado el número de tubos se determina el número de Reynolds para el flujo que corre dentro de las tuberías.

Para calcular el número de Reynolds en el sistema planteado, se tienen en cuenta condiciones dimensionales iniciales del montaje, tales como el diámetro de la tubería y las condiciones del fluido a las temperaturas de trabajo, ya que los rangos estarán entre los valores de la temperatura ambiente (50°C) como la temperatura más alta, media

7.7.4.1. Flujo en la tubería de carga:

$$\boldsymbol{Re = \frac{4\dot{m}\, D\iota\, \rho\, \mu\, n_p}{n_t}}$$

$$\frac{4*0{,}5\frac{Kg}{s}*\,0{,}015m*\,555{,}1\,\frac{Kg*s}{m^2}*988{,}1\frac{Kg}{m^3}*1}{28} \quad = \boldsymbol{Re = 597,67} \qquad \textbf{Flujo laminar}$$

Hay que aclarar que estos cálculos reflejan el flujo a la entrada del intercambiador por lo tanto es esperable obtener flujo laminar NRe<2100 debido a que las condiciones de la tubería no poseen perfiles demasiado marcados, también se puede apreciar que para las temperaturas entre los 19°C y los 50°C el flujo se comportará de manera similar en la entrada.

A medida que el flujo cambia de laminar a turbulento, en intercambiadores de flujo cruzado el coeficiente global de transferencia de calor aumenta, para el fluido caliente va a ser en una mayor proporción y para el fluido frío será un aumento, pero en mejor porcentaje, ya que este seguirá teniendo una menor temperatura.

7.7.4.2.Flujo al interior del intercambiador

Para este análisis tomamos la temperatura media dentro de la coraza al no conservar la temperatura mayor de 50°C durante todo el proceso, datos tomados de la Tabla 2. (El valor de 0.1932 m corresponde al diámetro interior de la coraza)

$$\boldsymbol{V = \frac{m}{\rho * A}}$$

$$\boldsymbol{V} = \frac{0{,}5\ kg/s}{993\frac{Kg}{m^3} * \pi\left(\frac{0.19320\ m}{2}\right)^2} = 0.01717$$

$$\boldsymbol{v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.720 * 10^{-3}\text{Kg/m} * \text{s\^2}}{994\ Kg/m^3} = 7.2434 * 10^{-7}\frac{m^2}{s}}$$

$$\boldsymbol{Re = \frac{V * D}{v} = \frac{0.0170\frac{m}{s} * 0.1932m}{7.2434 * 10^{-7}\frac{m^2}{s}} = 4579.6}$$

$Re = 4579.6$ Flujo turbulento

NRe >4000, dado el valor obtenido, se define que al interior de la coraza y a lo largo del intercambiador el flujo es turbulento.

Estos valores son calculados para el flujo dentro del intercambiador de calor, teniendo en cuenta las dimensiones interiores del intercambiador con un diámetro D=193.2 mm^2, esto sumado al uso de bafles para las subdivisiones produce un flujo turbulento el cual es el esperado en intercambiadores de calor para producir una transferencia de calor efectiva.

7.7.5. Selección de los bafles

Para lograr una correcta distribución de flujo dentro de la coraza, el espaciado entre los bafles debe estar entre 20% y 100% del diámetro del bafle. Esto también está determinado por el tipo de soporte que brindan a la tubería y a las vibraciones causadas en el sistema por el flujo de agua. El corte de los bafles se presenta por lo general entre un 20-35% de la altura y el espesor se puede encontrar para corazas de 8 pulgadas y para una configuración de 28 tubos, está alrededor de 0.065 in de espesor como se muestra en la Figura 6, S.W.Serth (Pag. 214).

$$\mathbf{8}\ \boldsymbol{in}\ \rightarrow \mathbf{203,2}\ \boldsymbol{mm}$$

Se escoge una separación para 8 bafles de 111 mm de separación entre sí, adicional a esto se cuenta con 2 bafles laterales a los tubos, lo cuales están conectados a las tapas del intercambiador, el uso de este número de bafles, permite que el coeficiente global de transferencia de calor, sea mayor debido a que el flujo se interrumpe para generar turbulencia, pero a su vez, un número mayor o menor, no permite tener una efectividad correcta, esto se probó durante las simulaciones posteriormente realizadas.

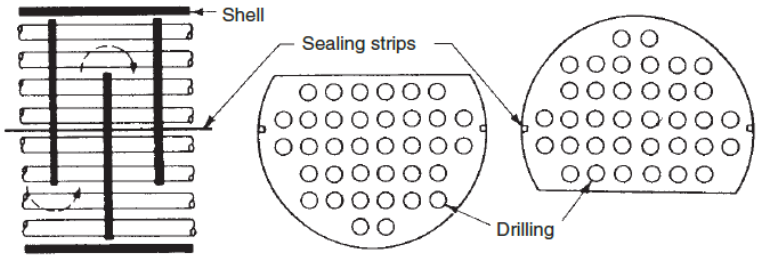


Figura 8. Separación de bafles.

Para determinar el calibre de las láminas de aluminio utilizadas en los bafles se toman de un calibre 0.125 pulgadas al tener un espaciado menor, requiere por lo tanto de 3.18 mm de espesor,

sin embargo, dadas las condiciones de que es un sistema didáctico se utiliza un espesor comercial de 1.9 mm ya que es más económico y funciona de manera correcta para las condiciones de operación.

Table 5.2 *Standard Values (Inches) for Baffle Thickness in Class R Heat Exchangers**

	Baffle spacing, inches				
Shell ID, inches	≤24	24–36	36–48	48–60	>60
8–14	0.125	0.1875	0.250	0.375	0.375
15–28	0.1875	0.250	0.375	0.375	0.500
29–38	0.250	0.3125	0.375	0.500	0.625
39–60	0.250	0.375	0.500	0.625	0.625
61–100	0.375	0.500	0.625	0.750	0.750

* Class R exchangers are for the generally severe requirements of petroleum and related processing applications.
Source: HEXTRAN and TEAMS computer programs.

Figura 9. Calibre de los bafles según el diámetro y el espaciado de los bafles (S.E.Serth)

8. MODELO PROPUESTO

A continuación, se muestra un modelo CAD en SolidWorks, el cual busca ser el diseño de partido para su construcción, teniendo en cuenta su desempeño evaluado en el programa para definir su viabilidad; se establece este prototipo y se procede a la construcción, elemento por elemento para finalmente obtener una representación exacta del modelo del intercambiador de calor.

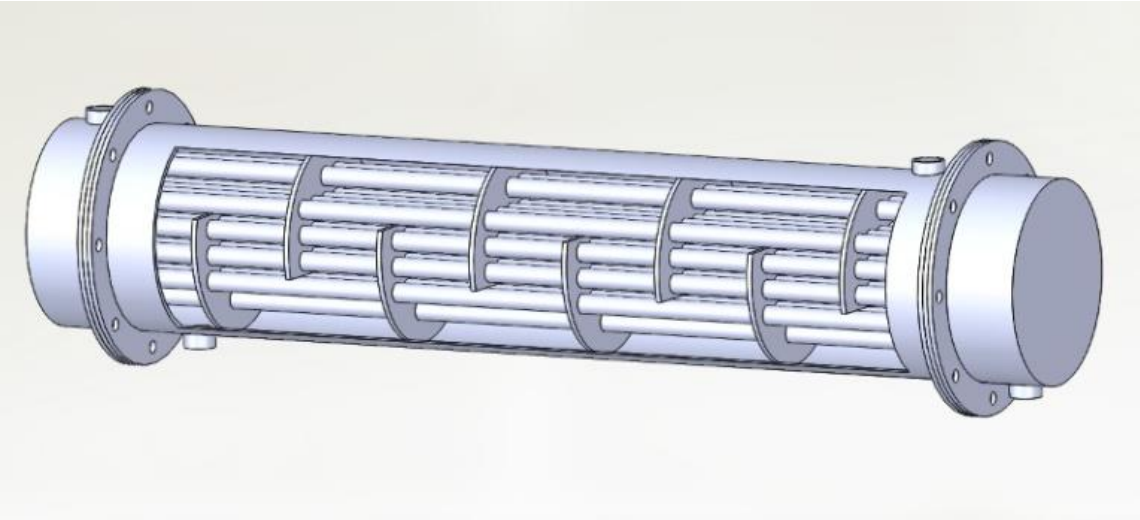


Figura 10.Modelo CAD del intercambiador propuesto. Creación propia.

8.1.1. Presión dentro de la tubería

La presión en el sistema es un factor crítico a medir, dadas las condiciones de trabajo, las tuberías por las cuales circula el fluido y la cámara interna que tiene como característica la ventana añadida en el intercambiador, esta, debe trabajar en condiciones controladas de presión para evitar el fallo. Se puede definir esta caída de presión teóricamente como:

$$\boldsymbol{\Delta P_t = \frac{f * n_p * L * \dot{m}^2}{2000 * D_i * s * \phi}} \qquad [\boldsymbol{Pa}] \quad (\boldsymbol{Tomado\ W.Serth\ Cap.5})$$

$$f = Factor\ de\ fricción = \frac{64}{Re}$$

$$L = Longitud\ de\ la\ tubería$$

$$D_i = Diametro\ de\ la\ tubería$$

$$s = Gravedad\ específica\ del\ fluido$$

$$\phi = Factor\ de\ correción\ de\ la\ viscosidad.$$

$$\boldsymbol{\Delta P_t(Min\ 20°C)} = \frac{\left(\frac{64}{597.67}\right) * 1 * 0.9m * \left(\frac{30\ kg}{min} * \frac{60min}{1\ h} * \pi * (9.525 * 10^{-3})^2\right)^2}{2000 * (\frac{3}{4} in * \frac{0.0254m}{in}) * \frac{0.997kg}{m^3} * (\frac{1.002 \frac{Pa}{s}}{0.7191})^{0.25}} \qquad [Pa]$$

$$\boldsymbol{\Delta P_t(Min\ 19°C) = 0.6864\ Pa}$$

La caída de presión es muy baja a esta temperatura, lo que indica que se conserva la presión que proviene del bombeo, la cual al no haber compresión del fluido se ajusta cercana a la presión atmosférica de Bogotá.

$$\Delta P_t(\boldsymbol{Min\ 35°C}) = \frac{\left(\frac{64}{597.67}\right) * 1 * 0.9m * \left(\frac{30\ kg}{min} * \frac{60min}{1\ h} * \pi * (9.525 * 10^{-3})^2\right)^2}{2000 * (\frac{3}{4} in * \frac{0.0254m}{in}) * \frac{0.994kg}{m^3} * (\frac{0.7197 \frac{Pa}{s}}{0.7191})^{0.25}} \quad [Pa]$$

$$\boldsymbol{\Delta P_t(Min\ 19°C) = 0.7480\ Pa}$$

La presión en el caso máximo de temperatura que fluirá a través de los tubos es menor a la de 19 °C debido a que este se encuentra más cerca a la media de la viscosidad, en el caso del agua al ser un fluido newtoniano conserva valores muy cercanos de viscosidad durante el proceso.

8.2. Lineamientos de diseño

8.2.1. Deposición del fluido

Las consideraciones más importantes son la corrosión y el ensuciamiento; los fluidos corrosivos deben colocarse por la entrada de las tuberías, las láminas, los cabezales y la tubería misma deben estar hechas de materiales anticorrosivos. Los fluidos pesados o densos deben también ser usados en las tuberías, más que en la cámara interna de la coraza ya que es más sencillo de limpiar y no se generan acumulaciones en espacios difíciles de acceder. El agua fría es usualmente usada en la tubería debido a su tendencia a corroer el acero y generar películas las cuales son difíciles de remover desde el exterior.

9. Metodología

la metodología planteada parte del análisis pre experimental realizado anteriormente, para así realizar el modelamiento de nuestro sistema en Software CAD y posteriormente realizar los análisis experimentales que brindan la factibilidad y la validación del modelo previo a su construcción, una vez evaluado el desempeño, se procede con la construcción del mismo.

9.1. Dimensionamiento

9.1.1. Número de tubos y coraza

El proceso de dimensionamiento estructural es el inicio en el proceso de construcción, ya que este nos permite determinar el tamaño medio del intercambiador de calor y a su vez, nos permite modelar y simular la estructura para obtener las condiciones propicias de trabajo del sistema.

Partiendo de esta condición se determina mediante el Robert W. Serth y su libro orientado a la construcción, diseño y definición de parámetros de funcionamiento de intercambiadores de calor de coraza y tubos; por lo que en el apéndice C, el cual determina la cantidad de tubos requerida según el diámetro de los mismos, así mismo determina el diámetro de la coraza sugerido para el número de tubos seleccionado. Teniendo en cuenta que el intercambiador propuesto es de dimensiones didácticas, se toma el número menor de tubos requeridos de calibre 3/4, dando un total de 28 tubos internos y un paso de los tubos igual 1 debido a la complejidad de la construcción.

9.1.2. Ventana de la coraza

La coraza cuenta con una ventana polimérica de doble pared, con 4 mm de espesor entre capas y transparente, el objetivo de usar esta ventana, es primero para permitir a los estudiantes y/o personas a cargo del manejo de la máquina mantener una visibilidad al interior de la coraza y así captar de manera gráfica lo que está pasando dentro de la misma; de igual manera, este material se eligió ya que tiene una flexibilidad alta, en comparación a los materiales acrílicos y vidrios, finalmente permite tener una compresibilidad alta, esto es importante ya que se sella mediante silicona Sika para ambientes con altas temperaturas, y el sello debe ser exacto para evitar fugas y caídas de presión.

9.1.3. Definición de número de bafles requeridos

Los bafles son elementos necesarios en el flujo turbulento y la velocidad del agua dentro del intercambiador, ya que estos permiten obtener velocidades más bajas y un mayor tiempo de exposición entre los fluidos, mejorando las condiciones térmicas del sistema dependiendo de la cantidad y la distribución de los mismos.

Para definir el número de bafles óptimo, se simula en el programa Solid Works Flow simulation, el modelo propuesto con las dimensiones de tubería definidas para el número de tubos seleccionada, dando como resultado un visual del comportamiento del sistema en las condiciones de trabajo esperadas, con estas simulaciones se logra apreciar cómo afecta la distribución, el número y el tamaño en la distribución tanto de calor, como en la circulación del fluido, ya que deben tener una distribución de tal manera que el fluido se vea forzado a circular en la dirección esperada. Se establecen las siguientes simulaciones como lineamiento, para a fabricación de los bafles requeridos y su dimensionamiento a la tubería de la coraza.

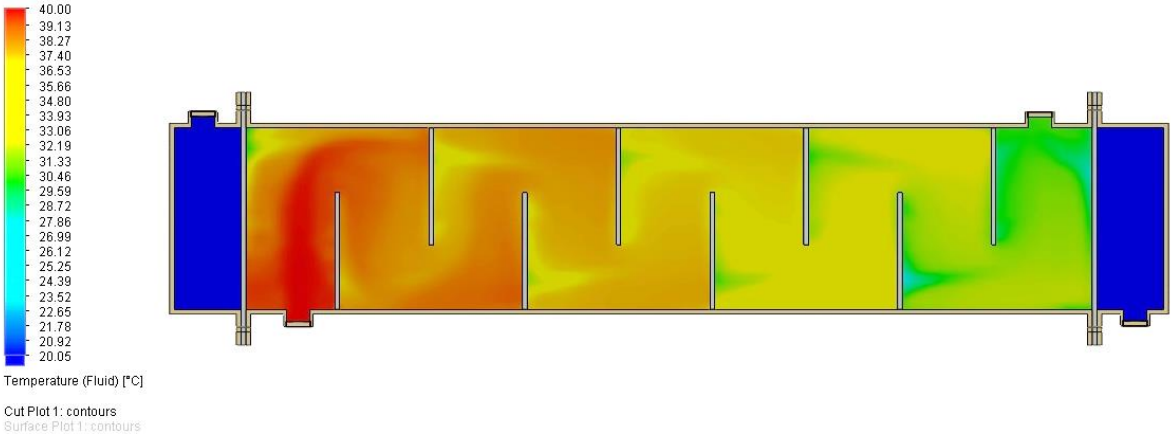


Figura 11. Creación propia, determinación mediante simulación de intercambio de calor en Solid Works.

9.1.4. Dimensionamiento de tapas

Como se aprecia en la Figura 12, las tapas cuentan con las dimensiones de diámetro exactamente iguales a las definidas para la coraza del intercambiador, con la diferencia de que estás cuentan con una entrada roscada de 1 pulgada de calibre, para las conexiones destinadas al sistema hidráulico, el cual se define a continuación.

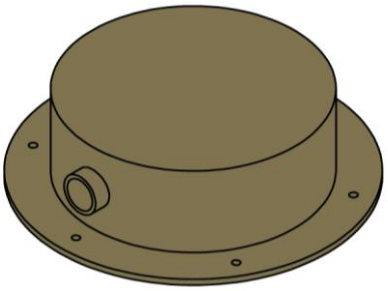


Figura 12. Esquema simplificado de las tapas del intercambiador de calor, creación propia

9.1.5. Dimensionamiento de los tanques de almacenamiento

Dado que se cuenta con 2 tanques de almacenamiento de agua, uno para la distribución de agua fría, que recorre los canales de la tubería y las tapas y un segundo que almacena el agua caliente, la cual va a circular por dentro de la coraza, será el fluido externo. Ambos tanques son de Aluminio, normalmente usados en el almacenamiento de elementos como cremas y jabones, poco reactivos.

El tanque de agua fría (Azul), cuenta con dimensiones de 35 cm de alto y un diámetro de 30 cm, con un volumen de 0,024m^3 o 25 Litros, el tanque de agua caliente (Negro), cuenta con una altura de 65 cm y un diámetro de 35 cm, con un volumen de 0,0625m^3 o 62 Litros. El tanque de agua caliente es de mayor tamaño, ya que el volumen dentro de la coraza es mucho mayor que el circula dentro de la tubería; Así mismo, ambos tanques son independientes, no están conectados y cuentan con su sistema independiente de circulación, explicado en el apartado 1.5.



Figura 13. Tanques de almacenamiento de agua caliente y fría, respectivamente.

9.1.6. Dimensionamiento de componentes hidráulicos

Los elementos hidráulicos seleccionados para el sistema, se busca sean de las especificaciones correctas, generar un equilibrio y un balance, en cuanto a la presión que el sistema tendrá durante el funcionamiento.

Se cuentan con diferentes componentes, que se describen a continuación:

- ***Bombas:*** Estas son de 1/5 HP, son 2 bombas para la circulación de agua y cada una está conectada al nivel más bajo posible dentro de los tanques, estas operan según las condiciones de catálogo a 50°C para evitar falla en los sellos. (Pretul, 2024), la información se encuentra en anexos.
- ***Unión Universal:*** Ubicadas en la salida de los tanques previo a la bomba, antes de entrar al intercambiador y después de salir del intercambiador, ya que estas permiten que el sistema sea desmontable.
- ***Tapón de alivio:*** Se incluye una tubería paralela al sistema, posterior a la bomba para poder purgar las bombas y la presión en el sistema.

- ***Válvula cheque:*** Permite que el fluido circule en la dirección a la que es impulsado mediante la bomba e impide un retorno del mismo.
- ***Válvula de bola:*** Se incluye una válvula que debe ser regulada manualmente para permitir el paso de agua, esta limita la entrada de agua al intercambiador cuando está cerrada, sin embargo, debe ser activada previo al funcionamiento de las bombas para evitar presiones altas.
- ***Tubería PVC:*** El sistema se encuentra conectado mediante tuberías de 1 pulgada, tanto las entradas como las salidas.
- ***Codos 1 pulgada***: Se encuentran en los cambios de dirección de la tubería y en el punto de alivio de agua de las bombas.
- ***Unión tipo T:*** Usada en la unión de la válvula de alivio.



Figura 14. Sistema hidráulico de alimentación y salida del intercambiador de calor.

- ***Medidor de caudal:*** Dentro de este trabajo no se enfoca el análisis en este dispositivo, puesto que este es analizado en un proyecto de investigación alterno y ya que este no estaba contemplado en el diseño original o la configuración del control electrónico, no tiene participación en las mediciones realizadas durante las prácticas.

9.1.7. Dimensionamiento de la estructura.

Un elemento esencial en el montaje y organización de todos elementos anteriormente mencionados, es la estructura metálica que será responsable también de soportar el peso del intercambiador, aproximadamente 120 kg.

A continuación, se adjunta el diseño definido para la construcción de la estructura, usando perfiles cuadrados de ¾ de pulgada calibre 16.

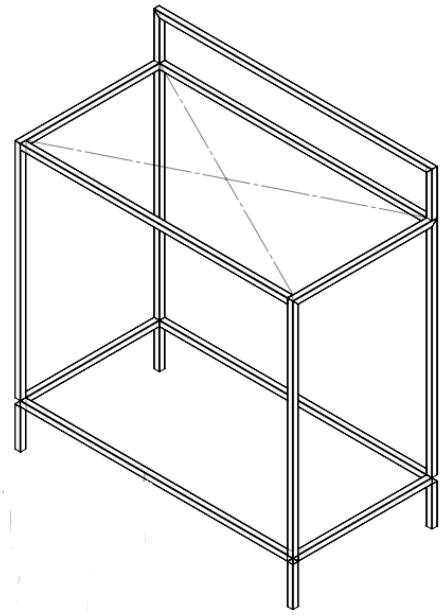


Figura 15. Diseño de estructura metálica. creación propia.

9.1.8. Materiales usados por parte

Tabla 4. Lista de materiales usados por elemento.

PARTE	MATERIAL
1. CORAZA	Acero Cold Roll
2. TAPAS	Acero Cold Roll
3. TUBOS	Aluminio
4. **BAFLES**	Aluminio
5. ESTRUCTURA	Acero Cold roll laminado
6. VENTANA	Polipropileno de doble cubierta
7. TUBERÍA	PVC 1in
8. RECIPIENTES DE AGUA	Aluminio
9. BASE PARA LOS ELEMENTOS	Madera
10. SELLOS INTERCAMBIADOR	Caucho

A continuación, se muestra un modelo CAD en SolidWorks, el cual busca ser el diseño de partido para su construcción, teniendo en cuenta su desempeño evaluado en el programa para definir su viabilidad; se establece este prototipo y se procede a la construcción, elemento por elemento.

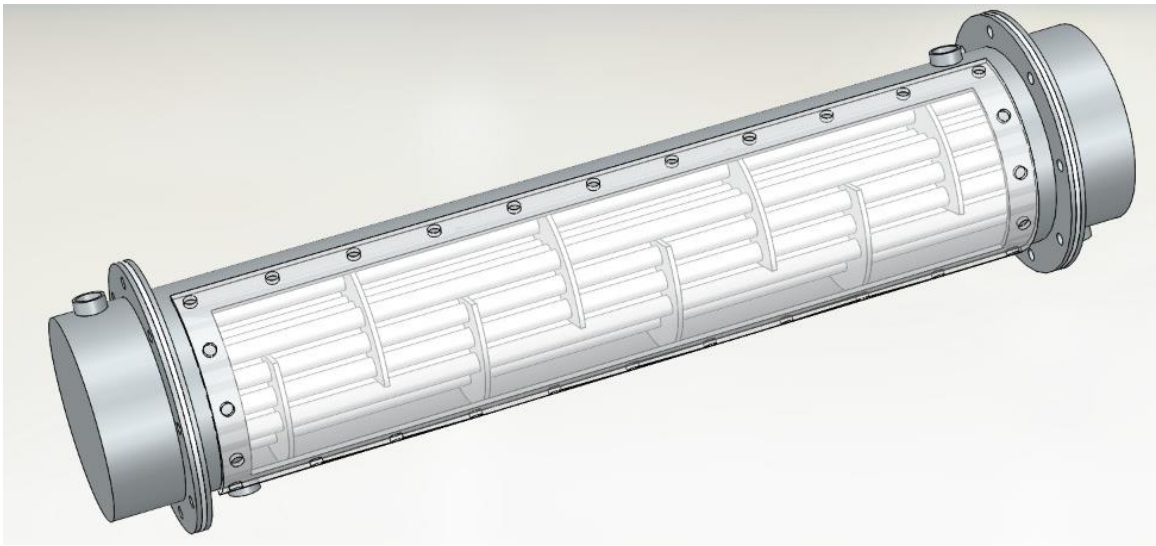


Figura 16. Diseño propio de intercambiador de calor con ventana.

8.1. Construcción y ensamble

8.1.1. Intercambiador

La construcción del banco de laboratorio, empieza por la manufactura y producción de la coraza, fabricada de acero A-36 de 8 pulgadas de diámetro con una longitud de 1 metro, excluyendo las dimensiones de las tapas. Este fue construido sobre medida, según las dimensiones tratadas en el dimensionamiento anteriormente, Figura 18.

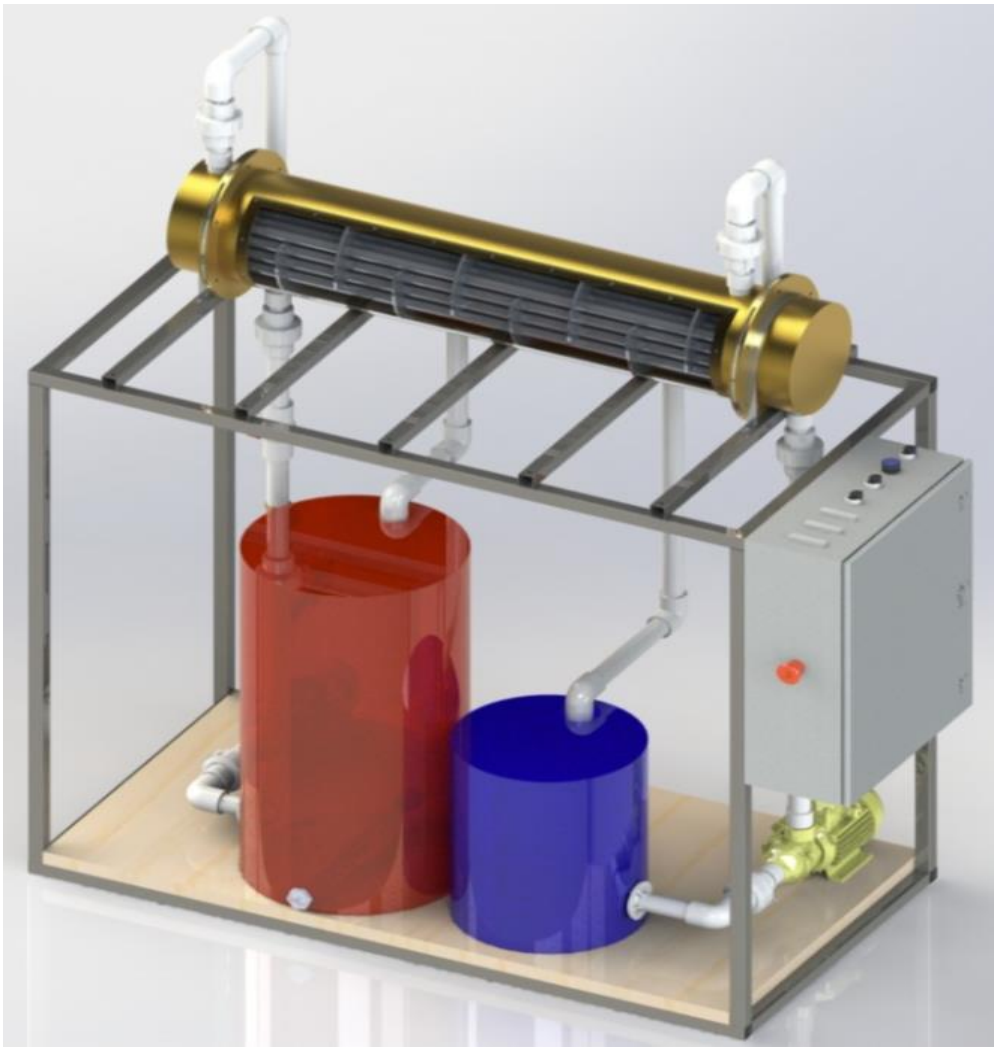


Figura 17. Diseño esperado de la construcción, modelado en Solid Works.



Figura 18. A. Construcción de la coraza. B. Ensamble de coraza y ajuste de tornillería con las tapas. C. Ensamble terminado, proceso de Cincado aplicado.

8.1.2. Tubería

El ensamble realizado para la tubería, se realizó de forma milimétrica, debido a que con un total de 28 tubos de calibre de ¾ de pulgada, se debe insertar cada uno a lo largo de los 8 bafles intermedios, estos permiten un flujo turbulento desde el interior y también a regular la velocidad del agua que abastece el sistema. Figura 19.



Figura 19. A. Ubicación de tubos y bafles de manera superficial. B. Soldadura de los tubos a los bafles de soporte externos. C. Ensamble completo de la tubería dentro del intercambiador.

Este ensamble requiere de 2 bafles de mayor tamaño, igualando las dimensiones externas de la coraza y las tapas, con el fin de ser el soporte lateral de cada uno de los tubos. Así mismo requiere estar aislada, por lo que se usó una resina polimérica como aislante (se aprecia de color negro) nos permite limitar el flujo de la coraza hacia las tapas y evitar flujo entre las mismas, debido a que los bafles son hechos de Aluminio, optar por soldar el material a los tubos habría significado un daño considerable, ya que solo cuenta con 2 mm de espesor, Figura 19.

8.1.3. Ventana

Uno de los objetivos de este proyecto, es permitir a los estudiantes de la Universidad Distrital, interactuar con el sistema y visualizar los procesos involucrados dentro y fuera del mismo, por esta razón se incorpora un ventana fuera de la coraza, que permite tener una vista hacía el interior, pero también permite tener un sistema más sencillo de interpretar, ya que en muchos escenarios industriales, no se cuenta con una panorámica del sistema involucrado y por lo tanto desinformación y desconocimiento del proceso.

Se define el material de la ventana plástica de doble revestimiento, usualmente utilizada en voladizos y techos en exteriores, a su vez, presenta una mayor flexibilidad y posibilidad de comprimirse. El selle del sistema se realizó mediante un empaque de caucho, Sika- 515 en contorno y finalmente apriete con tornillería ¼ de pulgada, Figura (20).

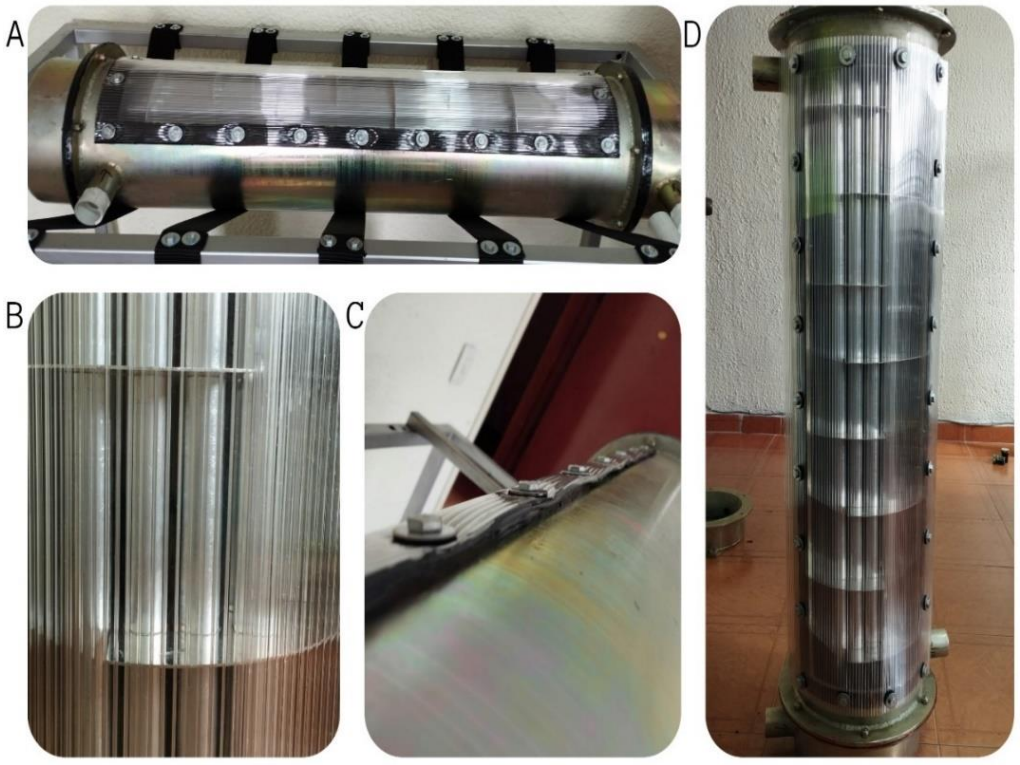


Figura 20. A. Ventana instalada con tornillería y silicona aislante. B. Vista previa del interior del intercambiador con ventana. C. Detalle de ajuste realizado con Silicona y tornillería. D. Visualización previa al sello de la tubería.

8.1.4. Estructura

El ensamble usado para la estructura metálica fue previamente analizado, en SolidWorks mediante elementos finitos para determinar la resistencia del material y los esfuerzos que se pueden encontrar al someter cargas de aproximadamente 120 Kg. Esto sin tener en cuenta el peso de los tanques de agua, los cuales aumentan el peso en la tubería inferior una vez se encuentren llenos.

El esfuerzo máximo causado por el peso del intercambiador es de 39 MPa y el menor causado es 79 kPa; el factor de seguridad mínimo es de 10, por lo que la estructura resiste las condiciones de peso de la máquina.



Figura 21. Estructura ensamblada y soldada, en proceso de pintura.

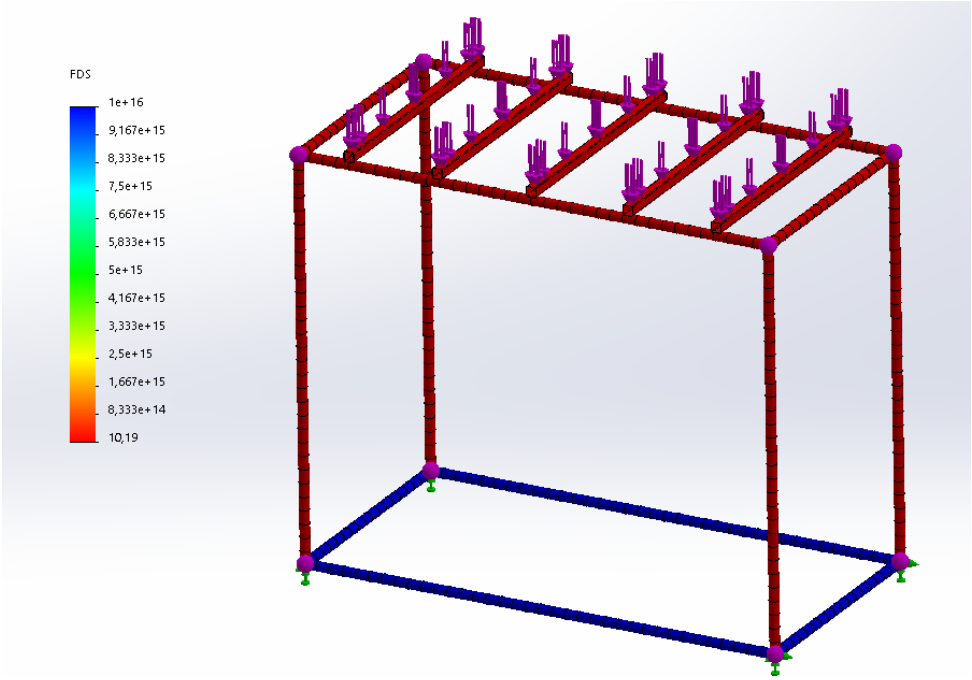


Figura 22. Visualización del factor de seguridad en la estructura.

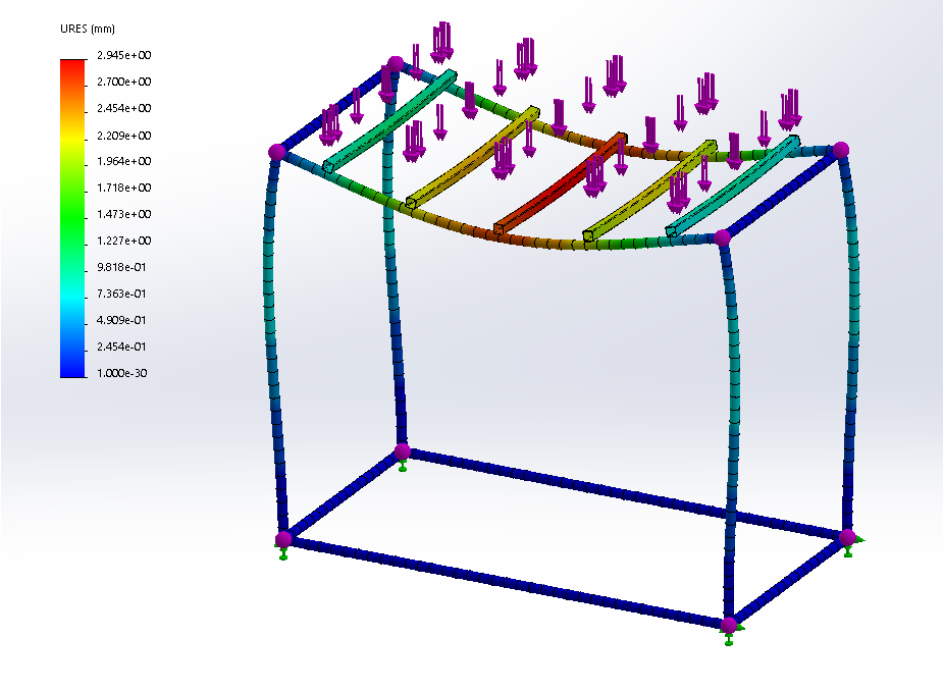


Figura 23. Deformación presente en la estructura en la estructura.

Posterior al ensamble de la estructura y los ensayos mediante elementos finitos, se realiza una prueba con la coraza, previa al ensamble, para evaluar la estabilidad y a su vez, fallas en la

soldadura. Sin embargo, no hubo falla alguna y se presenta una estructura estable y segura para la manipulación del intercambiador de calor.

A continuación, se presenta un adelanto de la construcción del banco y sus componentes mecánicos; esta ya es la configuración final optada para los dispositivos, cada elemento se ubicó en la posición más óptima con el fin de optimizar el tiempo en el recorrido del agua, así como para la manipulación por parte de los estudiantes, se optó por tener el intercambiador elevado ya que así, se puede visualizar de mejor manera el flujo de agua, pero que también facilita la caída de agua a la salida de las cámaras externas e internas y los depósitos se encontrarían a nivel del suelo para evitar mantener grandes volúmenes de agua a alturas que serían de difícil manejo en caso de requerir vaciar los tanques.

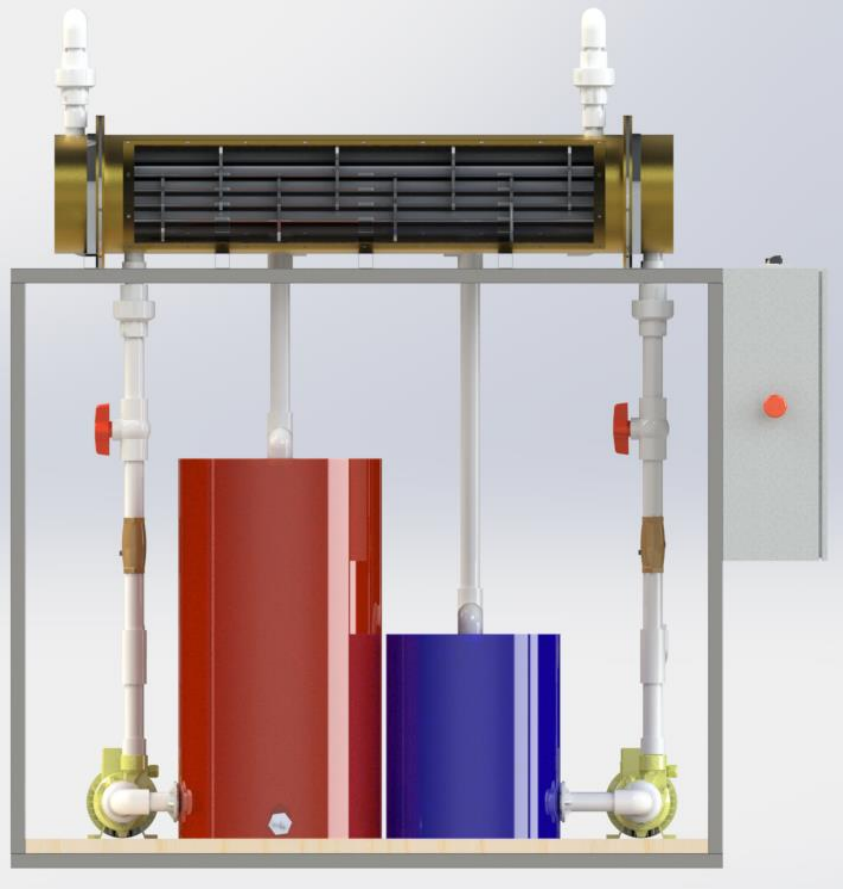


Figura 24. Modelo frontal proyectado previo a la construcción.



Figura 25. Avance del modelo construido.

8.1.5. Sistema hidráulico

El sistema hidráulico es el de mayor volumen ocupado en el montaje del intercambiador, debido a que está compuesto por diferentes componentes, los cuales por condiciones de seguridad se ubican en orden de tamaño, volumen y peso. Primero la ubicación de los tanques será en el nivel inferior al intercambiador, por lo tanto, las bombas deben suplir la altura útil, la cual es de aproximadamente 1 metro y permitir que el agua fluya tanto en sentido de subida como de bajada. Como se muestra en la siguiente distribución, los componentes fueron articulados independientemente y luego incorporados al sistema, el cuál ha sido pensado para ser desarmable, ya que por comodidad se requiere de una estructura y sistema de fácil movilidad y también transporte.

Cada elemento instalado dentro de la tubería busca permitir el flujo en un solo sentido del agua proveniente de los tanques de almacenamiento, como se muestra en la Figura 13, así mismo

debido a que se realiza el control de las temperaturas obtenidas en el sistema a lo largo del recorrido el fluido, se requiere a las salidas y entradas del intercambiador un termopar, de igual manera dentro del tanque de agua caliente para mantener las condiciones térmicas estables se requiere de un quinto termopar incorporado en el lateral inferior, posteriormente analizado en sistema eléctrico Figura 28.C. Finalmente, en la Figura 28.B y 28.D, se puede apreciar la ubicación de cada uno de los elementos y la salidas y entradas ubicadas para la coraza y la cámara de tubos dentro del intercambiador de calor.

A continuación, encontramos un diagrama de distribución de flujo del agua.

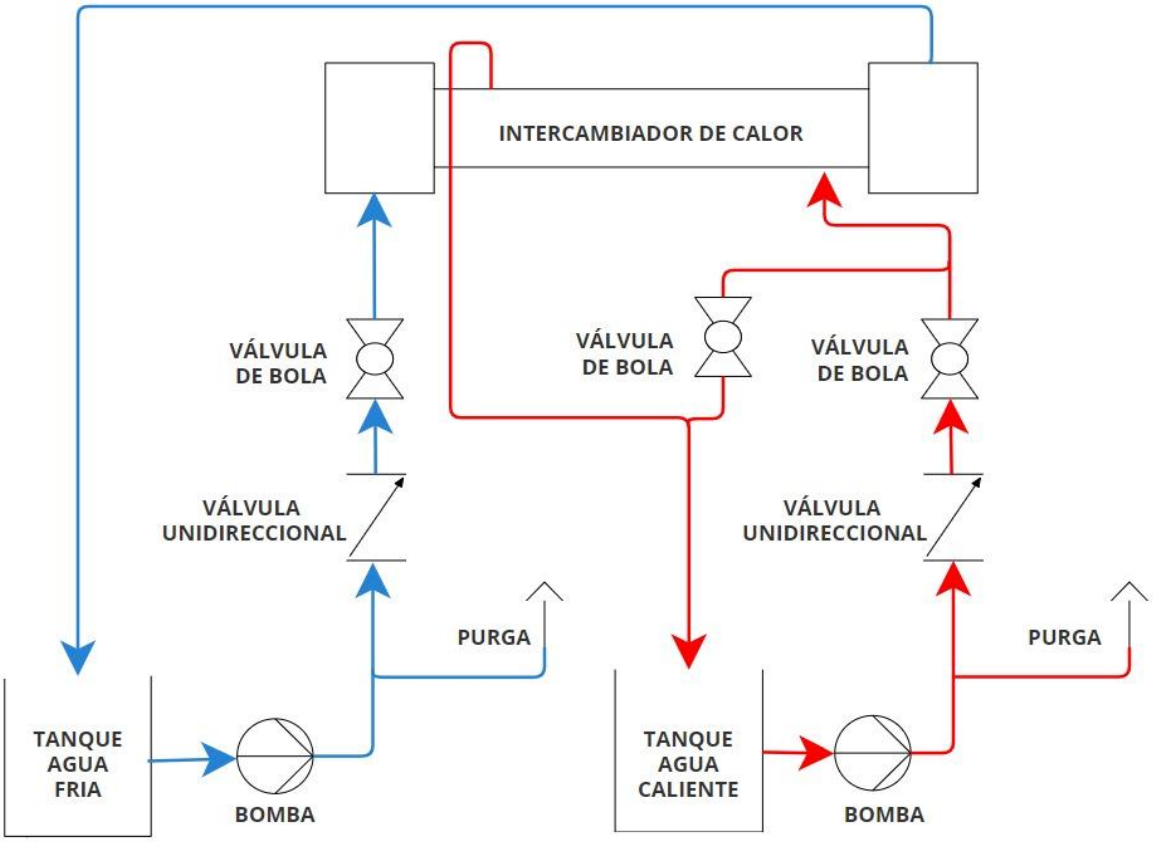


Figura 26. Distribución de flujo de agua a lo largo del intercambiador de calor.



Figura 27. Sistema hidráulico del modelo físico.



Figura 28. A. Visual de la conexión y accesorios de las bombas al intercambiador. B, Configuración final de los componentes del sistema hidráulico. C, termopar conectado a las entradas y salidas del intercambiador. D, salidas y entradas de la tubería conectadas a los tanques de agua caliente y fría.

8.1.6. Sistema de control – eléctrico

El intercambiador de calor, está siendo controlado y monitoreado por un panel de control electrónico, este permite que el sistema tenga arranque, continuidad y que se detenga en caso de requerirlo. Para formar el sistema de control, se obtienen primero las necesidades a satisfacer de cada componente para permitir el funcionamiento correcto del dispositivo, Figura 29.

Dentro de las características más importantes están la visualización de la variación de la temperatura, la activación de las resistencias y bombas hidráulicas por separado, la activación del sistema y el paro de emergencia del mismo, des este control depende la estabilidad del sistema, de haber algún error de programación se puede usar el botón Reset.



Figura 29. Instalación del sistema de control.



Figura 30. Actuadores y pantallas de control del sistema de control.

8.1.7. Panel de control

Es importante para mantener un control y obtener los datos de las condiciones de funcionamiento en el sistema, para esto se propone un centro de control electrónica el cual, controla y da señales al sistema, figura 33.

Para esto se definen las variables que se buscan medir y las variables que deben ser señales de control del proceso, ya que están interconectadas, estás variables y señales se definirán como:

8.1.8. Variables a medir

Temperatura, se definen 5 temperaturas a lo largo del sistema, cada una permite tomar una lectura del estado actual del proceso, estas son determinadas mediante 5 termo pares, ubicados dentro de la tubería y tanque.

- ***Temperatura del tanque caliente (TT)***

Es tomada a la altura de succión de la bomba, establecida para medir el valor obtenido mediante el accionamiento de las resistencias.

- ***Temperatura Fría de Entrada (EF)***

Es tomada a la entrada del intercambiador proveniente del tanque de agua fría.

- ***Temperatura Caliente de Entrada (EC)***

Es tomada a la entrada del intercambiador proveniente del tanque de agua caliente.

- ***Temperatura Fría de Salida (SF)***

Es tomada a la salida del intercambiador proveniente del tanque de agua fría.

- ***Temperatura Caliente de Salida (SC)***

Es tomada a la salida del intercambiador proveniente del tanque de agua caliente.

- ***Temperatura en las resistencias eléctricas***

El sistema alcanzará temperaturas de 50°C, estas deben ser moderadas y reguladas para evitar variaciones en los rangos que estas pueden alcanzar.

8.1.9. Dispositivos de control en el proceso

Estos dispositivos, se activan mediante la recepción de las señales obtenidas de las variables mediables y el control ejercido mediante el código de programación de Arduino, estos permiten controlar el proceso desarrollado por el intercambiador y de igual manera obtener los valores en tiempo real

8.1.9.1. Arduino MEGA

La programación del módulo Arduino, permite interpretar mediante los valores de temperatura, el sistema por completo, dando órdenes para la activación de señales y actuadores, a su vez está conectado a un computador integrado al banco, para su monitoreo y control.

8.1.9.2. Temporizador

La función de este es controlar el tiempo de trabajo de las bombas, ya que estas tienen de trabajo de 15 minutos, con descanso de 20 minutos entre ciclos, esto para evitar un recalentamiento, así mismo no se trabaja con temperaturas mayores a 40°C para evitar daños en los en los sellos de la misma, por recomendación del fabricante.

8.1.9.3. Relé

Se tiene acceso a 2 Relés, cada uno controla el tiempo de funcionamiento y la activación de los siguientes componentes:

- Relé 1: Activa la bomba #1, ubicada en el tanque caliente
- Relé 2: Activa la bomba #2, ubicada en el tanque fría

8.1.9.4. Módulo termopar

Estos se encargan de interpretar las temperaturas provenientes de los sensores de temperatura e interpretarlas para enviar señales tanto a Arduino como a las pantallas digitales de control de temperatura.

8.1.9.5. Breakers

Hay 2 breakers conectados directamente a las entradas de voltaje de las resistencias eléctricas, con el objetivo de controlar un exceso de corriente circulado que permita que se queme algún componente y así mismo protege las instalaciones de una sobrecarga o recalentamiento de las conexiones eléctricas.

8.1.9.6. Módulos Fase

Estos están junto a los breakers, son fuentes de corriente directa de 110 V aquí están conectados los componentes como las bombas, de aquí se reparten las señales de alimentación hacía los componentes de menor consumo como las fuentes de 5V y 12V.

8.1.10. Interruptores y actuadores del centro de control

- ***Interruptor de encendido***

  Controla el encendido y apagado completo del sistema

- ***Pulsador de reinicio (Reset)***

  Permite reestablecer el sistema y la configuración de un estado intermedio al estado original, tomando nuevamente medidas acordes al estado actual del sistema.

- ***Interruptor de las bombas***

  Este activa y da señal para la activación de ambas bombas en el sistema, previo a esto, las válvulas deben estar abiertas.

- ***Paro de emergencia***

  Es un pulsador de paro en caso de alguna situación tanto eléctrica, como hidráulica o de otra índole.

- ***Bombillo de encendido***

  Este se activa para mostrar que el sistema se encuentra abierta y/0 energizado.

- ***Breakers ON/OFF***

  Estos se encuentran ubicados el lado derecho del tablero de control, tienen como objetivo el control manual de las resistencias eléctricas de 1000W.

8.1.11. Fuentes de energía

- ***Fuente directa (110 V)***

  Esta es la obtenida por las fuentes de energía del laboratorio dentro de la Universidad, este será el encargado de alimentar todo el sistema en el primer nivel.

- ***Fuente de 12 V***

  Esta fuente es conectada en serie con la fuente directa de (110 V), el objetivo de esta es alimentar de forma independiente el temporizador.

- ***Fuente de 5 V***

  Esta fuente se utiliza como fuente directa de alimentación para el controlador Arduino, ya que este no puede trabajar con voltajes mayores a los 12 V, ya que su función es controlar mas no alimentar otros dispositivos.

Para la construcción del control eléctrico, se tuvo que adecuar cada elemento y su capacidad de procesamiento a las condiciones de los elementos más críticos como lo son las bombas y resistencias eléctricas, dado que estos presentan el mayor consumo energético y a su vez, requieren que los relés que controlan su activación y desactivación toleren ciclos prolongados y no generen sobrecalentamiento, por lo que el relé seleccionado tiene una capacidad de 30 Amperios; idealmente el dispositivo debe ser manipulado únicamente por el laboratorista o encargado de la práctica, ya que se busca generar el menor riesgo a cualquier persona no capacitada en su manipulación.

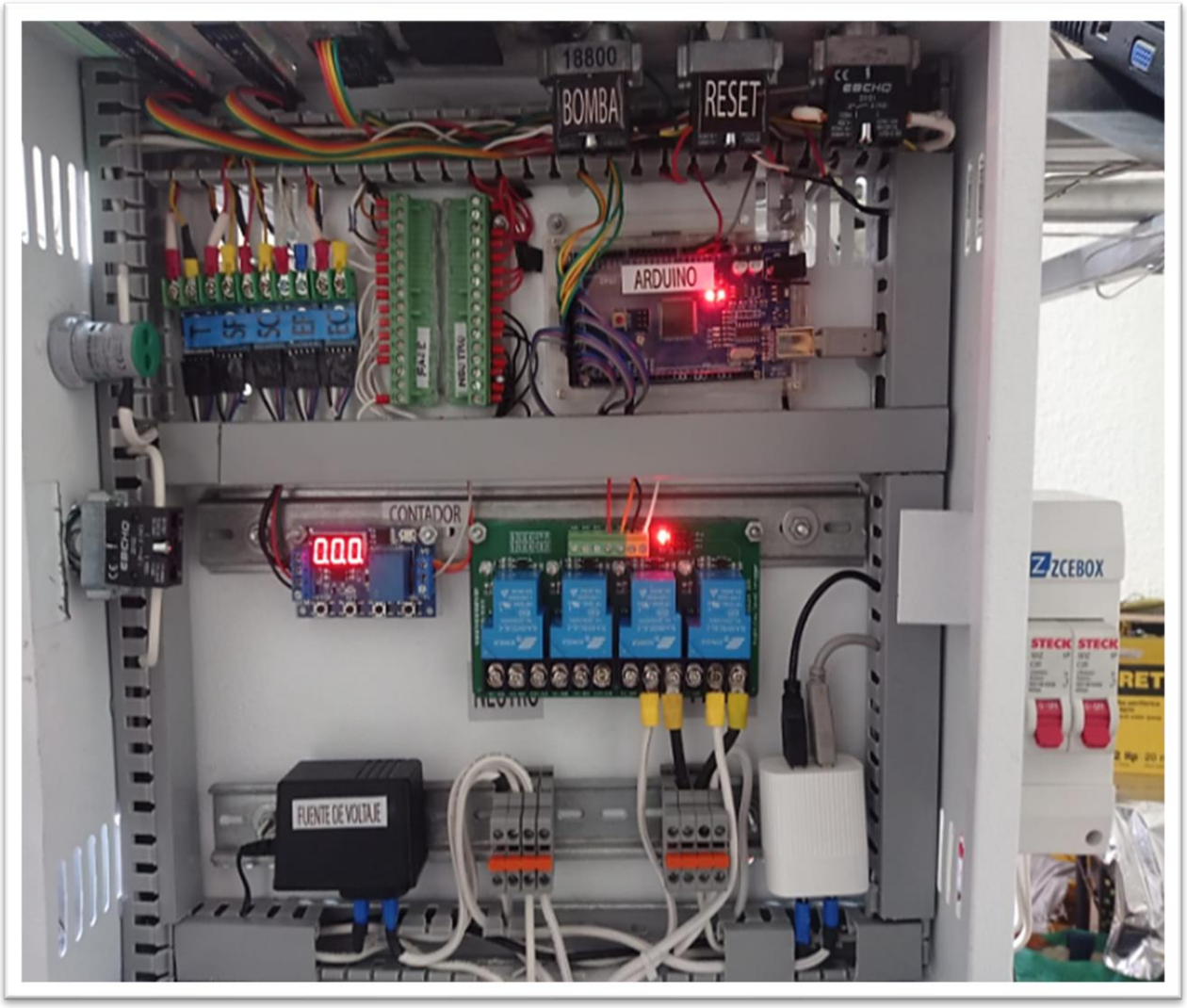


Figura 31. Montaje exterior del sistema de control, creación propia.

8.1.12. Componentes, diagrama eléctrico

Para identificar cada uno de los componentes electrónicos, se realiza un esquema de todos los elementos, sus conexiones y distribución dentro del centro de control, también para efectos de mantenimiento por parte de laboratoristas se deja explicito cada uno, en caso de ser necesario reemplazarlo, adjunto en anexos se encuentra este esquema unifilar.

La distribución acordada en el centro de control busca ser amigable con el usuario, pese a las múltiples conexiones presentes, se buscó sintetizar el funcionamiento de los elementos, de forma que en la parte inferior se encuentren los elementos de control de voltaje mayor a 120V y en la parte superior, las señales y elementos con voltajes de funcionamiento entre 5V y 12 V.

En la figura 33, podemos diferenciar cada una de las conexiones establecidas entre elementos, anteriormente se había explicado la funcionalidad de cada uno, como se aprecia en la entrada de voltaje de 120V se encuentra un sistema cerrado, el cual al momento de la activación del paro de emergencia o simplemente en la finalización del ciclo del trabajo; busca cortar el paro de energía directamente conectado a las resistencias eléctricas, bombas y por consiguiente a los elementos de señal y control.

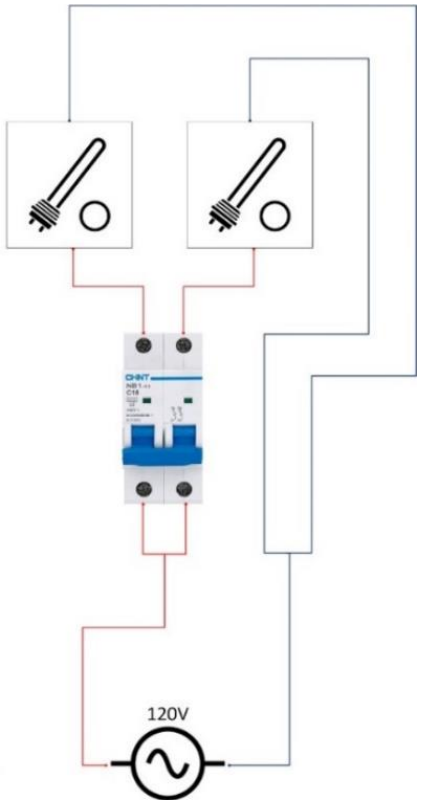


Figura 32. Diagrama unifilar de las resistencias eléctricas, creación propia

8.1.13. Diagrama unifilar

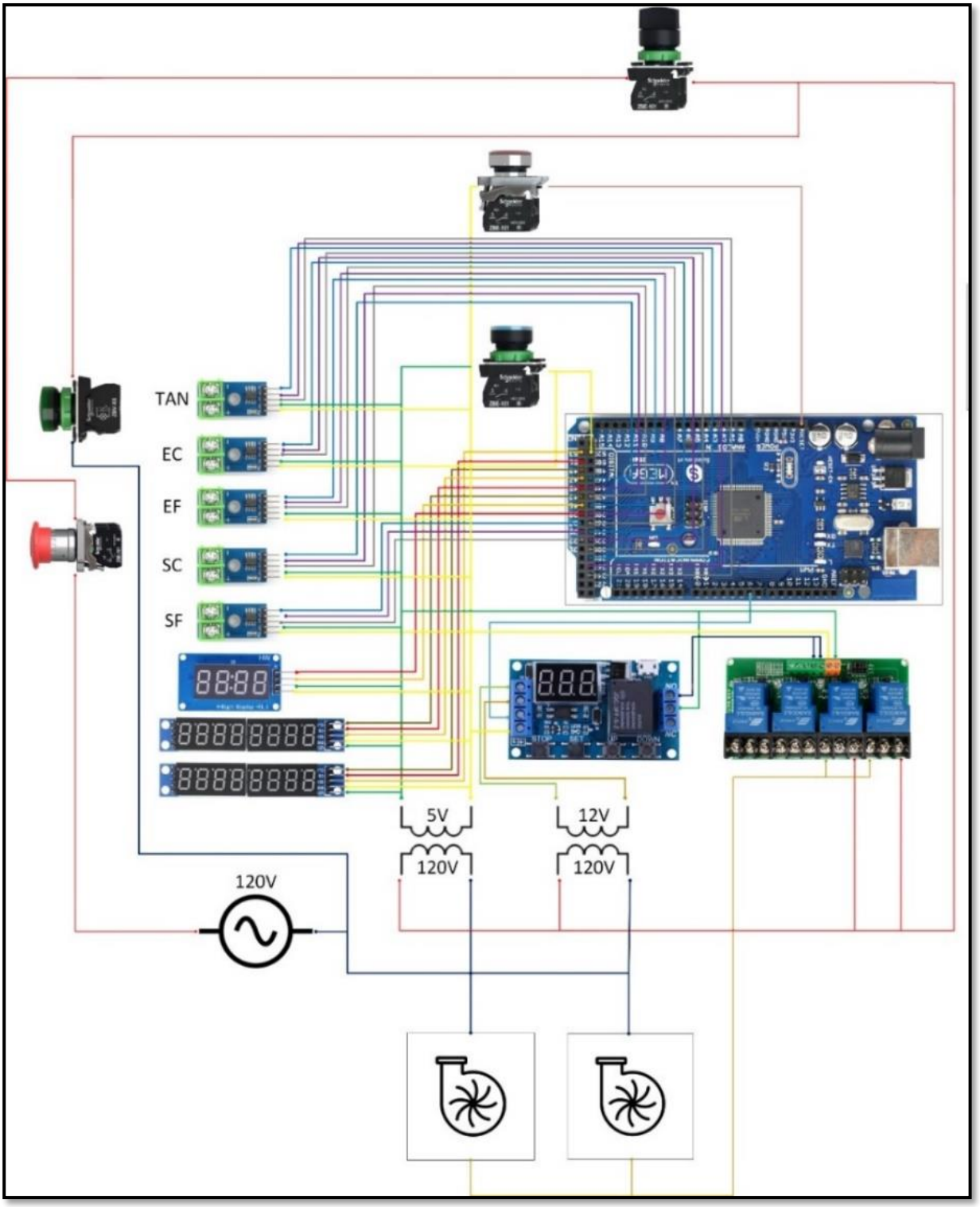


Figura 33. Diagrama unifilar del centro de control electrónico, creación propia.

8.1.14. Costos

Tabla 5. Tabla de costos por parte.

MATERIAL	VALOR UNITARIO	CANT	VALOR TOTAL
Acabado superficial - Servicio de irisado	$ 150.000,00	1	$ 150.000,00
Acople universal PVC 1"	$ 8.500	6	$ 51.000,00
Acople universal PVC 1/2"	$ 8.000	1	$ 8.000,00
Adaptado macho PVC 1"	$ 2.000	20	$ 40.000,00
Árbol Sierra Copa Bimetal	$ 22.000	1	$ 22.000,00
Arduino Mega 2560	$ 82.000	1	$ 82.000,00
Bisagra	$ 5.000	2	$ 10.000,00
Bolsa de abrazaderas plásticas	$ 8.500	1	$ 8.500,00
Bornera enchufable 4 pines	$ 5.000	4	$ 20.000,00
Bornera para riel Din 2 pines	$ 5.000	8	$ 40.000,00
Breaker 15 Amperios	$ 12.000	2	$ 24.000,00
Broca 1/4"	$ 6.500	3	$ 19.500,00
Broca macho 1/4"	$ 15.000	1	$ 15.000,00
Cable alambrado #8-5 Metros	$ 21.500	1	$ 21.500,00
Cable dúplex #8- 15 Metros	$ 30.000	1	$ 30.000,00
Caja Arduino plástica	$ 15.000	1	$ 15.000,00
Canaleta Ranurada 25×25 Plástica-3 Metros	$ 19.000	1	$ 19.000,00
Caneca de 10 Galones	$ 25.000	1	$ 25.000,00
Caneca de 15 Galones	$ 15.000	1	$ 15.000,00
Cargador 12V	$ 10.000	1	$ 10.000,00
Cargador doble USB 5V	$ 20.500	1	$ 20.500,00
Carril Din-3 Metros	$ 20.000	1	$ 20.000,00
Cinta de Doble Cara 3M™-2 Metros	$ 5.000	2	$ 10.000,00
Codo PVC 1"	$ 3.900	15	$ 58.500,00
Codo PVC 1/2"	$ 2.000	2	$ 4.000,00
Copa Cierra 1 1/4"	$ 30.000	1	$ 30.000,00
Coraza y tapas intercambiador	$ 700.000	1	$ 700.000,00
Disco de corte	$ 10.000	1	$ 10.000,00
Display 7 Segmentos de 4 Dígitos Con TM1637	$ 7.000	1	$ 7.000,00
Display de 7 segmentos 8 dígitos max7219	$ 10.500	2	$ 21.000,00
Electrodo de Soldadura 6011	$ 2.000	10	$ 20.000,00
Flanche 1"	$ 13.000	2	$ 26.000,00
Gabinete eléctrico	$ 60.000	1	$ 60.000,00
Hoja de cegueta	$ 7.000	2	$ 14.000,00
Jumpers M-H	$ 8.000	3	$ 24.000,00

MATERIAL	VALOR UNIT	CANT	VALOR TOTAL
Lamina de caucho 1200 x 600 x 5mm	$ 72.000	1	$ 72.000,00
Lamina de madera	$ 20.000	1	$ 20.000,00
Lamina 400x500 CR #18	$ 35.000	1	$ 35.000,00
Lámina para Techo 600x2400mm	$ 42.000	1	$ 42.000,00
Limpiador PVC	$ 43.000	1	$ 43.000,00
Malla Reja plástica - 1 Metro	$ 8.000	1	$ 8.000,00
Modulo Max 6675	$ 17.500	4	$ 70.000,00
Modulo Temporizador Con Relé 6 - 30v	$ 33.000	1	$ 33.000,00
Motobomba periférica Eléctrica 1/2 Hp Pretul	$ 123.000	2	$ 246.000,00
Pega-tanke	$ 26.500	1	$ 26.500,00
Perfilería Cuadrada CR 1"	$ 70.000	1	$ 70.000,00
Placa 4 Canales Relé 5v 30a	$ 81.500	1	$ 81.500,00
Plotter Gabinete eléctrico	$ 16.000	1	$ 16.000,00
Pulsador industrial Rojo	$ 7.000	1	$ 7.000,00
Pulsador industrial Verde	$ 7.000	1	$ 7.000,00
Pulsador paro de emergencia	$ 12.000	1	$ 12.000,00
Resistencias 1000W	$ 90.000	2	$ 180.000,00
Ruedas Capacidad Max 100Kg	$ 13.500	4	$ 54.000,00
Selector dos posiciones	$ 8.000	1	$ 8.000,00
Servicio de corte laser Bafles	$ 170.000	1	$ 170.000,00
Sika Flex 552	$ 16.500	1	$ 16.500,00
Soldadura PVC	$ 31.900	1	$ 31.900,00
Tapón Roscado PVC 1"	$ 6.100	2	$ 12.200,00
Tee PVC 1"	$ 16.900	2	$ 33.800,00
Terminal Conector Horqueta Cable 8	$ 300	40	$ 12.000,00
Terminales tubulares Cal 28	$ 300	20	$ 6.000,00
Termocupla tijo J	$ 13.000	4	$ 52.000,00
Testigo de encendido Verde	$ 7.000	1	$ 7.000,00
Tornillería varia	$ 25.000	1	$ 25.000,00
Tubería redonda de aluminio 1/2"	$ 6.000	30	$ 180.000,00
Tubo de PVC 1"- 6 Metros	$ 31.900	1	$ 31.900,00
Tubo de PVC 1/2"- 2 Metros	$ 8.500	1	$ 8.500,00
Válvula antirretorno 1"	$ 48.000	2	$ 96.000,00
Válvula de bola PVC 1"	$ 14.900	2	$ 29.800,00
Válvula de bola PVC 1/2"	$ 8.500	1	$ 8.500,00
Volvedores Para Machuelos Tipo Garrote	$ 30.000	1	$ 30.000,00
		TOAL COP	**$ 3.432.600,00**

9. Pruebas y simulaciones

El funcionamiento del intercambiador de calor y todos sus sistemas es algo que toma diferentes pruebas por sistemas para comprobar que cada uno funcionara de manera correcta, previo a la realización de todas las pruebas conjuntamente.

9.1. Alistamientos previos

Cada componente es previamente revisado en el momento de la instalación para tener la seguridad de que el elemento funcione correctamente, se llevan a cabo pruebas en los sistemas hidráulicos, como lo son las tuberías, bombas hidráulicas y tanques, así como las fugas presentes y la funcionabilidad del intercambiador, observando fugas o fallas dentro de este, por último el control electrónico es el que más tiempo conlleva ya que cada conexión realizada es indispensable para el funcionamiento correcto.

1 Se comprueba el funcionamiento de las bombas, estás deben ser purgadas previas a su utilización, para eliminar el aire dentro de las tuberías.

2 Se comprueba que la ventana de polímero no presente fuga o filtración por agua.

3 Se comprueba que las tuberías, no posean ninguna fuga, estas tuvieron un ajuste con sellante industrial para evitar que este sea un problema posterior.

4 Se ajustan los sellos y empaques de los tanques, a los cuales están conectadas las salidas y extracciones de agua, resistencias térmicas y termopar del tanque, para evitar fugas de agua.

5 Las resistencias fueron testeadas por separado, teniendo en cuenta que estas deben ser accionadas en un medio líquido, sin este, se corre el riesgo de daño en las mismas

6 Se ajustaron los termopares, para evitar fugas por estos hacía algún componente eléctrico

7 Se realiza la instalación del centro de control electrónico el cuál posee una configuración diferente, mencionada posteriormente

8 Se realizan las adecuaciones de las conexiones eléctricas, de tal forma que las que activan las resistencias eléctricas y las de las bombas, no tengan alguna cercanía a agua.

9 Se verifica que tanto el encendido como el paro de emergencia trabajen de manera correcta, en caso de requerir detener el sistema durante las pruebas.

10 Finalmente, se comprobaron las conexiones y la viabilidad en el tiempo de los materiales usados, asegurándose de eliminar los fallos posibles en cuanto a la infraestructura.



Figura 34. Montaje hidráulico

El intercambiador de calor para operar dentro de los rangos esperados, debe cumplir con las siguientes condiciones, los tanques deben tener un volumen mínimo de 57 Litros y 22 Litros de agua caliente y agua fría respectivamente; la temperatura debe estar en 50°C para el agua caliente y 20°C para el agua fría, se puede identificar los tanques en la Figura 34.

9.2. Funcionamiento del sistema eléctrico

Este sistema es uno de los más complejos ya que el montaje del mismo, llevó un tiempo en adecuarse y reestructurarse con el fin de que las conexiones fueran seguras, los dispositivos tuvieran una alimentación correcta y que aceptaran la corriente suministrada sin generar daños o cortos a largo plazo. Se siguen los siguientes procedimientos:

1. Se verifica que la corriente que fluye en el sistema no exceda la permisible por el cable, en este caso se usó cable alambrado de calibre 8 para la alimentación
2. Se utilizan para las resistencias 2 breakers que permiten tener un aislamiento de seguridad en caso de sobre alimentar el sistema.
3. Se comprobó que los termopares tuvieran lecturas correctas, ya que cuando el cable se obstruye, genera valores incorrectos
4. Se verifica que los relés puedan ser activados correctamente por el temporizador, en el caso de las bombas, y por el actuador ON/OFF en el caso de las resistencias eléctricas
5. Como se mencionaba anteriormente se usan fuentes de 5V y 12V, estas fueron adecuadas en sus empaques originales, provenientes de cargadores convencionales
6. Se verifica que la regleta de alimentación secundaria (color verde) este conectada en su 100% ya que esta alimenta a todos elementos electrónicos

7 Una vez instaladas cada una de las partes, se procede a programar el módulo Arduino con el código de cada uno de los elementos, el orden y el sentido lógico que estos tienen en cada paso de la activación.

Se debe tener en cuenta las siguientes condiciones durante el arranque y el periodo de pruebas del intercambiador:

- Se debe respetar el ciclo de calentamiento producido por las resistencias
- Una vez se apaguen, asegurarse de seleccionar el caudal elegido ajustando las válvulas previo a la circulación del fluido
- Activar las bombas, una vez circulando el agua, se debe respetar el tiempo de 20 min de operación por 15 min de descanso recomendado para alargar la vida útil de las bombas.
- Si hay algún flujo mayor de agua en alguno de los tanques, se debe nivelar manualmente el nivel de agua con el fin de evitar cavitación en las bombas.
- Asegurarse de refrigerar el agua en el tanque frio durante el tiempo de descanso.
- En función del caudal, cuando las condiciones se encuentran estables, es recomendable no usar el sistema a su máxima capacidad o incluso a la menor, ya que se pueden observar estancamientos en las temperaturas obtenidas y así mismo reducir la transferencia de calor entre los fluidos.
- El ciclo puede repetirse cuantas veces sea necesario (Consultar manuales de operación y guías de laboratorio en anexos).

9.3. Funcionamiento del intercambiador

Las pruebas permiten establecer la funcionalidad del intercambiador ya con sus sistemas al 100%, se puede operar el en su totalidad buscando igualar las condiciones teóricas obtenidas mediante la simulación de elementos finitos, a su vez, permite que detectemos variaciones en las medidas dado que el sistema se considera transitorio y cambia en el tiempo en la práctica. Para determinar los valores transferencia de calor, se considera el caudal como el factor determinante durante el proceso, ya que este permite que el fluido tenga un mayor tiempo de interacción y por consiguiente un diferencial de temperatura notorio.

El caudal máximo de operación de las bombas es de 30 L/min, es por esto que teniendo en cuenta un caudal equivalente de 0,5 kg/s con las válvulas a su máxima capacidad.

Con la variación de este flujo se busca controlar su apertura de las válvulas y así modificar valores de caudal a la salida, dentro de estas 5 pruebas realizadas, encontramos la modificación del caudal tanto en el tanque caliente como el tanque de agua fría y así obtener los resultados a continuación.

La construcción de los modelos y las simulaciones se realizaron en Solid Works Simulation, debido a que no se contaba con la licencia para usar ANSYS, de igual manera, este programa permite la interacción de la construcción, simulación y resultados en la misma interfaz, sin afectar las dimensiones, medidas y restricciones ya creadas durante la geometría, adjunto a este documento se encuentra en Anexos, los detalles de la simulación con los que busca profundizar el análisis realizado y explicar el paso a paso.

9.3.1. PRUEBA 1: Apertura 25 % de agua caliente y 25% de agua fría:

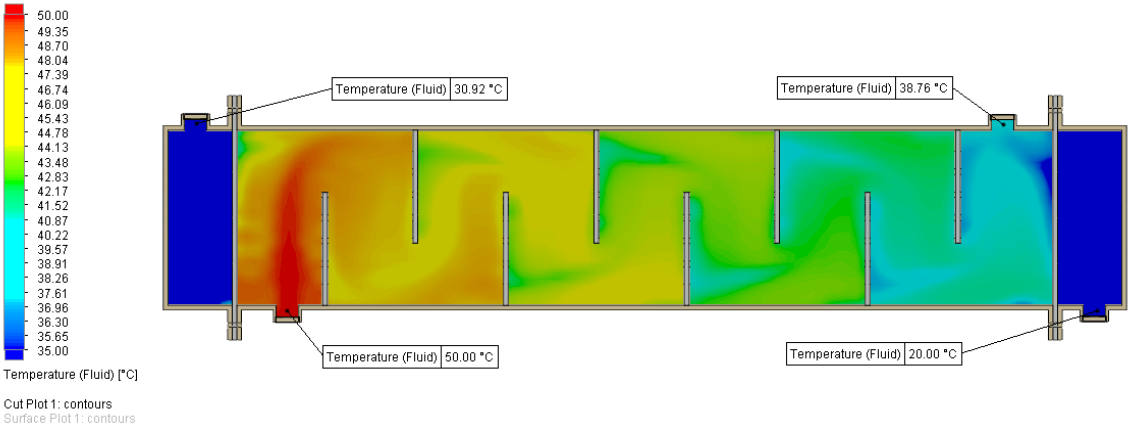


Figura 35. Simulación para un caudal de 25% Caliente – 25% frío.

La simulación nos muestra una distribución de calor que disminuye su magnitud a lo largo del recorrido dentro del intercambiador, la temperatura a la entrada conserva el valor de la temperatura en el tanque para este caso ideal, la diferencia de temperaturas para el agua caliente es de (11.24°C) y para el agua fría un de (10.92°C) el restante se puede interpretar como la temperatura generada al ambiente o simplemente como una pérdida de calor debido al material de la estructura.

Ahora bien, se realiza una prueba con las condiciones del intercambiador físico para evaluar similitudes y diferencias entre los modelos, de la siguiente forma:



Figura 36. Toma de temperaturas práctica 1.

Tabla 6. Relación de transferencia de calor prueba 1

Kg/s °C	25% Caliente – 25% Fría	
	Simulador	Práctica
T Tanque	50	50
T Ext In	50	51
T Ext Out	38,76	27
T INT In	20	24
T INT Out	30,92	27

Ya que la programación de las resistencias está diseñada para mantener una temperatura de 50°C en el tanque, la temperatura debe mantenerse en estas condiciones para recircular el agua que entra subenfriada al tanque de agua caliente y lograr recuperar temperatura.

Tabla 7. Evaluación del desempeño para la prueba 1.

Kg/s °C	25% Caliente – 25% Fría	
	Teórico	Práctica
Q (KW)	31,33	12,54
LMTD (K)	15	10,10
C Min (J/sk)	2091	522,75
C Max (J/sk)	1809,07	522,62
Q Max (KW)	62,73	14,11
ε	0,5	0,88
NTU	1	5
U (W/(m^2*C)	1510	1593,75

9.3.2. PRUEBA 2: Apertura 50% de agua caliente y 100% de agua fría:

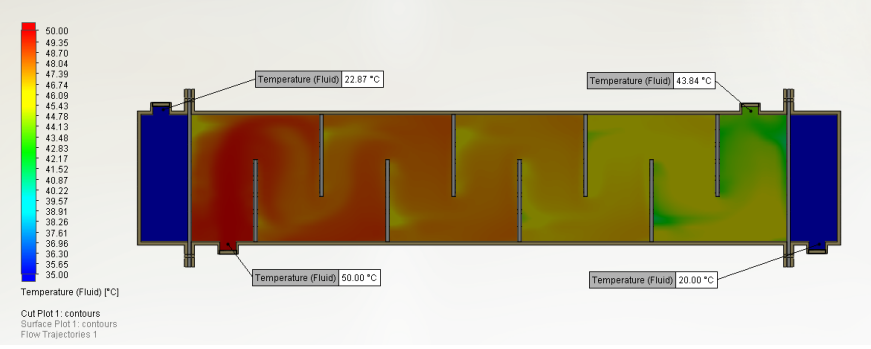


Figura 37. Simulación para un caudal 50% caliente – 100% frío.



Figura 38. Toma de temperaturas práctica 2.

Tabla 8. Relación de transferencia de calor prueba 2

Kg/s °C	50% Caliente – 100% Fría	
	Simulador	Práctica
T Tanque	50	48
T Ext In	50	43
T Ext Out	43,84	34
T INT In	20	29
T INT Out	22,87	31

Tabla 9. Evaluación del desempeño para la prueba 2.

Kg/s °C	50% Caliente – 100% Fría	
	Teórico	Práctica
Q (KW)	31,33	9,41
LMTD (K)	15	8,00
C Min (J/sk)	2091	1045,50
C Max (J/sk)	1809,07	2090,50
Q Max (KW)	62,73	14,63
ε	0,5	0,64
NTU	1	1,5
U (W/(m^2*C)	1510	956,25

9.3.3. PRUEBA 3: Apertura 25% de agua caliente y 100% de agua fría:

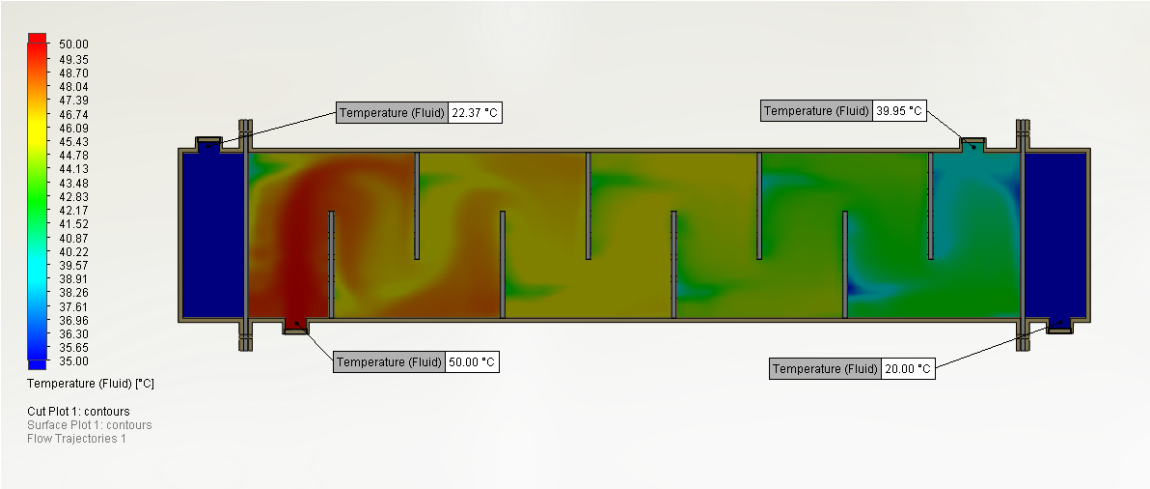


Figura 39. Simulación para un caudal 25% Caliente – 100% frío.



Figura 40. Toma de temperaturas práctica 3.

Tabla 10.Relación de transferencia de calor prueba 3

Kg/s	25% Caliente – 100% Fría	
°C	Simulador	Práctica
T Tanque	50	51
T Ext In	50	45
T Ext Out	39,95	30
T INT In	20	29
T INT Out	22,37	30

Tabla 11. Evaluación del desempeño para la prueba 3.

Kg/s °C	50% Caliente – 100% Fría	
	Teórico	Práctica
Q (KW)	31,33	7,84
LMTD (K)	15	5,17
C Min (J/sk)	2091	522,75
C Max (J/sk)	1809,07	2090,50
Q Max (KW)	62,73	8,364
ε	0,5	0,94
NTU	1	4,5
U (W/(m^2*C)	1510	1434,37

9.3.4. PRUEBA 4: Apertura 50% de agua caliente y 50% de agua fría:

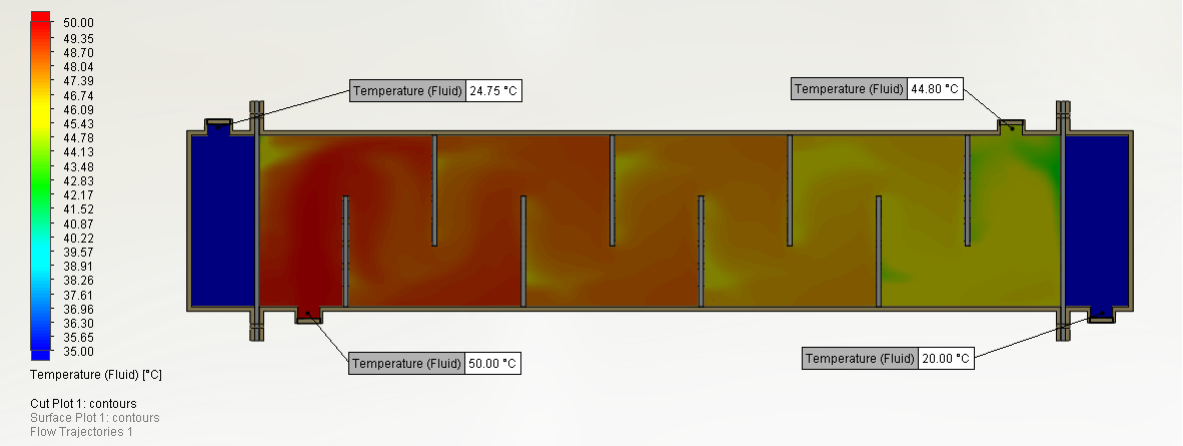


Figura 41. Simulación para un caudal 50% Caliente – 50% frío.



Figura 42. Toma de temperaturas práctica 4.

Tabla 12. Relación de transferencia de calor prueba 4

Kg/s °C	50% Caliente – 50% Fría	
	Simulador	Práctica
T Tanque	50	48
T Ext In	50	42
T Ext Out	44,8	32
T INT In	20	28
T INT Out	24,75	33

Tabla 13. Evaluación del desempeño para la prueba 4.

Kg/s °C	50% Caliente – 50% Fría	
	Teórico	Práctica
Q (KW)	31,33	10,45
LMTD (K)	15	6,17
C Min (J/sk)	2091	1045,50
C Max (J/sk)	1809,07	1045,25
Q Max (KW)	62,73	14,63
ε	0,5	0,71
NTU	1	2,5
U (W/(m^2*C)	1510	1593,75

9.3.5. Prueba 5: Apertura 100% de agua caliente y 100% de agua fría:

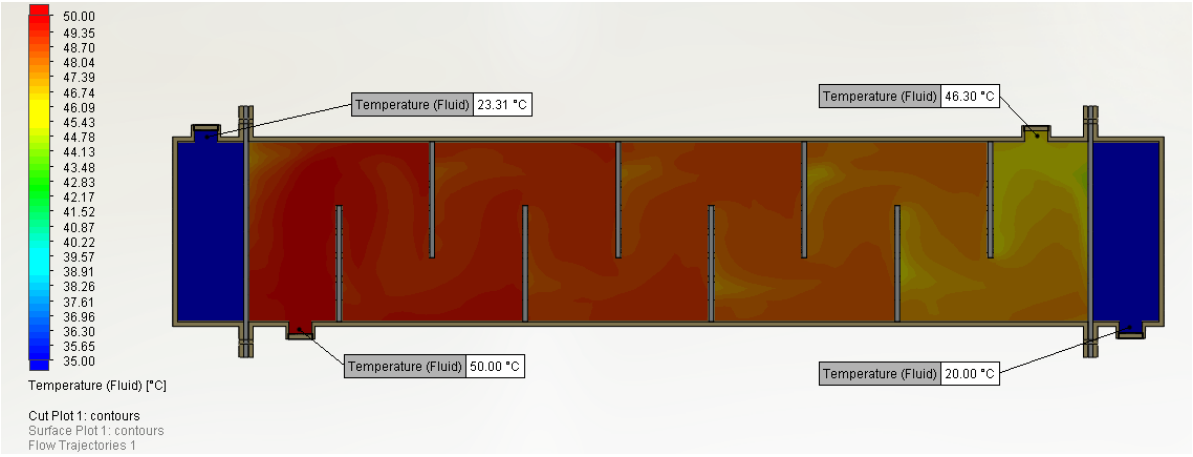


Figura 43. Simulación para un caudal 100% Caliente – 100% frío.



Figura 44. Toma de temperaturas práctica 5.

Tabla 14. Relación de transferencia de calor prueba 5

Kg/s °C	100% Caliente – 100% Fría	
	Simulador	Práctica
T Tanque	50	50
T Ext In	50	40
T Ext Out	46,3	27
T INT In	20	22
T INT Out	23,31	28

Tabla 15. Evaluación del desempeño para la prueba 5.

Kg/s °C	100% Caliente – 100% Fría	
	Teórico	Práctica
Q (KW)	31,33	27,18
LMTD (K)	15	8,00
C Min (J/sk)	2091	2091
C Max (J/sk)	1809,07	2090,5
Q Max (KW)	62,73	37,638
ε	0,5	0,72
NTU	1	2,5
U (W/(m^2*C)	1510	3187,5

El valor de U en la prueba 5 de 3187.5 W/m^2C está por encima del valor máximo de unidades de transferencia del agua, (Max. 1700), Cengel (2007); por lo que se interpreta como una

falla en el momento de la práctica, en la que posiblemente las condiciones iniciales no eran homogéneas en el fluido abastecido, alterando los valores reales obtenidos.

Con estas 5 pruebas realizadas se busca abarcar diferentes rangos de apertura posibles para realizar la práctica por parte de los estudiantes, sin embargo, el rango puede ser mayor y las combinación es pueden variar según se requiera.

El objeto de comparar el comportamiento del modelo simulado y el modelo práctico permite analizar las diferencias y posibles razones por las cuales los resultados no son del todo similares.

10. Encuesta de retroalimentación.

Se realiza una encuesta de satisfacción a estudiantes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas con el objetivo de obtener información en relación al dispositivo y su interacción con los manuales de operación del banco del laboratorio. Para el ejercicio se encuesta a 15 personas y se les pide evaluar el procedimiento descrito en la guía de laboratorio, una vez terminada, se diligencia una encuesta de retroalimentación con el objetivo de identificar oportunidades de mejora.

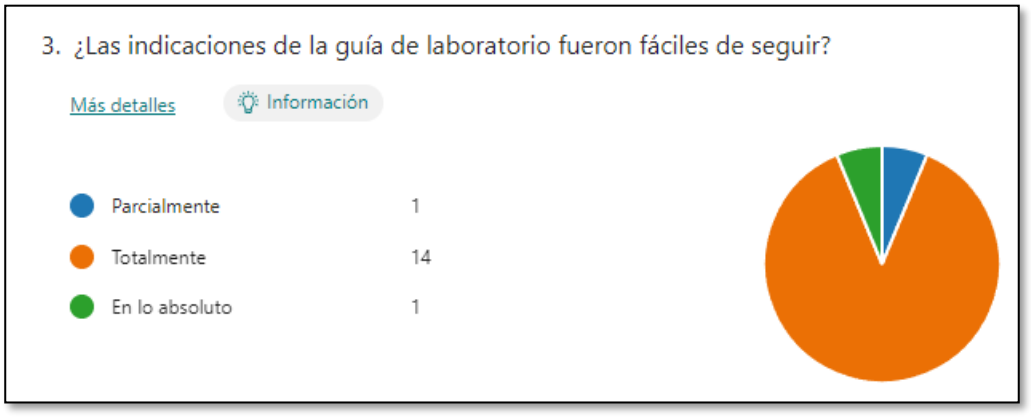


Figura 45. Pregunta 1, encuesta de retroalimentación.

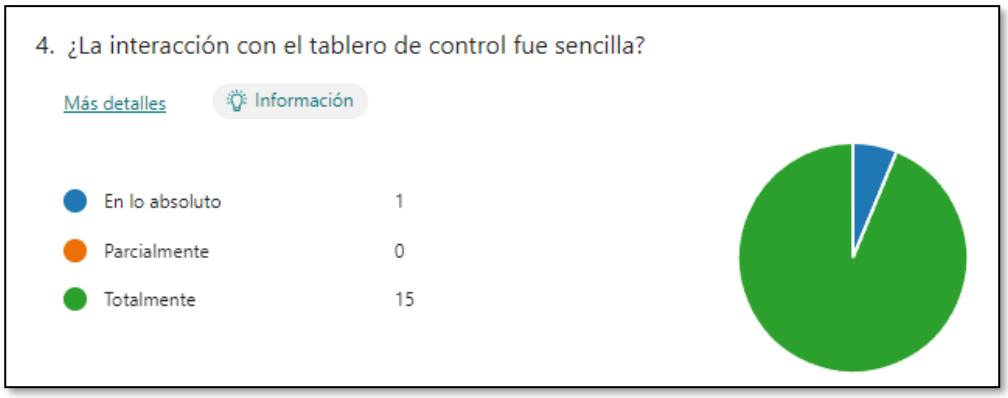


Figura 46. Pregunta 2, encuesta de retroalimentación

Se identificó que el 12,5% de los encuestados tuvieron dificultad para seguir el orden de las actividades, se incluye flujograma y demarcación de partes del tablero como acción de contención.

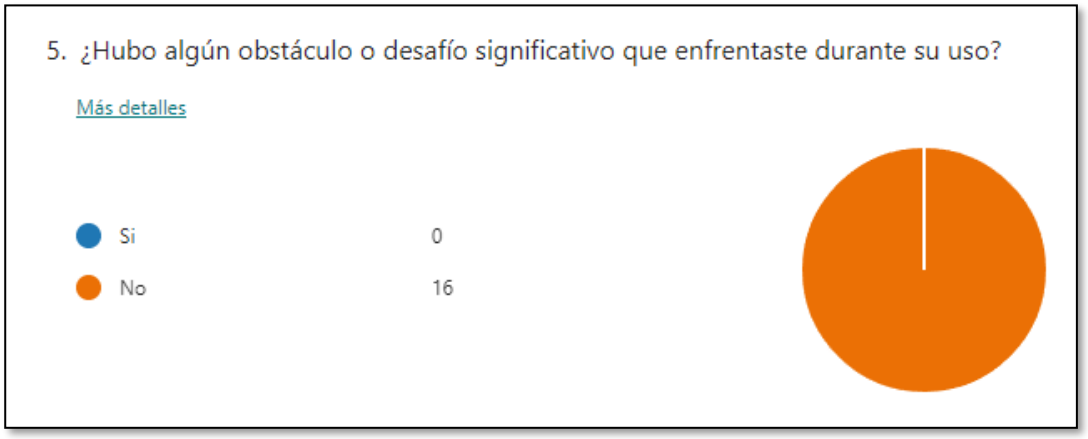


Figura 47. Pregunta 3, encuesta de retroalimentación.

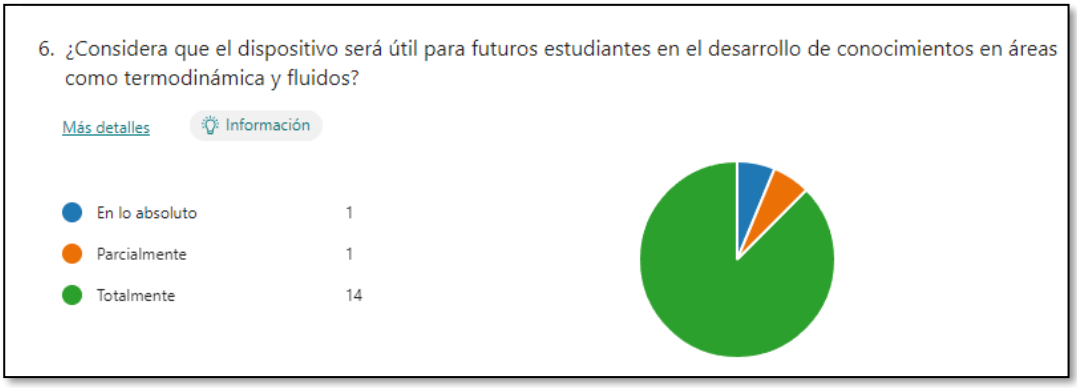


Figura 48. Pregunta 4, encuesta de retroalimentación.

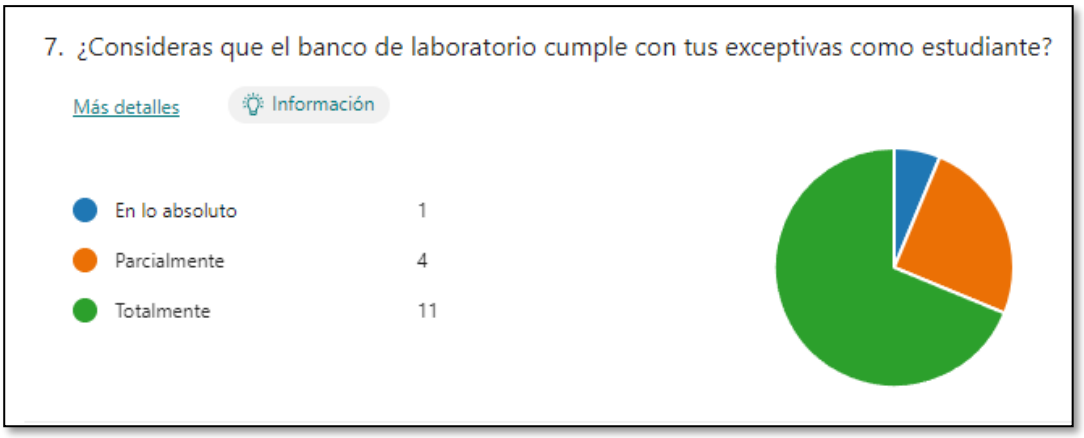


Figura 49. Pregunta 5, encuesta de retroalimentación.

Se pudo observar que el 87,5 % de los estudiantes encuestados consideran que el dispositivo les será útil para afianzar conocimientos en áreas de termodinámica y fluidos, por otro lado el 68,7% de los estudiantes consideran totalmente que el banco de laboratorio cumple con todas sus exceptivas para cuando esté en funcionamiento, el otro 31,3% considera que el dispositivo aún tiene varias oportunidades de mejora, oportunidades que se podrían llevar a cabo en futuros proyectos de grado de tecnología o ingeniería mecánica.

11. Resultados

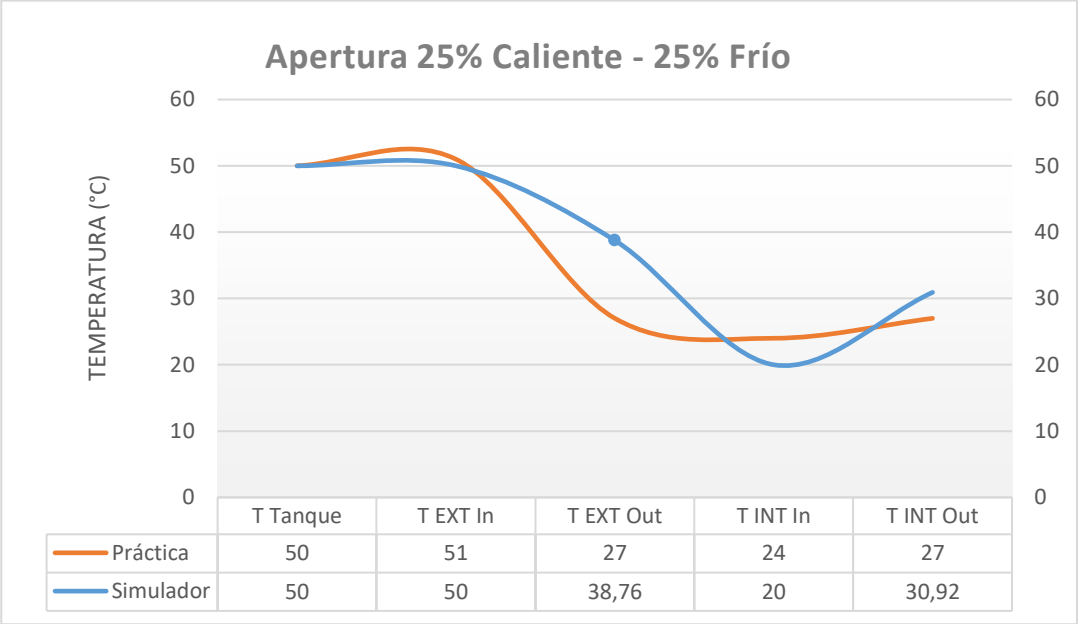
La toma de datos mediante el modelo práctico, nos permite obtener escenarios que podemos modificar de tal manera que el sistema pueda mediante variaciones y modificaciones durante su operación presentar resultados diferentes dada la transferencia por convección y la velocidad con la que el fluido circula.

Teniendo en cuenta el comportamiento de la simulación en SolidWorks, la prueba con mejor desempeño y mayor efectividad en la transferencia de calor es la prueba 1, como se observa en el Grafico 1, se alcanza un diferencial de temperatura de 11.24°C para el fluido caliente y una diferencia de 10.92°C para el fluido frio, lo que representa una transferencia de calor cercana de un fluido al otro, la diferencia se puede apreciar como perdida de la convección entre los materiales externos al agua.

Ahora bien, la prueba 5, presenta el diferencial de temperaturas menos congruente, tiene el caudal máximo que, circulando a lo largo de la prueba, al haber un mayor flujo de agua, la velocidad con la que se desplaza el fluido es mayor y por lo tanto tarda menos en moverse dentro de la tubería por la que circula el fluido frío y también por la ruta más corta del sistema. Por lo tanto, al haber una velocidad de circulación alta, la interacción del fluido caliente y el fluido frío es muy corta lo cual no permite una transferencia de calor eficaz para este modelo. Incluso en el modelo simulado y el modelo práctico, tiene el desempeño más bajo como se aprecia en el Grafico 4.

Existen oportunidades de mejora entre los resultados esperados y los obtenidos, dado a que el ciclo de trabajo es rápido, en el caso de las resistencias, estas se encuentran activadas dentro del

máximo de temperatura de 50°C, sin embargo, al recircular el agua el agua no logra estabilizarse y su temperatura caliente suele disminuir durante la prueba, por lo que solo se puede alcanzar los 50°C durante el tiempo de descanso de las bombas de 15 min.



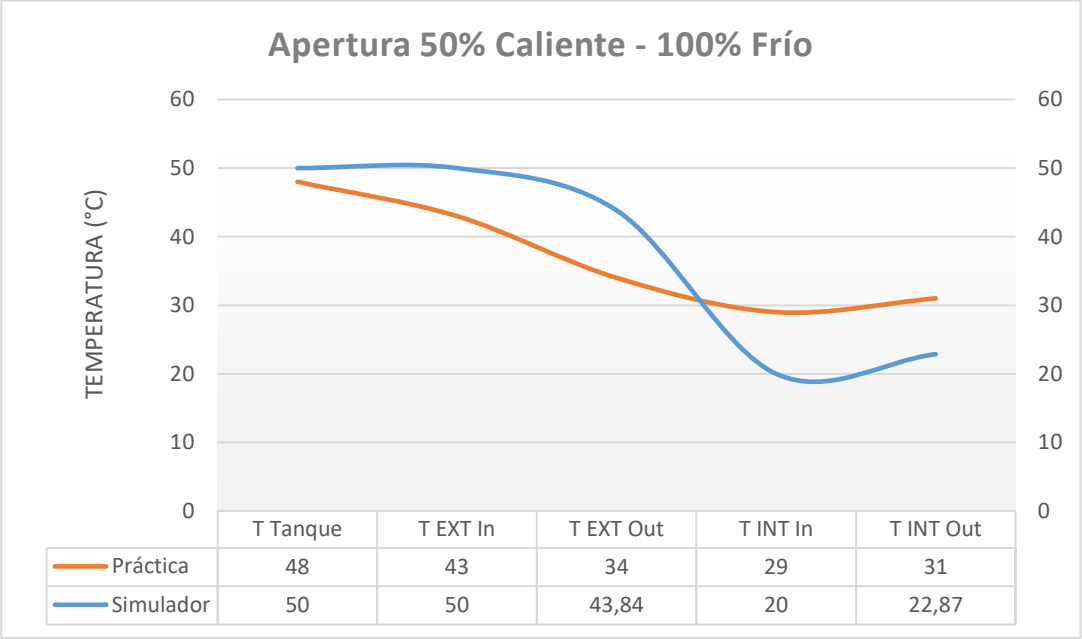
	T Tanque	T EXT In	T EXT Out	T INT In	T INT Out
Práctica	50	51	27	24	27
Simulador	50	50	38,76	20	30,92

Gráfico 1. Comparativa de resultados 1. Práctica 1.

A continuación, se muestra una comparativa entre las temperaturas en gráfico de barras con valores reales de temperatura durante la prueba 1, este gráfico simboliza en valores exactos el comportamiento de ambos fluidos y sus temperaturas.

En la prueba 2 al tener un caudal mayor en el agua fría que en el agua caliente, la transferencia de calor por convección es mínima debido al tiempo que tarda el agua fría en calentarse, al ser un flujo más rápido, no hay una transferencia significativa; esto para el modelo simulado, en la práctica la transferencia de calor es mínima, hay una caída rápida de temperatura del fluido caliente, sin embargo, no hay un aumento significativo en la temperatura del fluido frio, en comparación a la simulación, (Gráfico 2).

El objetivo de usar este tipo de gráficos, es identificar el punto de mayor temperatura, que es la entrada de agua caliente y los puntos con menor temperatura, los cuales deben ser lo valor de salida para el agua caliente y a su vez identificar los valores exactos que estos poseen.



	T Tanque	T EXT In	T EXT Out	T INT In	T INT Out
Práctica	48	43	34	29	31
Simulador	50	50	43,84	20	22,87

Gráfico 2. Comparativa de resultados Práctica 2.

Ahora bien, para comprobar la teoría del caudal de agua fría a mayor velocidad, se procede a disminuir el caudal de agua caliente a 0,125 kg/s, manteniendo el máximo flujo de agua fría de 0.5 kg/s, el comportamiento es muy similar al encontrar al encontrado en la prueba 3, no hay tanto en el modelo simulado como en el práctico una transferencia de calor significativa en el fluido frío, por lo tanto, es necesario variar las condiciones del fluido frío para obtener comportamientos diferentes.

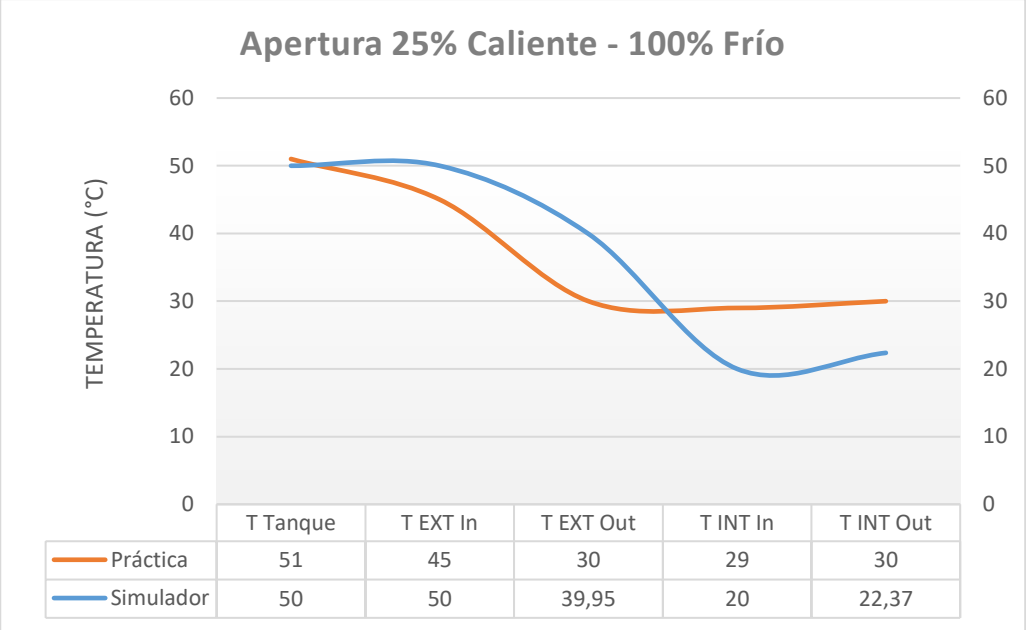


Gráfico 3. Comparativa de resultados Práctica 3.

Reduciendo el caudal a la mitad para ambos contenedores se busca tener una mejor transferencia, sin embargo, se observa que las temperaturas del fluido a partir de unos minutos se vuelve constante, esto debido a un problema de temperatura en el fluido frío, ya que la mayoría de pruebas se realizaron consecutivamente, la temperatura del agua estaba la mayor parte del tiempo sobre los 20°C, dado que con cada prueba realizada, se aumentaba cada vez más la temperatura del tanque frío, se alcanza un punto en el que las condiciones no cambian y no se observan resultados favorables, el sistema busca igualar ambas temperaturas durante la finalización del ciclo.

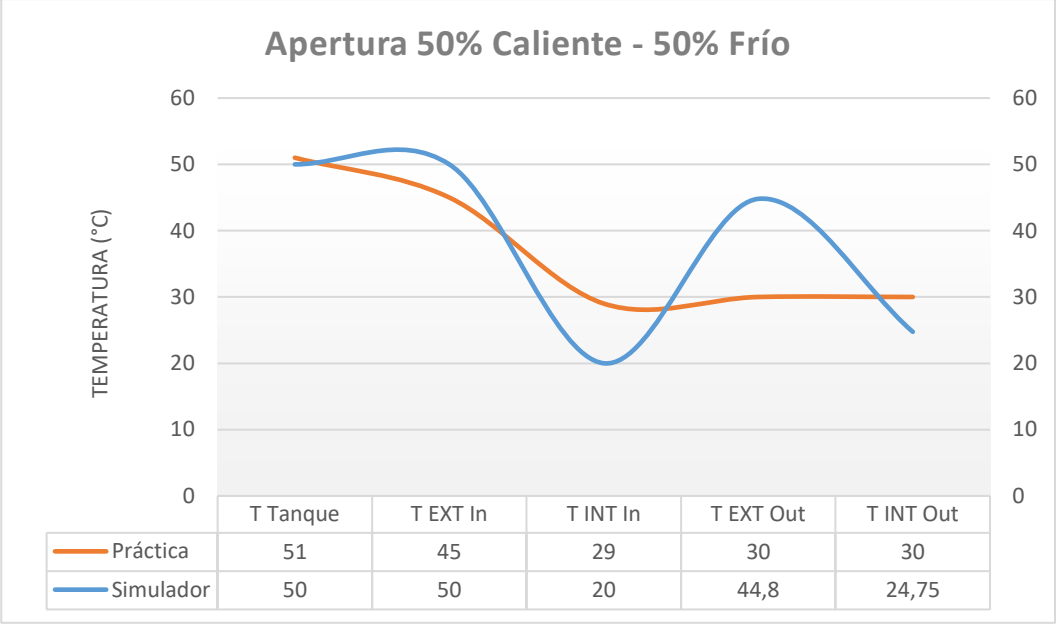


Gráfico 4. Comparativa de resultados Práctica 4.

Para evitar la misma situación en esta última, se espera a que las condiciones de ambos fluidos alcanzaran sus máximos y mínimos de temperatura esperados, para así obtener condiciones estables, esta vez, con el máximo caudal de 0.5 kg/s en ambos fluidos, caliente y frío; el modelo simulado mostraba un comportamiento poco favorable en la transferencia de calor, sin embargo, en la práctica se obtiene una diferencia de temperatura marcada por el fluido caliente y un aumento en la temperatura del fluido frío. Esto es debido a que la temperatura del fluido frío se encontraba en el menor punto posible y al tener contacto indirecto por convección se transfiere calor rápida y fácilmente de un fluido a otro, esto explica la pendiente negativa en la Grafica 4.

Sin embargo, a los 10 min de ciclo de trabajo, las condiciones vuelven a estancarse y las temperaturas de ambos fluidos frio y caliente tienden a igualarse, esto y en conclusión a las pruebas anteriores es causado por la falta de un refrigerador o dispositivo que disipe calor del fluido calentado que entra al recipiente de agua fría, en su ausencia, el fluido solo tiene a elevar su

temperatura sin un punto de caída durante el ciclo. Es importante que las condiciones de ambos fluidos se encuentren controladas para así poder obtener los valores esperados por lo modelos simulados, sin embargo, la práctica se torna extensa y difícil de controlar por la velocidad que lleva el fluido y a su vez, por la falta de un difusor de calor a la salida del fluido calentado, este puede ser una opción de mejora para posibles estudios, incorporar un radiador o ventilador hacía la salida del fluido del tanque frío, el cual ya viene pre calentado debido a la transferencia de calor.

Por último, nuestra práctica 5, tiene como objetivo analizar las condiciones del flujo a un porcentaje de apertura del 100% equivalente a 0,5 L/s, uno de los principales alcances con estas prácticas es lograr incentivar en los estudiantes la búsqueda de resultados que vayan de la mano de las variaciones en el sistema, muchos de los cuales son controlados manualmente. (Gráfico 5)

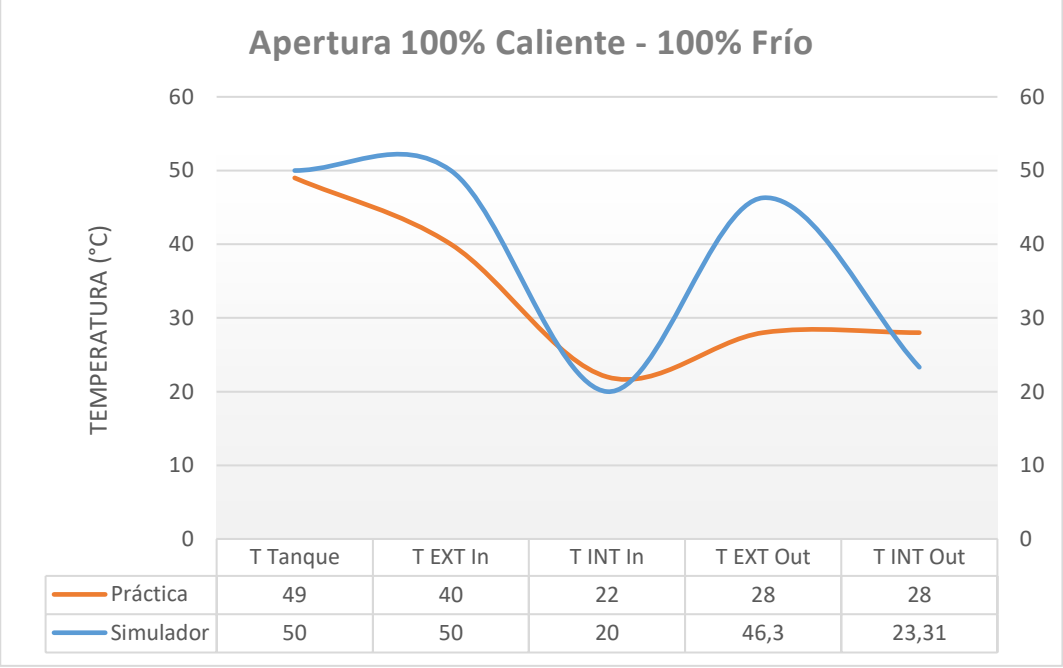
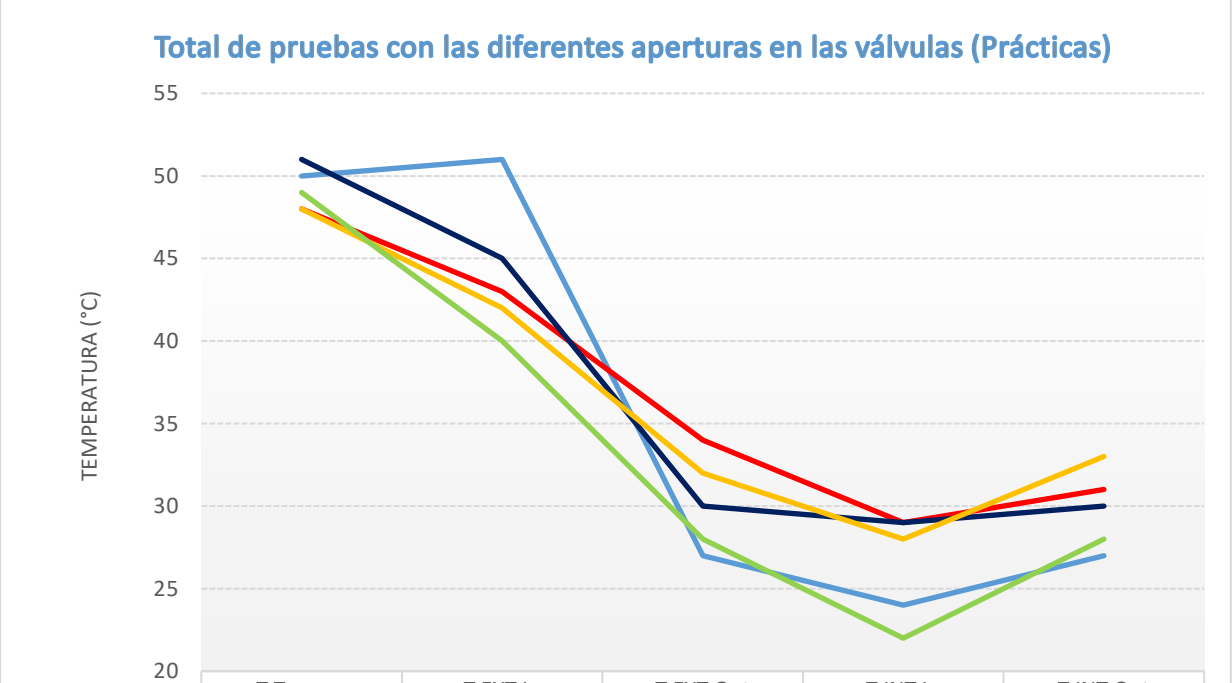


Gráfico 5. Comparativa de resultados Práctica 5.

De igual manera, se puede apreciar que, durante ciclos prolongados, el sistema tiende a generar un flujo mayor en alguno de los tanques, por lo cual en los manuales de operación se explica cómo controlarlo en caso de que suceda.

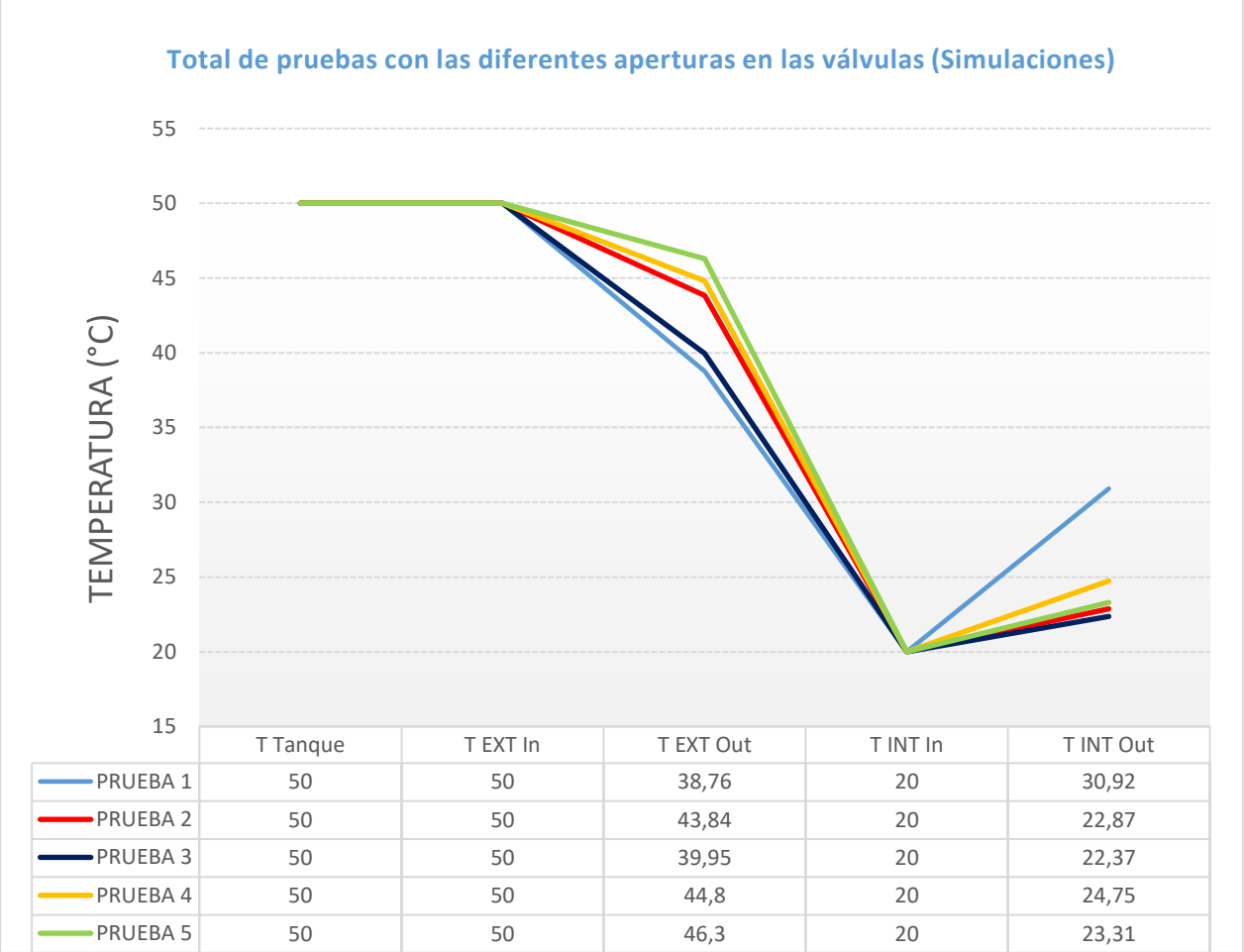
Para tener una visual más clara en cuanto al comportamiento de las 5 pruebas y su desempeño con respecto a las otras, se muestra el siguiente gráfico con el cual se observa que la Prueba 5 con apertura de agua de caliente del 100% y de agua fría del 100%, presenta el comportamiento más estable con una transferencia de calor de 6°C, seguida de la prueba 4 con un 50% de apertura para ambas válvulas con una transferencia de 5°C; por otro lado, de último lugar se ubica la prueba 3. ya que pese a tener una caída en la temperatura de la coraza, el fluido no logra transferir calor en gran proporción hacía el agua fría de la tubería.



	T Tanque	T EXT In	T EXT Out	T INT In	T INT Out
PRUEBA 1	50	51	27	24	27
PRUEBA 2	48	43	34	29	31
PRUEBA 3	51	45	30	29	30
PRUEBA 4	48	42	32	28	33
PRUEBA 5	49	40	28	22	28

Gráfico 6. Análisis conjunto pruebas prácticas.

Ahora se analiza el comportamiento de las pruebas mediante simulación las cuales arrojan resultados diferentes a los realmente obtenidos mediante las simulaciones.



	T Tanque	T EXT In	T EXT Out	T INT In	T INT Out
PRUEBA 1	50	50	38,76	20	30,92
PRUEBA 2	50	50	43,84	20	22,87
PRUEBA 3	50	50	39,95	20	22,37
PRUEBA 4	50	50	44,8	20	24,75
PRUEBA 5	50	50	46,3	20	23,31

Gráfico 7. Análisis conjunto pruebas simuladas.

En esta se puede notar que la prueba con mejor desempeño fue la prueba 1 dado que el diferencial de temperatura es mayor con 10.92°C, ya que es una simulación, las condiciones reales como material, ambientales y de cavitación, no se tiene en cuenta, por lo que esta prueba se encuentra como la de mejor desempeño; por el contrario, la prueba 3 es la que menor desempeño obtiene al tener un diferencial de transferencia menos, de alrededor de 2.37°C.

Se pueden apreciar oportunidades de mejora dentro de la construcción del intercambiador, como en el sistema de desagüe ya que este es indispensable para remover el agua al interior del intercambiador y puede convertirlo en un sistema flexible, puede adaptarse una manguera; se puede usar soldadura de aluminio de alta precisión para las uniones de los bafles y la tubería y así evitar fugas entre las cámaras; puede adecuarse un sistemas de refrigeración a la salida del agua fría posteriormente calentada, ya que así se lograría obtener las condiciones de temperatura de 20°C sugeridas en el proceso y aumentar el diferencial de temperaturas entre fluidos; por último debe realizarse una revisión de la ventana periódicamente con el fin de detectar fallos y rupturas, ya que esta debido a la presión de las bombas tiende a expandirse y contraerse al final de los ciclos (consultar planos de fabricación para mejoras sobre el diseño).

12. Conclusiones

- Las especificaciones técnicas del equipo fueron establecidas a partir de los requerimientos iniciales de diseño en el numeral 7.8, para un equipo didáctico de transferencia de calor de laboratorio, permitiendo la interacción directa del estudiante y la comprensión e interpretación del proceso mediante guías de laboratorio; Además, se logró determinar las características y parámetros necesarios incluidos en el numeral 9.2 durante su construcción y ensamble, finalmente se incluye en el numeral 10 el paso a paso para realizar el alistamiento previo y seguimiento para el correcto funcionamiento del intercambiador de calor durante las prácticas en la universidad.

- Se logra poner en marcha el banco de laboratorio de intercambiador de calor , cumpliendo con los requerimientos técnicos para intercambiadores de su tipo, la efectividad promedio lograda a lo largo de las pruebas es de 0.78, la cual es mayor a la efectividad teórica de 0.5; por otro lado, el coeficiente global de transferencia promedio es de 1765.87 W/m^2K, con una incidencia mayor en las pruebas 4 y 5, las cuales tienen mayor transferencia de calor hacía el agua fría; el desempeño del coeficiente global tiene influencia en el calor máximo producido durante la transferencia, con un promedio de 17.87 kW. La efectividad y el coeficiente global de transferencia son inversamente proporcionales, para las pruebas con mayor transferencia de calor la efectivada se encuentra en 0.72.

- El banco de laboratorio cuenta con la posibilidad de automatizar aún más procesos, debido a que el control eléctrico que se realiza mediante Arduino, placa de Software libre y microcontrolador reprogramable; otra propuesta, es la instalación de un dispositivo radiador que permita extraer el calor del agua fría, con el objetivo de mantener la estabilidad del equipo a largo plazo.

- Las guías de laboratorio son efectivas para facilitar la interacción de los estudiantes con el dispositivo, según lo demuestra una encuesta realizada, dirigida a la interpretación del manual de operación (Creación propia), esta se encuentra dirigida a 15 estudiantes, donde 86 % de los encuestados manifiestan que las indicaciones de la guía de laboratorio fueron de fácil seguimiento, por otro lado, el 93 % indicaron que el dispositivo es útil para futuros estudiantes en el desarrollo de conocimientos en áreas como termodinámica y fluidos, los resultados de esta encuesta se encuentran adjuntos en Anexos.

13. Referencias

Alfa Lavales, (2024), shell-and-tube heat exchangers, https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/tubular-heat-exchangers/shell-and-tube-heat-exchanger/

Álvarez Diaz, J. G., Armero Viveros, J. M., & Urrutia, C. A. (2020). Control de temperatura en intercambiadores de calor tipo coraza-tubo: una revisión realizada a la industria. *Entre Ciencia e Ingeniería*, *14*(27), 41–49. https://doi.org/10.31908/19098367.1763

Bach., D. & Alberto, S.. (2021). DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN MODULO INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA EL LABORATORIO DE INGENIERIA ELECTRONICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO. 93.

Caputo, A. C., Federici, A., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2022). On the design of shell-and-tube heat exchangers under uncertain operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, *212*, 118541. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118541

Caputo, A. C., Federici, A., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2022b). On the selection of design methodology for shell-and-tube heat exchangers optimization problems. *Thermal science and engineering progress*, *34*, 101384. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101384

Cruz, E. F. G. (2014). Diseño y fabricación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos para los Laboratorios de Termofluidos de la Universidad Santo Tomás. *Analysis of Micro-Earthquakes in the San Gabriel Mountains Foothills Region and the Greater Pomona Area As Recorded By a Temporary Seismic Deployment*, *1*(hal 140), 43. http://www.springer.com/series/15440%0Apapers://ae99785b-2213-416d-aa7ea12880cc9b9/Paper/p18311

Dong, J., Su, L., Qian, C., & Xu, W. (2013). Experimental study on thermal–hydraulic performance of a wavy fin-and-flat tube aluminum heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, *51*(1-2), 32-39. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.018

Ernesto, Q. R. J. (2021). *Diseño e implementación de un módulo intercambiador de calor para el Laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo*. https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/9742

Fernández, G. R. De, & Onh, J. (2007). *Intercambiadores*. *1*, 33.

Funke. (2012). Intercambiadores de calor de carcasa y tubos Modelos en serie y soluciones específicas para el cliente. *Quality Heat Exchangers*, http://www.funke.de/files/funke_rohrbuendel_wt_es.pdf

Guillén Cruz, EF (2020), Intercambiador de Calor Tubos Concentricos. https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2863/Guillenedinson2015.pdf

Gisela Montero Alpirez, (1985), Diseño de un intercambiador de tubos y coraza para laboratorio. Universidad Nacional Autónoma de méxico.

Gonz, D. (2011). *Intercambiador Equipo de transferencia de cambiar la entalpía de una corriente*.

Iriate; N. Galvan. (2016). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCASA Y TUBOS PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE*. *4*, 1–23.

Jin, H., Gu, Y., & Ou, G. (2021). Corrosion risk analysis of tube-and-shell heat exchangers and design of outlet temperature control system. *Petroleum Science*, *18*(4), 1219-1229. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.07.002

Moret, D. (7 de octubre de 2019). *7 consejos para pedir una hipoteca*. Rastreator. https://www.rastreator.com/hipotecas/consejos/pedir-una-hipoteca.aspx

Kelvion, (2023), Enhance design and performance, shell & tube single comfin, https://www.kelvion.com/products/product/shell-tube-single-comfin/

Laboratorios y Talleres de Mecánica, (2022), Hoja de vida de Intercambiador de calor en flujo cruzado P.A.Hilton H352, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, https://rita.udistrital.edu.co:23604/adminlab/inventario/equipo/fichatecnica/417894

Oviedo-Trespalacios, O., Angarita, L. P., Maestre-Meyer, M., & Correa, C. B. (2015). Building the Life-long Learning Competence in Undergraduate Engineering Students with a Laboratory Practice in Learning Curve. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *174*, 2021–2026. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.870

PA Hilton, (2022) , shell and tube heat eschanger, https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/tubular-heat-exchangers/shell-and-tube-heat-exchanger/

Parra, J. L., Leon, R. A., & Betancourt, D. A. (2017). *Banco didáctico de un intercambiador de calor (tubos y coraza) para laboratorio itm* (Vol. 1). ITM Institución universitaria.

Pretul, (2024), instructivo de Bomba periférica para agua, Modelo BOAP-1/2P3.

PULIDO, G. G. (2019). *DISEÑO DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR ALIMENTADOS POR ENERGÍA SOLAR GUILLERMO* (Vol. 1, Issue 69). Universidad autonoma de occidente.

R.W. Serth. (2007). Process Hear Transfer Pinciples and Applications.

Ricardo, E., & Salazar, B. (2021). *Diseño y construcción de un banco de pruebas termodinámico con un sistema intercambiador de calor de tubos y coraza Diseño y construcción de un*

banco de pruebas termodinámico con un sistema intercambiador de calor de tubos y coraza Andrés David Barón Vane (Vol. 1). Universidad Antonio Nariño Facultad.

Vasičkaninová, A., Bakošová, M., Čirka, Ľ., Kalúz, M., & Oravec, J. (2018). Robust controller design for a laboratory heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, *128*, 1297–1309. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.086

Zahrani, S. A., Islam, M. S., & Saha, S. C. (2021). Heat transfer enhancement of modified flat plate heat exchanger. *AppliedThermalEngineering*, *186*,116533.https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116533