



**Diseño y construcción de un intercambiador
de calor de carcasa y tubos para el
laboratorio de transferencia de calor de la
Universidad Antonio Nariño sede Tunja**

Jhon Alexander Pacanchique Ramírez

Carlos Eduardo Torres Castro

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2020

Diseño y construcción de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para el laboratorio de transferencia de calor de la Universidad Antonio Nariño sede Tunja

Jhon Alexander Pacanchique Ramírez

Carlos Eduardo Torres Castro

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

Director:

Msc. Omar F. Rojas Moreno

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Tunja, Colombia

2020

En este gran momento de mi vida quiero darle primeramente gracias a Dios por todas las bendiciones que me ha brindado durante este camino, a mis padres Carlos Julio Torres y Dora Inés Castro por todo su esfuerzo por apoyarme en cada momento que más lo necesite para que pudiera culminar mi carrera; a mis hermanas Angie Lizbeth Torres y Leidy Lorena Torres por su apoyo incondicional, por sus consejos que fueron de gran apoyo en los momentos difíciles, a mi novia Angie Lorena guerrero apoyo incondicional.

“EL ÉXITO DE LAS COSAS QUE UNO SE PROPONE EN LA VIDA SE LOGRA CON DEDICACION DISCIPLINA Y ESFUERZO “

Carlos Eduardo Torres Castro

Primeramente doy gracias a Dios a mi familia especialmente a mi padre Rafael Pacanchique y a mi madre Amilde Ramírez por su amor, trabajo y sacrificio todos estos años por eso gracias a ellos he logrado un triunfo más en mi vida, a mis hermanos, por los consejos que en momentos que necesité para seguir adelante con mi proyecto, a mi novia que me dio su apoyo incondicional y me enseñó que todo se puede con paciencia y dedicación.

Jhon Alexander Pacanchique Ramírez

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a la Universidad Antonio Nariño por tener buenos docentes los cuales nos ayudaron a formarnos intelectual y moralmente para ser buenos profesionales.

Un agradecimiento especial a los docentes Mercy Tatiana Villate, William Sanabria, Omar F. Rojas Moreno y demás docentes que nos brindaron su experiencia y su conocimiento durante el desarrollo de la tesis.

Para finalizar agradezco a todos los que hicieron parte del proceso de nuestra formación académica.

Resumen

El proyecto que se muestra a continuación es un intercambiador de calor de carcasa y tubo, el cual es comúnmente utilizado en la industria; por esta razón se vio la necesidad de implementar un banco didáctico destinado para el estudio de este tipo de intercambiadores, el cual cumple los siguientes objetivos de trabajo; diseño, construcción y validación, además de la elaboración de una guía de laboratorio. El diseño del intercambiador de calor se realizó siguiendo algunas especificaciones de la norma TEMA. La estructura del banco se diseñó teniendo en cuenta el espacio disponible en el laboratorio de fluidos, para el cual se utilizó el software llamado inventor; para la construcción se hizo la selección de los materiales más apropiados; En la validación se realizaron pruebas al intercambiador, como la circulación del fluido caliente entre los tubos y el frío al interior de la carcasa el cual puede ir en sentido paralelo y contraflujo, esto con el fin de evidenciar y calcular resultados de transferencia de calor presentes en el equipo; por último se planteó una guía laboratorio con la cual los estudiantes que estén cursando las materias de transferencia de calor y termodinámica podrán fortalecer sus conocimientos y comparar los cálculos teóricos con los prácticos, y así poder tener una idea más clara del funcionamiento de los intercambiadores de calor.

Palabras clave: Transferencia de calor, Diseño, intercambiador, coraza y tubo, norma TEMA, banco de prueba.

Abstract

The project shown below is a shell and tube heat exchanger, which is commonly used in industry. For this reason, it was necessary to implement a didactic bank for the study of this type of exchangers, which meets the following work objectives: design, construction and validation. In addition to the development of a laboratory guide. The design of the heat exchanger was carried out following some specifications of the TEMA standard. The structure of the bench was designed taking into account the space available in the fluid laboratory, for which the software called inventor was used; for the construction the most appropriate materials were selected. In the validation, tests were carried out on the exchanger, such as the circulation of the hot fluid between the tubes and the cold one inside the shell, which can go in parallel and counter flow, this in order to show and calculate the heat transfer results present in the team.

Finally, a laboratory guide was proposed with which the students who are studying the subjects of heat transfer and thermodynamics will be able to strengthen their knowledge and compare the theoretical calculations with the practical ones, and thus be able to have a clearer idea of the operation of heat exchangers.

Keywords: Heat transfer, Design, exchanger, shell and tube, TEMA standard, test bench.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras.....	IX
Lista de tablas	XI
Introducción y antecedentes	1
1. Marco teórico.....	1
1.1 Historia del intercambiador.....	1
1.2 Dispositivos de transferencia de calor.....	1
1.2.1 Calderas.....	2
1.2.2 Enfriadores.....	2
1.2.3 Evaporador	3
1.2.4 Torres de enfriamiento.	3
1.2.5 Intercambiador de calor.....	3
1.3 Tipos de intercambiadores de calor	3
1.3.1 Según la dirección del flujo	3
1.3.2 Según la norma TEMA	5
1.3.3 Según su estructura	5
1.4 Intercambiadores de carcasa y tubos	8
1.4.1 Clasificación.....	8
1.4.2 Componentes.....	10
1.5 Introducción a los materiales de diseño	15
1.5.1 Aceros al carbono	15
1.5.2 Aceros inoxidables	16
1.5.3 Acero inoxidable 316L.....	16
1.6 Mecanismos de transferencia de calor	16
1.6.1 Conducción	16
1.6.2 Convección	17
1.6.3 Radiación.....	19
2. Diseño y construcción del banco de pruebas del intercambiador carcasa y tubo	20
2.1 Información para el diseño	20
2.1.1 Densidad.....	20
2.1.2 Viscosidad.....	21
2.1.3 Calor específico.	21
2.1.4 Conductividad térmica.....	21

2.2	Diseño del intercambiador de calor	22
2.2.1	Temperatura promedio de los tubos	22
2.2.2	Velocidad máxima	22
2.2.3	Número de Reynolds	22
2.2.4	Relaciones del número de Nusselt promedio	23
2.2.5	Coeficiente individual de transferencia de calor	23
2.2.6	Caudal de un tubo	23
2.2.7	Velocidad en cada tubo	24
2.2.8	Longitud de los tubos.....	24
2.2.9	Número de Nusselt	24
2.2.10	Balance térmico.....	24
2.2.11	Diferencia de temperatura media logarítmica.....	25
2.2.12	Razón de transferencia de calor	26
2.2.13	Coeficiente global de transferencia de calor (U).....	26
2.2.14	Flujo másico.	26
2.2.15	Razón de capacidad calorífica	27
2.2.16	Relación de capacidades.....	27
2.2.17	Potencia máxima que podrá transferir el intercambiador de calor.....	27
2.2.18	Efectividad de un intercambiador de calor	28
2.2.19	Número de unidades de transferencia (NTU).....	28
2.2.20	Relación del NTU flujo paralelo.....	29
2.2.21	Relación del NTU flujo contraflujo.....	29
2.2.22	Análisis de convección interna de la tubería del banco de tubos.	31
2.2.23	Balance de energía y sistema de ecuaciones para resolución de variables del sistema	33
2.2.1	Calculo para el aislante térmico	41
2.2.2	Cálculo para la resistencia térmica de la pared del tubo	42
2.3	Construcción del intercambiador	45
2.4	Diseño del banco	47
2.4.1	Condición inicial del laboratorio de fluidos.	47
2.5	Construcción del banco	47
2.6	Ensamble del intercambiador al banco.	51
3.	Análisis de resultados	58
4.	Conclusiones y recomendaciones	67
4.1	Conclusiones.....	67
4.2	Recomendaciones.....	68
	Bibliografía	89

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo	5
Figura 2. Clasificación general de los dispositivos de transferencia de calor.	2
Figura 3. Flujo paralelo y contraflujo en intercambiadores.	4
Figura 4. Intercambiador de placas.....	6
Figura 5. Intercambiador refrigerado por aire.....	7
Figura 6. Intercambiador de doble tubo.	7
Figura 7. Intercambiador calor coraza y tubo.	8
Figura 8. Intercambiador de cabezal flotante interno (tipo AES)	9
Figura 9. Intercambiador de cabezal flotante con empaque exterior.	9
Figura 10. Intercambiador de cabezal y tubos integrados.	10
Figura 11. Intercambiador de lámina y tubo fijo.	10
Figura 12. Posición de los tubos de un intercambiador de calor.	11
Figura 13. Tubo liso y tubo corrugado.	12
Figura 14. Designación de las secciones de intercambiadores tubo-carcasa TEMA.	14
Figura 15. Tapas intercambiador de calor coraza y tubos	15
Figura 16. Conducción de calor	17
Figura 17. Convección forzada y convección natural o libre.	18
Figura 18. Ejemplo de transferencia de calor por radiación.	19
Figura 19. Datos de entrada para convección interna en la tubería.	31
Figura 20. Red de resistencia térmica y áreas superficiales.	42
Figura 21. Tubo corrugado de acero 316L.....	45
Figura 22. Lámina de acero inoxidable	45
Figura 23. Cabezal de acero inoxidable 316L.....	46
Figura 24. Operaciones de soldadura y fijación de recubrimiento	46
Figura 25. Espacio destinado para la ubicación del banco de pruebas	47
Figura 26. Medición de componentes para banco de prueba.....	48
Figura 27. Corte del material	48
Figura 28. Operación de soldadura.....	49
Figura 29. Unión de las piezas por TIG.....	49
Figura 30. Aplicación de recubrimiento de pintura estructura metálica.....	50
Figura 31. Pintura de láminas de madera que sujetan intercambiador y electrobomba...50	50
Figura 32. Banco terminado.....	51
Figura 33. Ensamble del intercambiador en el banco de pruebas.....	52
Figura 34. Adaptación en el laboratorio y ensamble de accesorios y tubería.....	52
Figura 35. Adaptación de sensores y sellado con masilla.	53

Figura 36. Sistema de flujo paralelo	59
Figura 37. Perfil de variación de temperatura en flujo paralelo	60
Figura 38. Sistema de contraflujo	61
Figura 39. Perfil de variación de temperatura en contraflujo	62
Figura 40. Variación del calor en el fluido caliente y frío	63
Figura 41. Variación de calor en el sistema contraflujo.....	64
Figura 42. LMTD en flujo paralelo y contraflujo	65

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Parámetros del fluido de a 20°C.....	21
Tabla 2. Parámetros de electrobomba y calentador.	29
Tabla 3. Corrección del margen de error.....	35
Tabla 4. Constantes m1 y m2	38
Tabla 5. Constantes K1 y n.....	38
Tabla 6. Carcasa.....	43
Tabla 7. Cabezal.....	44
Tabla 8. Tubos.....	44
Tabla 9. Placa.....	44
Tabla 10. Accesorios para conexión hidráulica del intercambiador	53
Tabla 11. Accesorios mecánicos y digitales	56
Tabla 12. Características técnicas	58
Tabla 13. Datos en paralelo	66
Tabla 14. Datos en contraflujo	66

Introducción y antecedentes

Los intercambiadores de calor son equipos que permiten la circulación interna de fluidos con la finalidad de transferir energía calorífica de un medio a otro; en un caso particular como los intercambiadores de carcasa y tubo, el intercambio de energía calorífica entre los tubos internos con el fluido externo cubierto por la carcasa, se logra a través de un fluido calentador o un refrigerante. Este tipo de intercambiador de calor es ampliamente utilizado en todo tipo de industria, especialmente en la química y petroquímica, generando en los procesos ventajas competitivas debido al ahorro y uso eficiente de la energía que proporcionan; por tanto, para los diferentes usos y factores donde se requieren equipos de intercambio de calor es muy importante conocer el funcionamiento de los mismos, para lograr de ellos un óptimo desempeño y sacarles el mayor provecho.

Existen diversos tipos de intercambiadores de calor, clasificados según la dirección de flujo: paralelo, contraflujo y flujo cruzado; según su estructura: de placas, de carcasa y tubo, refrigerados por aire y de tubos concéntricos. A partir de los diversos tipos de intercambiadores de calor, se optó por el modelo propuesto por Ericsson, es decir, un intercambiador de calor tipo carcasa y tubo (Cengel, s. f.-a). Debido a que éste tiene un amplio uso a nivel industrial y su funcionamiento no es complicado; además éste modelo puede ser utilizado con fines didácticos, como laboratorios de práctica.

En el año de 1852, el ingeniero e inventor John Ericsson, propuso el modelo del primer intercambiador de carcasa y tubos, el cual lo utilizó para el condensador de las máquinas de vapor de la época, para el diseño se basó en los principios básicos de la termodinámica y en los ciclos de Carnot, donde el equipo trabaja absorbiendo un incremento de calor y lo cede a uno de baja temperatura, logrando producir un trabajo sobre el exterior (Subirtupagina.com, s. f.).

La estructura de carcasa y tubo es un acoplamiento básico de modelos anteriores de los intercambiadores de calor, debido a que los sistemas de tubos son muy eficientes al

realizar el intercambio de calor, el fluido que circula por el intrínseco de los tubos se denomina flujo interno y el fluido que circula por el interior de la carcasa flujo externo. Para comprender mejor la transferencia de calor se explicará de manera breve: dos fluidos a disímil temperatura entran en contacto a través de la pared del tubo, y el calor se transfiere del fluido más caliente al más frío, hasta que uno y otro alcanzan un equilibrio de temperatura (*Intercambiadores de Calor - Ingeniero Marino, s. f.*). Se ha optado por utilizar tubos corrugados en el diseño y construcción de los intercambiadores de calor, debido a que su estructura helicoidal permite la generación de flujos turbulentos, aumentando las tasas de transferencia de calor que en comparación de los tubos lisos son más altas (*Intercambiadores de Calor Tubulares / De Carcasa y Tubos / SACOME, s. f.*).

Entidades como la UOP (Universal Oil Products) y la ASM (American Society of Metals) brindan información técnica y orientación para escoger el material más adecuado para la construcción de un intercambiador de carcasa y tubo, dependiendo de las características de los fluidos, como las temperaturas y la variación de presiones intercambiador (Barragán & Landázuri, s. f.).

.Hay diferentes mecanismos de transferencia de calor: cuando se encuentra un gradiente de temperatura en un medio fijo, que puede ser sólido o un fluido, se define como transferencia de calor por conducción; en cambio, la expresión convección se refiere a la transferencia de calor que ocurre entre una superficie y un fluido en circulación a diferentes temperaturas; por último, la radiación térmica es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas que se genera por el movimiento térmico de partículas en un material.

La transferencia de calor por conducción es uno de los mecanismos de transferencia de calor que se da en escala atómica; la energía en forma de calor que viaja a través de la materia se evidencia gracias al movimiento molecular, es decir, el calor se traslada de la zona más caliente a la más fría, produciendo un flujo de calor. La convección puede ser de dos tipos, natural o forzada; la primera se da de acuerdo a la diferencia de densidades de la materia, en la cual el movimiento de estos es relativamente nulo, y la segunda, cuando se obliga al material a moverse inmediatamente impulsado por ventiladores. La transferencia de calor por radiación es un método de transferencia de calor en el cual la energía se da a través de fotones u ondas electromagnéticas. La radiación puede extenderse sin limitación ya que no necesita de un medio, es decir puede hacerlo inclusive en el vacío (*Por qué los tubos corrugados en HRS Heat Exchangers, s. f.*).

Existen diferentes formas de optimizar el diseño y construcción de intercambiadores de carcasa y tubos, empezando por la elaboración de un diseño que facilite el proceso de construcción, modificaciones estructurales y de materiales en los componentes y la selección y modificación de las propiedades del fluido de trabajo; algunos trabajos solamente llegan hasta el diseño, razón por la que se determinó que uno de los objetivos en este proyecto es llegar a la validación y construcción del intercambiador diseñado.

De acuerdo con la tesis de diseño, construcción y operación de un intercambiador de calor de carcasa y tubo destinado para el laboratorio de la universidad internacional SEK de Perú (Barragán & Landázuri, s. f.), se evidencia la pérdida de calor en el tanque del fluido caliente, porque la parte superior se encontraba descubierta, esta mejora se puede implementar al construir el intercambiador.

Al pasar el tiempo se han encontrado mejoras que ayudan en el diseño y mejoran la transferencia de calor en los intercambiadores de calor de carcasa y tubos, esto se evidencia en un estudio reciente realizado por la universidad de Cantabria del país Vasco (*aportaciones para el uso de nano fluidos en un intercambiador de calor de carcasa y tubo*, s. f.-a), en el cual plantean mejoras en el fluido reemplazándolos por nano fluidos en intercambiadores de calor carcasa y tubo; esta mejora genera ahorros de energía, la viscosidad y la densidad aumentan, mejorando la conductividad térmica.

Objetivo general

Diseñar y construir un intercambiador de calor de carcasa y tubos para el laboratorio de transferencia de calor de la universidad Antonio Nariño.

Objetivos específicos

1. Diseñar y calcular los parámetros de funcionamiento del intercambiador.
2. Construir el intercambiador de acuerdo con las especificaciones definidas anteriormente.
3. Validar de forma experimental la funcionalidad del intercambiador de acuerdo a parámetros de diseño.
4. Realizar una guía de trabajo experimental para la realización de prácticas académicas en el área de transferencia de calor.

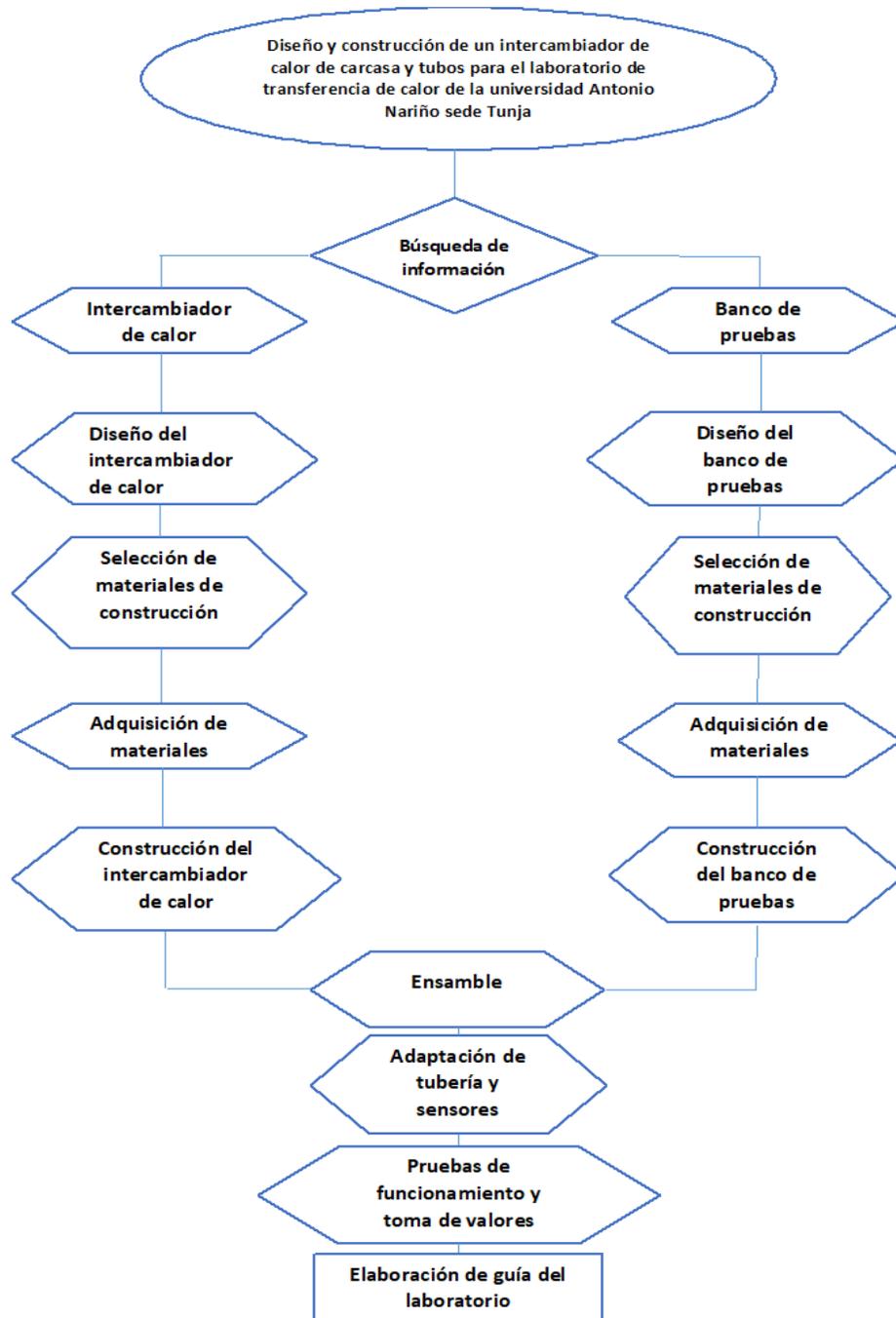
Alcance y limitaciones

Diseñar e implementar un banco de pruebas de un intercambiador de calor cuya estructura se compone de carcasa y tubos, el cual les servirá a los estudiantes de la FIMEB que estén cursando la materia de transferencia de calor y termodinámica, dicho banco está basado en modelos similares los cuales poseen la capacidad de evaluar condiciones de flujo y contraflujo al ingresar un fluido (se utilizara agua), se podrán adquirir varios datos como las temperaturas de entrada y salida, los coeficientes de transferencia de calor, la efectividad del intercambiador, entre otros, estos datos les permitirá adquirir un mejor conocimiento sobre el funcionamiento de los intercambiadores de calor.

Una limitación será el tiempo y la condición sanitaria que se está presentando en estos días.

Metodología

Para el desarrollo se llevarán a cabo las siguientes etapas; en la etapa de **diseño** se partió de la búsqueda de información sobre los criterios de diseño de intercambiadores y bancos de prueba, para luego calcular y diseñar estos dos componentes; en la etapa de **construcción** se procede a seleccionar y adquirir los materiales correspondientes para construir y ensamblar el intercambiador en el banco de pruebas, seguido a esto se adaptan los accesorios correspondientes como la tubería y los sensores; en la etapa de **validación** se comprueba el correcto funcionamiento del banco de pruebas de intercambiador mediante ensayos en las dos direcciones de flujo (paralelo y contraflujo), de esta manera poder tomar datos experimentales y hacer un análisis teórico de los mismos; por último elaborar la **guía de trabajo** correspondiente para la realización de experiencias de laboratorio. Para la realización del intercambiador se diseñó, construyó y validó un intercambiador de carcasa y tubo que servirá como banco de prueba en laboratorios de transferencia de calor en la Universidad Antonio Nariño sede Tunja; en la figura 1 se presentan las etapas desarrolladas.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo

Fuente: Autores

1. Marco teórico

1.1 Historia del intercambiador

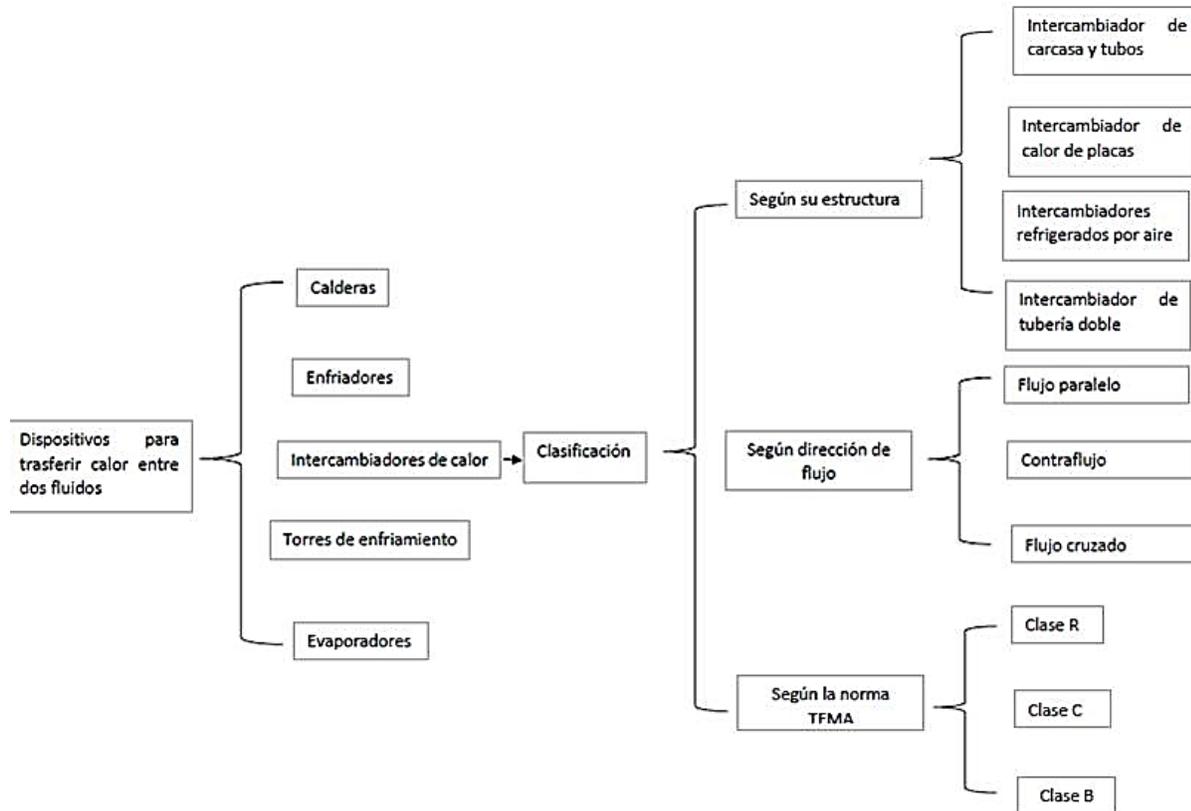
A mediados del siglo XIX en los inicios de la Revolución industrial, el ingeniero e inventor John Ericsson inventó el intercambiador de carcasa y tubo, el cual implementó para la condensación de vapor de embarcaciones que transportaban mercancías y personas. Gracias a ese primer diseño, se implementaron diferentes formas y configuraciones de manera global en todo tipo de industrias tales como: Alimentaria, automotriz, petrolera, petroquímica, química, refrigeración, en el sector energético y procesos de generación de energía.

Los primeros intercambiadores estaban contruidos de forma rústica, con materiales metálicos de baja calidad comparados con los modernos, debido a que las industrias metalúrgica y siderúrgica no contaban con un buen desarrollo tecnológico para su construcción(*I. BOSQUEJO HISTÓRICO*, s. f.). Los intercambiadores fueron adaptándose en diversos dispositivos, de acuerdo al sector industrial o de aplicación en el que se les empezó a considerar de importancia para la gestión energética de los procesos, de los que se mencionan a continuación los de mayor uso.

1.2 Dispositivos de transferencia de calor

La figura 2 presenta la clasificación general de los dispositivos de transferencia de calor, dentro de los que se encuentran los intercambiadores de calor, objeto de éste trabajo.

Figura 2. Clasificación general de los dispositivos de transferencia de calor.



Fuente: Autores

1.2.1 Calderas.

Son sistemas que se utilizan en diversos procesos térmicos como producción de agua caliente y vapor para diferentes fines industriales; este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, estando el fluido en estado líquido y al calentarse cambia su fase a vapor saturado(Newhall & Dzurisin, 1988).

1.2.2 Enfriadores

Son máquinas frigoríficas que sirven para enfriar un líquido que por lo general es agua; este fluido circula desde el exterior mediante un bombeo mecánico(ENFRIADOR INDUSTRIAL - Ale Mendez Beristain, s. f.).

1.2.3 Evaporador

Es un sistema de intercambio de calor diseñado para la transferencia de energía térmica desde un medio a enfriar hacia un refrigerante (*Transferencia de Calor en Evaporadores | Evaporación | Líquidos*, s. f.).

1.2.4 Torres de enfriamiento.

Son un tipo de intercambiadores utilizados para enfriar un fluido utilizando el aire del ambiente, utilizando el principio de enfriamiento evaporativo (*¿Qué es y cómo funciona una torre de enfriamiento?*, s. f.).

1.2.5 Intercambiador de calor

Es una máquina que permite el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas hasta obtener un punto de equilibrio de éstas. La transferencia de calor que se presenta se da por convección y conducción (Andres Cullay, 11:28:37 UTC). Por ser éste el tema de trabajo, se detallan en el siguiente numeral.

1.3 Tipos de intercambiadores de calor

El intercambiador de calor permite la transferencia de calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas, sin que se puedan mezclar entre sí. En ingeniería se encuentran diversas clasificaciones de los intercambiadores, según criterios técnicos y estándares internacionales que se mencionan a continuación.

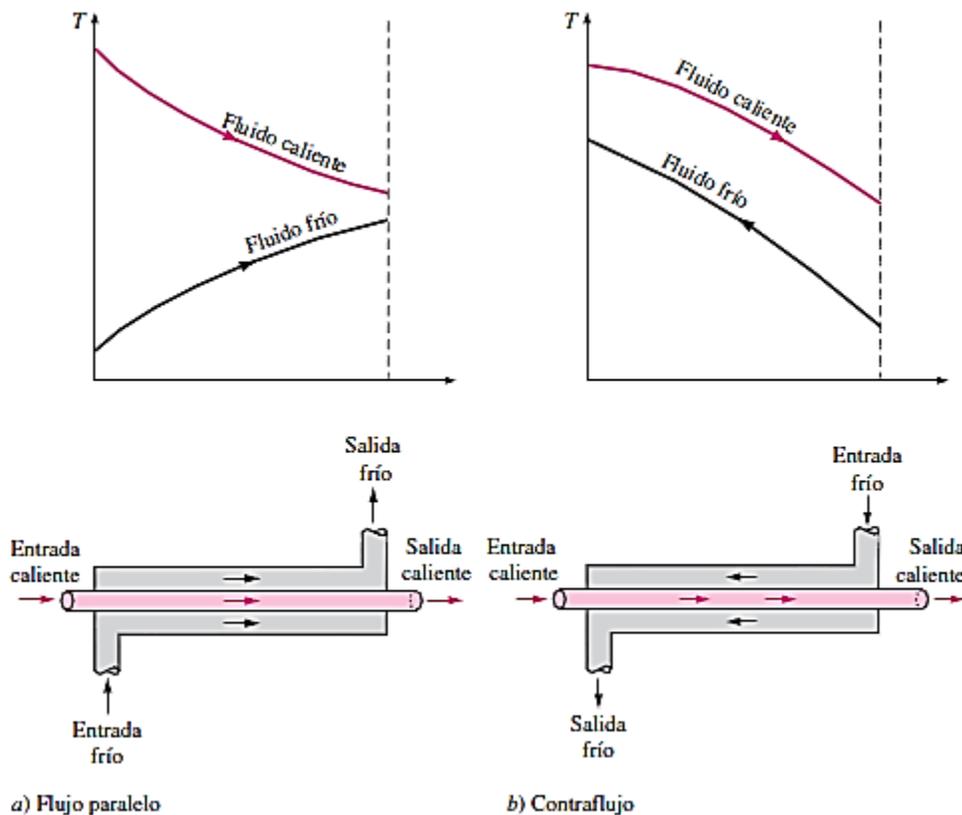
1.3.1 Según la dirección del flujo

Por la dirección en la que se cruzan los fluidos que circulan al interior, los intercambiadores de calor pueden ser de:

- **Flujo paralelo.** Sucede cuando el fluido que circula por el interior de los tubos y en el exterior es decir el de la carcasa, fluyen en la misma dirección. Debido a que presentan una diferencia de temperatura significativa el calor se transfiere del fluido de mayor temperatura hasta el de menor temperatura intentando alcanzar el equilibrio térmico entre ellos, veáse en la figura 2 (Cengel, s. f.-a).

- **Contraflujo.** Se denomina contraflujo porque el fluido caliente que cruza por el interior de los tubos va en dirección contraria al flujo del fluido frío que pasa sobre los tubos y al interior de la carcasa. Este proceso suele ser más eficiente en la transferencia de calor, veáse en la figura 3.

Figura 3. Flujo paralelo y contraflujo en intercambiadores.



Fuente: (Cengel, s. f.-b)

- **Flujo cruzado.** En este tipo el fluido que circula por el interior y por la superficie de los tubos formara un ángulo de 90° con el fluido que pasa por e interior de estos. Generalmente es utilizado para fluidos que presentan cambios de fase(Cengel, s. f.-a).

1.3.2 Según la norma TEMA

(The Tubular Exchange, Manufacturers Association)

Novena edición-2007 fue elaborada por el comité técnico de intercambiadores de calor.

Es una asociación comercial de fabricantes de intercambiadores de calor de carcasa y tubo han sido los principales gestores de investigación y desarrollo de los intercambiadores de calor durante más de 60 años; La norma TEMA ha logrado una aceptación en el mundo como pionera en el diseño mecánico de carcasa y tubo por esta razón se elige trabajar con esta norma .

- **Clase R:** Las normas TEMA para intercambiadores de calor clase R especifican el diseño, materiales de intercambiadores de calor no sometidos a llama, para requerimientos rigurosos en la industria del petróleo y procesos relacionados.
- **Clase C:** Esta clase especifica el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometidos a la llama, para requerimientos normalmente moderados de procesos comerciales.
- **Clase B:** Esta clase especifica el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometidos a la llama, para el servicio de los procesos de la industria química.

En este trabajo la clase que más se adapta es la clase C; en comparación con las otras dos clases esta no está sometida a presiones muy altas ni a manejo de químicos, además el intercambiador clase C se construyó con fines didácticos para que los estudiantes de la UAN puedan llevar llevar los conocimientos teóricos a la práctica.

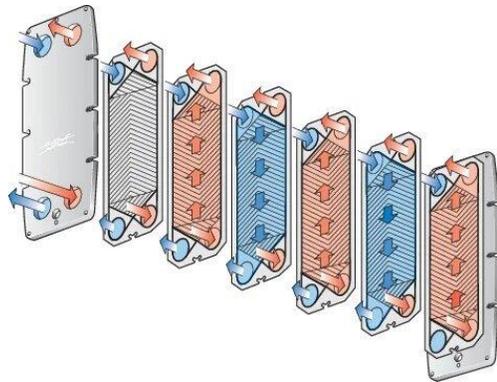
1.3.3 Según su estructura

Debido a su amplio uso los intercambiadores de calor son diseñados y construidos para las diversas necesidades industriales, requiriendo estructuras diferentes según la aplicación:

- **Intercambiador de calor de placas.** Este tipo de intercambiadores consiste en un conjunto de placas que pueden ser corrugadas y acanaladas, que se encuentran unidas a presión y separadas por un empaque; el espacio forma conductos en los cuales circulan

dos fluidos, generando el intercambio de calor entre las placas; entre mayor sea el número de placas mayor será la transferencia de calor, véase en la figura 4.

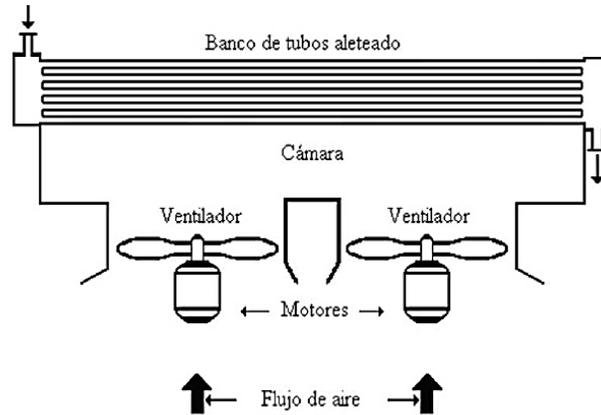
Figura 4. Intercambiador de placas.



Fuente: Taller mecánico: limpieza de un intercambiador de placas

- **Intercambiadores refrigerados por aire.** Se trata de una serie de tubos que están localizados en una corriente de aire; esta corriente puede ser forzada o natural con ayuda de un ventilador; los tubos llevan una serie de aletas para aumentar la superficie de intercambio de calor con un coeficiente de transferencia mayor, véase en la figura 5 (StudentCity, 11:16:42 UTC).

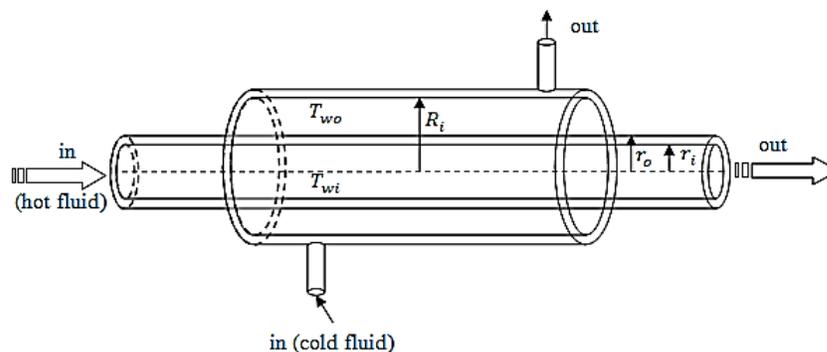
Figura 5. Intercambiador refrigerado por aire.



Fuente: (APRENDE MAS sobre el chiller enfriado por aire DETALLES TECNICOS, s. f.)

- **Intercambiador de tubería doble.** Siendo uno de los más sencillos este tipo de intercambiador consta de dos tubos concéntricos que tienen diámetros diferentes; uno de los fluidos pasa por el tubo de menor diámetro el cual está situado en el interior del tubo más grande y el otro fluido pasa por la parte exterior del tubo, generando así la transferencia de calor; su diseño es empleado usualmente para el calentamiento o enfriamiento de productos con baja-media viscosidad, véase en la figura 5 (Intercambiadores de calor de doble tubo | Tubo en tubo | SACOME, s. f.).

Figura 6. Intercambiador de doble tubo.

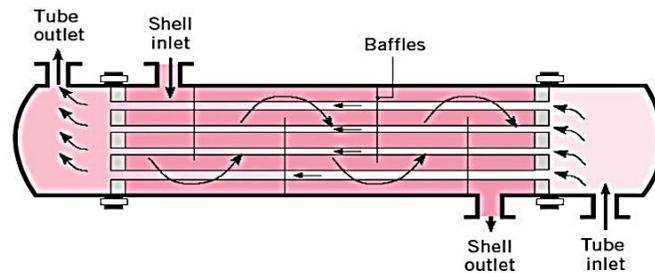


Fuente: Sacome: intercambiadores de calor doble tubo

- **Intercambiador de tubo y carcasa.** Este intercambiador de calor es uno de los más utilizados en la industria, contiene una cantidad de tubos instalados en el interior de una

coraza paralelos a esta; la transferencia de calor ocurre cuando un fluido de mayor o menor temperatura circula al interior de los tubos, y otro fluido circula en el exterior de los tubos pasando por la coraza, de tal manera que los fluidos alcanzan un equilibrio de temperatura; estos fluidos circulan a flujo paralelo y contraflujo; debido a su diseño térmico la coraza está aislada para prevenir pérdida de calor hacia el medio, véase en la figura 7 (Cengel, s. f.-a). El intercambiador de este trabajo es de éste tipo, razón por la que a continuación se especifica su clasificación y características principales.

Figura 7. Intercambiador calor coraza y tubo.



Fuente: Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones.

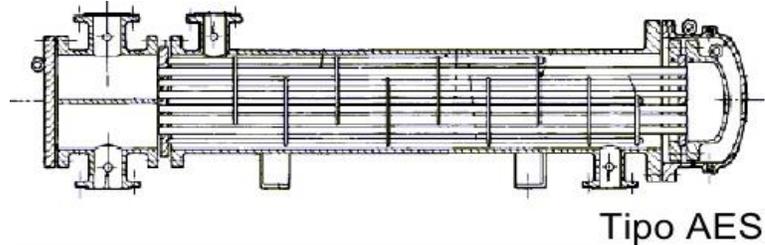
1.4 Intercambiadores de carcasa y tubos

1.4.1 Clasificación

En función de la estructura de los componentes, los intercambiadores de carcasa y tubos se clasifican en:

- **Intercambiador de cabezal flotante interno (tipo AES).** Este tipo de intercambiador es muy utilizado en la industria petrolera, tiene una carcasa de un paso y tuberías de doble paso desmontable permitiendo la limpieza de este, utiliza desviadores transversales y placas de apoyo, lo que producen flujos turbulentos en el fluido que transitará por el interior, el cabezal flotante permite que los tubos dilaten libremente dentro de la coraza evitando esfuerzos en la tubería, véase en la figura 8.

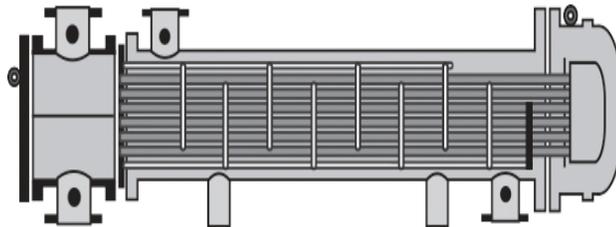
Figura 8. Intercambiador de cabezal flotante interno (tipo AES) .



Fuente: Hidroterm: intercambiador de cabezal flotante interno.

- Intercambiador de cabezal flotante exterior. En este intercambiador los tubos son desmontables y rectos que van unidos por anillos de cierre hidráulico y espejos flotantes, el cabezal también es removible por lo cual la limpieza del intercambiador se facilita, y es uno de los más baratos, pero requiere de mantenimientos constantes, esto con el fin de prevenir fugas y mantener los empaques, véase en la figura 9 (*Intercambiadores de calor de Haz Removible o Cabezal Flotante | INDURADIA, s. f.*).

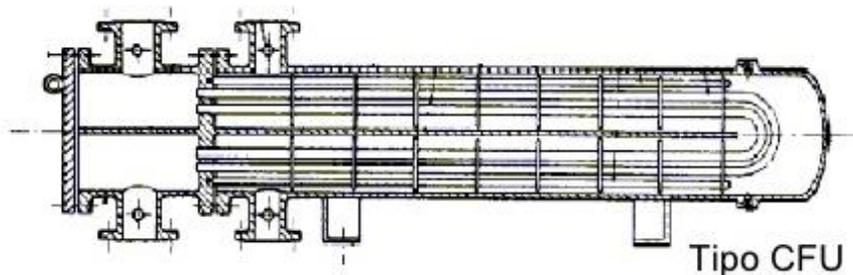
Figura 9. Intercambiador de cabezal flotante con empaque exterior.



Fuente: induradia : Intercambiador de cabezal flotante con empaque exterior

- **Intercambiador de cabezal y tubos integrados.** Este modelo tiene un conjunto de tubos en U que facilita el desmontaje y limpieza del intercambiador, el inconveniente del conjunto de tubos en U es que si se daña uno de ellos no es fácil reemplazarlo; lo que más resalta de este intercambiador de calor son sus tubos que tienen la capacidad de contraerse y dilatarse, véase en la figura 10 (*Intercambiador de calor de carcasa y tubos - Wikiwand, s. f.*).

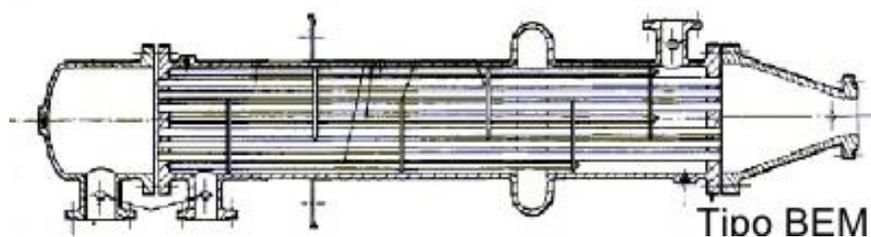
Figura 10. Intercambiador de cabezal y tubos integrados.



Fuente: Hidroterm: intercambiador de cabezal flotante interno.

- **Intercambiador de lámina y tubo fijo.** Este intercambiador posee láminas que van soldadas a la coraza y funcionan como sujetadores de los tubos, así mismo tienen una junta de expansión de la carcasa lo que ayuda a soportar la diferencia de temperatura, debido a que el intercambiador de calor es de un paso, limita la velocidad del fluido y hace que la transferencia de calor sea baja, véase en la figura 11 (Francisco Torrealba, 04:31:41 UTC)

Figura 11. Intercambiador de lámina y tubo fijo.



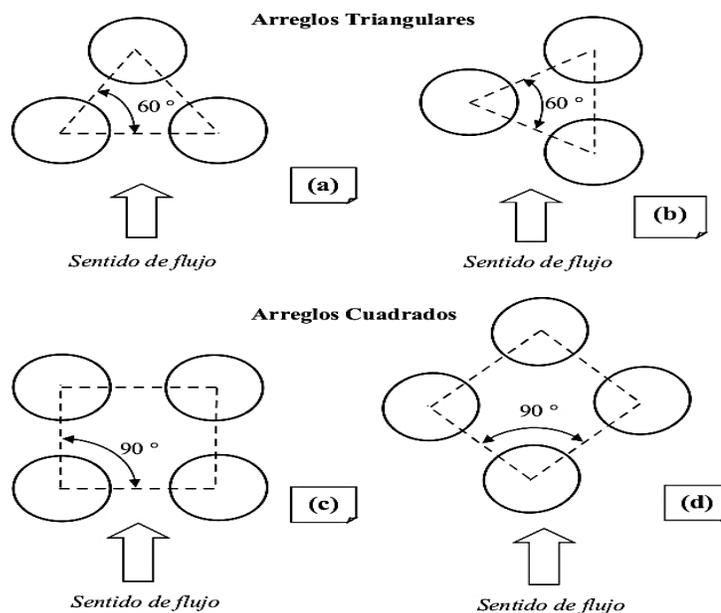
Fuente: Hidroterm: intercambiador de cabezal flotante interno.

1.4.2 Componentes

El intercambiador de carcasa y tubo tiene varios componentes como lo son: la tubería, la carcasa y las tapas.

▪ **Tubería.** Los tubos de los intercambiadores de calor pueden fabricarse en formas y materiales diversos dependiendo los usos industriales; los más comunes se construyen de acero, cobre-níquel, latón, aluminio, acero inoxidable, entre otros. Estos tubos ya tienen unos estándares de medida existentes por la industria comercial; los espacios entre tubos mantienen una distancia de tal manera que no se unen entre sí, ya que la estructura del cabezal se debilitaría; los tubos pueden tener diversas posiciones como son triangular o cuadrada, como se muestra en la figura 12; la disposición de los tubos es definida siguiendo características geométricas donde la combinación y las dimensiones del tubo son importantes, como la distancia entre centros y los arreglos, logran que el equipo trabaje con óptimos resultados bajo parámetros de diseño.

Figura 12. Posición de los tubos de un intercambiador de calor.



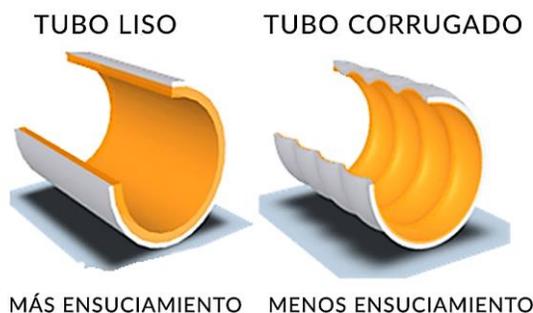
Fuente: Hidroterm: intercambiador de cabezal flotante interno.

Respecto a los diferentes arreglos, cada uno posee ciertas ventajas como: arreglo cuadrado, este permite buena accesibilidad para la limpieza externa y tiene baja caída de presión cuando el fluido pasa en la dirección, véase la figura 12; en la disposición triangular se produce mayor turbulencia ya que el fluido que cruza a alta velocidad choca directamente con la hilera siguiente y los aspectos de limpieza y caída de presión son

menores; la disposición triangular es mejor para alcanzar valores altos del coeficiente de transmisión fuera del haz de tubos, entonces podemos decir que los arreglos triangulares son mas adecuados para flujos turbulentos y laminares en procesos limpios mientras que el arreglo cuadrado es utilizado para casos donde se requiera una limpieza mecánica.

- *Tubo corrugado*. Es un tubo con hendidura helicoidal frabricado a partir de un tubo normal liso, se obtiene por deformación en frío; el número de entradas y ángulo se pueden cambiar a fin de optimizar el proceso térmico; en los intercambiadores de calor este tubo corrugado presenta una ventaja frente al intercambiador de *tubo liso* en cuanto a transferencia de calor y en cuanto a la drenabilidad, ya que no genera estancamiento en el tubo; la corrugacion del tubo genera mayor turbulencia en el fluido cuando este circula por el tubo interior, esto implica que se puede trabajar con un número de Reynolds bajo, es decir, que para un tubo liso el régimen de transición entre el fluido laminar y turbulento este número ronda los 2000- 25000, mientras que para tubo corrugado esta transición se encuentra cercano a los 500, véase en la figura 13 (SACOME, 2017).

Figura 13. Tubo liso y tubo corrugado.



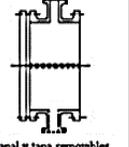
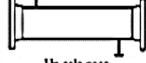
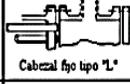
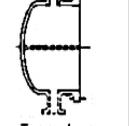
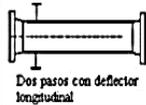
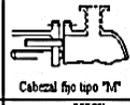
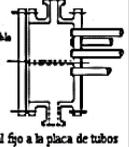
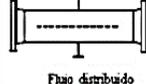
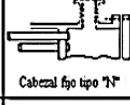
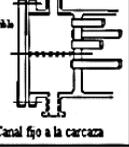
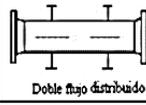
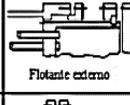
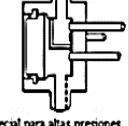
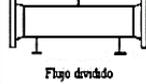
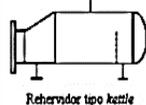
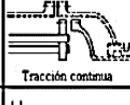
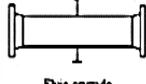
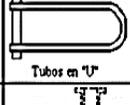
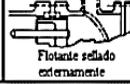
Fuente: Sacome : Intercambiador de calor tubo corrugado

- **Coraza.** Para la construcción de las corazas se necesita de materiales resistentes como el acero, el cual se encuentra estandarizado según el diámetro de la coraza y la presión a la que va a ser sometido. Uno de los materiales más utilizados para la construcción de las corazas es el acero al carbono. En cada extremo se soldan las bridas que llevarán las tapas junto con las cajas de distribución, las toberas de entrada y salida van soldadas con una placa de refuerzo, esto dependiendo a la presión de servicio.

Según la TEMA (Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association), que define estándares para la fabricación de intercambiadores tubulares, como el de carcasa y tubo, se aplica para intercambiadores con diámetro de carcasa interior máximo de 60in.(1524mm). Cada selección de los intercambiadores se identifica con una letra dependiendo de su forma y características, de tal manera que se identifican con 3 letras; la primera letra representa la designación del tipo de cabezal anterior, la segunda representa el tipo de carcasa y la tercera el tipo de cabezal posterior, esto se traduce a : diámetro de carcasa/longitud de tubos.

La coraza tipo “E” y la coraza tipo “F” se utilizan cuando se produce un cruce de temperaturas, para lograr una contracorriente entre los fluidos de tubos y coraza. Los de tipo “G” presentan cualidades similares a las del tipo “F”, y su aplicación es en la condensación de vapores. La coraza tipo “H” de flujo doble splits es muy utilizado para caídas de presión en condensadores. La circulación del vapor se divide en dos boquillas, la coraza también se divide en dos compartimientos separados por un soporte transversal. La coraza tipo “K” es utilizada para la generación de vapor, es necesario que el fluido se mantenga en estado líquido y también dejar un espacio encima del nivel del líquido, esto para hacer que las gotas de vapor puedan viajar a una velocidad baja, de esta manera hacer que las gotas de líquido que son arrastradas tengan la oportunidad de caer, véase en la figura 14 (*Tema 9th Edition 2007, s. f.*)

Figura 14. Designación de las secciones de intercambiadores tubo-carcasa TEMA.

	CABEZALES ANTERIORES: ESTACIONARIOS O FIJOS	TIPOS DE CARCAZAS	CABEZALES POSTERIORES
A	 Canal y tapa removibles	E  Un solo paso	L  Cabecal fijo tipo "L"
B	 Tipo sombrero	F  Dos pasos con deflector longitudinal	M  Cabecal fijo tipo "M"
C	 Tapa removible Canal fijo a la placa de tubos	G  Flajo distribuido	N  Cabecal fijo tipo "N"
N	 Tapa removible Canal fijo a la carcasa	H  Doble flajo distribuido	P  Flotante externo
D	 Especial para altas presiones	J  Flajo dividido	S  Anillos divididos
		K  Rehervidor tipo kettle	T  Tracción continua
		X  Flajo cruzado	U  Tubos en "U"
			W  Flotante sellado externamente

Fuente: Norma TEMA : Designación de las secciones de intercambiadores.

- **Tapas.** Son elementos importantes para la construcción de los intercambiadores de calor, se emplean en la entrada como en la salida, proporcionan el cierre de ambos extremos del intercambiador de calor, estas se seleccionan dependiendo del diseño y las características del intercambiador, pueden ser de dos tipos: tapas abombadas y tapas planas, véase en la figura 15 (373772.pdf, s. f.).

Figura 15. Tapas intercambiador de calor coraza y tubos .



Fuente: Autores

1.5 Introducción a los materiales de diseño

La presión es un factor indispensable en la fabricación de los intercambiadores de calor, por ello el material a utilizar dependerá de la presión máxima admisible del diseño. Tenemos que para presiones altas o medias que se encuentren por encima o por debajo de una atmósfera se deberán utilizar materiales metálicos, y para presiones bajas cercanas a una atmósfera se podrá utilizar cualquier material dependiendo el diseño y las condiciones de uso. Se presentan a continuación los materiales de uso frecuente para intercambiadores de calor.

1.5.1 Aceros al carbono

Los aceros al carbono son el principal producto siderúrgico utilizado en la industria, es una aleación de acero y hierro, u otros aleantes como el manganeso. Los aceros tienen un alto grado de importancia debido a su facilidad de fabricación, su bajo costo y propiedades como la alta resistencia. Algunos aceros son muy blandos y dúctiles, estos pueden ser creados rápidamente y son muy utilizados para dar formas como cuerpos de autos, otros son formados tan duros que son utilizados como herramientas de corte, otros poseen resistencia y tenacidad para uso de ejes en recipientes y envases. (*Clasificación de los Aceros*, s. f.-a)

1.5.2 Aceros inoxidables

Este tipo de acero es muy implementado en todo tipo de industrias y en la construcción, debido a que poseen una alta resistencia a la corrosión, esta propiedad es gracias al cromo que se encuentra presente en la microestructura del acero en porcentajes entre 10-12%, el cromo se mezcla con el oxígeno del aire formando una película delgada de óxido de cromo en la superficie, provocando que no sea atacado por elementos oxidantes, otros materiales como el molibdeno mejoran el comportamiento frente a la corrosión en vías húmedas. (*Clasificación de los Aceros*, s. f.-b)

1.5.3 Acero inoxidable 316L

Este acero es utilizado en la fabricación de intercambiadores de calor, equipos farmacéuticos, piezas para hornos, recortes de válvulas y bombas, piezas expuestas a atmosferas y tuberías. Está compuesto por cromo níquel austenítico que contiene molibdeno el cual aumenta la resistencia a la corrosión, mejora la resistencia a picaduras y mayor resistencia a altas temperaturas. (*Aceros Inoxidables 316 y 316L*, s. f.)

1.6 Mecanismos de transferencia de calor

El calor es la energía que se transmite de un cuerpo a otro por medio de tres modos diferentes: convección, conducción y radiación. La transferencia de calor sucede en el intercambio de calor desde el cuerpo más caliente a uno más frío, hasta que los dos cuerpos y su entorno lleguen a un punto de equilibrio térmico. (*Transferencia de calor - EcuRed*, s. f.)

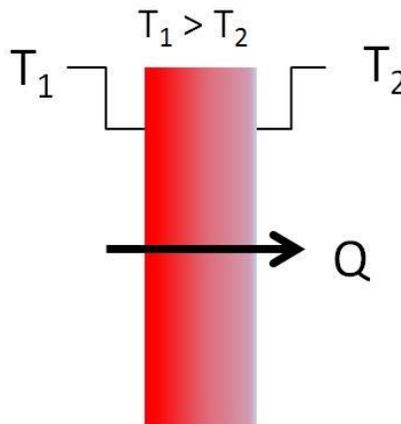
1.6.1 Conducción

La conducción es el modo de transferencia de calor que se da en escala atómica, las moléculas más energéticas ceden energía a las adyacentes de menor energía, provocando un flujo de calor desde las temperaturas más altas hacia las más bajas. La transferencia de calor por conducción se da en cuerpos sólidos, líquidos o gases. En los gases y los

líquidos esta transferencia ocurre con la colisión y difusión de las moléculas que se encuentran dispersas; en los sólidos se debe a la combinación de vibraciones en las moléculas, y a la conducción de energía por parte de los protones libres.

Por ejemplo cuando se sostiene una barra metálica de algún extremo y el otro extremo se introduce en un horno de tal manera que la temperatura aumenta y el calor se transmitirá hasta el extremo más frío por conducción. De esta manera los átomos se cargarán de energía, lo que los llevará a ceder parte de esta energía de un átomo a otro sin que estos cambien de posición aumentando la temperatura de esta región, este proceso continua a lo largo de la barra hasta llegar al extremo que se está sosteniendo, notando una elevación de la temperatura en esa área, véase en la figura 16 (dice, 2013). La ecuación 1 corresponde a la expresión general de transferencia de calor por conducción, en donde se observa que el flujo de calor (q), es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas e inversamente proporcional a la longitud.

Figura 16. Conducción de calor .



Fuente: ingygestconsultores : Transferencia de calor

1.6.2 Convección

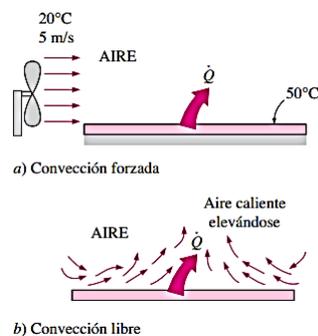
La transferencia de calor por convección se da cuando un fluido o un gas está en movimiento e interactúa con la superficie de un sólido, generando un efecto que combina el proceso de conducción y el movimiento de los fluidos, cuanto mayor sea el movimiento del fluido mayor será la transferencia de calor por convección. Cuando la superficie del sólido se encuentra a una temperatura caliente, el fluido que se encuentra a menor

temperatura recibirá calor que se transferirá al resto del fluido, generando de esta manera una circulación continua del fluido y transmitiendo así el calor hacia las zonas más frías. ([Termodinámica I] Conducción, convección y radiación - El Tamiz, s. f.)

Los líquidos y gases, al incrementar su temperatura su densidad disminuye, esto provoca que asciendan y dejen un vacío por el fluido caliente, el cual lo ocupará el fluido más frío (de menor densidad). La convección se puede dar de dos formas, natural o forzada; esta primera ocurre cuando el fluido extrae calor de la zona caliente, cambiando su densidad haciendo que se desplace a la zona más fría cediendo su calor; la convección forzada ocurre cuando el fluido es forzado a moverse a través de una zona caliente y este transporta el calor hacia la zona más fría, podemos tomar como ejemplos de este tipo de transferencia de calor el ventilador y las bombas.

En ingeniería esta transferencia de calor está presente en dispositivos como los intercambiadores de calor, que permiten el intercambio de calor entre fluidos y superficies que se encuentran a temperaturas diferentes, donde se comprende que la convección se da en cada fluido y la conducción a través de la pared que los separa, véase en la figura 17. (Carlos, 2013)

Figura 17. Convección forzada y convección natural o libre.

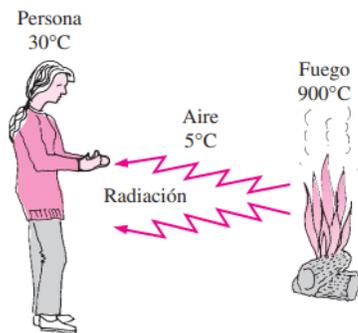


Fuente: Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones.

1.6.3 Radiación

En este tipo de transferencia de calor no es necesario el contacto de una fuente de calor con el objeto a calentar, a diferencia de los otros mecanismos que si lo requieren; el calor es emitido por un cuerpo debido a su temperatura bastante elevada, que se transmite como energía por medio de ondas electromagnéticas debido a las configuraciones electrónicas de átomos o moléculas; es la transferencia más rápida y no sufre atenuación en el vacío. Un ejemplo es la llegada de energía solar térmica a la tierra, o la radiación térmica que se presenta en los alrededores de una llama encendida, como se observa en la figura 18 (Cengel, s. f.-a).

Figura 18. Ejemplo de transferencia de calor por radiación.



Fuente: Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones.

2. Diseño y construcción del banco de pruebas del intercambiador carcasa y tubo

El intercambiador, que es el componente principal, está soportado sobre un banco que se diseñó en el software Inventor de Autodesk. El banco de pruebas está diseñado para optimizar el espacio disponible en el laboratorio, de igual manera sirve como soporte de la electrobomba y el intercambiador de calor; gracias a esto los estudiantes pueden tener una visualización más clara del funcionamiento de un intercambiador de calor para llevar a cabo los diversos cálculos que conlleva la transferencia de calor.

2.1 Información para el diseño

- **Parámetros del fluido**

El agua es un líquido que posee propiedades y características tales como un alto calor específico, esto quiere decir que puede absorber calor antes que suba su temperatura, por ello las industrias lo utilizan como refrigerante y posee las propiedades señaladas en la tabla 1, tales como:

2.1.1 Densidad.

Esta permite un alto coeficiente convectivo, por lo que el mecanismo principal de transferencia de calor es la convección forzada. Una propiedad importante del agua es que es muy estable ya que esta varía poco con los cambios de presión y temperatura, siendo así la densidad del agua (1000kg/m^3) bajo condiciones de una atmósfera de presión y aproximadamente 4°C de temperatura; cuanto mayor sea la densidad de un cuerpo más pesado parecerá (Cengel, s. f.-b).

2.1.2 Viscosidad.

Es una propiedad de los fluidos que se define como la resistencia al movimiento; el agua posee una viscosidad muy baja comparada con la del aceite o la miel, su valor es de 0.001 Ns/m^2 a una temperatura de 20°C . (*Medición de la viscosidad y principios de la viscosidad | Malvern Panalytical, s. f.*)

2.1.3 Calor específico.

Es una propiedad de las sustancias que se relaciona con la cantidad de energía necesaria para aumentar su temperatura; el agua posee una capacidad calorífica específica alta, esto quiere decir que para elevar su temperatura se debe absorber mucho calor por unidad de masa; en condiciones estándar un kilogramo de agua necesita una kilocaloría para que su temperatura aumente un grado centígrado es decir ($1 \text{ kcal}/^\circ\text{C}\text{-kg}$), equivalente a $4184 \text{ J/K}\text{-kg}$. (*Calor Específico - Concepto, unidades, fórmulas y ejemplos, s. f.*)

2.1.4 Conductividad térmica.

Es la capacidad que tienen algunos materiales para transmitir calor por medio de sus moléculas; la razón de éste es que al aumentar la temperatura sus moléculas aumentan la energía cinética sin ocasionar movimientos globales de la materia (*Conductividad Térmica - Concepto, métodos y ejemplos, s. f.*)

Tabla 1: Parámetros del fluido de a 20°C

Parámetro	Valor
Densidad (kg./m^3)	998
Viscosidad ($\times 10^{-3} \text{ kg./m}\text{-s}$)	1,002
Numero de Prandtl (adimensional)	7.01
conductividad térmica (k) (W/m.K)	0.58

Fuente: Autores

2.2 Diseño del intercambiador de calor

▪ Parámetros para el diseño del intercambiador

2.2.1 Temperatura promedio de los tubos

Es la temperatura media de la suma entre la entrada y salida de líquido a trabajar en el intercambiador de calor.

$$T_m = (T_i + T_e)/2 \quad (1)$$

2.2.2 Velocidad máxima

Esta se determina en base al requerimiento de la conservación de la masa para un flujo estacionario y se da entre el área más pequeña entre los tubos alineados.

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{S_T - D_e} \quad (2)$$

2.2.3 Número de Reynolds

Es la relación que hay entre las fuerzas de inercia que son las que impulsan al fluido a que se mueva, y las fuerzas viscosas que son las que lo retienen. Se expresa como un número adimensional y dependiendo del valor de Reynolds el flujo en la superficie cambia: $Re < 30$ se utiliza para superficies lisas; para flujos laminares en donde la superficie tiene risos u ondas $450 < Re < 1800$ y cuando es un flujo turbulento $Re > 1800$.

$$Re = \frac{\rho V_{m\acute{a}x} D_e}{\mu} \quad (3)$$

$\rho =$ densidad

$V_{max} =$ velocidad máxima

$\mu =$ viscosidad dinámica

$\vartheta =$ viscosidad cinemática

$D = \text{diámetro del tubo}$

2.2.4 Relaciones del número de Nusselt promedio

Es la correlación Nusselt de para a configuración de tubos escalonados con rango de Re_D 1000 y 2×10^5 .

$$N_{uD} = 0,35 \left(\frac{S_T}{S_L} \right) Re_D^{0,6} Pr^{0,36} (P_r/P_{rs})^{0,25} \quad (4)$$

$$N_{uD,N_L} = FN_{uD} \quad (5)$$

2.2.5 Coeficiente individual de transferencia de calor

Representa la eficacia de la transferencia de calor en los fluidos; también representa la cantidad de calor transferido por unidad de superficie, tiempo y diferencia de temperatura. Podemos calcular para la superficie interna (h_{int}) y externa (h_{banc}) de los tubos por donde pasan los fluidos. Se expresa en $[KJ/h*m^2*°C]$.

$$h_{banc} = \frac{Nu \cdot k}{D_i} \quad (6)$$

$$h_{int} = \frac{Nu \cdot k}{banc} \quad (7)$$

$k = \text{conductividad térmica}$

$D_i = \text{diámetro interno}$

$Nu = \text{número de Nusselt}$

2.2.6 Caudal de un tubo

Será igual al caudal total en el banco de tubos entre el número de tubos.

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_{total}}{N} \quad (8)$$

2.2.7 Velocidad en cada tubo

Es igual a el caudal en cada tubo entre el área interna del tubo (A_i).

$$V_a = \frac{\dot{V}}{A_i} \quad (9)$$

2.2.8 Longitud de los tubos.

Para poder encontrar la longitud en un tubo, se hallan las longitudes de entrada hidrodinámica y térmica.

$$L_{h,laminar} \approx 0,05 R_e D_i \quad (10)$$

$$L_{t,laminar} \approx P_r L_{h,laminar} \quad (11)$$

2.2.9 Número de Nusselt

Es la forma adimensional de expresar el coeficiente de transferencia de calor por convección, que representa la transferencia de calor debido a que hay movimiento de fluido, es decir que tanto aumenta la transferencia de calor a causa de que hay convección en lugar de conducción. Su significado físico es la estimación de la eficiencia del Proceso de transferencia de calor.

$$Nu = 3,66 + \frac{0,065(D_i/L) R_e P_r}{1 + 0,04((D_i/L) R_e P_r)^{2/3}} \quad (12)$$

$D_i =$ *Diametro interno*

$L =$ *longitud*

2.2.10 Balance térmico

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica la velocidad de transferencia de calor de un fluido con mayor temperatura va a ser igual que la transferencia de calor hacia el fluido frío, de esta manera obtenemos que:

- Para el enfriamiento de un fluido:

$$\bar{Q}_h = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h2} - T_{h1}) \quad (13)$$

\dot{m} = flujo másico

C_p = calor específico del fluido

Para el calentamiento de un fluido:

$$\bar{Q}_c = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c2} - T_{c1}) \quad (14)$$

2.2.11 Diferencia de temperatura media logarítmica

Representa la variación de la temperatura que experimentan los fluidos a través de su paso por el intercambiador de calor, ya que estas temperaturas no son constantes, esto porque en diferentes puntos un fluido va perdiendo calor y el otro lo va ganando. Además, para este método es necesario conocer las temperaturas de entrada y salida y el flujo másico del fluido.

$$LMTD = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (15)$$

Dentro de esta ecuación se pueden presentar dos casos en función del arreglo del paso del flujo, los cuales son flujo paralelo y contraflujo.

▪ Contraflujo:

$$\Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,2} \quad (16)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,2} - T_{c,1} \quad (17)$$

▪ Flujo paralelo:

$$\Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,1} \quad (18)$$

$$\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c2} \quad (19)$$

Los subíndices **h** y **c** representan el fluido caliente y el fluido frío respectivamente.

2.2.12 Razón de transferencia de calor

$$\bar{Q} = UA_s \Delta T_{ml} \quad (20)$$

Donde U: coeficiente total de transferencia de calor
 A_s = Área de transferencia de calor
 ΔT_{ml} = diferencia de temperatura

2.2.13 Coeficiente global de transferencia de calor (U)

Es la cantidad de calor total transferido entre una superficie ante un cambio de un grado centígrado; de acuerdo a las características del intercambiador este valor varía ya que es obtenido mediante prácticas reales, y es de vital importancia para el cálculo térmico de un intercambiador, debido a que es estudiado entre dos corrientes de flujo, como en nuestro caso el intercambiador de calor de carcasa y tubos, en donde los fluidos a trabajar son agua en la carcasa y agua entre los tubos internos. Este coeficiente de transferencia de calor se da entre el fluido caliente y el fluido frío que se encuentran separados por medio de la tubería y se calcula de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{banc}} + \frac{1}{h_{int}}} \quad (21)$$

2.2.14 Flujo másico.

Se define como la cantidad de masa que pasa a través de una sección transversal a una velocidad determinada en unidad de tiempo. Debido a que la masa lleva energía, se puede decir que es un mecanismo adicional de transferencia de energía y de la misma manera se lleva la energía cuando sale del sistema.

$$\dot{m}_c = \rho_c V_c (N_T S_T L)$$

ρ = densidad del fluido

V = velocidad del fluido

(22)

N_T = número de tubos en un plano transversal

S_T = Paso trasversal

L = Longitud del tubo

2.2.15 Razón de capacidad calorífica

La capacidad calorífica es la cantidad de calor necesario para poder elevar la temperatura a 1°C a medida que circula por el intercambiador, entre más grande sea este valor el fluido experimentara un cambio pequeño en la temperatura, y viceversa. Por tanto, al aumentar el gasto de flujo másico al doble, la temperatura disminuirá a la mitad.

$$C_h = m_h \dot{c}_{ph}$$

(23)

$$C_c = m_c \dot{c}_{pc}$$

(24)

Donde:

m = flujo masico

c_p = calor especifico

2.2.16 Relación de capacidades

Es la capacidad calorífica máxima sobre la mínima.

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

(25)

2.2.17 Potencia máxima que podrá trasferir el intercambiador de calor

La temperatura máxima se obtiene cuando el fluido que pasa a través de un sistema tiende a alcanzar un equilibrio térmico con el ambiente que lo rodea.

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} * (T_{h1} - T_{c1}) \quad (26)$$

2.2.18 Efectividad de un intercambiador de calor

La efectividad del intercambiador es la división entre la razón o potencia real y la potencia máxima de transferencia de calor, esta puede variar dependiendo de su configuración geométrica:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (27)$$

$\varepsilon =$ efectividad del intercambiador

$\dot{Q} =$ potencia

$\dot{Q}_{max} =$ potencia máxima

2.2.19 Número de unidades de transferencia (NTU)

Esta es una cantidad adimensional de la efectividad de los sistemas de transferencia de calor, para un NTU >5 la temperatura de salida del fluido será mayor que la superficial, es decir superaría el límite permitido para la transferencia de calor, un NTU alrededor de 5 estará en el límite lo que indica que la transferencia de calor no aumentara por más que se incremente la longitud del tubo, en comparación con un valor de NTU más pequeño indicara que tendrá más oportunidades de transferencia de calor.

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} = \frac{UA_s}{(\dot{m}c_p)_{min}} \quad (28)$$

2.2.20 Relación del NTU flujo paralelo

$$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + c)]}{1 + c} \quad (29)$$

2.2.21 Relación del NTU flujo contraflujo

$$NTU = \frac{1}{c - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C - 1}\right) \quad (30)$$

■ Cálculos para el diseño del intercambiador

Como práctica de laboratorio, se va a utilizar el mismo fluido con dos condiciones de flujo y temperatura diferente. Para los cálculos se parte de una electrobomba y un calentador de calor disponibles en el laboratorio; por esa razón en la tabla 2 se presentan los parámetros de caudal flujo másico y temperatura media de entrada del calentador (tubos) y de entrada del agua del grifo (casco).

Tabla 2. Parámetros de electrobomba y calentador.

Dato	Tubos	Cáscos
Caudal \dot{V} [lpm]	2	9
Flujo másico \dot{m} [kg/s]	0,033	0,15
Temperatura Entrada $T_{c,ent}, T_{f,ent}$ [°C]	60	20

Fuente: Autores

Con estos datos de partida se requiere calcular los datos de las temperaturas de salida de los fluidos caliente y frío. Como aproximación para la evaluación de la convección en la carcasa, se evalúa considerando el flujo a través de banco de tubos. Asumiendo una temperatura de salida para el agua al pasar por el casco de $T_e = T_{c2} = 30$ °C se tiene:

De la ecuación (1)

$$T_m = \frac{T_i + T_e}{2} \Rightarrow T_m = \frac{20 + 30}{2} = 25 \text{ °C}$$

De la tabla A-9 del libro Transferencia de calor y masa de Yunus A. Cengel para una $T_m = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ se tienen como propiedades del fluido de trabajo:

$$\rho = 997 \text{ Kg/m}^3 \quad C_p = 4180 \text{ J/Kg.K} \quad k = 0,607 \text{ W/m.K}$$

$$\mu = 0,891 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \quad Pr = 6,14$$

Teniendo $D_e = 0,01 \text{ m}$, $S_T = 0,0125 \text{ m}$ y $A = 2,85 * 10^{-4} \text{ m}^2$ $V = 0,4015 \text{ m/s}$ entonces se tiene que la velocidad máxima y el número de Reynolds quedan:

De la ecuación (2)

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{S_T - D_e} V \Rightarrow V_{m\acute{a}x} = \frac{0,0125 \text{ m}}{(0,0125 - 0,01) \text{ m}} \left(0,4015 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \Rightarrow V_{m\acute{a}x} = 2 \text{ m/s}$$

De la ecuación (3)

$$Re_D = \frac{\rho V_{m\acute{a}x} D_e}{\mu} \Rightarrow Re_D = \frac{997 \text{ kg/m}^3 * 2 \text{ m/s} * 0,01 \text{ m}}{0,891 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}} \Rightarrow Re_D = 22379,34$$

De la tabla 7-2 del libro Transferencia de calor y masa de Yunus A. Cengel se obtiene el número de Nusselt, el cual queda:

Asumiendo $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow Pr_s = 5,42$

De la ecuación (4)

$$Nu_{uD} = 0,35(1)22379,34^{0,6}(6,14)^{0,36}(6,14/5,42)^{0,25} = 282,65$$

El cual es un número de Nusselt valido para $N_L > 16$; como $N_L = 6$ entonces se tiene:

De la ecuación (5)

$$Nu_{uD,N_L} = F Nu_{uD} = (0,945)(282,65) \Rightarrow Nu_{uD,N_L} = 267,10$$

Por lo cual se tiene un coeficiente de transferencia de calor de:

De la ecuación (6)

$$h_{banc} = \frac{Nu_{uD,N_L} \cdot k}{D_e} \Rightarrow h_{banc} = \frac{267,10 * 0,607 \text{ W/m.K}}{0,01 \text{ m}} \Rightarrow h_{banc} = 16212,97 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

No se considera la convección natural por dos razones, primero que todo el flujo de convección forzada y natural de acuerdo a la disposición del banco van en contra flujo por lo cual sería despreciable el efecto y por otro lado, la temperaturas son bajas, para llegar a ser consideradas de acuerdo al número de Grashof para convección natural.

2.2.22 Análisis de convección interna de la tubería del banco de tubos.

Los datos de entrada con los que cuenta la tubería del banco de tubos, se pueden observar en la figura 19.

Figura 19. Datos de entrada para convección interna en la tubería.



Fuente: Autores

En las consideraciones iniciales, se decidió que el banco de tubos va a estar conformado por un total de $N = 30$ tubos, entonces, como se tiene un caudal total de $\dot{V}_{total} = 2 \text{ lpm}$ se encuentra un caudal por tubo, el área interna de la tubería y una velocidad con la que fluye el agua por cada tubo de:

De la ecuación (8)

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_{total}}{N} \Rightarrow \dot{V} = \frac{2 \text{ lpm}}{30} \Rightarrow \dot{V} = 0,0666 \text{ lpm} \Rightarrow \dot{V} = 1,11 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} (D_i)^2 \Rightarrow A_i = \frac{\pi}{4} (0,008 \text{ m})^2 \Rightarrow A_i = 5,0265 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

De la ecuación (9)

$$V_a = \frac{\dot{V}}{A_i} \Rightarrow V_a = \frac{1,11 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{5,0265 \times 10^{-5} \text{ m}^2} \Rightarrow V_a = 0,0221 \text{ m/s}$$

Ahora, asumiendo una temperatura de salida para el agua de $T_e = T_{c,sal} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ se tiene:

De la ecuación (1)

$$T_m = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2} \Rightarrow T_m = \frac{60 + 50}{2} \Rightarrow T_m = 55 \text{ }^\circ\text{C}$$

De la tabla A-9 del libro Transferencia de calor y masa de Yunus A. Cengel para una $T_m = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ se tiene:

$$\begin{aligned} \rho &= 985,2 \text{ Kg/m}^3 & C_p &= 4183 \text{ J/Kg.K} & k &= 0,649 \text{ W/m.K} \\ \mu &= 0,504 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s} & P_r &= 3,25 \end{aligned}$$

De la ecuación (3)

Se procede a calcular el número de Reynolds como:

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{\rho V_a D_i}{\mu} \Rightarrow R_e = \frac{985,2 \text{ kg/m}^3 * 0,0221 \text{ m/s} * 0,008 \text{ m}}{0,504 * 10^{-3} \text{ kg/m.s}} \Rightarrow \\ R_e &= 345,602 \ll R_{ecr} = 10000 \rightarrow \text{Laminar} \end{aligned}$$

Se tiene un flujo laminar, por lo cual se procede a calcular las longitudes de entrada hidrodinámica y térmica, respectivamente como:

De la ecuación (10 y 11)

$$\begin{aligned} L_{h,laminar} &\approx 0,05 R_e D_i \Rightarrow L_{h,laminar} = 0,05(345,602)(0,008 \text{ m}) \\ L_{h,laminar} &= 0,138 \text{ m} \end{aligned}$$

$$L_{t,laminar} \approx P_r L_{h,laminar} \Rightarrow L_{t,laminar} = 3,25 (0,138 \text{ m}) \Rightarrow L_{t,laminar} = 0,448 \text{ m}$$

Por lo cual, se observa un flujo laminar en desarrollo, por lo tanto, el número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor se encuentran como:

De la ecuación (12)

$$N_u = 3,66 + \frac{0,065(D_i/L) R_e P_r}{1 + 0,04((D_i/L) R_e P_r)^{2/3}}$$

$$N_u = 3,66 + \frac{0,065(0,008 \text{ m}/0,51 \text{ m}) * 345,602 * 3,25}{1 + 0,04((0,008 \text{ m}/0,51 \text{ m}) * 345,602 * 3,25)^{2/3}} \Rightarrow N_u = 4,56$$

De la ecuación (7)

$$h_{int} = \frac{N_u \cdot k}{D_i} \Rightarrow h_{int} = \frac{4,56 * 0,649 \text{ W/m.K}}{0,008 \text{ m}} \Rightarrow h_{int} = 369,93 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

2.2.23 Balance de energía y sistema de ecuaciones para resolución de variables del sistema

Suponiendo que la superficie exterior del intercambiador de calor está bien aislada, de modo que la transferencia de calor ocurre entre los dos fluidos; se puede deducir que la razón de pérdida de calor del fluido caliente (Q_h) va a ser igual a la razón de ganancia de calor por el fluido frío (Q_c), por lo cual se tiene que:

$$\bar{Q}_h = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h2} - T_{h1}) \quad (13)$$

$$\bar{Q}_c = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c2} - T_{c1}) \quad (14)$$

Se tiene que la diferencia de temperatura media logarítmica se puede expresar como:

De la ecuación (15)

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 - \Delta T_2)} = \frac{(T_{c,ent} - T_{f,ent}) - (T_{c,sal} - T_{f,sal})}{\ln\left(\frac{T_{c,ent} - T_{f,ent}}{T_{c,sal} - T_{f,sal}}\right)}$$

Y a partir de la temperatura media logarítmica el calor se puede expresar como:

De la ecuación (20)

$$\bar{Q} = UA_s \Delta T_{ml}$$

Donde U es el coeficiente de transferencia de calor total, y para este caso, no se considera relevante la transferencia de calor por conducción debido a que la pared de tubería es pequeña, se tiene U igual a:

De la ecuación (21)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{banc}} + \frac{1}{h_{int}}} \Rightarrow U = \frac{1}{\frac{1}{16212,97 W/m^2 \cdot K} + \frac{1}{369,93 W/m^2 \cdot K}} \Rightarrow U = 361,677 W/m^2 \cdot K$$

Retomando la ecuación (14) se tiene que:

$$\bar{Q}_c = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c2} - T_{c1})$$

De la ecuación (22)

En donde el flujo másico \dot{m}_c se encuentra como:

$$\dot{m}_c = \rho_c V_c (N_T S_T L) = 985,2 Kg/m^3 * 0,4015 m/s (5 * 0,0125 m * 0,51m)$$

$$\dot{m}_c = 12,608 kg/s$$

Este sería el caudal calculado máximo en el banco. El calentador de agua no permite sino un caudal de 2lpm, para un flujo másico de 0,03284kg/s, lo cual no estaría por completo sumergido el banco de tubos. Reemplazando para la ecuación (b) se tiene:

$$0,03284 kg/s * 4183 J/Kg \cdot K (T_{c2} - 20) = \bar{Q}$$

$$137,369 T_{c2} - 2747,39 = \bar{Q}$$

Retomando la ecuación (13) se tiene que:

$$\bar{Q}_h = -\dot{m}_h C_{p_h} (T_{h2} - T_{h1})$$

En donde el flujo másico \dot{m}_{agua} se encuentra como:

$$\dot{m}_c = \rho_c \dot{V}_c = 997 Kg/m^3 * 1,5 \times 10^{-4} m^3/s \Rightarrow \dot{m}_c = 0,149 kg/s$$

Reemplazando para la ecuación (b) se tiene:

$$0,149 kg/s * 4180 J/Kg \cdot K (60 - T_{h2}) = \bar{Q}$$

$$37369,2 - 622,82 T_{h2} = \bar{Q}$$

Retomando ecuación (20) se tiene que:

$$UA_s \Delta T_{ml} = \bar{Q}$$

$$361,667W/m^2 \cdot K (0,010\pi * 30 * 0,51 m) \frac{(60 - 20) - (T_{h2} - T_{c2})}{\ln\left(\frac{60 - 20}{T_{h2} - T_{c2}}\right)} = \bar{Q}$$

$$\frac{6953,608 - 173,84(T_{h2} - T_{c2})}{\ln\left(\frac{40}{T_{h2} - T_{c2}}\right)} = \bar{Q} \quad (3)$$

Organizando el sistema de ecuaciones para el despeje se tiene:

$$137,369T_{c2} - 2747,39 = \bar{Q}$$

$$37369,2 - 622,82T_{h2} = \bar{Q}$$

De la ecuación (30) se tiene

$$\frac{6953,608 - 173,84(T_{h2} - T_{c2})}{\ln\left(\frac{40}{T_{h2} - T_{c2}}\right)} = \bar{Q}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se tienen como solución:

$$T_{c2} = 45,93 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{h2} = 54,28 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \bar{Q} = 3556,785 \text{ W}$$

Las temperaturas asumidas están desbordadas del 5% de margen de error, se realizan varias iteraciones hasta encontrar la temperatura dentro del 5% de margen de error.

Tabla 3. Corrección del margen de error

Iteración	T _{c2} [°C]	%error	T _{h2} [°C]	%error	Q [w]
1	45,93	30,11	54,28	7,88	3556,78
2	40,26	6,21	52,88	2,57	3521,26
3	41,88	4,023	51,96	1,74	3496,11

Fuente: Autores

Aplicando el método de Efectividad – NTU, se evaluaron las condiciones del intercambiador para las temperaturas dadas y obtenidas:

De las ecuaciones (23 y 24)

Las razones de capacidad calorífica son:

$$C_c = m_c c_{pc} = 0,15 \text{ kg/s} \cdot 4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C} = 627 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

$$C_h = m_h c_{ph} = 0,033 \text{ kg/s} \cdot 4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C} = 137,94 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

De la ecuación (25) la relación de capacidades será:

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{137,94}{627} = 0,22$$

De la ecuación (26)

Por lo tanto, la transferencia máxima de calor posible será:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{h1} - T_{c1}) = 137,94(60 - 20) = 5517,6w$$

De la ecuación (27)

Para lo cual, la efectividad del intercambiador será:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{3496,11}{5517,6} = 0,634$$

De la ecuación (28)

El número de unidades de transferencia NTU, será:

$$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+c^2}} \ln \left(\frac{2/\varepsilon - 1 - c - \sqrt{1+c^2}}{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - c + \sqrt{1+c^2}} \right)$$

$$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+0,22^2}} \ln \left(\frac{\frac{2}{0,634} - 1 - 0,22 - \sqrt{1+0,22^2}}{\frac{2}{0,634} - 1 - 0,22 + \sqrt{1+0,22^2}} \right) = 1,15$$

De la ecuación (29) tenemos:

$$NTU = -\frac{\ln[1 - (0,634) * (1 + 0,22)]}{1 + 0,22}$$

$$NTU = 1,217$$

De la ecuación (30) tenemos:

$$NTU = \frac{1}{0,22 - 1} \ln \left(\frac{0,634 - 1}{0,634 * 0,22 - 1} \right)$$

$$NTU = 1,096$$

El valor de NTU para contraflujo es menor que el paralelo, lo que indica más oportunidades de transferencia de calor en este sistema, es decir que si se alarga los tubos habrá más transferencia de calor.

▪ Método Bell Delaware

En este método se calcula el coeficiente de transferencia de calor, la caída de presión en la carcasa y la determinación de factores de corrección dependientes de la geometría. Su nombre que fue patrocinado por la industria de intercambiadores de calor carcasa y tubo en la universidad Delaware. Su coeficiente de fricción va en la misma dirección del banco de tubos estos se conocen como correlaciones para bancos de tubos ideales.

Bell Delaware propone calcular el coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza. Los errores de este método pueden ser de 40% en pérdida de carga y para el coeficiente de transferencia de calor es de 25%.

Todos aquellos factores que puedan llegar a afectar el comportamiento del intercambiador se tienen en cuenta.

En este caso se partió de unos datos geométricos iniciales:

D_s : diámetro de carcasa

D_{ti} : diámetro interior de los tubos

D_t : diámetro exterior de los tubos

k : conductividad del material de los tubos

A partir de las condiciones del intercambiador sobre las cuales se hizo su construcción y posterior evaluación, se tiene:

- Diámetro Carcasa interno, $D_{ti} = 74,5\text{mm}$
- Longitud efectiva, $L_e = 51,0\text{mm}$
- Diámetro externo tubos, $D_t = 10\text{mm}$
- Distancia entre centros, $S_t = 12,5\text{mm}$
- Número total de tubos, $N_{tt} = 30$
- Disposición = Rotate square (alineado rotado) según norma TEMA RCB-2.4

Los cálculos, basados en el numeral RCB-7.126 TEMA, son:

- Diámetro de círculo circunscritos de los tubos, D_{otl} :

$$D_{otl} = D_{ti} \left(\frac{N_{tt}}{K_1} \right)^{1/n} \quad (31)$$

$$D_{otl} = D_{ti} \left(\frac{N_{tt}}{K_1} \right)^{1/n} = 8mm \left(\frac{30}{0,215} \right)^{1/2,207} = 74,964mm$$

Este valor calculado es ligeramente mayor al diámetro interno de la carcasa, por lo tanto, el total de tubos tomado a criterio es adecuado. Valores de K_1 y n tomados de las siguientes tablas.

Tabla 4. Constantes m_1 y m_2

tube bundle type	m_1	m_2
fixed or U-tube	8	0.01
outside packing	39	0
split-ring	44	0.025
pull-through	87	0.007

Tabla 5. Constantes K_1 y n

tube passes	K_1		n	
	triangular	square	triangular	square
1	0.319	0.215	2.142	2.207
2	0.249	0.156	2.207	2.291
4	0.175	0.158	2.285	2.263
6	0.0743	0.0402	2.499	2.617
8	0.0365	0.0331	2.675	2.643

Fuente: R. Sinnott, «An introduction to Chemical Engineering Design,» de Chemical Engineering Series, vol. 6, J. Coulson y J. Richardson, Edits., Oxford, U.K., Pergamon Press, 1989

- Diámetro de Circunferencia de centros, D_{ct}

$$D_{ctl} = D_{otl} - D_t \quad (32)$$

$$D_{ctl} = D_{otl} - D_t = 74,964 - 10 = 64,964mm$$

- Holgura entre haz de tubos y carcasa, L_{bb}

$$L_{bb} = D_s - D_{otl} \quad (33)$$

$$L_{bb} = D_s - D_{otl} = 76,3 - 74,964 = 1,33mm$$

Como separación mínima se tiene 1,33mm; el diseño tiene una separación real de 2,6mm.

- Número de deflectores, N_b

$$N_b = \frac{L_{ta} - (L_{bb})L_{bc}}{(L_{bb})L_{bc}} + 1 \quad (34)$$

$$N_b = \frac{L_{ta} - (L_{bb})L_{bc}}{(L_{bb})L_{bc}} + 1 = 4,875 \sim 5 \text{ deflectores}$$

$$L_{ta} = L_{tt} - 0,2D_s = 510mm - 0,2(76,3mm) = 494,74mm$$

La tubería utilizada es corrugadas, con espesor de corrugados por debajo de 1 pulgada (25,4mm), por lo tanto, según numeral RCB-7.1 TEMA, se corrige el número de deflectores a partir del factor $F=0,1$, utilizado para aletas o corrugados de longitud inferior. Por lo tanto: $N_{bcorr} = F \cdot N_b = 0,1 * 4,875 = 0,4875$ No requiere deflectores, el corrugado es suficiente.

- Factores de Corrección de convección

Los factores de corrección se determinan en función de la configuración del intercambiador, basados en el numeral T-3.1 TEMA:

El coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de la carcasa se corrige basado en la siguiente ecuación:

$$h_s = h_{si} J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s \quad (35)$$

h_{si} : coeficiente convectivo calculado del lado de la carcasa

J_c : es factor de corrección para deflectores.

$$J_c = 0,55 + 0,72 F_c \quad (36)$$

Asumiendo F_c , fracción de tubos perpendicular al flujo, de 0,15, como valor mínimo de la norma.

$$J_c = 0,55 + 0,72(0,15) = 0,658$$

J_l : es factor de corrección para las fugas, tanto entre la carcasa y los deflectores como entre los tubos y los deflectores. Como no hay deflectores el valor a tomar será de 1.

J_b : es el factor de corrección para las corrientes que se producen entre el haz de tubos y la carcasa. A partir de la relación rss , donde N_L (tubos dirección longitudinal) N_T (tubos dirección transversal).

$$J_b = e^{[-C(Sb/sm)(1-\sqrt[3]{2rss})]} \quad (37)$$

$$rss < 0,5 \quad J_b = 1 \quad rss > 0,5$$

$$rss = \frac{N_L}{N_T} \quad (38)$$

$$rss = \frac{N_L}{N_T} = \frac{5}{6} = 0,833 \text{ por lo tanto, } J_b = 1$$

J_r : es el factor de corrección para el gradiente adverso de temperaturas que se produce cuando el flujo es laminar.

Para el caso del banco de tubos se obtuvo un número de Reynolds de $R_{eD} = 22379,34$, para lo cual se considera como flujo laminar. El factor de corrección será de 0,85; según figura T-3.1 TEMA.

J_s : es el factor de corrección para la separación diferente en las secciones de entrada y salida con respecto a la separación de los deflectores centrales. Considerando que no se contemplaron deflectores, se utilizará factor de corrección igual a 1.

Retomando la fórmula (37)

Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor corregido será:

$$h_s = 16212,97W/m^2 \cdot K(0,658)(1)(1)(0,85)(1) = 9067,91W/m^2 \cdot K$$

- Caída de Presión en la carcasa ΔP_c

$$\Delta P_c = N_L f \cdot \chi \frac{\rho_c V_{max}^2}{2} \quad (39)$$

$$\Delta P_c = N_L f \cdot \chi \frac{\rho_c V_{max}^2}{2} = 6(0,4)(1) \frac{997kg/m^3(2m/s)^2}{2} = 4785,6Pa$$

f Tomado de figura 7-27, libro de transferencia de calor y masa. Yunus Cengel.

- Caída de Presión en los tubos ΔP_T

$$\Delta P_T = f \frac{L}{D} \frac{\rho_h V^2}{2} \quad (40)$$

$$\Delta P_T = f \frac{L}{D} \frac{\rho_h V^2}{2} = 0,4 \frac{0,51}{0,008} \frac{985,2kg/m^3(0,0221m/s)^2}{2} = 6,135Pa$$

2.2.1 Calculo para el aislante térmico

Al agregar un asilamiento a un cilindro o una esfera aumentará la resistencia a la conducción, pero disminuirá la convección de la superficie, es decir que al aislar la carcasa

de un intercambiador con un material con una conductividad k y un radio r , el calor del tubo hacia el medio circundante se perderá.

$$r_{cr} = \frac{k}{h} \tag{41}$$

Donde:

$k =$ conductividad termica del material

$h =$ conveccion

Para incrementar la transferencia de calor el radio de aislamiento debe estar por encima del radio critico $r_{CR} < r_{aisl}$

$$r_{cr} = \frac{k}{h_s} = \frac{16 W(k.m)}{9067.91 \frac{W}{m^2.k}} = r_{cr} = 1.76 mm$$

Donde r_{ais} es el radio de la carcasa

$$r_{aisl} = 37 mm$$

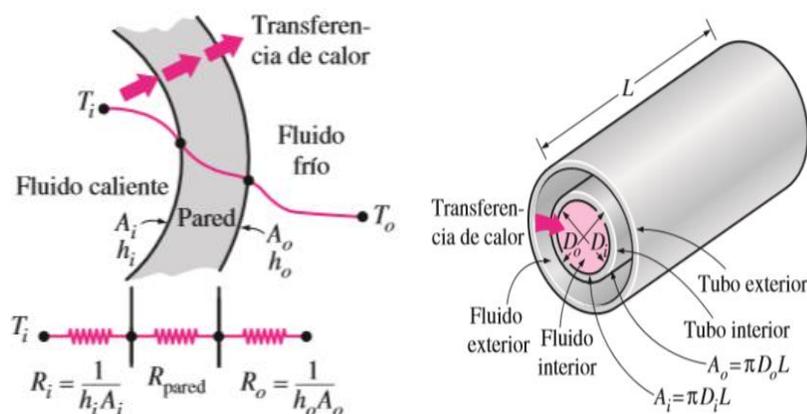
El cual se evidencia que cumple el criterio de $r_{CR} < r_{aisl}$

2.2.2 Cálculo para la resistencia térmica de la pared del tubo

Es la capacidad que tiene el material del tubo para resistir al flujo de la temperatura.

$$R_{pared} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \tag{42}$$

Figura 20. Red de resistencia térmica y áreas superficiales.



Fuente: Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones.

De la ecuación (28)

$$R_{pared} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL}$$

$$R_{pared} = \frac{\ln(0,01m/0,008m)}{2\pi\left(\frac{16W}{k.m}\right)0,51m} = 0,0043^\circ C/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_{banc}A_i} = 0,0155^\circ C/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_{int}A_o} = 0,5836^\circ C/W$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{banc}A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_{int}A_o} = 0,6034^\circ C/W$$

La resistencia por conducción de la pared de los tubos es de un valor despreciable con respecto a las resistencias por convección y con respecto a la resistencia total. Debido a que el material del tubo es un buen conductor la resistencia por conducción no se considera.

Características de diseño.

- **Especificaciones de carcasa, cabezal, tubos y placa.** Las tablas 6, a 9 presentan las especificaciones de carcasa, cabezal, tubos y placa respectivamente. La coraza es una pieza fundamental en el diseño de un intercambiador de calor, se puede realizar con una placa rolada o un cilindro metálico sin costura; para este trabajo se optó por el primer caso, debido a la facilidad de construcción y los costos.

Tabla 6. Carcasa

Material de construcción: Acero inoxidable 316L			
<i>Longitud (cm)</i>	<i>Diámetro externo (cm)</i>	<i>Diámetro interno (cm)</i>	<i>Espesor (cm)</i>
51	7.62	7.45	0.09

Fuente: Autores

Para circulación del agua fría a través de la carcasa se implementó una electrobomba, la cual impulsa el fluido desde un tanque que contiene agua a temperatura ambiente; la presión de ésta electrobomba está regulada por una válvula en “Y” que permite un manejo del fluido más adecuado para el paso de este hacia la carcasa. Para la construcción del cabezal, primero se diseñó en inventor y posterior a ello se construyó con las características presentadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Cabezal

Material de construcción: Acero inoxidable 316L			
<i>Longitud entradas (cm)</i>	<i>Diámetro externo (cm)</i>	<i>Diámetro interno (cm)</i>	<i>Espesor (cm)</i>
2	5.3	4.3	0.5

Fuente: Autores

Tabla 8. Tubos

Material de construcción: Tubo de acero inoxidable 316L			
<i>Longitud (cm)</i>	<i>Diámetro externo (cm)</i>	<i>Diámetro interno (cm)</i>	<i>Espesor (cm)</i>
51	1	0.8	0.1

Fuente: Autores

Tabla 9. Placa

Material de construcción: Placa de acero inoxidable 316L			
<i>Entradas soporte de tubos (#)</i>	<i>Diámetro externo (cm)</i>	<i>Diámetro entradas (cm)</i>	<i>Espesor (cm)</i>
30	7.5	1	0.2

Fuente: Autores

Una vez determinadas las características de todos los componentes del banco y el intercambiador, se procedió a su construcción, como se verifica en la siguiente galería fotográfica.

Teniendo las dimensiones del intercambiador podemos hacer el diseño de cada parte en el programa Inventor profesional 2018, como se evidencia en el anexo A donde se encuentran los planos definidos, con el fin de poder seguir con la fase de construcción.

2.3 Construcción del intercambiador

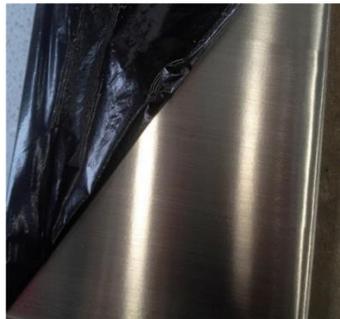
- Se obtuvieron los materiales necesarios para la construcción del intercambiador de calor, que se presentan en las figuras 20, 21 y 22, correspondiendo al tubo corrugado, la lámina y el cabezal de acero inoxidable respectivamente.

Figura 21. Tubo corrugado de acero 316L



Fuente: Autores

Figura 22. Lámina de acero inoxidable



Fuente: Autores

Figura 23. Cabezal de acero inoxidable 316L



Fuente: Autores

Una vez se tuvieron los materiales se realizaron las operaciones de soldadura para la unión del cabezal y las entradas, con una corriente de 58 A y la fijación del aislante térmico al cuerpo del intercambiador (ver figura 23).el aislante reúne las siguientes características: espesor de 3 a 5 mm, reduce la temperatura de la cubierta 15 °C +/-

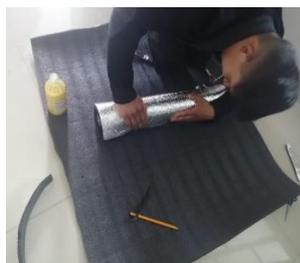
Figura 24. Operaciones de soldadura y fijación de recubrimiento



a) Operación de Soldadura



b) Equipo de soldadura



b) Recubrimiento con el material aislante

Fuente: Autores

2.4 Diseño del banco

2.4.1 Condición inicial del laboratorio de fluidos.

Debido a que el intercambiador de calor trabaja con fluidos, el laboratorio de fluidos de la universidad es el más adecuado para la instalación del banco de pruebas, y el espacio a utilizar se evidencia en la Figura 25. Está conformado por un área aproximada de 1 m².

Figura 25. Espacio destinado para la ubicación del banco de pruebas



Fuente: Autores

Se realizó el diseño y el dimensionamiento del banco en el programa Inventor profesional 2018, como se evidencia en el anexo A donde se encuentran los planos definidos, con el fin de poder seguir con la fase de construcción.

2.5 Construcción del banco

Se procede a tomar medidas del material (figura 25) para la construcción de la estructura del banco de pruebas, con acero cold rolled. Luego se desarrollaron las etapas de corte a medida de los componentes (figura 26); soldadura con E6013 como material de aporte y 81 voltios (figura 27) y proceso de soldadura TIG (figura 28).

Figura 26. Medición de componentes para banco de prueba



Fuente: Autores

Figura 27. Corte del material



Fuente: Autores

Figura 28. Operación de soldadura

a) Material de aporte
Fuente: Autores

b) Equipo de soldadura TIG

Figura 29. Unión de las piezas por TIG.**Fuente:** Autores

Después de haber soldado la estructura del banco, se procedió a la aplicación de pintura en la estructura metálica para evitar la corrosión (figura 30) y a las láminas de madera que conforman el soporte (figura 31); la figura 32 presenta la base del banco completamente terminada.

Figura 30. Aplicación de recubrimiento de pintura estructura metálica.



Fuente: Autores

Figura 31. Pintura de láminas de madera que sujetan intercambiador y electrobomba



Fuente: Autores

Figura 32. Banco terminado



Fuente: Autores

2.6 Ensamble del intercambiador al banco.

Se procedió luego a ensamblar el intercambiador en el banco (figura 32) y a realizar la correspondiente adaptación en el laboratorio (figura 33), haciendo uso de los accesorios presentados en las tablas 10,11 y 12.

Figura 33. Ensamble del intercambiador en el banco de pruebas



Fuente: Autores

Figura 34. Adaptación en el laboratorio y ensamble de accesorios y tubería



Fuente: Autores

Figura 35. Adaptación de sensores y sellado con masilla.**Fuentes:** Autores**Tabla 10.** Accesorios para conexión hidráulica del intercambiador

NOMBRE	CANTIDAD	IMAGEN
Codo	10	
Semicodo	6	

NOMBRE	CANTIDAD	IMAGEN
Tubo	3	
Adaptador (Y)	1	
Buje 3/4"	5	
Teflón	3	
Pegante para tubos	2	

NOMBRE	CANTIDAD	IMAGEN
Aislante térmico	1	
Llave de paso de agua	4	
Pieza en T para fluido	3	
Reducción macho	4	

Fuente: Autores

Tabla 11. Accesorios mecánicos y digitales

NOMBRE	CANTIDAD	IMAGEN	DESCRIPCION
Medidor de caudal	1		<p>Permite medir el caudal proveniente de la electrobomba y el calentador. Consta de dos medidores que se encuentran ubicados en a la salida de los fluidos.</p>
Termómetro digital	4		<p>Mide las temperaturas de entrada y salida de los fluidos que circulan en el intercambiador.</p>
Calentador de agua	1		<p>Realiza el calentamiento del fluido, el cual pasara al interior de los tubos.</p>
Electrobomba	1		<p>Esta impulsa el fluido frio para que circule al interior de la carcasa del intercambiador.</p>

Fuente: Autores

3. Análisis de resultados

Se tomaron las medidas a criterio de intercambiadores comerciales similares estas se pueden evidenciar en la siguiente tabla, para el número de tubos se realizó los cálculos basados en el numeral RCB-7.126 TEMA en el cual hallamos el diámetro del círculo circunscrito de los tubos el cual dio un valor de 74,464mm ecuación (31), este valor es ligeramente mayor al diámetro interno de la carcasa, por lo tanto, el total de tubos tomado a criterio es adecuado.

Cada una de las partes se pueden ver con detalle en el en anexo A

Tabla 12. Características técnicas

Diámetro de la carcasa	76,2 mm
Longitud de la carcasa	510 mm
Diámetro externo de los tubos	10 mm
Diámetro interno de los tubos	8 mm
Longitud de los tubos	510 mm
Sección de entrada del intercambiador	53 mm
Espesor del aislante	5 mm
Numero de tubos	30
Potencia de la bomba	0.5 Hp
Potencia nominal del calentador	1,2kW
Distancia entre los centros de los tubos	12,5 mm
Material de todo el intercambiador	Acero inoxidable 316L
Material del banco	Acero coll rolled y láminas de madera

Fuente: Autores

Los fluidos a utilizar son agua caliente y fría, que con la ayuda de los termómetros digitales y un medidor de caudal como los muestra la tabla 11, se puede registrar los datos de caudal y temperaturas de entrada y salida que presenta cada fluido.

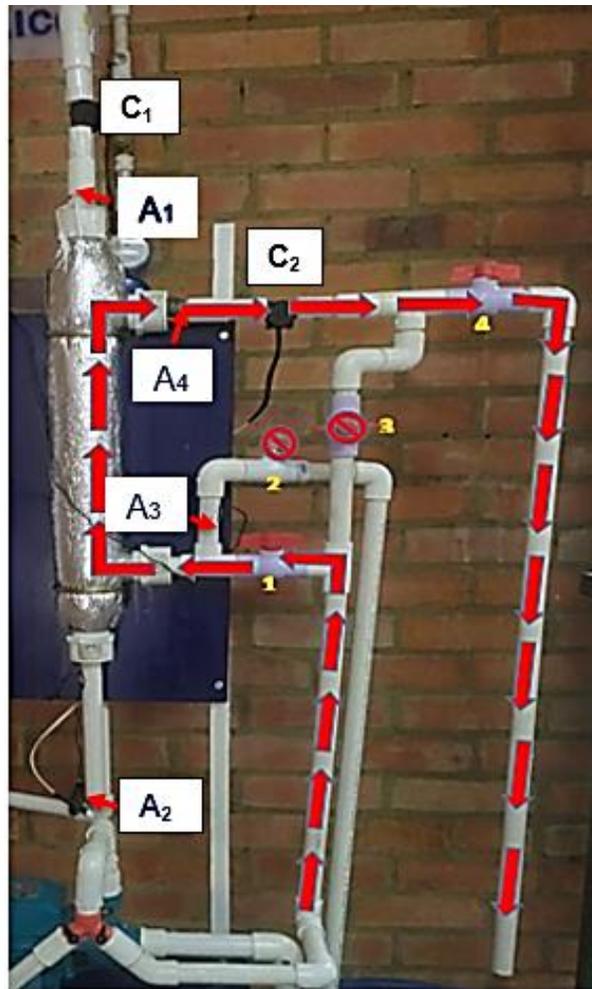
Para hacer circular estos fluidos se utilizó un calentador de agua y una electrobomba véase en la tabla 11, que generan un caudal máximo de 2lpm y 21lpm respectivamente. En la realización de las practicas se tomó a criterio el valor de 9 lpm para el caudal del fluido frio ya que este puede ser modificado, mientras que para el fluido caliente se dejó el mismo, esto porque es un caudal muy pequeño y no es conveniente modificarlo.

se realizaron prácticas de laboratorio haciendo circular el fluido frío en dos direcciones (paralelo y contraflujo) al interior de la carcasa, y el fluido caliente en una sola dirección al interior de los tubos, esto con el fin de comprobar la efectividad de cada uno de los sistemas.

- **Flujo paralelo**

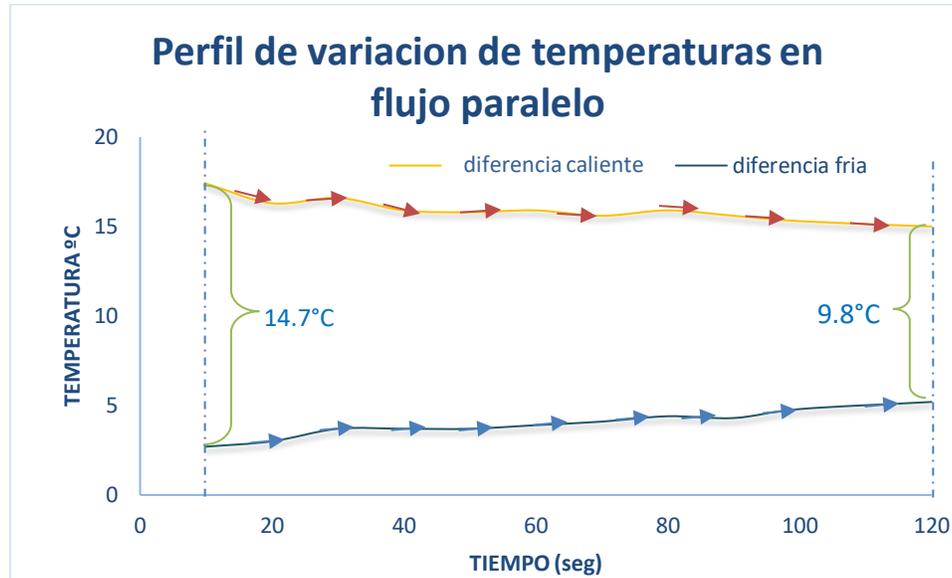
Para que el sistema esté en flujo paralelo se deben cerrar las llaves de paso (2) y (3), las temperaturas fueron registradas con termómetros digitales ubicados en los puntos (A1, A2, A3, A4), y los caudales se registraron con medidores de caudal ubicados en los puntos (C1, C2) como se muestra en la figura.

Figura 36. Sistema de flujo paralelo



Fuente: Autores

Figura 37. Perfil de variación de temperatura en flujo paralelo

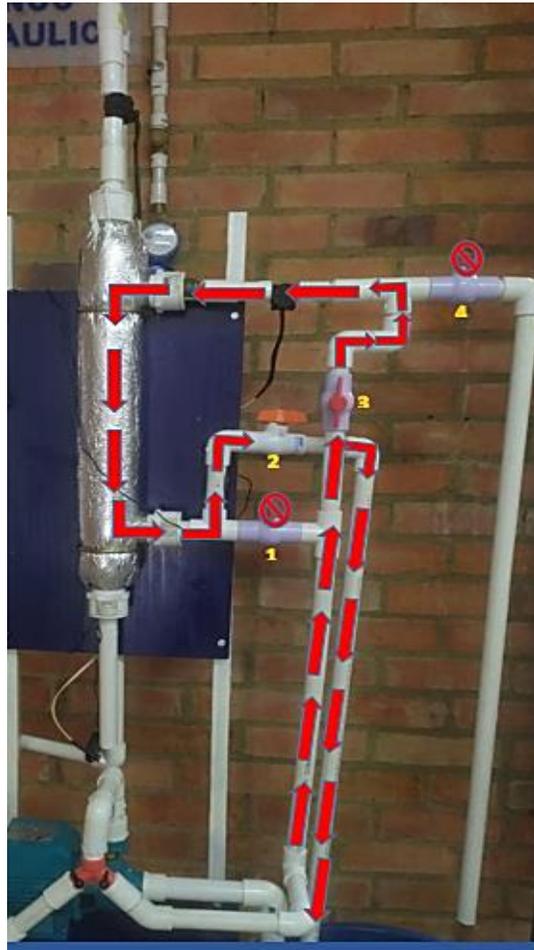


Fuente: Autores

En este gráfico podemos observar que al tomar valores de la diferencia de temperaturas del fluido caliente y el frío, la diferencia de temperatura más grande entre los dos fluidos es de 14.7 °C y transcurridos 120 segundos la más pequeña es de 9.8°C, estas van a tratar de llegar a un equilibrio térmico a medida que pasa el tiempo.

- **Contraflujo**

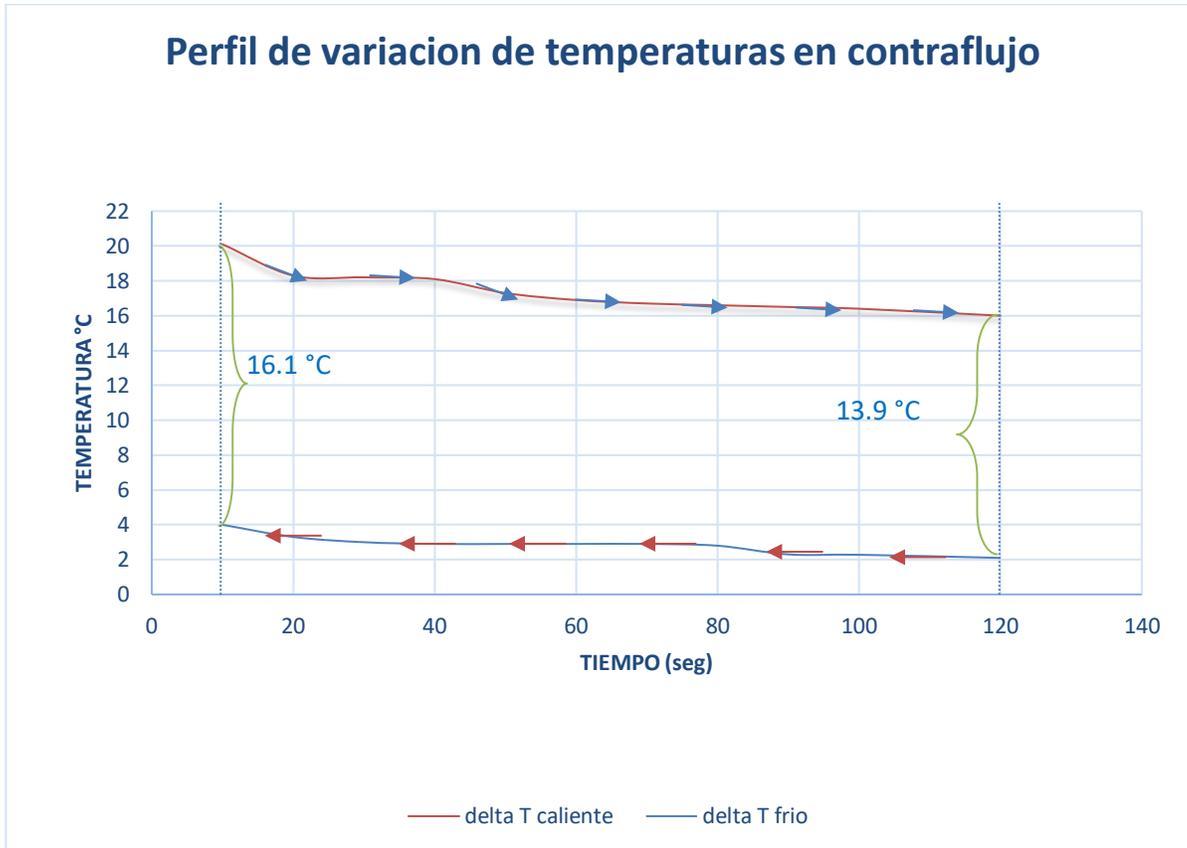
Para que el sistema esté en contraflujo se deben cerrar las llaves de paso (1) y (4) las temperaturas fueron registradas con termómetros digitales ubicados en los puntos (A1, A2, A3, A4), y los caudales se registraron con medidores de caudal ubicados en los puntos (C1, C2) como se muestra en la figura.

Figura 38. Sistema de contraflujo

Fuente: Autores

Al graficar el delta de temperatura del fluido caliente y el fluido frío durante 120 segundos se obtiene la gráfica de variación de temperatura en contraflujo.

Figura 39. Perfil de variación de temperatura en contraflujo



Fuente: Autores

La gráfica se evidencia una circulación de fluido frío en contraflujo con un caudal de 9 L/min con respecto al caliente que circula a (2) Lt/min, de esta manera aumenta su temperatura de manera inversa, y la temperatura del fluido caliente disminuye en el otro sentido. Se presenta una diferencia de temperatura entre los dos fluidos máximos de 16.1 ° C y una mínima de 13,9 °C, esto quiere decir que a razón del tiempo esta va disminuyendo.

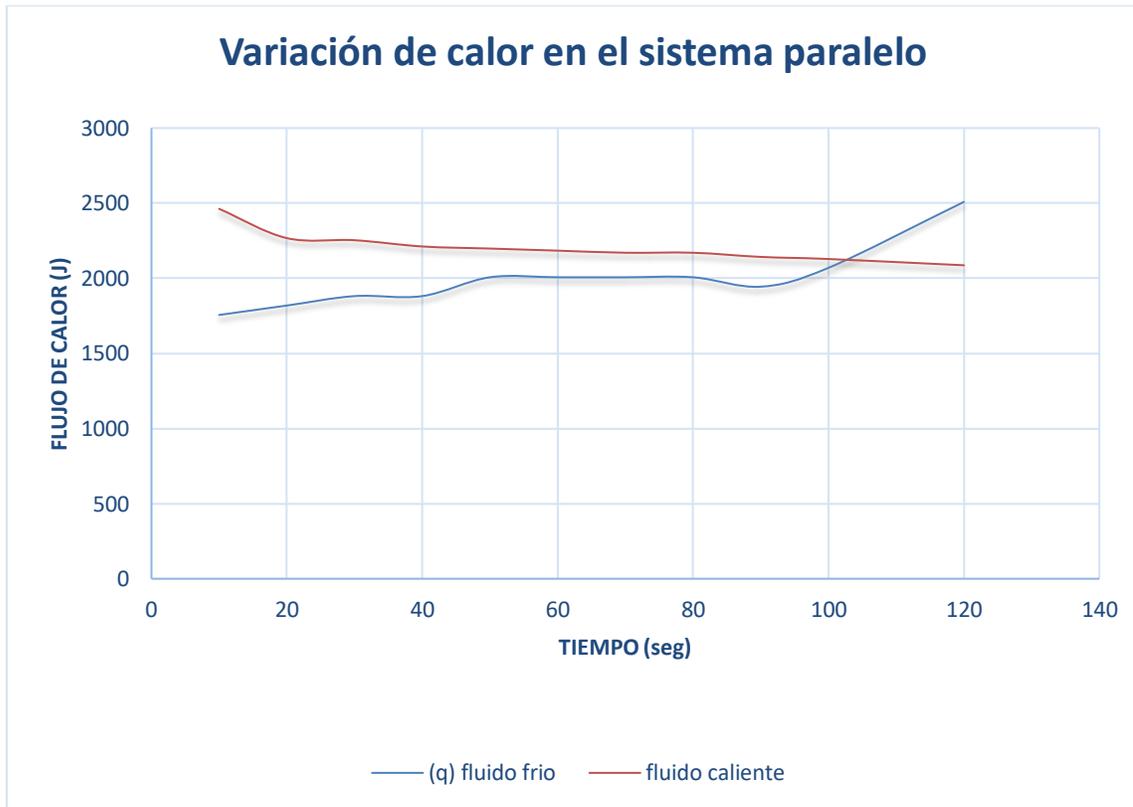
Haciendo una comparación con el sistema en paralelo, podemos evidenciar que hay una diferencia de temperaturas máximas y mínimas con respecto al contraflujo, esto nos quiere decir que el fluido frío va adquirir mayor temperatura en contraflujo que en paralelo, lo que se traduce a un mejor desempeño en la velocidad de transferencia de calor.

• Transferencia de calor en el sistema paralelo

La transferencia presente en el intercambiador ocurre por convección a través del fluido y por conducción por la pared que los separa, para que ocurra se tiene en cuenta la configuración del equipo.

En el presente grafico se observa la variación de calor que presenta el fluido caliente con respecto al tiempo.

Figura 40. Variación del calor en el fluido caliente y frio



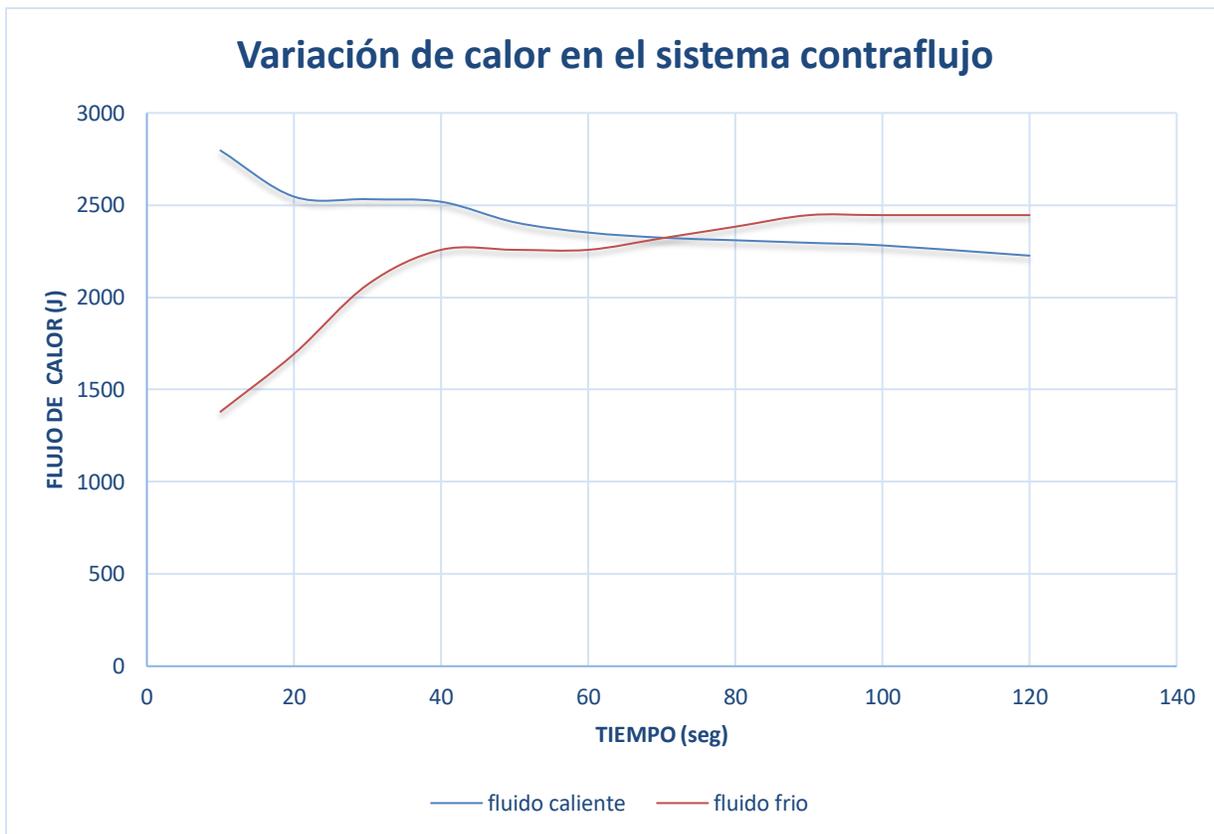
Fuente: Autores

El calor que se muestra para el fluido caliente es negativo pero se coloca en términos absolutos. Se observa que la velocidad con la que el fluido caliente pierde calor es superior a la velocidad con la que el frío gana calor debido a que el caudal del fluido caliente es de 2 L/min mientras que el del frío es de 9L/min.

Se puede observar que aproximadamente en el segundo 105 la cantidad de calor que un fluido ganaba y el otro lo perdía es la misma.

- **Transferencia de calor en el sistema contraflujo**

Figura 41. Variación de calor en el sistema contraflujo



Fuente: Autores

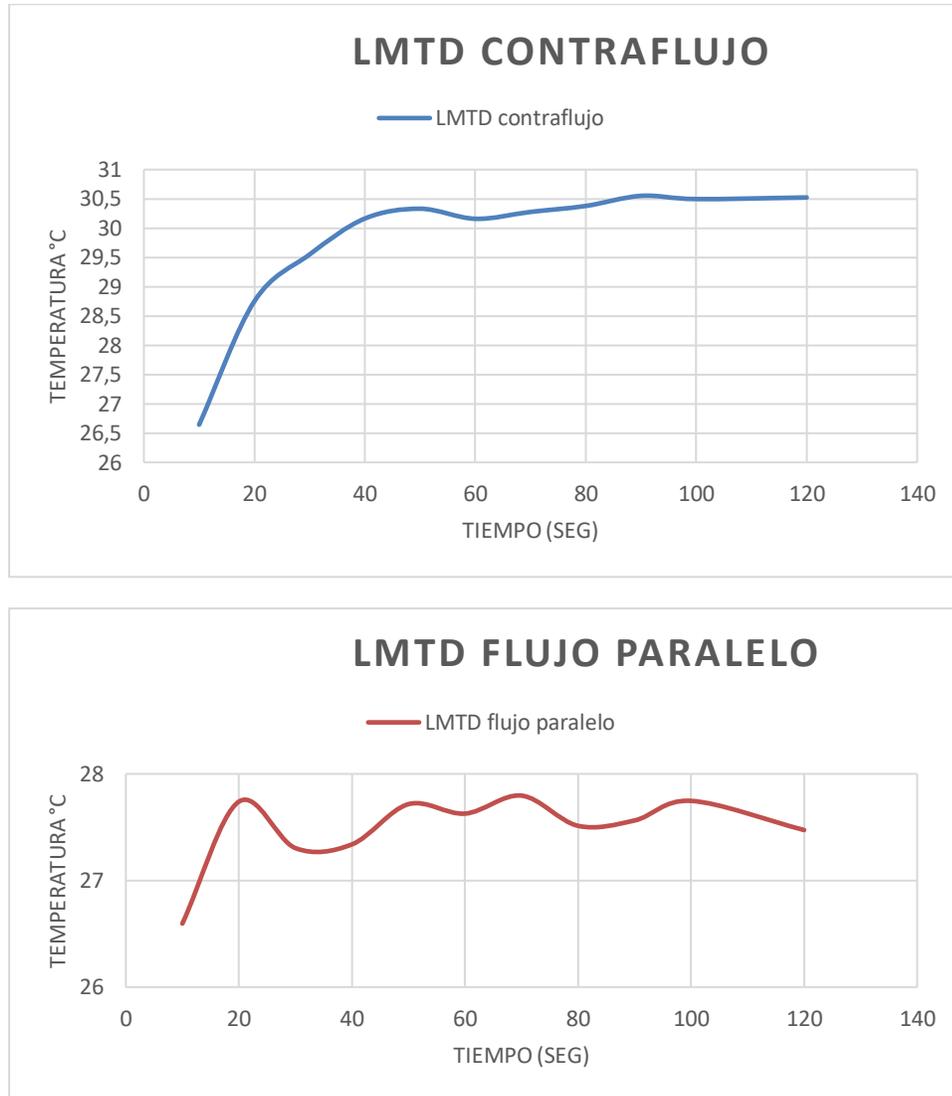
En este gráfico se evidencia que el calor del fluido caliente tiene un descenso, debido a que la circulación del fluido frío que ingresa en sentido contrario se lleva parte de este calor, de esta manera la pérdida y ganancia será de 570,44 (J) y 1066,15 (J) y en el instante de tiempo 70 segundos estos serán iguales.

El calor cedido por el fluido caliente es muy inferior al calor recibido por el fluido frío esto debido a que el calentador no permite si no un caudal de 2 lpm, para un flujo másico de 0,03284 kg/s mientras que el fluido frío se hizo pasar a 9 lpm, con un flujo másico de 0,15 kg/s, para que la pérdida y ganancia fuera igual se tendría que hacer pasar los fluidos a un mismo caudal.

- **Temperatura media logarítmica (LMTD) flujo paralelo y contraflujo**

Representa la variación de la temperatura que experimentan los fluidos a través de su paso por el intercambiador de calor, ya que estas temperaturas no son constantes, esto porque en diferentes puntos un fluido va perdiendo calor y el otro lo va ganando.

Figura 42. LMTD en flujo paralelo y contraflujo



Fuente: Autores

Como los indican los autores Yang, W.M, Chua, K.J y Islam, M.R la causa de la diferencias en flujo paralelo y contra flujo respecto a LMTD es. Es porque para un punto X a lo largo del intercambiador, es decir, en dirección del flujo, en el contraflujo siempre se va a presentar una diferencia grande de temperatura entre los dos fluidos, ya que en este tipo

los dos fluidos tardan más en encontrarse, mientras que en flujo paralelo los dos fluidos para una distancia X se encuentran más rápidamente y por lo tanto la diferencia de temperatura es más pequeña (Bergman et al., 2011).

En flujo paralelo los dos fluidos entran del mismo lado del intercambiador, es decir, tienen cercanía, y por ello poco tiempo para ganar o perder calor, según el fluido. Mientras que en contraflujo, los dos fluidos están lejanos relativamente, por lo que tendrán más tiempo de ganancia de calor, que aunque la tasa pueda llegar a ser la misma en flujo paralelo y contra flujo, los fluidos tendrán más tiempo para ganar calor y por lo tanto la diferencia de temperatura será mayor.

Cálculos reales de efectividad y NTU para flujo paralelo y contraflujo

Los siguientes datos son obtenidos mediante los cálculos necesarios para determinar la efectividad y el NTU del intercambiador, con datos reales obtenidos de la práctica en las dos direcciones del fluido paralelo y contraflujo.

Tabla 13. Datos en paralelo

LMTD	U(coeficiente de transferencia total)	Razones de capacidad calorífica		Relacion de capacidad	Transferencia máxima de calor	Efectividad	NTU PARALELO
		Ch	Cc	C	Q _{max}	E	NTU
26.49	329	139.10	625.58	0.22	5424.92	0.77	2.36
As	calor Q						
0.48	4189.46						

Tabla 14. Datos en contraflujo

LMTD	U(coeficiente de transferencia total)	Razones de capacidad calorífica		Relacion de capacidad	Transferencia máxima de calor	eficiencia	NTU CONTRAFLUJO
		Ch	Cc	C	Q _{max}	E	NTU
29.88	329	139.10	625.67	0.22	5564.02	85%	2.16
As	calor Q						
0.48	4723.66						

En el anexo B podemos observar la guía de laboratorio donde se podrá hacer las diferentes prácticas mencionadas en este trabajo, donde el estudiante podrá afianzar los conocimientos teóricos de transferencia de calor y termodinámica llevándolos a la práctica.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se diseñó un intercambiador de calor con una carcasa de un solo paso y una disposición en los tubos alienado rotado, con un coeficiente total de transferencia de calor U de $329W/m^2.K$ y un área intercambio de calor A_s de $0.48m^2$, fluido caliente con densidad de 983.3 kg/m^3 a una temperatura de 60°C Y fluido frio a una densidad de 998 kg/m^3 a 20°C .
- El diseño se realizó bajo criterios de la norma TEMA tales como; RCB-2.4, RCB-7.126, RCB-7.1, T-3.1, para hallar, la disposición de los tubos, diámetros para corroborar el número de tubos seleccionados a criterio, el coeficiente de transferencia de calor por convección y factores de corrección dependientes de la geometría.
- El diseño y dimensiones del banco fueron basadas en el espacio disponible en el laboratorio de fluidos de la sede UAN Tunja, el modelado se realizó en el software Inventor.
- Se construyó un banco para de ensayos de transferencia de calor utilizando acero inoxidable 316L para el intercambiador y acero coll rolled para el banco.
- los ensayos arrojaron en el sistema paralelo una diferencia de temperatura promedio de 16°C eficiencia al sistema del 77% y en contraflujo de 18°C . una eficiencia del 85%.
- se diseñó una guía de laboratorio con las especificaciones técnicas del banco, describiendo uso y posibles aplicaciones en el desarrollo de prácticas de asignaturas relacionadas.

4.2 Recomendaciones

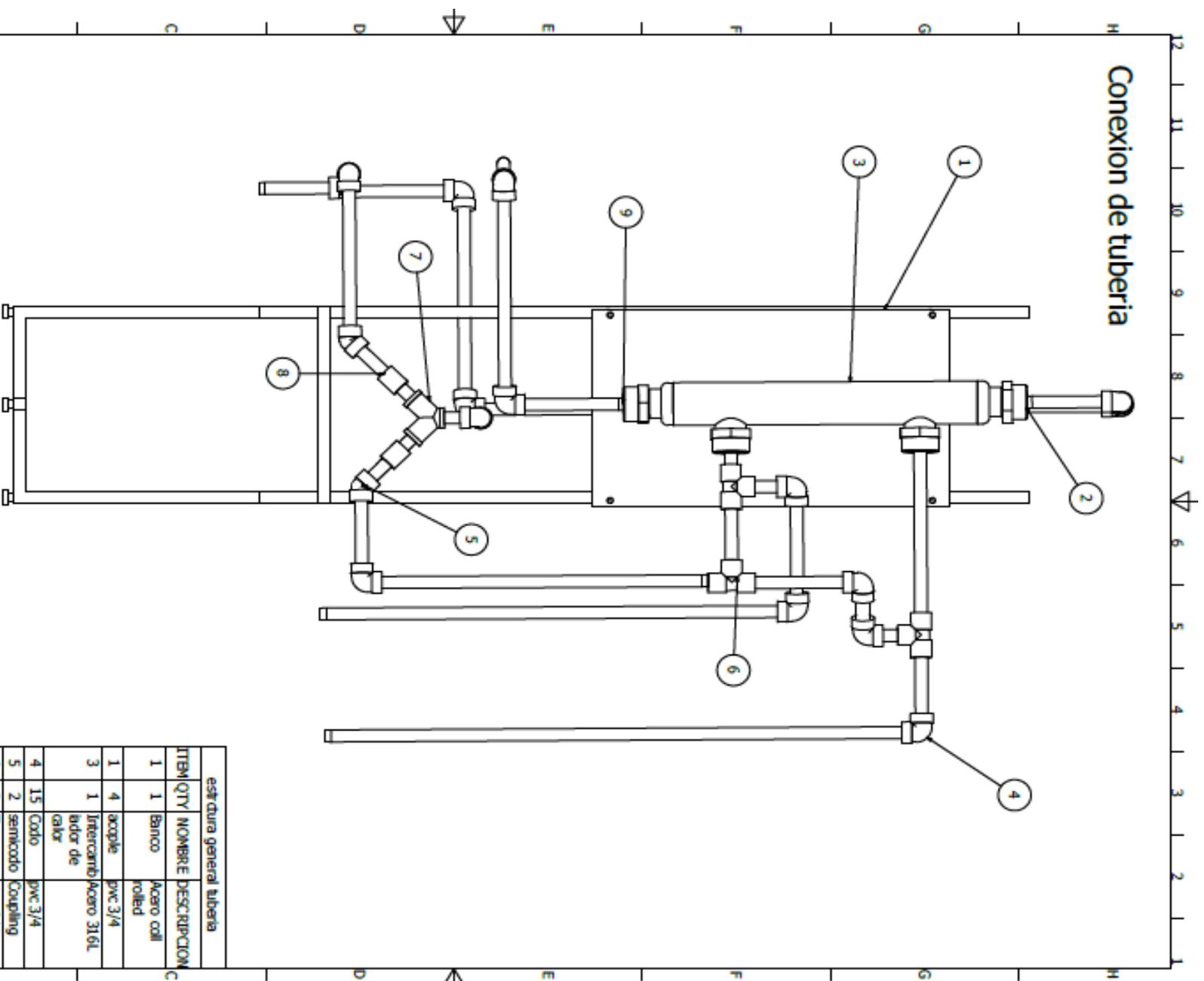
Realizada la validación y funcionamiento del intercambiador de calor se evidencio posibles mejoras tales como:

- En la regulación de la presión de la bomba sería bueno que las dos salidas retornen al mismo recipiente, esto para evitar un desperdicio de agua.
- El agua en la salida del fluido frio depositarla en un recipiente diferente, así el fluido frio de entrada mantendrá su temperatura estable.
- Tener en cuenta un retorno del agua para evitar pérdidas del fluido
- Se puede instalar un calentador solar para calentar nuestro fluido y hacer un estudio completo del rendimiento del calentador solar e intercambiador de calor.
- Se recomienda aumentar el caudal del calentador para tener mejores resultados de transferencia de calor.

Anexo A: planos estructurales de intercambiador y banco

Planos diseñados en el programa inventor.

Conexion de tubería



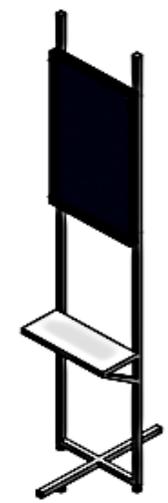
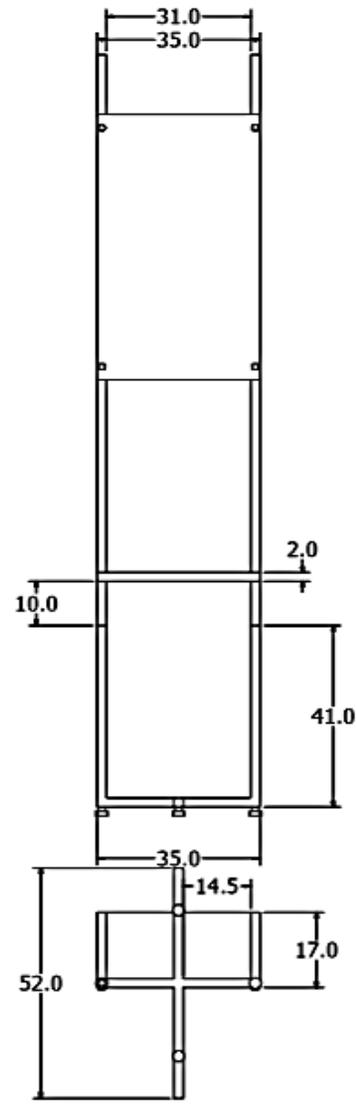
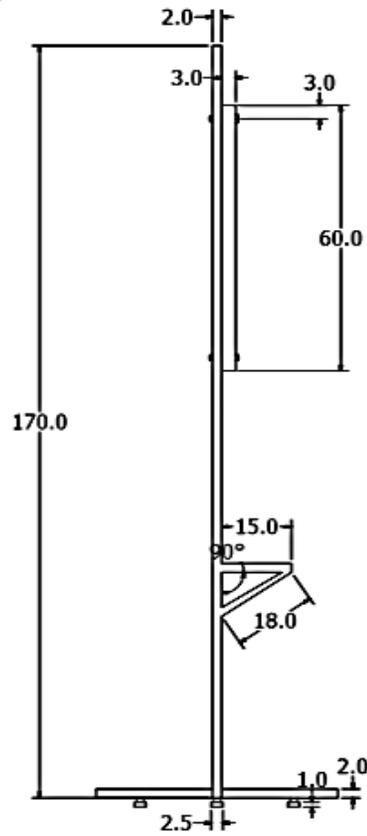
estructura general tubería	
ITEM	QTY / NOMBRE / DESCRIPCION
1	1 Banco Acero coil rold
1	4 acople pvc 3/4
3	1 Intercambi Acero 316L bidor de calor
4	15 Codo pvc 3/4
5	2 semicodo Coupling
6	3 Tee pvc 3/4
7	1 Conector Y
8	2 Union pvc 3/4
9	4 reductor pvc 1 1/2 a 3/4

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES
FAUL TIVO INGENIERIA MECANICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES
FAUL TIVO INGENIERIA MECANICA

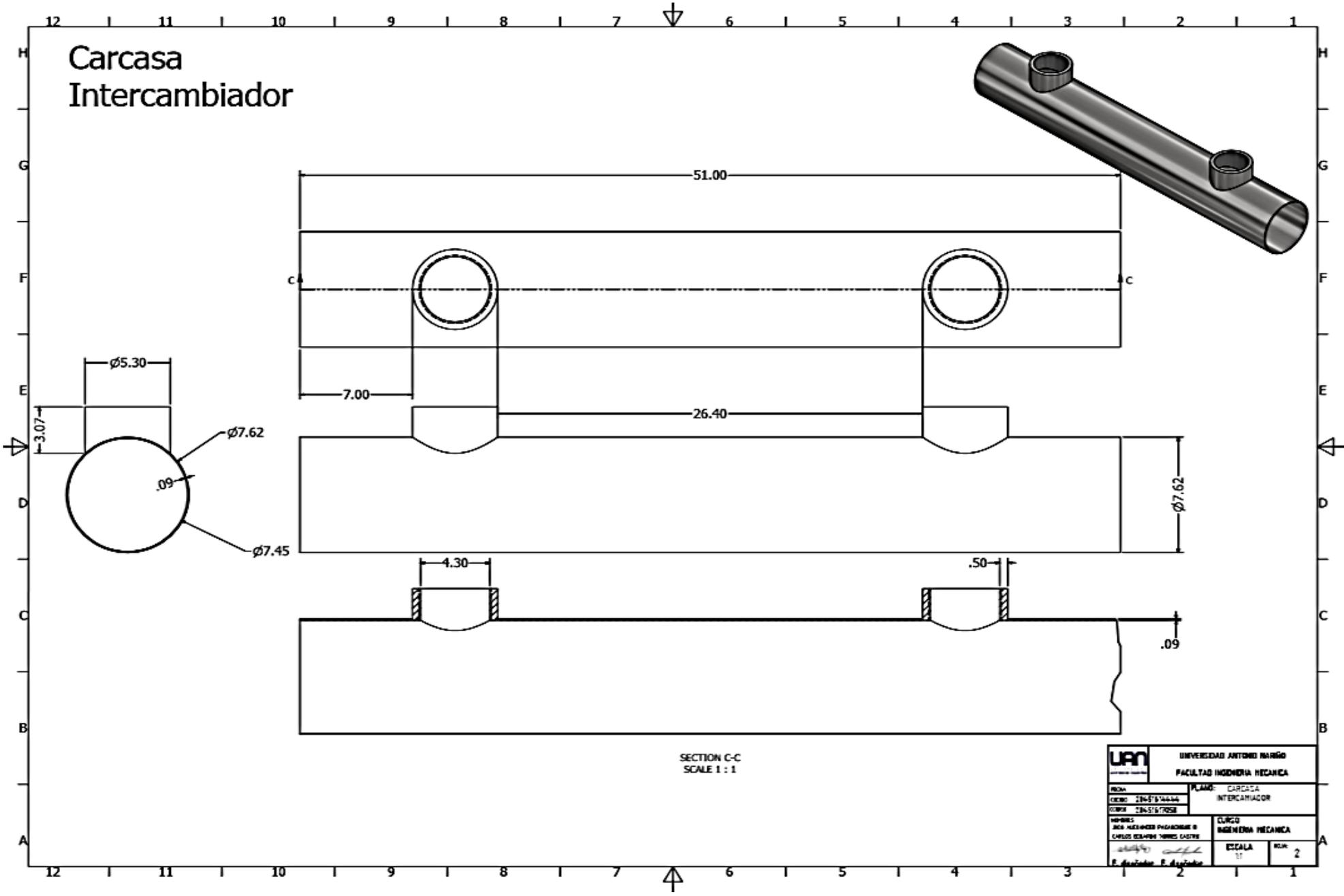
PROYECTO: **PLANO CONEXION**
 TITULO: **RETIENAS PARA**
 AREA: **TRUSTABLE**
 CARRERA: **INGENIERIA MECANICA**
 ESCALA: **1:1**
 FECHA: **2023**

Banco de pruebas



UNIVERSIDAD ANTONIO NARRO	
FACULTAD INGENIERIA MECANICA	
PLANO: ESTRUCTURA DEL BANCO	
FECHA: 20-5-2022	
PROFESOR: CARLOS ROBERTO TORRES CASTRO	CURSO: INGENIERIA MECANICA
ALUMNO: P. Gonzalez	ESCALA: 1:5
	PLA: 1

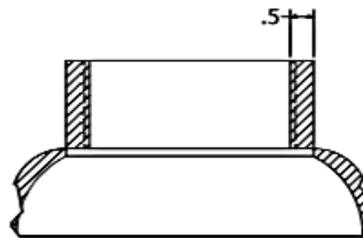
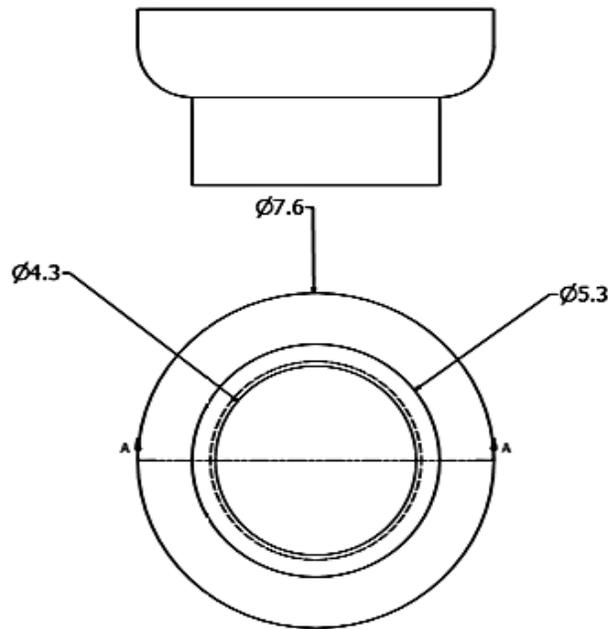
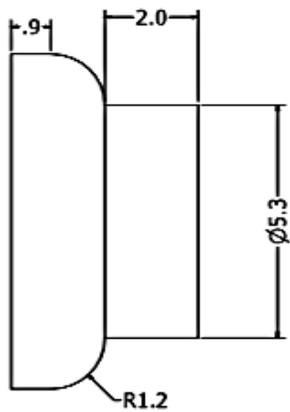
Carcasa Intercambiador



SECTION C-C
SCALE 1 : 1

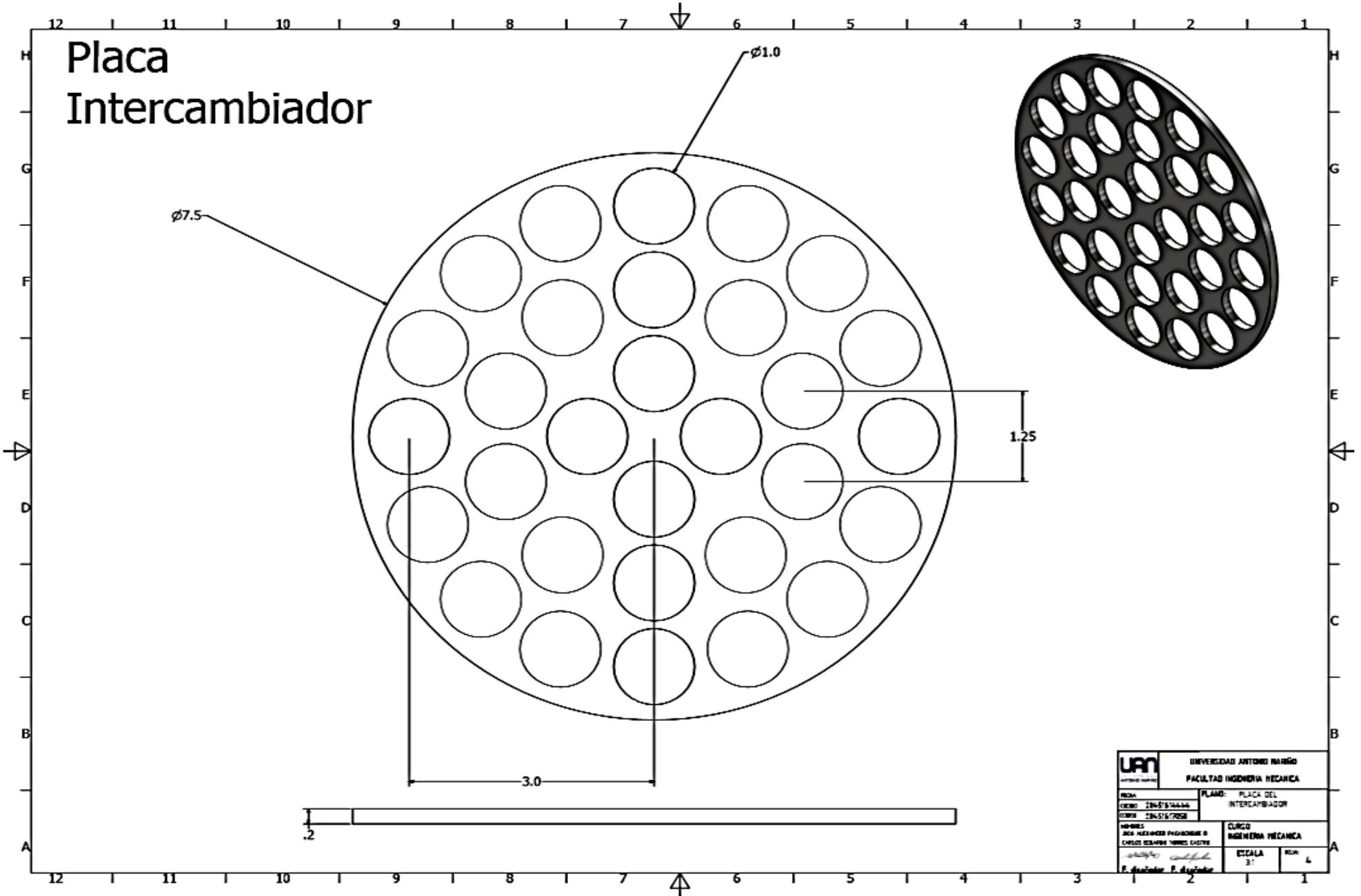
		UNIVERSIDAD ANTONIO MARRERO FACULTAD INGENIERIA MECANICA	
NOMBRE: CARRERA: CURSO:	PLANO: INTERCAMBIADOR	CARGO: INGENIERIA MECANICA	ESCALA: 1:1
NOMBRE: CARLOS ESCOBAR TORRES	F. Escobar	NOMBRE: F. Escobar	NÚMERO: 2

Cabezal Intercambiador



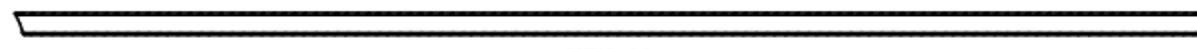
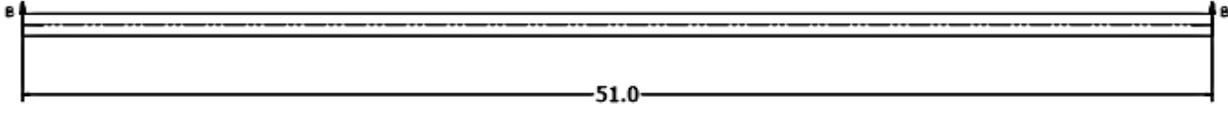
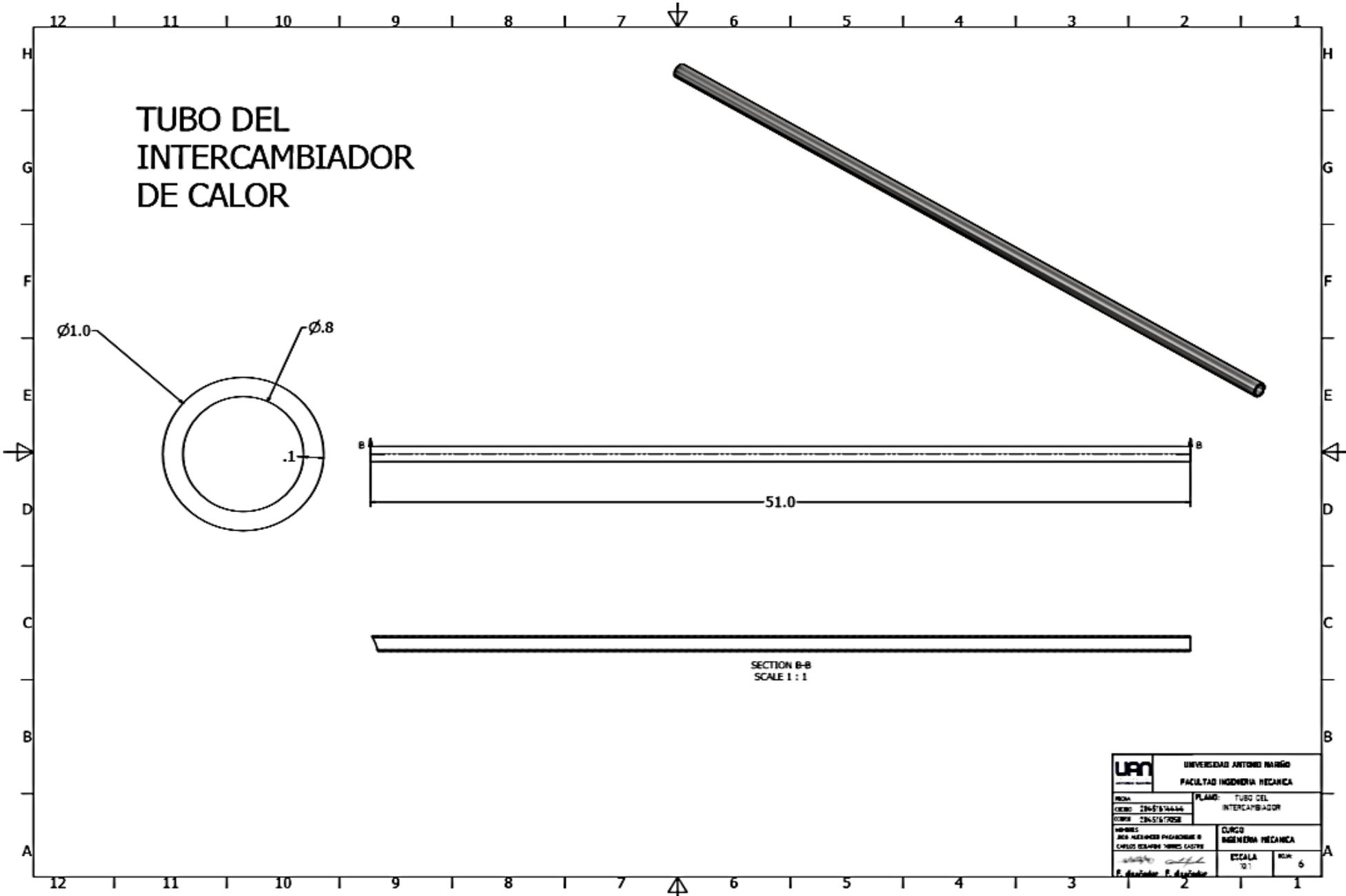
		UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO FACULTAD INGENIERIA MECANICA	
TEMA: CARGO: 2045/2044 CORRE: 2045/2044	PLANO: CABEZAL DEL INTERCAMBIADOR		
NOMBRES: JOSE ALEXANDER PARRAMONDE O CARLOS DELAVIDA TORRES CASTRO	CARGO: INGENIERA MECANICA		
F. de entrega: F. de entrega	ESCALA: 2:1	NO. de: 5	

Placa Intercambiador



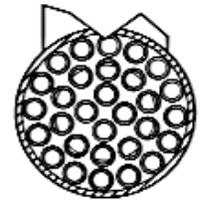
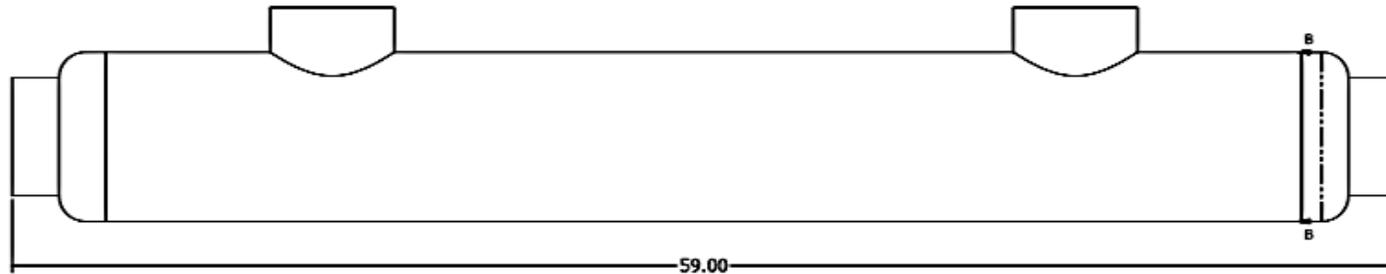
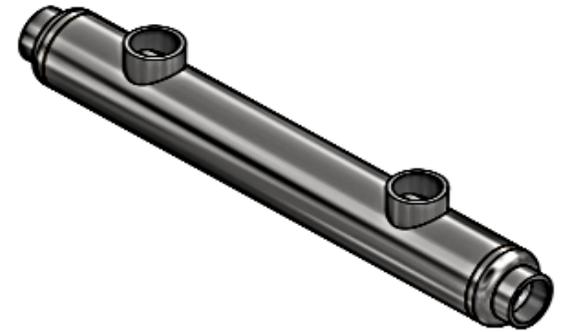
		UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO FACULTAD INGENIERIA MECANICA	
NOMBRE: CAROL ESTEBAN NARINO CASTRO	NOMBRE: CAROL ESTEBAN NARINO CASTRO	PLANO: PLACA DEL INTERCAMBIADOR	CURSO: INGENIERIA MECANICA
ESCALA: 3:1	NOMBRE: F. Acosta	NOMBRE: F. Acosta	NOMBRE: F. Acosta

TUBO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR



UAN		UNIVERSIDAD ANTONIO MARIÑO	
		FACULTAD INGENIERIA MECANICA	
PROJ: 2045/0444	PLANO: TUBO DEL INTERCAMBIADOR		
COMP: 2045/0702			
NOMBRE: JESUS ALEJANDRO PARRONCHI B CARRILLO ESCOBAR MARIO LUSTRE F. de autor: F. de autor		CARGO: INGENIERIA MECANICA ESCALA: 1:1 HOJA: 6	

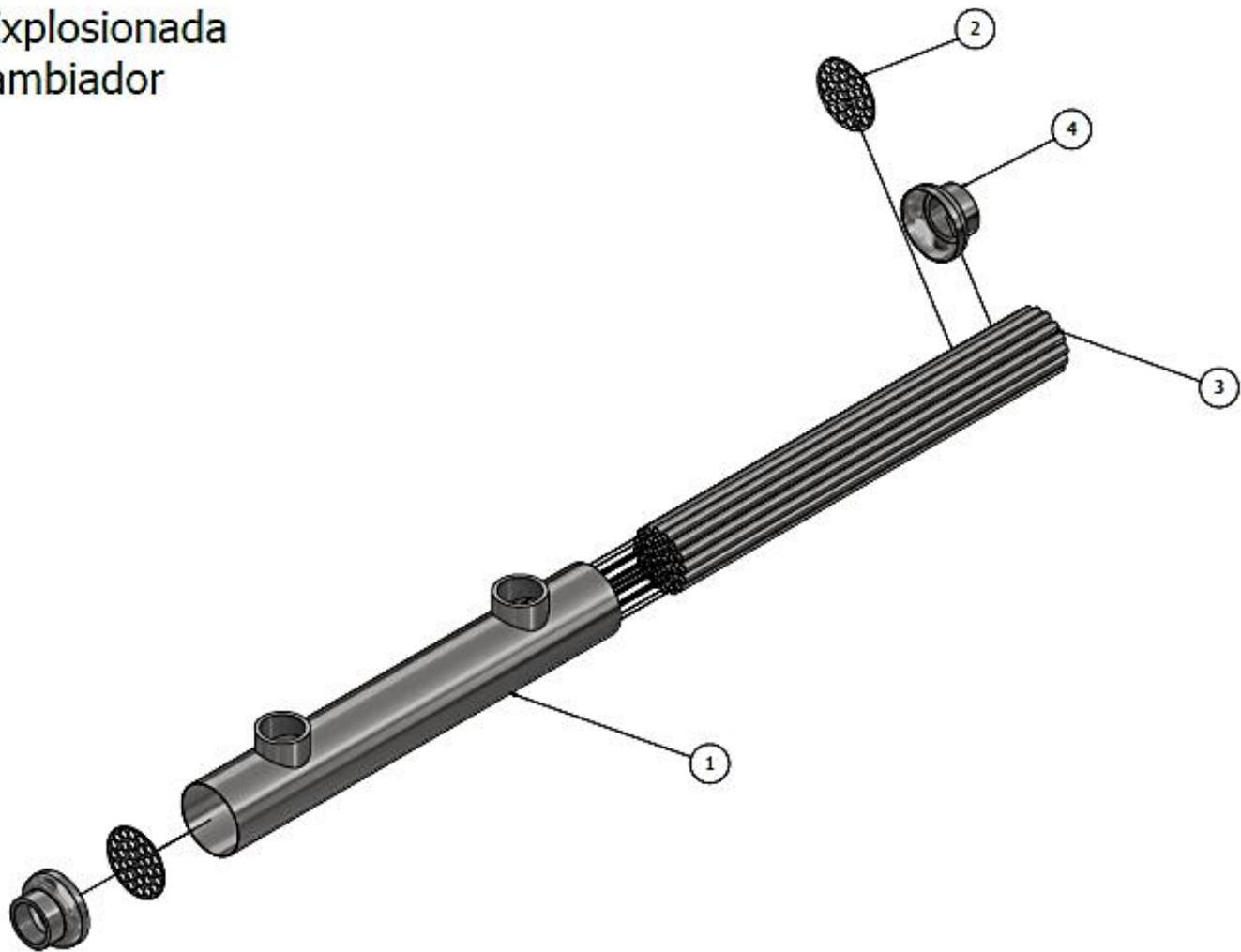
Intercambiador



SECTION B-B
SCALE 1:1

		UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO FACULTAD INGENIERIA MECANICA	
NOMBRE: DISEÑO: 2015/03/04 CORRE: 2015/03/05		PLANO: INTERCAMBIADOR	
NOMBRES: JOSE ALEXANDER PARRAMONTE B CARLOS BELTRAN NARRO CASTRO		CARGO: INGENIERA MECANICA	
F. de aprobación: F. de revisión:		ESCALA: 1:1	HOJA: 3

Vista Explosionada Intercambiador



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	CARCAS A	Acero inoxidable 316L
2	2	PLACA	Acero inoxidable 316L
3	30	TUBOS	Acero inoxidable 316L
4	2	CABEZAL	Acero inoxidable 316L

 UNIVERSIDAD ANTONIO RIVERO <small>UNIVERSIDAD ANTONIO RIVERO</small> <small>FAVULTAD INGENIERIA MECANICA</small>		<small>UNIVERSIDAD ANTONIO RIVERO</small> <small>FAVULTAD INGENIERIA MECANICA</small>	
<small>PROF. SALDIBERRILLAN</small> <small>PROF. SALDIBERRILLAN</small>		<small>PLANO: CARCASA INTERCAMBIADOR</small>	
<small>INGENIERO</small> <small>JUAN ALEXANDER FIGUEROA B</small> <small>CALLE BOQUERON 70000 CANTON</small>		<small>CURSO</small> <small>INGENIERIA MECANICA</small>	
<small>F. Saldiberrillan</small> <small>F. Saldiberrillan</small>		<small>ESCALA</small> <small>1:2</small>	<small>HOJA</small> <small>2</small>



UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD INGENIERIA MECANICA

FECHA

PLANO: INTERCAMBIADOR

CODIGO 20451614444

CODIGO 20451617058

NOMBRES

JHON ALEXANDER PACANCHIQUE R
CARLOS EDUARDO TORRES CASTRO

CURSO

INGENIERIA MECANICA

F. diseñador F. diseñador

ESCALA

1:1

HOJA:

3

Anexo B: Guía de laboratorio

Se realizó la guía de laboratorio para la aplicación en el intercambiador de calor de carcasa y tubo, con el fin de que los estudiantes afiancen con el banco didáctico los conocimientos que aprenden en las clases de transferencia de calor y termodinámica.

LABORATORIO No 1: RECONOCIMIENTO Y MANEJO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR CARCASA Y TUBO

PROGRAMA: INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: TERMODINÁMICA , TRANSFERENCIA DE CALOR

NOMBRE DEL DOCENTE:

FECHA:

1. Objetivos

General:

- Conocer el funcionamiento general de un intercambiador de calor de carcasa y tubo, calcular el calentamiento o enfriamiento indirecto de una corriente a otra separada por una pared.

Objetivos específicos

- Tomar la lectura de los caudales que registra el medidor de caudal a la salida del fluido frío y caliente, se recomienda tomar la lectura del caudal del fluido frío con los registros a la mitad.
- Registrar los datos de las temperaturas en la entrada y salida de los fluidos en el intercambiador

cuando la dirección del fluido este en sentido paralelo como lo muestra la imagen.

- Registrar los datos de las temperaturas en la entrada y salida de los fluidos en el intercambiador cuando la dirección del fluido este en sentido contraflujo como lo muestra la imagen.
- Realizar cálculos para hallar LMTD en los dos sistemas (paralelo y contraflujo) y realizar conclusiones de los resultados obtenidos.
- Encontrar las diferencias de flujo paralelo y contracorriente
- Hallar el coeficiente de transferencia de calor en todo el intercambiador.

- Calcular la efectividad

2. Introducción

Los intercambiadores de calor son equipos que permiten la circulación interna de fluidos con la finalidad de transferir energía calorífica de un medio a otro; en un caso particular como los intercambiadores de carcasa y tubo, el intercambio de energía calorífica entre los tubos internos con el fluido externo cubierto por la carcasa, se logra a través de un fluido calentador o un refrigerante. Este tipo de intercambiador de calor es ampliamente utilizado en todo tipo de industria, especialmente en la química y petroquímica, generando en los procesos ventajas competitivas debido al ahorro y uso eficiente de la energía que proporcionan; por tanto, para los diferentes usos y factores donde se requieren equipos de intercambio de calor es muy importante conocer el funcionamiento de los mismos, para lograr de ellos un óptimo desempeño y sacarles el mayor provecho.

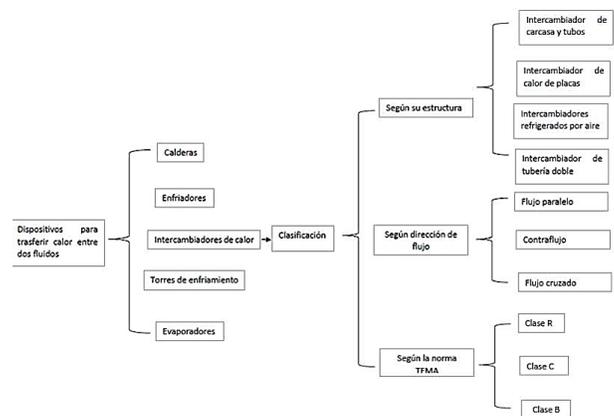
3. Marco teórico

A mediados del siglo XIX en los inicios de la Revolución industrial, el ingeniero e inventor John Ericsson inventó el intercambiador de carcasa y tubo, el cual implementó para la condensación de vapor de embarcaciones que transportaban mercancías y personas. Gracias a ese primer diseño, se implementaron diferentes formas y configuraciones de manera global en todo

tipo de industrias tales como: Alimentaria, automotriz, petrolera, petroquímica, química, refrigeración, en el sector energético y procesos de generación de energía.

- Clasificación general de los dispositivos de transferencia de calor.

Clasificación general de los dispositivos de transferencia de calor.



Fuente: autores

Calderas.

Son sistemas que se utilizan en diversos procesos térmicos como producción de agua caliente y vapor para diferentes fines industriales; este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, estando el fluido en estado líquido y al calentarse cambia su fase a vapor saturado

Enfriadores

Son máquinas frigoríficas que sirven para enfriar un líquido que por lo general es agua; este fluido circula desde el exterior mediante un bombeo mecánico

Evaporador

Es un sistema de intercambio de calor diseñado para la transferencia de energía térmica desde un medio a enfriar hacia un refrigerante

Torres de enfriamiento.

Son un tipo de intercambiadores utilizados para enfriar un fluido utilizando el aire del ambiente, utilizando el principio de enfriamiento evaporativo

Intercambiador de calor

Es una máquina que permite el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas hasta obtener un punto de equilibrio de éstas. La transferencia de calor que se presenta se da por convección y conducción

Convección

La transferencia de calor por convección se da cuando un fluido o un gas está en movimiento e interactúa con la superficie de un sólido, generando un efecto que combina el proceso de conducción y el movimiento de los fluidos, cuanto mayor sea el movimiento del fluido mayor será la transferencia de calor por convección.

Conducción

La conducción es el modo de transferencia de calor que se da en escala atómica, las moléculas más energéticas ceden energía a las adyacentes de menor energía, provocando un flujo de calor desde las temperaturas más altas hacia las más bajas. La transferencia de calor por conducción se da en cuerpos sólidos, líquidos o gases

Radiación

En este tipo de transferencia de calor no es necesario el contacto de una fuente de calor con el objeto a calentar, a diferencia de los otros mecanismos que si lo requieren; el calor es emitido por un cuerpo debido a su temperatura bastante elevada, que se transmite como energía por medio de ondas electromagnéticas debido a las configuraciones electrónicas de átomos o moléculas; es la transferencia más rápida y no sufre atenuación en el vacío

Según la dirección del flujo

Por la dirección en la que se cruzan los fluidos que circulan al interior, los intercambiadores de calor pueden ser de:

Flujo paralelo.

Sucede cuando el fluido que circula por el interior de los tubos y en el exterior es decir el de la carcasa, fluyen en la misma dirección. Debido a que presentan una diferencia de temperatura significativa el calor se transfiere del fluido de mayor temperatura hasta el de menor temperatura intentando alcanzar el equilibrio térmico entre ellos.

Contraflujo. Se denomina contraflujo porque el fluido caliente que cruza por el interior de los tubos va en dirección contraria al flujo del fluido frío que pasa sobre los tubos y al interior de la carcasa. Este proceso suele ser más eficiente en la transferencia de calor.

4. Solucion guia laboratorio

Primero se conectara el calentador a la toma de 220V, se verificará las termocuplas y el paso de agua al calentador luego se mide la temperatura deseada en el calentador se pondrá el paso de agua fría en el sentido que se desea realizar la práctica.

Se hace pasar de forma paralela dos fluidos de agua a distinta temperatura el cual el agua fría va a pasar al exterior de los tubos y al interior de la carcasa una vez que estén pasando los fluidos se tomaran los datos de entrada y salida por unos minutos

Sistema de flujo paralelo



Figura 1. Sistema de flujo paralelo

5. Datos experimentales en flujo paralelo

Tabla 1. Datos de temperaturas de entrada.

T(S)	DATOS	CALIENTE ENTRADA	FRIA DE ENTRADA
10	T1 (°C)	58	20.1
10	T2 (°C)	58.8	20.3
10	T3 (°C)	58-8	20.1
10	T4 (°C)	58-8	20.5
10	T5 (°C)	59,2	20.4
10	T6 (°C)	59,2	20.3
10	T7 (°C)	59,2	20.5
10	T8 (°C)	59,2	20.2
10	T8 (°C)	59,2	20.4

T(S) Temperatura en segundos.

Tabla 2. Datos de temperatura de salida

DATOS	CALIENTE SALIDA	FRIA DE SALIDA
T1 (°C)	40,3	22,8
T2 (°C)	42,5	23,3
T3 (°C)	42,6	23,8
T4 (°C)	42,6	24,2
T5 (°C)	43,4	24,3
T6 (°C)	43,5	24,5
T7 (°C)	43,6	24,7
T8 (°C)	43,8	24,8
T8 (°C)	44,2	25
Q(CAUDAL)	2(lpm)	9 (lpm)

6. Resultados

Primera parte

Las diferencias de temperatura simple para los dos fluidos en paralelo.

Flujo paralelo

Tabla: 3 diferencia de temperaturas fluido caliente y frio

Nº DE PRUEBAS	ΔT_c	ΔT_f
T1 (°C)	17,7	2,7
T2 (°C)	16.3	3
T3 (°C)	16,2	3,7
T4 (°C)	15,9	3,7
T5 (°C)	15,8	3,7
T6 (°C)	15,7	3,9
T7 (°C)	15,6	4,1
T8 (°C)	15,6	4,4
T8 (°C)	15,4	4,3
Q(CAUDAL)	2 (lpm)	9 (lpm)

ΔT_c =diferencia de temperatura caliente

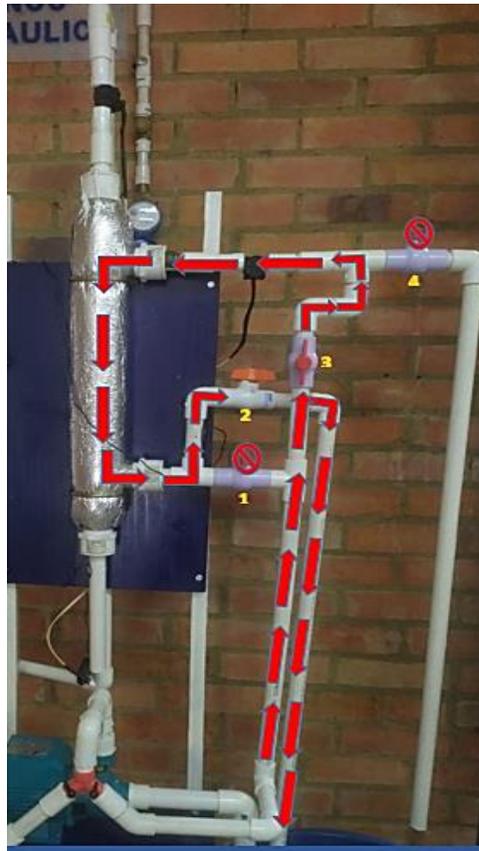
ΔT_f = diferencia de temperatura frio

Tc-ent –Tc-salid

Sistema en contraflujo

Este sistema el fluido frio ingresa en sentido contrario al del agua caliente como se evidencia en la figura

Figura 2 sistemas en contraflujo



Fuente: Autores

Para que el sistema esté en contraflujo se deben cerrar las llaves de paso (1) y (4) como se muestra en la figura 2.

7. Datos experimentales en contraflujo

Tabla 4. Temperaturas de entrada del intercambiador de calor en contraflujo.

T(S)	DATOS	CALIENTE ENTRADA	FRIA DE ENTRADA
10	T1 (°C)	60,1	20,6
10	T2 (°C)	60,8	20,6
10	T3 (°C)	61,3	20,5
10	T4 (°C)	61,3	20,6
10	T5 (°C)	61,9	20,7
10	T6 (°C)	61,7	20,8
10	T7 (°C)	61,4	20,8
10	T8 (°C)	61,4	20,8
10	T8 (°C)	61,4	20,5

Tabla 5. Temperaturas de salida del intercambiador de calor en contraflujo

DATOS	CALIENTE SALIDA	FRIA DE SALIDA
T1 (°C)	40,	24,6
T2 (°C)	42,5	23,9
T3 (°C)	43,1	23,5
T4 (°C)	43,8	23,5
T5 (°C)	44,4	23,6
T6 (°C)	44,5	23,7
T7 (°C)	44,7	23,7

T8 (°C)	44,8	23,6
T8 (°C)	44,9	23,2
Q(CAUDAL)	2(lpm)	9 (lpm)

Las diferencias de temperatura simple para los dos fluidos en el sistema contraflujo.

Tabla 6. Diferencia de temperaturas

Nº DE PRUEBAS	ΔT_c	ΔT_f
T1 (°C)	20,1	4
T2 (°C)	18,3	3,3
T3 (°C)	18,2	3
T4 (°C)	18,1	2,9
T5 (°C)	17,3	2,9
T6 (°C)	16,9	2,9
T7 (°C)	16,7	2,9
T8 (°C)	16,6	2,8
T8 (°C)	16,5	2,7
Q(CAUDAL)	2 (lpm)	9 (lpm)

ΔT_c =diferencia de temperatura caliente

ΔT_f = diferencia de temperatura frio

Realizar cálculos para hallar LMTD en los dos sistemas (paralelo y contraflujo) y realizar conclusiones de los resultados obtenidos

$$LMTD = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln \frac{(\Delta T_1)}{\Delta T_2}}$$

Representa la variación de la temperatura que experimentan los fluidos a través de su paso por el intercambiador de calor, ya que estas temperaturas no son constantes, esto porque en diferentes puntos un fluido va perdiendo calor y el otro lo va ganando.

Flujo paralelo.

$$\Delta T_1 = T_{c-ent} - T_{f-salid}$$

.

$$\Delta T_2 = T_{c-sal} - T_{f-salid}$$

$$LMTD = 26,4949057$$

Esta temperatura representa la temperatura promedio que pasa por el intercambiador en sistema paralelo

Contraflujo.

$$\Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,2}$$

$$\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c1}$$

$$LMTD = 29,8750063$$

Esta temperatura representa la temperatura promedio que pasa por el intercambiador en contraflujo lo cual indica que hay una mayor diferencia de temperatura en este sistema.

8. Calor cedido y calor absorbido el sistema paralelo

$$q_{per} = \dot{m} * \Delta T_c * C_p$$

$$q_{abs} = \dot{m} * \Delta T_f * C_p$$

Tabla 7. Ganancia y pérdida de calor.

q_{per}	q_{abs}
2436,16381	1689,07174
2243,47289	1876,74638
2229,70925	2314,65386
2188,41834	2314,65386
2174,6547	2314,65386
2160,89107	2439,77029
2147,12743	2564,88671
2147,12743	2752,56135
2119,60015	2690,00314

9. Calor cedido y calor absorbido en contraflujo

$$q_{per} = \dot{m} * \Delta T_c * C_p$$

$$q_{abs} = \dot{m} * \Delta T_f * C_p$$

Tabla 8. Ganancia y pérdida de calor.

$q_{\Delta T_c}$	$q_{\Delta T_f}$
2764,50646	2502,3285
2516,93871	2064,42101
2503,18495	1876,74638
2489,43119	1814,18816
2379,40108	1814,18816
2324,38602	1814,18816
2296,8785	1814,18816
2283,12473	1751,62995
2269,37097	1689,07174

Tabla 9. Propiedades físicas a una temperatura de 22°C para el agua.

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad (p)	997.5	kg/m ³
Calor específico (cp)	4181	J/kg*K
Conductividad térmica	0.6025	W/m*K
Viscosidad cinemática	0.0009465	m ² /s
Prandtl	6.6	
Prandtl superficial	6.14	

Propiedades tomadas de la Tabla A-9 libro de transferencia de calor Cengel.

Tabla 10. Valores constantes para la realización de cálculos.

Nombre	valor	Unidad
De	0.01	M
Di	0.008	m
L	0.51	m
F	0.945	
S _T	0.0125	M
Ai	5.0265*10 ⁻⁵	m ²
As	0.4806	m ²

Tabla 11. Calculo en la carcasa

nomb re	ecuación	valor
Vmax	$V_{max} = \left(\frac{S_T}{S_T - D_e} \right)$	2 m/s
ReD	$Re_D = \frac{\rho V_{max} D_e}{\mu}$	21156,91 479 (turbulento)

NuD	$N_{uD} = 0,35 \left(\frac{S_T}{S_L} \right) R_d^{0,6} P_r^0 / P_{rs}^{0,25}$	276,8338 256
NuD, NL	$N_{uD,NL} F N_{uD}$	261,6079 652
hban c	$h_{banc} = \frac{N_{uD,NL} \cdot k}{D_e}$	15761,88 W/ m ² *K

Tabla 12. Propiedades físicas del agua a una temperatura de 50°C.

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad (p)	998.1	kg/m ³
Calor específico (cp)	4181	J/kg*K
Conductividad térmica	0.644	W/m*K
Viscosidad cinemática	0.000547	m ² /s
Prandtl	3.55	
Prandtl superficial	6.14	

Tabla 13. Cálculos en el banco de tubos

nombr e	ecuación	valor
Caudal en un tubo	$\dot{V} = \frac{\dot{V}_{total}}{N}$	1.11*10 ⁻⁶ m ³ /s
Velocidad en un tubo	$V_a = \frac{\dot{V}}{A_i}$	0.0221 m/s
Re	$Re = \frac{\rho V_a D_i}{\mu}$	322.67 (Laminar)
NuD	$N_u = 3,66 + \frac{0,065(D_i/L) Re}{1 + 0,04((D_i/L) Re)}$	4.17

Hint	$h_{int} = \frac{Nu \cdot k}{D_i}$	335.98 W/ m ² *K
U	$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{banc}} + \frac{1}{h_{int}}}$	328.96 W/ m ² *K
Q	$UA_s \Delta T_{ml} = \dot{Q}$	4189.4 6 W

10. Efectividad por NTU en el sistema paralelo

Las razones de capacidad calorífica son:

$$C_f = m_f c_{pf} = 625.58 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

$$C_c = m_c c_{pc} = 139.10$$

se selecciona el mínimo para hallar \dot{Q}_{max}

$$\dot{Q}_{max} = C \min (T_{h1} - T_{c1}) = 5424.91 \text{ W}$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}}$$

$$\varepsilon = 77\%$$

En el sistema de flujo paralelo arrojo una efectividad del 77% lo cual indica que realiza un buen proceso de transferencia de calor.

Este mismo procedimiento se realizó para el sistema en contraflujo el cual arrojo una efectividad de 84%.

Conclusiones

- Para $Re > 10000$ turbulento y < 10000 laminar, lo que indicara que las ecuaciones de NU serán diferentes.
- En la LMTD los valores en flujo paralelo y contraflujo son 26.5°C y 29.8 °C respectivamente, por lo cual se concluye que en el segundo sistema presenta

mayores tasas de transferencia de calor.

- En el intercambiador de calor carcasa y tubo se pudo evidenciar los resultados prácticos, el cual se obtuvo una efectividad de 77% en sentido paralelo y una en contraflujo de 85%, demostrando así que el sistema contraflujo tienen una mayor eficiencia.

Referencias.

Cengel, U. A. (s. f.-a). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. 930

Evaporadores

Transferencia de calor—EcuRed. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de https://www.ecured.cu/Transferencia_de_calor

[Termodinámica I] Conducción, convección y radiación—El Tamiz. (s. f.). Recuperado 4 de septiembre de 2020, de <https://eltamiz.com/2010/09/16/termodinamica-i-conduccion-conveccion-y-radiacion/>

Bibliografía

.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/15784/415338.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Andres Flores. (22:42:16 UTC). *Reporte intercambiadores de calor* [Educación].

ATALA MARIA IRIARTE PUPO, & NUR-EL DAVID GALVAN PIMIENTA. (s. f.). *DISEÑO Y*

CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCASA Y TUBOS PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE. .docx

Barragán, A. S. A., & Landázuri, D. C. A. (s. f.). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, Y OPERACIONALIZACIÓN*

DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CARCASA, DESTINADO PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK. 171.

Cengel, U. A. (s. f.). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. 930.

Por qué los tubos corrugados en HRS Heat Exchangers. (s. f.). HRS Heat Exchangers. Recuperado 27 de febrero de 2020, de <https://www.hrs-heatexchangers.com/es/recursos/las-ventajas-de-los-tubos-corrugados-en-los-intercambiadores-de-calor/>

Subirtupagina.com. (s. f.). *Historia de los Intercambiadores de Calor | Alfa de Occidente*. Historia de los

Intercambiadores de Calor | Alfa de Occidente. Recuperado 15 de abril de 2020, de <https://alfadeoccidente.mx/seccion/?p=32>

Transferencia de calor—EcuRed. (s. f.). Recuperado 1 de mayo de 2020, de

https://www.ecured.cu/Transferencia_de_calor

Zachár, A. (2010). Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19), 3928-3939.

373772.pdf. (s. f.). Recuperado 31 de agosto de 2020, de

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6176/373772.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

415338.pdf. (s. f.). Recuperado 25 de mayo de 2020, de

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/15784/415338.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Aceros Inoxidables 316 y 316L. (s. f.). NKS. Recuperado 10 de septiembre de 2020, de

<https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/>

Andres Cullay. (11:28:37 UTC). *Intercambiadores de Calor*.

<https://es.slideshare.net/andresitoito/intercambiadores-de-calor-13031365>

APRENDE MAS sobre el chiller enfriado por aire DETALLES TECNICOS. (s. f.).

Recuperado 22 de noviembre de 2020, de

<https://www.confopresarial.com/chiller-enfriado-por-aire/>

Barragán, A. S. A., & Landázuri, D. C. A. (s. f.). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, Y*

OPERACIONALIZACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y

CARCASA, DESTINADO PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES

UNITARIAS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES DE LA

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK. 171.

Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of*

Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons.

Calor Específico—Concepto, unidades, fórmulas y ejemplos. (s. f.). Recuperado 17 de

septiembre de 2020, de <https://concepto.de/calor-especifico/>

Carlos. (2013, junio 27). *Radiación, conducción y convección: Tres formas de*

transferencia de calor. Nergiza. [https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-](https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/)

[conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/](https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/)

Cengel, U. A. (s. f.-a). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. 930.

Cengel, U. A. (s. f.-b). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. 930.

Clasificación de los Aceros. (s. f.-a). Recuperado 10 de septiembre de 2020, de

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>

Clasificación de los Aceros. (s. f.-b). Recuperado 10 de septiembre de 2020, de

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>

Conductividad Térmica—Concepto, métodos y ejemplos. (s. f.). Recuperado 17 de

septiembre de 2020, de <https://concepto.de/conductividad-termica/>

dice, T. de calor en edificación | Z. N. (2013, junio 21). Transferencia de calor en

edificación. • Inygest—Construcción y rehabilitación de edificios, viviendas y

locales comerciales. *Inygest - Construcción y rehabilitación de edificios, viviendas*

y locales comerciales.

[https://www.inygestconsultores.es/uncategorized/transferencia-de-calor-en-](https://www.inygestconsultores.es/uncategorized/transferencia-de-calor-en-edificacion/)

[edificacion/](https://www.inygestconsultores.es/uncategorized/transferencia-de-calor-en-edificacion/)

ENFRIADOR INDUSTRIAL - Ale Mendez Beristain. (s. f.). Recuperado 21 de agosto de

2020, de <https://sites.google.com/site/aleprocesos/enfriador-industrial>

Francisco Torrealba. (04:31:41 UTC). *Diseño de un intercambiador de calor*

termodinamica [Engineering].

[https://www.slideshare.net/FranciscoTorrealba1/diseo-de-un-intercambiador-de-](https://www.slideshare.net/FranciscoTorrealba1/diseo-de-un-intercambiador-de-calor-termodinamica)

[calor-termodinamica](https://www.slideshare.net/FranciscoTorrealba1/diseo-de-un-intercambiador-de-calor-termodinamica)

I. BOSQUEJO HISTÓRICO. (s. f.). Recuperado 21 de agosto de 2020, de

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/05/htm/sec_5.htm

ml

Intercambiador de calor de carcasa y tubos—Wikiwand. (s. f.). Recuperado 29 de agosto de 2020, de

https://www.wikiwand.com/es/Intercambiador_de_calor_de_carcasa_y_tubos

Intercambiadores de calor de doble tubo | Tubo en tubo | SACOME. (s. f.). Recuperado 22 de agosto de 2020, de <https://www.sacome.com/intercambiadores-calor-doble-tubo/>

Intercambiadores de calor de Haz Removible o Cabezal Flotante | INDURADIA. (s. f.). Recuperado 29 de agosto de 2020, de <http://induradia.com/intercambiadores-calor-haz-removible-cabezal-flotante/>

Intercambiadores de Calor Tubulares | De Carcasa y Tubos | SACOME. (s. f.).

Recuperado 26 de marzo de 2020, de <https://www.sacome.com/intercambiadores-tubulares/>

Intercambiadores de Calor—Ingeniero Marino. (s. f.). Recuperado 26 de marzo de 2020, de <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>

Medición de la viscosidad y principios de la viscosidad | Malvern Panalytical. (s. f.).

Recuperado 16 de septiembre de 2020, de

<https://www.malvernpanalytical.com/es/products/measurement-type/viscosity>

Newhall, C. G., & Dzurisin, D. (1988). *Historical unrest at the large calderas of the world.* Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Por qué los tubos corrugados en HRS Heat Exchangers. (s. f.). HRS Heat Exchangers.

Recuperado 27 de febrero de 2020, de [https://www.hrs-](https://www.hrs-heatexchangers.com/es/recursos/las-ventajas-de-los-tubos-corrugados-en-los-intercambiadores-de-calor/)

[heatexchangers.com/es/recursos/las-ventajas-de-los-tubos-corrugados-en-los-intercambiadores-de-calor/](https://www.hrs-heatexchangers.com/es/recursos/las-ventajas-de-los-tubos-corrugados-en-los-intercambiadores-de-calor/)

¿Qué es y cómo funciona una torre de enfriamiento? (s. f.). enseco. Recuperado 21 de agosto de 2020, de <https://www.ienseco.com/single-post/torre-de-enfriamiento>

SACOME. (2017, septiembre 10). Intercambiadores de Calor de Tubo Corrugado.

SACOME. <https://www.sacome.com/intercambiadores-calor-tubo-corrugado/>

StudentCity. (11:16:42 UTC). *Termodinámica Intercambiadores de calor* [Tecnología].

<https://es.slideshare.net/kof2002plus/termodinmica-intercambiadores-de-calor>

Subirtupagina.com. (s. f.). *Historia de los Intercambiadores de Calor | Alfa de Occidente*.

Historia de los Intercambiadores de Calor | Alfa de Occidente. Recuperado 15 de abril de 2020, de <https://alfadeoccidente.mx/seccion/?p=32>

Tema 9th Edition 2007. (s. f.). pdfslide.net. Recuperado 17 de octubre de 2020, de

<https://pdfslide.net/documents/tema-9th-edition-2007-56b47b43c454b.html>

[Termodinámica I] Conducción, convección y radiación—El Tamiz. (s. f.). Recuperado 4

de septiembre de 2020, de <https://eltamiz.com/2010/09/16/termodinamica-i-conduccion-conveccion-y-radiacion/>

Transferencia de Calor en Evaporadores | Evaporación | Líquidos. (s. f.). Scribd.

Recuperado 21 de agosto de 2020, de

<https://es.scribd.com/document/236277349/Transferencia-de-Calor-en-Evaporadores>

Transferencia de calor—EcuRed. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de

https://www.ecured.cu/Transferencia_de_calor