



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR DE
PLACAS PARALELAS PARA SU USO COMO RECURSO DIDÁCTICO EN EL
LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

CARLOS ALBERTO TORRES CAMACHO

Código: 20451813726

EDINSON GALINDO VERGARA

Código: 20451915169

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2022

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR DE
PLACAS PARALELAS PARA SU USO COMO RECURSO DIDÁCTICO EN EL
LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

CARLOS ALBERTO TORRES CAMACHO

EDINSON GALINDO VERGARA

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

Ingeniero Mecánico

Director: Jonathan Fábregas Villegas

Mgtr. En Ingeniería Mecánica

Línea de Investigación:

Diseño Mecánico y Transferencia de Calor.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	3
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 JUSTIFICACIÓN	7
2 MARCO TEORICO	9
2.1 Parámetros previos de desarrollo	17
2.1.1 Diseño conceptual del calentador	18
2.1.2 Resistencia térmica del sistema	20
2.1.3 Soportes	20
2.1.4 Depósito	21
2.2 Fabricación del calentador	21
2.2.1 Resistencia térmica	21
2.2.2 Construcción del calentador	22
2.3 Características térmicas del IC	24
2.3 Ubicación dentro de la línea de investigación	29
3 DISEÑO METODOLOGICO	30
3.1 Conceptos	30
3.2 Intercambiador de Calor	34
2.2.1 Intercambiador de calor de tubos y casco	35
3.2.2 Intercambiador de calor de placas	36
4 DISEÑO DEL CIRCUITO HIDRÁULICO	41
4.1 Circuito hidráulico	42
4.2 Principios asociados al funcionamiento del circuito hidráulico	45
4.3 Principio de funcionamiento	46
5 DESIGNACIÓN DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS	47
5.1 Intercambiador de calor de placas	47

5.2 Tubería.....	48
5.3 Depósito del refrigerante	50
5.4 Selección de las electrobombas	51
5.4 Selección de los medidores de temperatura.....	54
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
6.1 Costos	62
6.1 Manual de usuario	62
7 CONCLUSIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	67
ANEXOS.....	69
Anexo 1. Guías de laboratorio.....	69

Lista de Figuras

Figura 1. Grafica para el cálculo del factor de corrección para un IC.....	11
Figura 2. Estructura base del ICP	18
Figura 3. Resistencia eléctrica del calentador	22
Figura 4. Esquema del depósito del calentador	23
Figura 5. Esquema del ICP modelo SAA6D170E-3	25
Figura 6. Fronteras del sistema para $m=$ constante	32
Figura 7. Clasificación de los IC con base en su fabricación	34
Figura 8. Intercambiador de calor de tubo y casco.....	35
Figura 9. Intercambiador de calor de placas.....	36
Figura 10. Válvula de mariposa CPVC 1/2 pulgada	41
Figura 11. Circuito hidráulico para el fluido de mayor temperatura.....	43
Figura 12. Circuito hidráulico para el fluido de menor temperatura.....	44
Figura 13. Breakers del sistema eléctrico.....	46
Figura 14. Diagrama hidráulico del motor SAA6D170E-3	47
Figura 15. Tubería empleada en el ICP 1a	48
Figura 16. Tubería empleada en el ICP 2a	49
Figura 17. Proceso de incorporación del depósito del fluido de mayor temperatura	50
Figura 18. Electrobomba Karson.....	51
Figura 19. Especificaciones técnicas	52
Figura 20. Curva característica de la electrobomba seleccionada.....	53
Figura 21. Termómetros digitales del sistema.....	54
Figura 22. Estructura base del ICP	56
Figura 23. Instalación de los termómetros en el circuito hidráulico	57
Figura 24. Conexiones de los termómetros 1a	57
Figura 25. Conexiones de los termómetros 2a	58
Figura 26. Montaje del banco con los recubrimientos en el circuito.....	59

Lista de tablas

Tabla 1. Materiales disponibles para el calentador.....	22
Tabla 2. Propiedades del cobre.....	23
Tabla 3. Propiedades del agua	27
Tabla 4. Comparativa de los intercambiadores de calor más usados	37
Tabla 5. Especificaciones técnicas del termómetro digital TPM-10.....	55
Tabla 6. Resultados de las pruebas realizadas	60
Tabla 7. Costos de fabricación del sistema.....	62

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\iint dx dy$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
ρ	Densidad	$[Kg/m^3]$
μ	Viscosidad dinámica	$[Kg/m*s].$
h_c	Coefficiente convectivo del fluido de mayor T	$[W/m^2 \text{ } ^\circ C].$
h_f	Coefficiente convectivo del fluido de menor T	$[W/m^2 \text{ } ^\circ C]$
K_m	Conductividad del material	$[W/m^2 \text{ } ^\circ C]$
t	Grosor de la placa	$[m]$
C_c	Coefficiente de ensuciamiento de fluido de mayor T	$[W/m^2 \text{ } ^\circ C]$
C_f	Coefficiente de ensuciamiento de fluido de menor T	$[W/m^2 \text{ } ^\circ C]$
Nu	Número de Nusselt	Adimensional
Pr	Número de Prandtl	Adimensional
Re	Número de Reynolds	Adimensional
V	Velocidad másica del canal	$[m/s]$
Q	Caudal	$[m^3/s]$
DH	Diámetro hidráulico del canal	$[m]$

AC	Área del canal de flujo	[m ²]
b	Separación entre placas	[m]
Lw	Anchura de la placa	[m]
AT	Área de transferencia de calor	[m ²]
U	Coefficiente global de transferencia de calor	[W/m ² °C]
FT	Factor de corrección para los ICP	Adimensional
\dot{m}	Flujo másico	[Kg/s]
Cp	Calor específico	[J/Kg°C]
TEntrada	Temperatura de entrada del fluido	[°C]
TSalida	Temperatura de salida del fluido	[°C]
Q	Razón de transferencia de calor	[W]
S	Superficie de transferencia de calor	[m ²]
ΔTML	Razón logarítmica de temperatura de los fluidos	[°C]

Superíndices

Superíndice	Término
-------------	---------

n	Exponente, potencia
---	---------------------

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

1.LT	Primera ley de la termodinámica
ICP	Intercambiador de calor de placas
ΔTML	Diferencia media logarítmica de temperatura entre los fluidos

Agradecimientos

A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para llegar a este punto tan importante de mi vida.

A mi madre, por sus consejos y apoyo incondicional que forjaron el carácter que me definen como persona.

A mi esposa y mi hija, por el apoyo emocional que me brindaron a lo largo de este proceso.

A mis compañeros de trabajo, quienes gracias a su gran corazón y su confianza me ayudaron a cumplir este logro.

Carlos Alberto Torres Camacho

Edinson Galindo Vergara

Resumen

En este documento se presenta el diseño conceptual y fabricación detallada de un intercambiador de calor de placas, el cual será implementado en las experiencias del laboratorio, correspondientes al área de la transferencia de calor, por los estudiantes de la universidad Antonio Nariño. El diseño y posterior ensamble del sistema de intercambio de calor se desarrolló con base en los elementos propios necesarios para su funcionalidad, empleando un modelo de temperatura media logarítmica y considerando parámetros importantes como lo son las distintas configuraciones y esquemas de flujo pertinentes; de manera adicional para el montaje se consideraron las condiciones iniciales de operación, la potencia en el circuito eléctrico disponible para cualquier escenario, la disponibilidad de los materiales para el ensamble del mismo y los recursos para su adquisición.

Palabras claves: *Intercambiador de calor, diseño, fabricación, placas, implementación.*

Abstract

This document presents the conceptual design and detailed manufacturing of a plate heat exchanger, which will be implemented in the laboratory experiences, corresponding to the area of heat transfer, by the students of the Antonio Nariño University. The design and subsequent set of the heat exchange system was shown based on the elements necessary for its functionality, using a logarithmic average temperature model and considering important parameters such as the different configurations and relevant flow schemes; In addition, for the assembly, the initial operating conditions, the power in the electrical circuit available for any scenario, the availability of materials for the same set and the resources for their acquisition were considered.

Keywords: Heat exchanger, design, manufacturing, plates, implementation.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los principales campos de aplicación de la ingeniería mecánica se encuentra el de la transferencia de calor, la cual es abordada de distintas maneras en la aplicación de los conceptos derivados del mismo, esto con base en los diferentes mecanismos de transferencia con los que el calor se transfiere, los cuales son: la conducción, la radiación y la convección. Es así como se ha adoptado en este estudio trabajar en los desarrollos en los que intervienen estos fenómenos y para los cuales el intercambiador de calor es relevante.

A través de la teoría que se ha estudiado se alcanza a comprender el funcionamiento de los sistemas de transferencia energética más comunes en la industria y a su vez en las actividades prácticas de Transferencia de calor en la universidad. En estos se pueden encontrar algunos de los tipos de intercambiadoras que existen y que son utilizados con fines académicos como es el caso en particular; aunque no todos estos están presentes en los laboratorios, no está de más considerar adecuar este espacio con un intercambiador de calor de placas para estos mismos efectos.

Con la finalidad de poder complementar el conocimiento que se adquiere en la asignatura por parte de los estudiantes en la asignatura ya mencionada, es así como se considera necesario el diseño y posterior fabricación de un sistema de intercambio de calor que implique la integración de un intercambiador de calor de placas paralelas, además de la elaboración de un manual de operación y guías de laboratorio, con lo cual se podrá acceder de una manera fácil a una buena comprensión del funcionamiento y manipulación de estos dispositivos.

En el desarrollo del diseño del sistema y su adaptación, se tuvieron en cuenta las condiciones iniciales mínimas para su funcionalidad y las restricciones que se pueden presentar en el laboratorio, y se aplicaron los principios teóricos y matemáticos pertinentes utilizados en la industria actual. Por otra parte, se seleccionaron unos materiales acordes a las funcionalidades básicas de estos dispositivos y se procedió a su fabricación con base en los objetivos propuestos para el mismo. Adicionalmente, se desarrolló una validación del comportamiento del dispositivo con el objetivo de alcanzar a analizar en detalle las variables que rigen su funcionalidad.

Ya como última actividad se construyó un manual de operación y una guía para efectuar prácticas en el laboratorio, la cual será el referente en el momento de desarrollar las experiencias con el intercambiador de calor de placas paralelas.

1. ANTECEDENTES

Para mediados del siglo XIX Ericsson motivado por la segunda revolución industrial para el año de 1852 inventa el primer intercambiador de calor documentado, el cual basó su diseño en lo que hoy en día conocemos como de tubo-carcasa, este fue desarrollado con el objetivo de utilizar el condensado de los navíos (González-Mendizabal, 2002).

Con base en ese primer diseño es que se presentan nuevos tipos de intercambiadores de calor, cada vez más eficientes lo que les permite adentrarse en gran parte de las industrias y una amplia variedad de sectores de producción.

En la actualidad se puede observar que, en los diferentes sistemas mecánicos, entre otros, ocurren fenómenos de transferencia de calor en los que este afecta de manera directa ciertos procesos o productos derivados del mismo, es así como según la teoría el calor siempre se transfiere de un foco a otro, o bien, de un fluido a otro en particular (Herrero & Lambea, 2013). Los intercambiadores de calor son dispositivos creados para esta función, ya que permiten de manera controlada realizar este tipo de acciones encaminadas a la transferencia de energía derivada de varias fuentes y que involucran fluidos.

Los intercambiadores de calor son hoy en día uno de los equipos de mayor aplicación y normalmente los más encontrados en las industrias. Estos desempeñan una función relevante en términos de la necesidad de ahorrar energía y a su vez de disponer de equipos en óptimas condiciones no sólo con base en un análisis térmico y de su rendimiento en cuanto a temas económicos que este pueda proporcionar en su instalación (Mediaceja, 2011), sino que adicionalmente se asocia a otros factores, en donde la eficiencia energética

del sistema y su inminente disponibilidad, estén sujetas a la calidad en los procesos en los que estos intervienen.

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor en función del diseño, aunque en general siempre se adopta el principio universal de transferencia de calor, en el que se afirma que la transferencia siempre se dará de un fluido o foco de mayor temperatura uno de menor (Herrero & Lambea, 2013). La versatilidad de los distintos diseños existentes en la actualidad es coherente con este principio, es así como se pueden encontrar de diferentes tipos como los de placa o plato y los tubulares (Investigación, 2011).

Los intercambiadores de calor de placas son dispositivos importantes en la Industria de Procesos, ya que abarcan una amplia variedad de aplicaciones. La construcción y diseño de estos equipos representa el estudio de características muy específicas y por ende especiales tanto en el uso, como en su aplicación lo que convierte cada sistema desarrollado en un problema particular. En la mayoría de la literatura existente con respecto a la transferencia de calor, se mencionan estos equipos, aunque vale la pena destacar que se presentan con base en algunas generalidades (Gómez, 2008). La mayor parte de los documentos sobre los intercambiadores de placas provienen principalmente de los fabricantes de estos equipos (quienes poseen el know-how) y su difusión está normalmente limitada a la industria.

El diseño y posterior desarrollo de estos equipos se limita a la implementación de estos en los entornos más relevantes para su óptimo aprovechamiento, esto no descarta su aplicación en los escenarios donde el conocimiento es generado, es así como se considera de manera adicional su uso en los espacios académicos y científicos, en la observación y

análisis detallado de los diferentes fenómenos que intervienen en los procesos térmicos o de transferencia de calor.

Para el caso en concreto se optó por trabajar con un intercambiador de calor de placas a contraflujo porque es considerado como de los más comunes en las aplicaciones académicas, ya que este será destinado para estos efectos en las que la demanda no es del todo significativa, dado que es posible controlar de una manera más apropiada los incrementos en cuanto a altas temperaturas y presiones se refiere, en los que se emplean procesos que requieren enfriamiento o calentamiento, siendo estos equipos los más ideales para las condiciones de trabajo y operación en las instalaciones de la institución.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de intercambio de calor de placas paralelas para su uso como recurso didáctico en el laboratorio de transferencia de calor.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar el diseño conceptual del sistema de intercambio de calor de placas paralelas con base en los criterios ingenieriles pertinentes.
- Construir e instrumentar el sistema bajo los criterios de diseño térmico que permita la medición y seguimiento de variables termodinámicas.
- Comprobar el funcionamiento del sistema de intercambio de calor implementado mediante pruebas experimentales en entornos reales de operación.
- Elaborar el manual de usuario y prácticas de laboratorio para su uso en los espacios académicos dispuestos por la Universidad.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los fenómenos de transferencia de calor han representado en la humanidad uno de los grandes retos en cuanto a la aplicación de los conceptos generados a partir de estos.

Lo evidente de los efectos de estos fenómenos es un motivo determinante en la motivación de desarrollos encaminados a contrarrestar sus implicaciones. Tal es el hecho de que estos inciden en múltiples circunstancias en la vida diaria, como es el caso de los sistemas de refrigeración comercial e industrial, en el sector de los alimentos, en la industria petroquímica y otros no menos importantes.

El momento de establecer las soluciones que se apliquen directamente a esta problemática, se considera pertinente desarrollar sistemas que minimicen los efectos de estos fenómenos sobre alguna actividad en particular. Tal es el caso del sector industrial donde en los procesos en los que se involucran fluidos expuestos a temperaturas consideradas altas o no aprovechables se presenta como una alternativa el uso de los intercambiadores de calor.

El uso de un intercambiador de calor de placas como modelo práctico en los procesos de formación, proporciona explícitamente una guía de aprendizaje adecuada en la asignatura de transferencia de calor, ya que se relacionan conocimientos teóricos y conceptos básicos que le permiten al estudiante familiarizarse con este sistema en un entorno de mayor importancia (Range & Castro, 2020).

El uso de estos equipos se remonta en sus inicios a la segunda revolución industrial y es desde ese momento en que se adopta la relevancia que en la actualidad estos tienen, en diferentes aplicaciones industriales (Chevalier et al. 2013.).

Debido al auge en las investigaciones de carácter experimental e incluso teóricas, en la actualidad se ha logrado un avance significativo en la industria en materia económica y de medio ambiente Bolívar (2002) & González-Mendizabal (2002), esto gracias a la optimización constante en la eficiencia de los diferentes equipos en el campo de producción, es por ello por lo que el trabajo desarrollado por el personal científico es de una relevancia destacada (Pino Torres, 2018).

La pertinencia por parte de los estudiantes en desarrollar las destrezas o habilidades necesarias como futuros ingenieros en el sector térmico, insta a las instituciones de educación superior (IES) a implementar en sus espacios académicos experiencias afines a potencializar estos conceptos y el manejo adecuado por parte de los que intervienen en los procesos de formación. Es así como se considera importante el desarrollo de estos equipos en el marco de espíritu investigativo y de aplicación directa sobre la formación de los presentes en el programa de ingeniería, dado que el sector energético es y seguirá siendo uno de los campos de aplicación más importantes en la vida de un ingeniero.

2 MARCO TEORICO

En este capítulo se explicará gran parte de la teoría relevante con respecto al diseño de un sistema de intercambio de calor, en este sentido se describirán las variables y ecuaciones necesarias para el diseño conceptual en cuantos a aspectos térmicos del ICP que estará incorporado al sistema.

Flujo de energía

Consiste en el flujo de calor \dot{Q} que se transfiere desde un fluido a otro por medio de la superficie de las placas del dispositivo y está dada por la ecuación:

$$\dot{Q} = A * U * \Delta TML \quad (1)$$

Donde:

\dot{Q} = Razón de transferencia [W].

A = Superficie de transferencia [m²].

U = Coeficiente global de transferencia de calor [W/m² °C].

ΔTML = Razón media logarítmica de temperatura entre los fluidos [°C].

Balance térmico de energía

Los IC normalmente alcanzan a llegar a sus condiciones nominales de operación en periodos relativamente cortos de tiempo y suelen funcionar regularmente durante extensos periodos, sin que se presenten cambios en sus condiciones iniciales de operabilidad. Es así como es que estos, son considerados dispositivos de régimen estacionario, por tal motivo, el flujo másico del fluido interviniente, su temperatura y la velocidad de este, en cualquier

entrada o salida permanecerán siempre constantes. De acuerdo con la primera ley o enunciado de la termodinámica, la velocidad de la transferencia de calor desde el fluido de mayor temperatura será siempre igual a la transferencia de calor con respecto al de menor temperatura, de acuerdo con esto tenemos que:

Para un incremento de T de un fluido:

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p (T_{Entrada} - T_{Salida}) \quad (2a)$$

-

Para una disminución de T de un fluido:

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p (T_{Salida} - T_{Entrada}) \quad (2b)$$

Donde: \dot{m} = Flujo másico [Kg/s].

C_p = Calor específico [J/Kg°C].

$T_{Entrada}$ = Temperatura de entrada [°C].

T_{Salida} = Temperatura de salida [°C].

Área de transferencia de calor

Es la superficie necesaria para desarrollar el proceso de transferencia del flujo térmico Q y está representada por la siguiente ecuación:

$$AT = \dot{Q}U * FT * \Delta TML \quad (3)$$

Donde: AT = Área total de transferencia de calor [m²].

U = Coeficiente global de transferencia de calor [W/m² °C].

FT = Factor de corrección para los ICP.

El factor de corrección para el IC del sistema con referencia a el método de diseño de la media logarítmica se extrae de la figura 1 sustentado por las ecuaciones (4) y (5) donde:

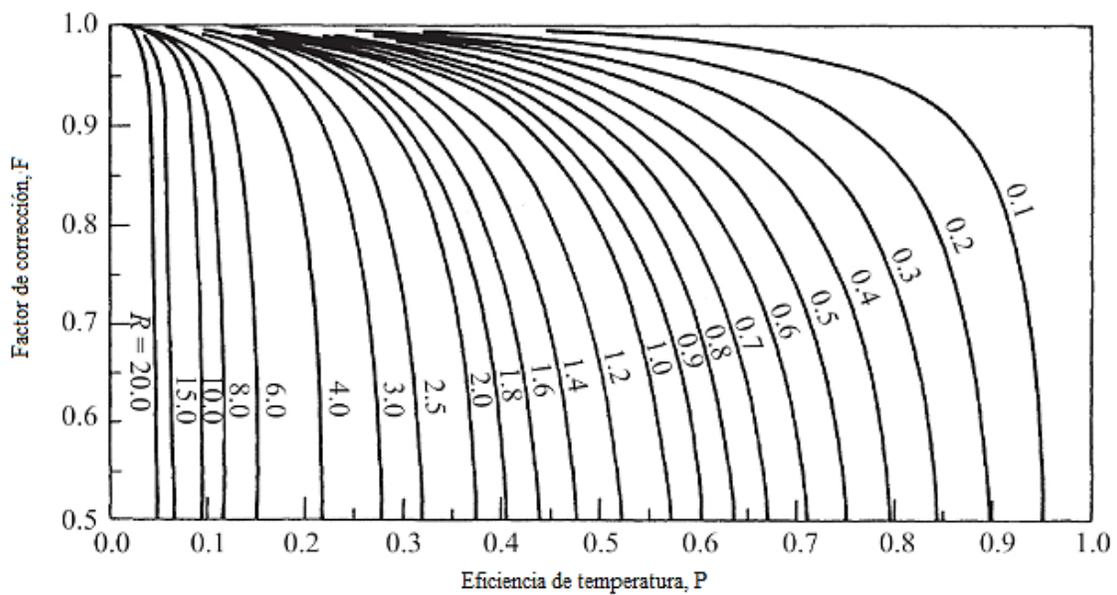
P = Efectividad del lado frio

R = Razón de capacidad térmica

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (4)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - t_1} \quad (5)$$

Figura 1. Grafica para el cálculo del factor de corrección para un IC



Fuente: Los autores

Área de transferencia para una placa lisa

Es el área de la superficie de la placa que conduce el fluido, sin considerar el de alargamiento como uno de los factores relevantes en la superficie, siendo así que se

entiende que no es el área real de la placa sino más bien su proyección y está representada por la expresión:

$$API = L_v * L_a \quad (6)$$

Donde: API = Área de transferencia de calor para una placa lisa [m^2].

L_v = Distancia vertical [m].

L_a = Ancho de la placa [m].

Factor de alargamiento superficial

Este puede determinarse con base en la aproximación a un perfil de corrugación sinusoidal, a partir de una fórmula de integración de tres partes:

$$\phi \approx \frac{1}{6} \left(1 + \sqrt{1 + x^2} + 4 * \sqrt{1 + \frac{x^2}{2}} \right) \quad (7)$$

$$x = \frac{2 * \pi * b}{P_c}$$

Donde: ϕ = Factor de alargamiento superficial.

x = Variable [m].

b = Profundidad de corrugación [m].

P_c = Paso de la corrugación [m].

Área de transferencia para una placa corrugada

Se define como el área real de la superficie de la placa, en donde ocurre la transferencia de calor y está definida por la siguiente expresión:

$$AP_c = API * \phi \quad (8)$$

Donde: AP_c = Área de transferencia de calor de una placa con corrugado [m^2].

Número de placas totales

Es la totalidad del área en la que el fluido establece contacto con cada una de las placas, es decir, la suma del área real de todas las placas efectivas con las que dispone el intercambiador y está definida por la ecuación:

$$NP = AT * APl \quad (9)$$

Donde: NP = Número total de placas.

Cantidad efectiva de placas

Teniendo en cuenta que la placa inicial del dispositivo y la última permanecen en contacto con los fluidos por una sola de sus caras, no son consideradas en el cálculo de la transferencia energética, por lo que la cantidad efectiva de placas para el diseño estaría dada por la ecuación:

$$NE = NP - 2 \quad (10)$$

Donde: NE = Cantidad efectiva de placas.

Canales por cada paso

Este concepto es básicamente el conducto formado entre dos placas adyacentes, mientras que por otro lado un paso es una agrupación de canales en donde el flujo se divide y se distribuye. La totalidad de estos canales disponibles por paso está definida por la ecuación:

$$NC = NP - 12 \quad (11)$$

Donde: NC = Canales por paso.

Área del flujo para un canal

Es la zona de corte transversal de un canal por donde atraviesa el flujo, el cual está definido de acuerdo con la siguiente expresión:

$$AC = b * L_w \quad (12)$$

Donde: AC = Área del flujo para un canal [m²].

b = Separación entre placas [m].

L_w = Ancho de la placa [m].

Diámetro hidráulico del canal

El diámetro hidráulico para el canal formado entre dos placas corrugadas considera de manera relevante el factor de alargamiento de la superficie en contacto ya que este varía la sección transversal del canal real para los valores dados con respecto a la profundidad de la corrugación y paso. El diámetro hidráulico está representado por la ecuación:

$$DH = 2 * b \phi \quad (13)$$

Donde: DH = Diámetro hidráulico del canal [m].

Velocidad lineal del fluido por cada canal

Implica las relaciones en las que está presente el proceso de transferencia y las eventuales disminuciones de presión y que normalmente se sustentan con respecto a la velocidad másica del canal y puede calcularse a través de la siguiente expresión:

$$V = Q * NC * AC \quad (14)$$

Donde:

V = Velocidad másica del canal [m/s]

Q = Caudal [m³/s]

Numero de Reynolds

Corresponde a una expresión adimensional, la cual afirma que el régimen al que esté sometido el flujo, depende de fuerzas inerciales y viscosas asociadas al fluido.

$$Re = \frac{\rho * V * DH}{\mu} \quad (15)$$

Donde: Re = Numero de Reynolds.

μ = Viscosidad dinámica [Kg/m*s].

ρ = Densidad [Kg/m³].

Numero de Nusselt

Es básicamente un coeficiente de transferencia adimensional. Para el desarrollo propuesto de este dispositivo se empleará una ecuación particular para los ICP, la cual es aceptable para los parámetros con los que se opera.

$$Nu = 0,1528 * (Re)^{0,66} * (Pr)^{0,4} \quad (16)$$

Donde: Nu = Numero de Nusselt.

Pr = Numero de Prandtl.

Coefficiente convectivo

Es aquel que de manera cuantitativa determina la influencia de las propiedades del fluido, como también de la superficie y el flujo en presencia de un proceso de transferencia de calor por convección.

$$h = Nu * k / DH \quad (17)$$

Donde: h = Coeficiente de convección [W/m² °C].

k = Conductividad térmica [W/m °C].

Coefficiente global de transferencia de calor

Si se considera para el diseño del ICP los parámetros anteriormente descritos, es de utilidad considerar el modelo de Diferencia Media Logarítmica de Temperatura, ya que este prioriza los coeficientes convectivos de transferencia en los fluidos intervinientes, así mismo también considera la resistencia térmica del material con el que se fabricaron las placas, para una posterior validación del Coeficiente Global de Transferencia. Este se puede obtener a través de la siguiente expresión:

$$U = 1 / (1/hc + t/Km + 1/hf) \quad (18)$$

Donde:

hc = Coeficiente de convección del fluido de mayor T [W/m² °C].

hf = Coeficiente de convección del fluido de menor T [W/m² °C].

Km = Conductividad térmica del material de la placa [W/m °C].

t = Grosor de la placa [m].

C_c = Coeficiente de ensuciamiento de fluido de mayor T [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$].

C_f = Coeficiente de ensuciamiento de fluido de menor T [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$].

Máxima razón de transferencia de calor

Es la potencia máxima que puede alcanzar y con la cual se transfiere el calor en el intercambiador.

$$\dot{Q}_{Max} = (\dot{m} * C_p) \min (T_{c_{Entrada}} - T_{f_{Entrada}}) \quad (19)$$

Donde: $\dot{Q}_{Máx}$ = Máxima razón de transferencia de calor [W]

$(\dot{m} * C_p)_{\min}$ = Producto del flujo másico y calor específico mínimo entre los dos fluidos de trabajo [$\text{W}/^\circ\text{C}$]

Efectividad teórica para un intercambiador de calor

La eventual efectividad del intercambiador de calor está vinculada en esencia a su configuración o distribución geométrica y a la configuración que adopte el flujo. Es así como, para los distintos tipos de IC se tienen relaciones para la efectividad de este.

$$\varepsilon = \dot{Q} * \dot{Q}_{Máx} \quad (20)$$

Donde: ε = Efectividad de un intercambiador de calor

2.1 Parámetros previos de desarrollo

Previo al desarrollo del diseño conceptual del sistema de intercambio de calor, era necesario tener claros varios de los parámetros más destacados, como lo son en este caso

las temperaturas de entrada y el flujo másico o caudal con el que se pretende trabajar, esto con el objetivo de desarrollar diseños óptimos, eficientes y precisos. Es por ello por lo que se planteó trabajar en el desarrollo del calentador de agua como primera medida, en el acondicionamiento de las entradas y a su vez nos suministre el fluido que estará a una mayor temperatura en el sistema.

En la figura 2 se puede apreciar uno de los elementos más importantes y sobre los cuales se sustentaron las bases del diseño correspondientes al sistema de intercambio de calor,

Figura 2. Estructura base del ICP



Fuente: Los autores

2.1.1 Diseño conceptual del calentador

Asumiendo las condiciones iniciales del laboratorio, se desarrolló una salida de 110 VAC para el suministro energético del calentador, puesto que se requiere disponer de una potencia eléctrica baja para flujo menor de corriente. Se desarrolló una medición de esta

salida, de tal manera que se hallara el valor real del voltaje, esto con el objeto de poder caracterizar la potencia máxima permisible del sistema con datos más próximos.

El sistema de alimentación de energía está integrado por un circuito eléctrico del que se sustentara el calentador, este a su vez está protegido por un breaker de 20 A y su posterior ensamble se realizó utilizando un cableado de cobre calibre 8 AWG. Con estos datos se pudo encontrar un valor de aproximado para los flujos de corrientes, el cual fue empleado en el cálculo del valor de la máxima potencia eléctrica disponible para el sistema en mención. Los valores permisibles de corriente para un conductor de calibre 8 AWG a (de 90°C) varían de 55 A.45

$$I_{Cond} = 1,45 * I \quad (21)$$

Para lo cual tenemos:

I_{Cond} = Máxima permisibilidad de corriente del conductor.

I = Máxima corriente de trabajo.

Con base en la ecuación (21) se procede luego a despejar la máxima corriente de trabajo. I

$$= I = I_{Cond} * 1,45$$

$I = 55A * 1,45$ de tal manera que

$$I = 37,93 = 38 A$$

Una vez calculadas los valores de las dos medidas más relevantes, voltaje y corriente respectivamente, se dio lugar a establecer los cálculos del valor de la potencia eléctrica máxima que podía ser empleada en el sistema.

$$P = V * I \quad P = 219,642 \text{ V} * 38 \text{ A}$$

$$P = 8346,434 \text{ W}$$

Una vez se ha calculado la potencia máxima teórica del sistema y de la que se puede hacer uso en el mismo, se empezó a desarrollar el diseño de su forma. Para lo cual se pensó en establecer un diseño algo compacto y de fácil manejo para una mejor versatilidad, con base en estos hallazgos se determinó que sería óptimo una forma rectangular con la resistencia ubicada en el extremo derecho del depósito del dispositivo.

2.1.2 Resistencia térmica del sistema

Para la selección de la resistencia térmica se consideraron relevantes ciertos aspectos que se detallan de la siguiente manera:

- Se considera que tiene que operar de manera adecuada en contacto con el agua.
- Esta tiene que soportar altas corrientes.
- En cuanto a las dimensiones más específicamente de altura, este no debe estar por encima de los 10 cm.

2.1.3 Soportes

Para el caso del soporte sobre el cual estar fijada la resistencia, esta deberá ser soportada por un material que además de contener las propiedades físicas necesarias para garantizar su funcionalidad, este debe cumplir con funciones propias de un conductor,

como lo es el caso del cobre y por supuesto el bronce, ya que estos cuentan con baja resistividad eléctrica.

2.1.4 Depósito

Es el elemento donde se encuentra el fluido de mayor temperatura y a su vez contiene a la resistencia en uno de sus extremos conectado como uno de los soportes del sistema. Como se ha mencionado en apartados anteriores, se optó por seleccionar una configuración rectangular y esta que uno de sus condicionamientos sea la de soportar temperaturas que varíen entre los 38 y 60 °C. Otro de los aspectos a considerar, fue el volumen de este para una mejor maniobrabilidad en el ensamble o en su defecto mantenimiento.

2.2 Fabricación del calentador

2.2.1 Resistencia térmica.

En la figura 3, se muestra la resistencia seleccionada, fue una de 110 V. Estas resistencias están diseñadas para alcanzar a disipar hasta los 5500 W; siendo el valor máximo permisible en el que este sistema pueda disipar, en alrededor de 8000 W, por lo cual se considera apropiada para el uso específico.

Figura 3. Resistencia eléctrica del calentador



Fuente: Tomada de www.homecenter.com.co

2.2.2 Construcción del calentador

El proceso de manufactura del calentador empezó con el ensamble de los soportes. Estos se fabricaron en el taller dispuesto para este fin, en él se caracterizaron los materiales acordes con las propiedades esperadas para la implementación y acople en el intercambiador, en la tabla 1 se pueden observar las principales características de los posibles materiales dispuestos para su fabricación.

Tabla 1. Materiales disponibles para el calentador

Material	Resistencia eléctrica [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
Cobre	0,02 - 0,05
Bronce	0,0172 - 0,0175

Fuente: ayudaelectronica.com

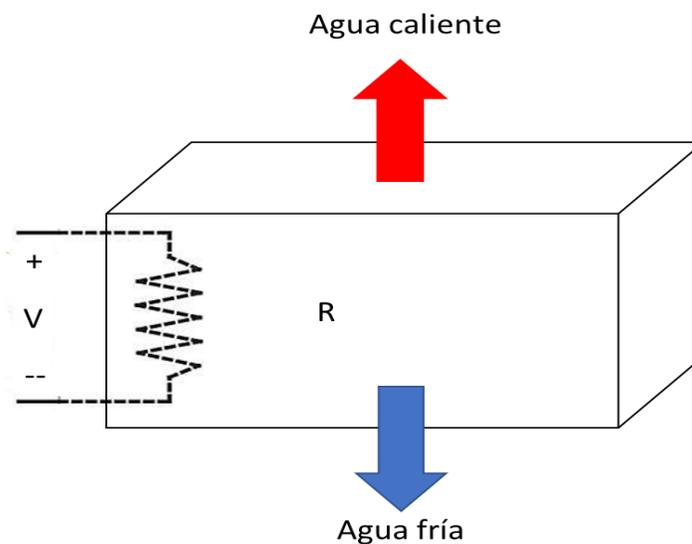
En la tabla 1 se observan los valores de resistencia eléctrica para los materiales propuestos para el calentador.

Tabla 2. Propiedades del cobre

Sustancia	Densidad ρ kg/m^3	Calor específico C_p $kJ/kg \cdot K$
Cobre		
-173	8,900	0.254
-100	8,900	0.342
-50	8,900	0.367
0	8,900	0.381
27	8,900	0.386
100	8,900	0.393
200	8,900	0.403

Fuente: Los autores

En la tabla 2 se puede apreciar las principales propiedades consideradas para el diseño del sistema de transferencia de calor.

Figura 4. Esquema del depósito del calentador

Fuente: Los autores

En la figura 3 se puede apreciar el esquema propuesto para el diseño del depósito del calentador correspondiente al sistema de intercambio de calor que se pretende implementar.

Inmediatamente calculado el valor de potencia real disipado por la resistencia y como tal los valores promedios de las temperaturas del agua a la entrada del calentador del sistema, los cuales se determinaron en alrededor de los 20 °C, por otra parte, se determinaron adicionalmente los flujos máxicos más probables que pudiesen estar presentes para las distintas temperaturas a la salida, las cuales estarían variando entre los rangos de 30 y 60 °C. Estos datos posiblemente pueden ser asignados sin ningún tipo de restricción en específico o de manera general.

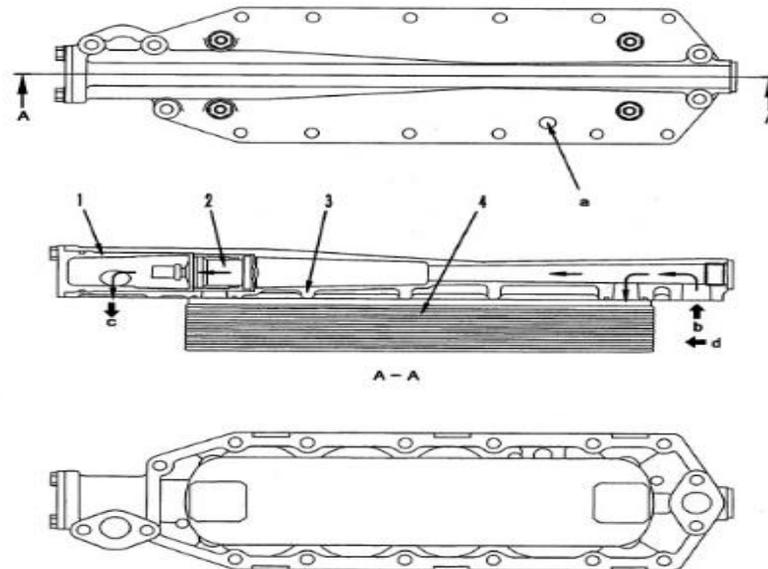
Dado que se esperaba que en el sistema estuviese sometido a un flujo de caudal importante, pero que a su vez no fuese muy abundante, se descartó inmediatamente los valores por encima de las cotas y se decidió en últimas asignar un caudal de 10 L/min. Este es válido para la entrada, esto es para el caso de los fluidos fríos y los calientes, aunque inicialmente se propuso un valor un poco menor en el diseño preliminar, se estima que, con base en los cálculos y datos registrados en la literatura existente, el valor teórico asociado a la temperatura con la que debe salir el fluido al emplear este caudal sea de 56,9 °C.

2.3 Características térmicas del IC

Una vez ratificados los datos de los elementos que estarán vinculados al prototipo, se procedió a seleccionar un intercambiador de calor de placas de un motor diésel modelo: SAA6D170E-3 el cual cuenta con las especificaciones necesarias para un óptimo funcionamiento y es coherente con los cálculos del diseño conceptual para el banco de pruebas que se construirá.

Vale la pena destacar que los elementos que estarán incorporados al sistema se han descrito de manera secuencial en este documento y en la medida en que se esté avanzando se desglosaran en mayores detalles.

Figura 5. Esquema del ICP modelo SAA6D170E-3



Fuente: Manual motor diésel modelo SAA6D170E-3

En la figura 4 se muestra las vistas de planta, frontal y superior del ICP seleccionado para el montaje e implementación del sistema de transferencia de calor.

En la selección e implementación del intercambiador se consideraron aspectos fundamentales como lo son:

- Se consideran insignificantes las pérdidas térmicas que puedan presentar hacia el entorno.
- Se prevé un funcionamiento por parte del dispositivo en estado estacionario.
- A lo largo de su trayectoria, la temperatura del fluido permanecerá constante.

- Para el caso de las caídas o pérdidas de presión en el interior del IC se considerarán insignificantes.
- Durante todo el trayecto del proceso, el fluido mantendrá todas las propiedades de este.

Inicialmente para la valoración de la carga térmica, se consideró seleccionar el valor de la potencia que se requería tomar por parte del fluido de mayor temperatura, este valor se estimó en 3000 W, luego de esto se calculó la temperatura con la que saldría el fluido caliente del ICP.

Se consideró pertinente realizar una estimación con respecto a la temperatura de salida de tal manera que se pudiese cuantificar un promedio entre la temperatura a la entrada y así poder obtener los parámetros asociados a las propiedades o características básicas del agua que se requerirían para poder resolver la ecuación general de transferencia.

En consecuencia, se esperaba que el valor de salida para el fluido caliente oscilara alrededor de los 40 °C, se optó por seleccionar este como un valor provisional, y este se promedió con el ajustado a la entrada el cual se definiría en 55 °C, con esto se consiguió un valor medio de 47,5 °C.

En la tabla 3 se presentan las propiedades más importantes con respecto al fluido de operación del sistema, esto con el fin de conocerlas con base en diferentes temperaturas.

Tabla 3. Propiedades del agua

Water	Temperature (°C)					
	0	20	40	60	80	100
Vapor pressure (mm Hg)	4.58	17.53	55.32	149.4	355.2	760.0
Density (g/cm ³)	0.9998	0.9982	0.9922	0.9832	0.9718	0.9583
Specific heat (cal/g °C)	1.0074	0.9988	0.9980	0.9994	1.0023	1.0070
Heat of vaporization (cal/g)	597.2	586.0	574.7	563.3	551.3	538.9
Thermal conductivity (kcal/m ² h °C)	0.486	0.515	0.540	0.561	0.576	0.585
Surface tension (dynes/cm)	75.62	72.75	55.32	69.55	66.17	62.60
Viscosity (centipoises)	1.792	1.002	0.653	0.466	0.355	0.282
Refractive index	1.3338	1.3330	1.3306	1.3272	1.3230	1.3180
Dielectric constant	88.0	80.4	73.3	66.7	60.8	55.3
Coefficient of thermal expansion × 10 ⁻⁴	–	2.07	3.87	5.38	6.57	–

Fuente: Tomado de Man J M. (1999). Principle of Food Chemistry. Aspen Publisher. Gaithersburg, Maryland

Como la potencia que disipe el fluido caliente será la misma potencia que toma el fluido frío, se utilizó la ecuación [2 b] y se despejó la temperatura de salida.

$$TF - Final = 20\text{ °C} + 3000\text{ J s} * 996,5\text{ kg m}^3 * 0,00005\text{ m}^3\text{ s} * 4179\text{ J kg} * K$$

$$TF - Final = 34,408\text{ °C}$$

Coefficiente global de transferencia

Continuando con el diseño térmico conceptual se procedió a designar un valor temporal para el coeficiente global de transferencia, que en ultimas seria corregido en caso de ser necesario.

$$UProv2 = 500\text{ W m}^2 * K$$

Con este valor se encontró el área de transferencia total.

$$AT = 3000W * 500W m^2 * K * 0,975 * 16,524 \text{ } ^\circ C$$

$$AT = 0,3725 m^2$$

Contraflujo.

Para efectos del cálculo para el sentido contraflujo, se optó por desarrollarlo de forma inversa. Considerando un área de transferencia de calor y un coeficiente global de calor establecido, se estableció la potencia a la que se podía llegar a transferir. Para alcanzar esto, se empleó de manera inicial, el valor de la media logarítmica de la temperatura para el caso del sentido contraflujo y el de manera conjunta el factor de corrección calculado en apartados anteriores. Con estos datos se encontró el valor asociado a la temperatura media logarítmica real, esto para el sentido contraflujo.

$$59 \Delta TM = 0,975 * 20,54 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta TM = 20,027 \text{ } ^\circ C$$

Luego se empleó una ecuación con la que se calculó el valor de potencia que se transferirá en el sistema.

$$\dot{Q} = 0,951556202 m^2 * 195,689282 W m^2 * K * 20,027 \text{ } ^\circ C$$

$$\dot{Q} = 3729,255 W$$

Una vez se tiene este valor para la potencia, se calcularon las temperaturas de salida para los fluidos de trabajo.

$$TC - salida = 55 \text{ } ^\circ\text{C} - 3729,255 \text{ J s} * 989,1 \text{ kg m}^3 * 0,00005 \text{ m}^3 \text{ s} * 4180,5 \text{ J kg} * K$$

$$TC - salida = 36,9622 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$TF - salida = 20 \text{ } ^\circ\text{C} + 3729,255 \text{ J s} * 996,5 \text{ kg m}^3 * 0,00005 \text{ m}^3 \text{ s} * 4179 \text{ J kg} * K$$

$$TF - salida = 37,9102 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.3 Ubicación dentro de la línea de investigación

El desarrollo del presente proyecto está alineado en la manera en cómo el egresado de Ingeniería Mecánica de la UAN se encuentra en la capacidad de desarrollar el diseño de un sistema mecánico y construirlo a partir de los conceptos previos adquiridos en la institución, en los que para este estudio de desarrollo e innovación se consideran como prioritarios lo asimilado en las asignaturas de Diseño Mecánico y transferencia de calor, materiales de ingeniería, resistencia de materiales, entre otros.

De esta forma se está aportando en gran medida al desarrollo de investigaciones de carácter aplicado, como es el caso en particular donde se diseña y construye un intercambiador de calor, en donde adicionalmente y de manera inferencial se proporcionará un documento en el que se registraran todas las observaciones y análisis detallados para obtener el objetivo propuesto y de paso permitirle a los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño poder documentarse en futuras investigaciones sobre lo plasmado en el desarrollo con respecto a los conceptos científicos y de diseño.

3 DISEÑO METODOLOGICO

3.1 Conceptos

El diseño metodológico se aborda desde los conceptos propios referentes al estudio de los fenómenos de transferencia de calor, en ese sentido se considera destacar el mismo desde las bases del capítulo 2, dado que corresponde a conceptos y ecuaciones de diseño preliminar del sistema, vale la pena destacar que la termodinámica adopta un papel muy importante en el desarrollo de este proyecto y como tal la descripción de las definiciones derivadas de esta ciencia, resultan relevantes en la asimilación de los conocimientos básicos para tener en cuenta.

Termodinámica

Según Cengel (2005) la termodinámica hace referencia a la ciencia de la energía y sus propiedades. En ese sentido se entiende que la energía se vincula a aspectos dentro de los cuales esta cuenta con la capacidad para realizar diferentes transformaciones. El concepto en sí surge de las palabras griegas therme (calor) y dynamis (fuerza), lo cual corresponde a lo más cercano por parte de los intentos del hombre en desarrollar los primeros esfuerzos por desarrollar medios en los cuales se pudiese transformar el calor en energía. Actualmente, el termino es llegado a interpretarse de una forma más extensa para asociar aspectos energéticos y sus diferentes cambios, incluidas la producción de potencia, sistemas frigoríficos y las distintas relaciones entre las propiedades de la materia en el universo (Cengel, 2005, p. 29).

Energía

Existen diversas formas de energía, las cuales son: la energía térmica, mecánica, eléctrica, química y por último la nuclear, e incluso la masa es llegada a considerarse como una de las tantas formas ya existentes. Ésta a su vez puede transferirse desde o en su defecto hacia un sistema cerrado (una masa constante) en dos formas distintas como lo son el calor y el trabajo.

En un volumen de control, la energía se transfiriere por flujos de masa. Para lo que se considera que cuando se presenta una transferencia de energía en cualquier sentido dentro de un sistema cerrado, se identifica como calor si la produce una diferencia significativa de sus temperaturas. Para el caso contrario se define como trabajo, y lo produce una fuerza que está actuando en una distancia determinada (d'Auxi, 2019, p. 18).

En los análisis e investigaciones termodinámicas, se suele considerar dos grupos para clasificar las diversas formas de energía que integran la totalidad de un sistema: macroscópicas y microscópicas (Rivadulla Fernández, 2018, p. 31).

- Macroscópicas: son las que implican un sistema como un todo con respecto a un marco de referencia externo, como lo es en el caso las energías cinéticas y la potencial.
- Microscópicas: son las que están directamente relacionadas con la estructura molecular de un sistema específico y el grado de actividad molecular presente en él, y son autónomos con respecto a los marcos de referencia externos. La sumatoria de todas estas formas de energía se define como la energía interna de un sistema (Cengel, 2005, p. 30).

Calor y temperatura

El calor es una forma de energía y su capacidad, la medida de su capacidad de transferirla está dada por la temperatura, quien representa su unidad de medida para estos casos. la transferencia de calor ocurre cuando se presenta un desbalance térmico, o más bien cuando una de las partes involucradas entre las que tiene lugar un proceso de transferencia alcanza a estar más caliente o en su defecto se afirma que tiene mayor temperatura que la otra (Rolle, 2006, p. 41).

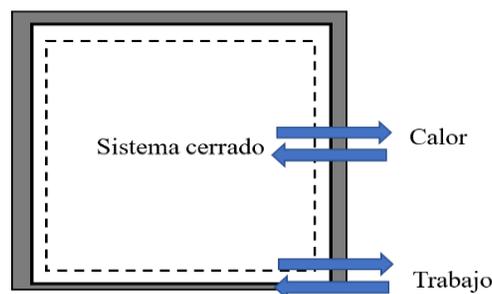
Principio de conservación de la energía

Corresponde a uno de las más relevantes e imprescindibles leyes del universo, la cual es conocida como el principio de conservación de la energía, en esta se afirma que, durante una interacción, la energía puede llegar a transformarse de una forma a otra, pero la totalidad de su magnitud siempre permanecerá constante (Renuncio, 2000, p. 18).

La energía y sus formas de transferencia

La energía en sí puede llegar a cruzar fronteras en un sistema cerrado a través de dos alternativas distintas, la cuales se ven representadas en el calor y el trabajo.

Figura 6. Fronteras del sistema para $m=$ constante



Fuente: los autores

La imagen mostrada en la figura 5 representa la transferencia de calor en un volumen de control, esta se muestra con base a las dos formas en las que la energía puede atravesar las fronteras del sistema.

Transferencia de energía por calor

El calor como se definió en el apartado anterior corresponde a una forma de energía transferible entre dos sistemas (o entre un sistema y el entorno) a causa de una diferencia de temperatura. Siendo así, una interacción de energía se presentará en forma de calor sólo si ocurre debido a una diferencia entre las temperaturas. De esta manera se infiere que no es posible que se presente transferencia alguna de calor entre dos sistemas, si estos están a una misma temperatura.

El calor como una de las formas más comunes de energía, alcanza a transferirse a través de tres mecanismos específicos, los cuales son: por conducción, por convección, ya sea natural o forzada y por radiación.

Conducción: es un mecanismo de transferencia de energía, en el que las partículas más energizadas de una sustancia o material se desplazan hacia las adyacentes con menos energía, producto de la interacción entre estas.

Convección: es el mecanismo que implica la transferencia de energía entre superficies sólidas y fluidos adyacentes que se encuentren en movimiento o en estado de reposo, y vincula los efectos combinados de la conducción y la dinámica del fluido.

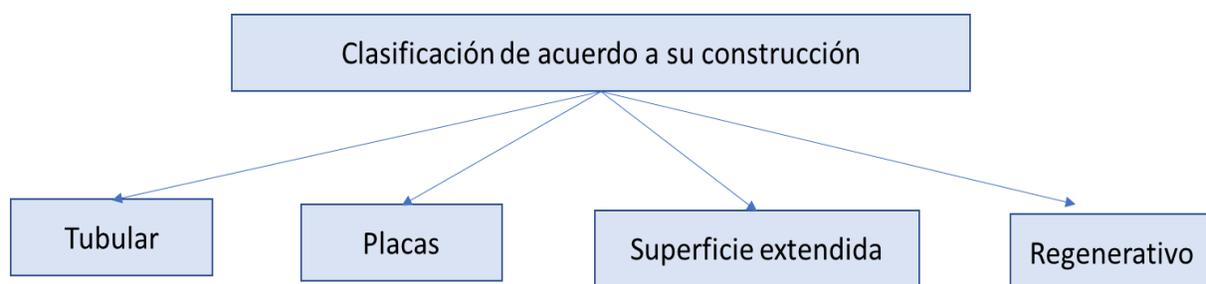
Radiación: es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones).

3.2 Intercambiador de Calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo de transferencia de energía, utilizado para la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos disponibles que se encuentren a diferentes temperaturas (Juárez & Mendoza, 2015, p. 38) aunque algunos textos lo definen como un equipo de transferencia de calor cuya función es cambiar la entalpía de una corriente (Pérez Sánchez et al., 2019, p. 3). Los intercambiadores de calor actualmente se clasifican de acuerdo con los siguientes aspectos:

- Mecanismo de transferencia de calor
- Nivel de compactación de las superficies
- Configuraciones de flujo
- Etapas de los fluidos en el proceso

Figura 7. Clasificación de los IC con base en su fabricación



Fuente: los autores

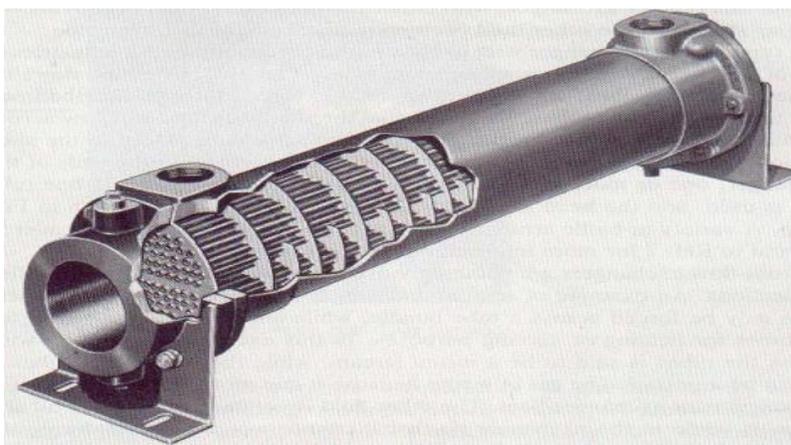
El esquema anterior mostrado en la figura 6 corresponde a los diferentes tipos de IC existentes de acuerdo con su construcción.

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar de acuerdo con su construcción en los tipos descritos en la figura 2, aunque para efectos de este proyecto solo consideraremos en cuanto a su definición los de tubo y casco y los de placas, por ser este último el de nuestro interés.

2.2.1 Intercambiador de calor de tubos y casco

Este es el intercambiador de calor más usado en la industria y generalmente es construido por tubos circulares, elípticos, rectangulares, redondos y planos. Actualmente existe una considerable flexibilidad en el diseño, porque la geometría puede variar fácilmente cambiando el diámetro del tubo, posición y longitud. Este es diseñado básicamente para altas presiones. Se emplean principalmente líquido-líquido y líquidos con cambios de fase (condensación y evaporación). Se utilizan para gas-líquido y gas-gas en las aplicaciones de transferencia de calor precisamente cuando la temperatura y presión de funcionamiento son muy altas (González-Mendizábal, 2018).

Figura 8. Intercambiador de calor de tubo y casco



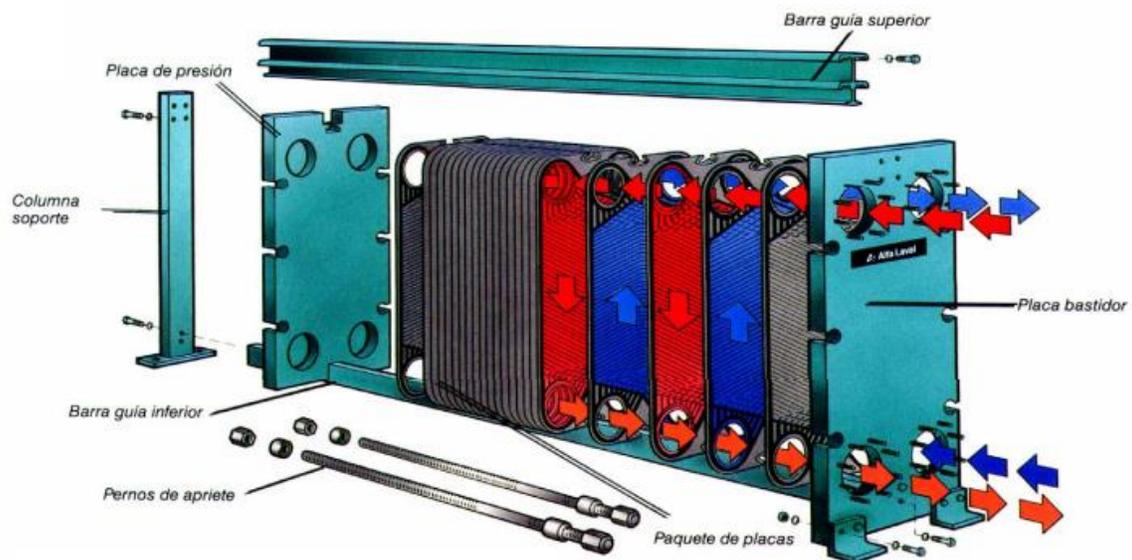
Fuente: Tomado de gecousb.com 2009

En la figura 7 se observa una imagen del diseño de un intercambiador de calor de tubos y casco, en esta se puede apreciar a manera de corte parte de los tubos que lo componen en su interior.

3.2.2 Intercambiador de calor de placas

Este intercambiador consta de una serie de placas metálicas rectangulares, las cuales son acopladas unas a otras en un bastidor metálico que permite la fijación adecuada mediante tornillos laterales. Cada placa cuenta con un patrón ondulado por las que circula el fluido, estas corrugaciones facilitan en primer lugar la transferencia, al lograr incrementar la superficie de intercambio energético y la turbulencia (Juárez & Mendoza, 2015, p. 45).

Figura 9. Intercambiador de calor de placas



Fuente: Tomado de gecousb.com 2009

En la figura 8 se puede apreciar el esquema básico de un ICP de uso industrial y las diferentes partes que lo integran en su estructura.

Tabla 4. Comparativa de los intercambiadores de calor más usados

Aspecto a comparar	Tubo y coraza	PHE	SHE
Respuesta en operaciones líquido-líquido	Altos coeficientes globales de transferencia de calor para $Re > 2.100$.	Altos coeficientes globales de transferencia de calor para $Re > 10$.	
Resistencia	Alta	Baja	Media
Área de transferencia de calor	Grande	Muy grande	Mediana
Costos básicos	Altos	Bajos	Altos
Mantenimiento	Difícil de inspeccionar, limpieza química muy buena por la carcasa y aceptable o pobre por los tubos. Limpieza mecánica prácticamente imposible. Reparaciones aceptables.	Completamente accesible para inspección, limpieza química y manual. Fácil reemplazo de todas sus partes.	La inspección varía de buena a pobre. Limpieza química muy buena. Limpieza mecánica varía de buena a pobre. Reparación pobre.
Limitaciones de espacio y peso (para la misma operación)	Requiere de un espacio considerable y además un espacio amplio para mantenimiento.	Ligeras y ocupan poco espacio. No requieren de espacio adicional para mantenimiento.	Ligeras y ocupan menos espacio que tubo y carcasa.
Diferencia de temperatura mínima entre los fluidos	Hasta 5 °C.	Hasta 1 °C.	No especificado.

Fuente: Tomado de González-Mendizábal (2002). Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones.

En la tabla 4 se describen las características más importantes para la selección del intercambiador de calor para el sistema de transferencia de calor propuesto para su implementación.

Luego de ampliar los conceptos fundamentales necesarios para el desarrollo del sistema de intercambio de calor y se realizaron los cálculos pertinentes para el diseño conceptual, se realizó de manera secuencial el proceso de desarrollo de este, el cual se presentó de la siguiente manera:

1. Se procedió a escoger un intercambiador de calor de placas paralelas para el sistema de intercambio de calor, debido a la disponibilidad del dispositivo en el entorno laboral de los integrantes del proyecto.
2. De manera conjunta a la selección del dispositivo que integrara el sistema, se procede a la selección y compra de los materiales para realizar el encapsulado del intercambiador de calor, se opta por utilizar lámina de acero inoxidable calibre 10 el cual fue cortado con equipo de plasma para darle las medidas acordes con las dimensiones del intercambiador.
3. Se realizan los procesos de manufactura y adaptación de intercambiador al encapsulado con soldadura revestida de acero inoxidable E308 54L de 3/32" de diámetro.
4. Se procede a acoplar el dispositivo con tubería galvanizada de 3/4" usando una reducción de 3/4 a 1/2", cabe anotar que el intercambiador tiene una unión mecánica por medio de 4 tornillos de 10 mm de diámetro con la superficie del encapsulado y tratada con pegante epóxico sintético para evitar fugas y mezclas del fluido de mayor temperatura con el fluido refrigerante.
5. Se continúa con la fabricación del banco que servirá de base para la instalación de todos los componentes que conforman el prototipo, a esta se le aplicó un revestimiento tipo pintura al horno para prolongar la vida útil de los materiales y

evitar la corrosión, A este banco se le instalaron dos tablas Rh resistente a la humedad con recubrimiento de melamina (aspecto madera) con canto del mismo tono para fines estéticos.

6. Se fabrica un depósito para el fluido de mayor temperatura con lámina de acero al carbono y un recubrimiento de pintura al horno para evitar el deterioro por oxidación y contacto directo con el fluido.
7. Para el circuito de mayor temperatura se empleó una tubería de cobre de 1/2" para el fluido que estará con una alta temperatura al igual que también se le incorporaron accesorios de cobre para su acople y posterior unión por medio de soldadura con gas butano y material de aporte.
8. Para el circuito del refrigerante se usó una tubería de CPVC, la cual puede soportar temperaturas de operación máxima de hasta 82 °C al igual que los accesorios de acople, los cuales fueron integrados al sistema a través de un pegamento especial para este tipo de material.
9. En el sistema propuesto se integran a dos (2) electrobombas de 0,5 HP de marca Karson disponibles en almacenes de cadena, las cuales cumplen con gran parte de las características óptimas para la implementación en el sistema.

10. Se adapta un depósito de polipropileno para el fluido refrigerante debido a la capacidad para contener el fluido a menor temperatura y la facilidad de adquisición en el mercado local.

11. Posterior a estos procesos de desarrollo del sistema, se integraron todos los elementos y se entregó un sistema funcional y en perfecto estado.

4 DISEÑO DEL CIRCUITO HIDRÁULICO

Para la disposición del funcionamiento el ICP es menester implementar un circuito hidráulico apropiado, con el que se lograría direccionar el fluido de trabajo u operación de una forma más eficiente, segura y confiable, desde la válvula de 1/2 pulgadas (Figura 8) en todas las diferentes etapas en las que se involucre el fluido, esto para el calentamiento y la distribución, hasta alcanzar las boquillas de entrada del ICP y más adelante poder llegar a conducir este, desde las boquillas de salida hasta el mismísimo sumidero del sistema. En el pre diseño de este, se consideraron parámetros relevantes entorno a su funcionalidad, como lo es la presión y la temperatura de operación del IC, como también otros factores no menos relevantes como lo es la disponibilidad y la pertinencia de los elementos y aditamentos inmersos en el proceso, de tal manera que se pueda a implementar un sistema hidráulico lo más óptimo posible.

Figura 10. Válvula de mariposa CPVC 1/2 pulgada



Fuente: Los autores

La imagen representada en la figura 9 corresponde a la válvula de CPVC de ½” empleada en el montaje del sistema hidráulico de menor temperatura.

Máxima presión de operación

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 3, se disponía de una fuente de agua de 25 L ubicada a una distancia de 15 cm, de tal modo que, la máxima presión que se podía presentar y que llegaría a soportar el dispositivo en todo su conjunto sería la que alcanzaría la columna de líquido resultante entre la diferencia de alturas de la mesa y la que corresponde a la posición actual de los tanques la cual estaría a los 10 cm.

$$P = \rho H_2O * g * h$$

$$P = 1000 \text{ kg} * \text{m}^3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,10 \text{ m}$$

$$P = 981 \text{ Pa} = 0,981 \text{ kPa}$$

$$P_{abs} = 0,981 \text{ kPa} + 101 \text{ kPa} = 101,981$$

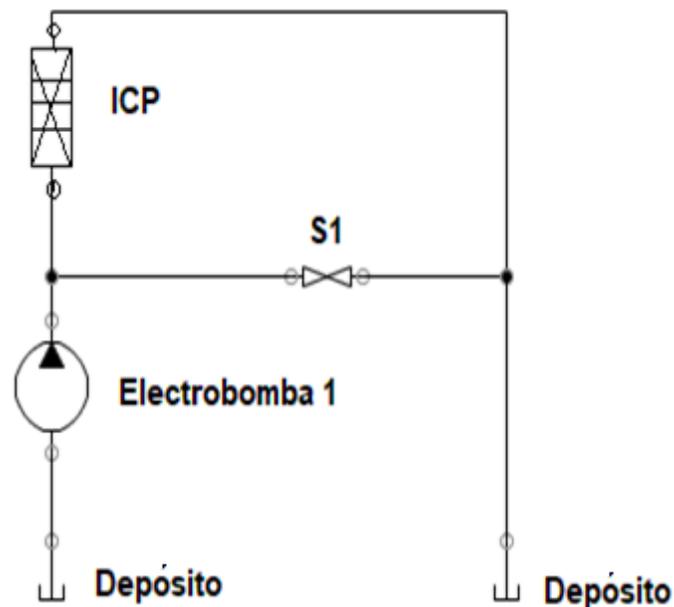
Con este dato, se sustentaron los criterios apropiados para la selección de las tuberías y aditamentos necesarios para un correcto y óptimo funcionamiento del IC.

4.1 Circuito hidráulico

En la sección anterior se hizo referencia específicamente al objetivo general del circuito en mención, ahora bien, en este punto se describirán los casos específicos a desarrollar en cuanto a las actividades del sistema:

- Permitir que haya una variación del flujo, de tal manera que se puedan realizar variaciones en las condiciones de operabilidad del ICP.
- Establecer divisiones en el fluido de trabajo, básicamente en dos ramales, uno de operación y otro de alivio, de manera que por ambas llegue a circular la misma cantidad del fluido.
- Garantizar la alternancia en la dirección o sentido de circulación del fluido frío en el IC, para llegar a poder desarrollar las pruebas de operabilidad del flujo en sentido contraflujo.
- Hay que asegurar que no se generen excesos de fluido en el IC una vez culmine la experiencia en el laboratorio.

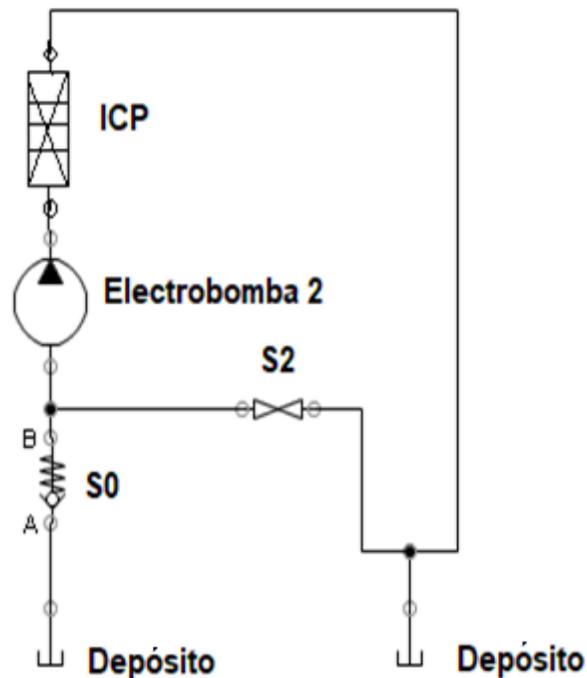
Figura 11. Circuito hidráulico para el fluido de mayor temperatura



Fuente: los autores

En la figura 11 se presenta el esquema del circuito hidráulico para el fluido de mayor temperatura y los elementos que lo integran.

Figura 12. Circuito hidráulico para el fluido de menor temperatura



Fuente: Los autores

La figura 12 presenta de manera visual el esquema desarrollado para el circuito hidráulico del fluido de menor temperatura, en este se pueden observar los elementos básicos del sistema, como las válvulas, electrobomba, ICP y el depósito.

En el circuito anteriormente mostrado en la figura 11 y 12 se cumple con todas las tareas mencionadas con cierta anticipación y está desarrollado con elementos que se seleccionaron para la fabricación del circuito hidráulico, los cuales se dividieron en dos partes, una correspondiente al refrigerante y la otra al fluido de transferencia, en ese sentido tenemos que para el circuito hidráulico del fluido a transferir se requirieron:

- 8 Codos CPVC de 1/2 pulgada.
- 1 Tés CPVC de 1/2 pulgada.
- 1 Válvula de mariposa 1/2 pulgada
- 1 Válvula cheque 1/2 pulgada

Por otra parte, para el circuito hidráulico del fluido refrigerante tenemos que esta se diseñó en cobre por sus propiedades, en ella se emplearon:

- 9 Codos de cobre 1/2 pulgada.
- 1 Tés de cobre 1/2 pulgada.
- 1 Válvula de cierre de cobre 1/2 pulgada
- 1 Reducción de 1" a 1/2" de cobre

4.2 Principios asociados al funcionamiento del circuito hidráulico

Partimos con el supuesto de tener todas las válvulas inicialmente cerradas, el primer paso es abrir la válvula S1 para así crear una vía de acceso para el fluido de menor temperatura y así obtener una configuración para flujo en paralelo, Para finalizar se cierra la válvula S1; con esto se permite que salga todo el fluido acumulado en las tuberías e intercambiador, se espera hasta que todo el fluido sea evacuado por el mismo sistema.

4.3 Principio de funcionamiento

Para iniciar todos los breakers están cerrados, se procede a abrir el B1 y B2 en el circuito de potencia, seguido de esto, se acciona el interruptor B3, energizando de esta manera la bobina, Para apagar el dispositivo basta con cerrar los breakers B1, B2 y B3. El encendido del calentador como se observa será manual y dependerá de un valor de caudal mínimo de operación el cual se determinó que será de 10 L/min; si se activa con un caudal menor la temperatura del fluido podría superar el límite de seguridad de algunos de los componentes del dispositivo.

Figura 13. Breakers del sistema eléctrico



Fuente: Los autores

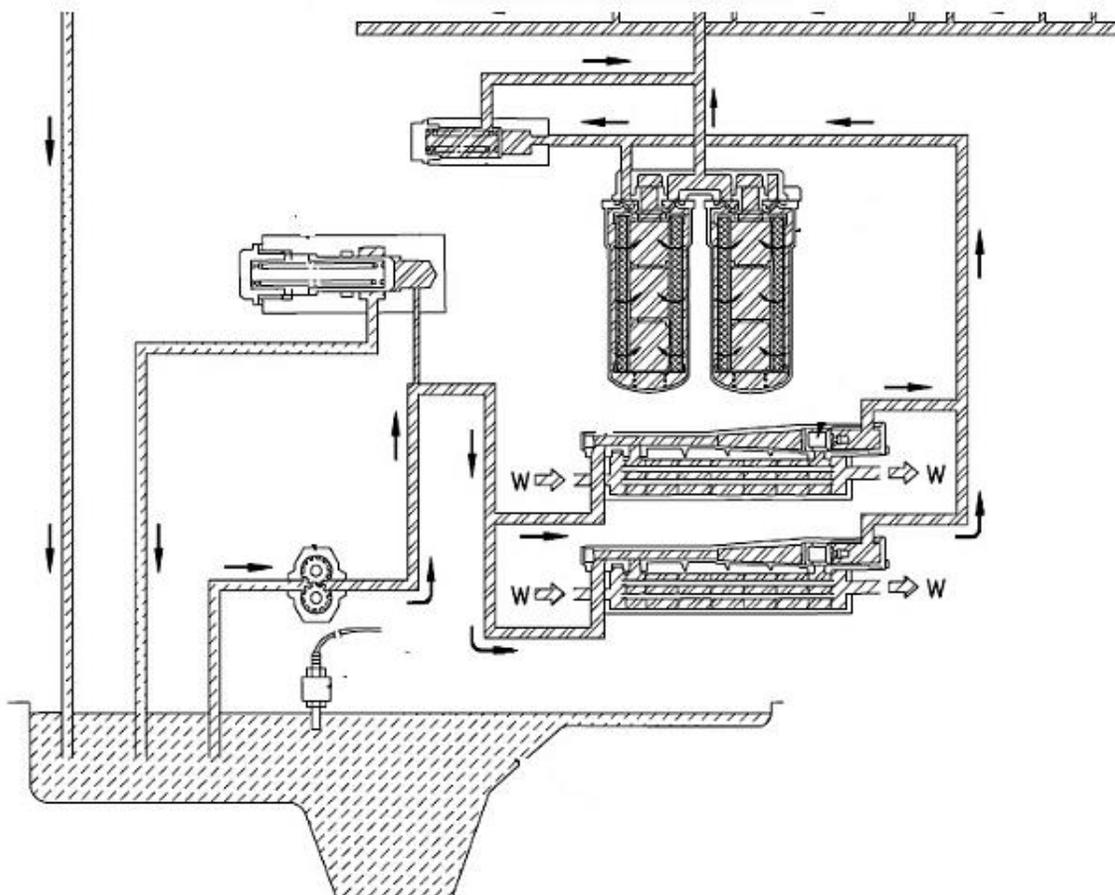
En la figura 13 se puede observar la caja con los breakers, donde se encuentra el barraje de fase, uno de neutro y otro para el polo a tierra, en él se consideraron los códigos de colores estipulados en la norma.

5 DESIGNACIÓN DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS

5.1 Intercambiador de calor de placas

Como se mencionó en apartados anteriores, el intercambiador seleccionado fue el de un motor diésel modelo SAA6D170E-3.

Figura 14. Diagrama hidráulico del motor SAA6D170E-3



Fuente: Tomado del manual del motor diésel modelo SAA6D170E-3

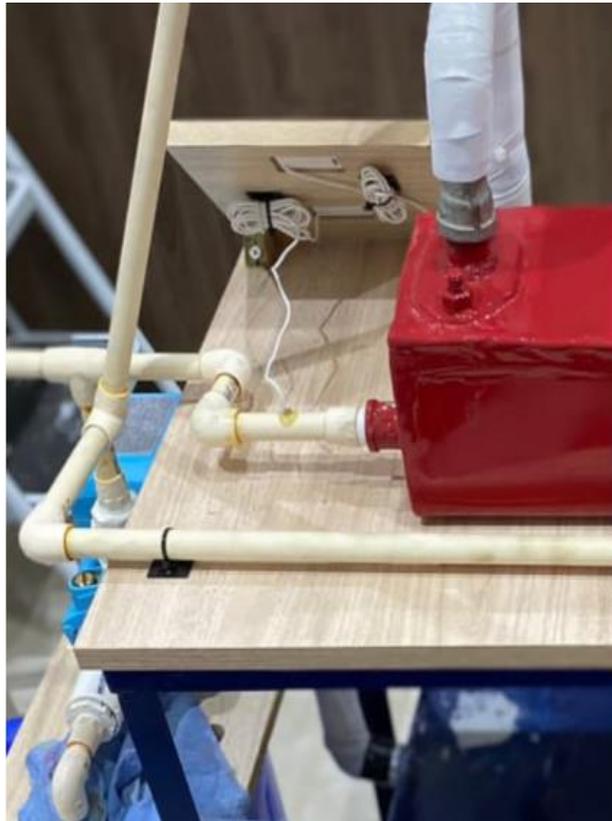
En la figura 14 se puede observar el diagrama de la distribución del sistema de lubricación del motor SAA6D170E-3 del cual se extrajo para su adaptación al sistema de

transferencia el ICP, el cual posee dimensiones de 44 cm de largo, 10 cm de ancho y una altura de 10 cm, como también se tiene que integra un número total de 15 placas, lo que representa un área de transferencia de calor de $0,60 \text{ m}^2$.

5.2 Tubería

Se considera pertinente hacer uso de dos tipos de tubería, una asignada para el agua fría y la otra para el agua caliente. Para el circuito hidráulico posesionado antes del calentador se optó por emplear tubos CPVC de 1/2 de pulgada y para el circuito hidráulico que se implementó después del calentador de calor se utilizó tubo de 1/2 pulgada de cobre.

Figura 15. Tubería empleada en el ICP 1a



Fuente: Los autores

En la imagen que se observa en la figura 15 se observa parte del circuito hidráulico conectado al calentador, en esta se puede apreciar el recubrimiento que hace parte de la medida implementada para reducir las pérdidas de calor por convección.

Figura 16. Tubería empleada en el ICP 2a



Fuente: Los autores

En la figura 16 se observa el montaje de la instalación hidráulica del fluido de trabajo, en esta se puede observar las conexiones a la electrobomba #2 y el punto de entrada al ICP.

5.3 Depósito del refrigerante

Una vez se configuraron los parámetros de diseño, se procedió a desarrollarlo con base en estos, de tal manera que se construyó en el taller y se le incorporo un revestimiento anticorrosivo para efectos de mayor durabilidad en los tiempos de operación del sistema.

Figura 17. Proceso de incorporación del depósito del fluido de mayor temperatura



Fuente: Los autores

En la figura 17 se muestra parte del proceso de acople de la tubería del circuito hidráulico del fluido de mayor temperatura.

5.4 Selección de las electrobombas

El sistema de succión es uno de los componentes más importantes de este dispositivo, es así como se seleccionaron dos electrobombas marca Karson de referencia KSN-30560 las cuales cuentan con un H de 18 metros, Q máximo de 28 L/m, opera con un voltaje de 125 V con corriente AC a 60 Hertz, opera con una potencia efectiva de 370W/0,5 Hp, producen de 3000 a 3400 rpm.

Figura 18. Electrobomba Karson



Fuente: Los autores

En la figura 18 se observa la electrobomba seleccionada instalada en el banco del sistema de transferencia.

Figura 19. Especificaciones técnicas



KARSON BOMBA DE AGUA		n. 2129
Modelo: KSN-30560		60Hz
H.max: 18 m		3.6 A
Q.max: 28L/min		
125 V	370W/0.5HP 1000msnm	
3000-3400 r/min	Succión: 8m	
Conexión: 1"x1"	Fases: 1	F.P 0.89
Eficiencia (%) 27	20µ F/250V	IP:44

Fuente: Los autores

En la figura 19 se pueden observar las especificaciones básicas de la electrobomba seleccionada para el sistema de transferencia de calor.

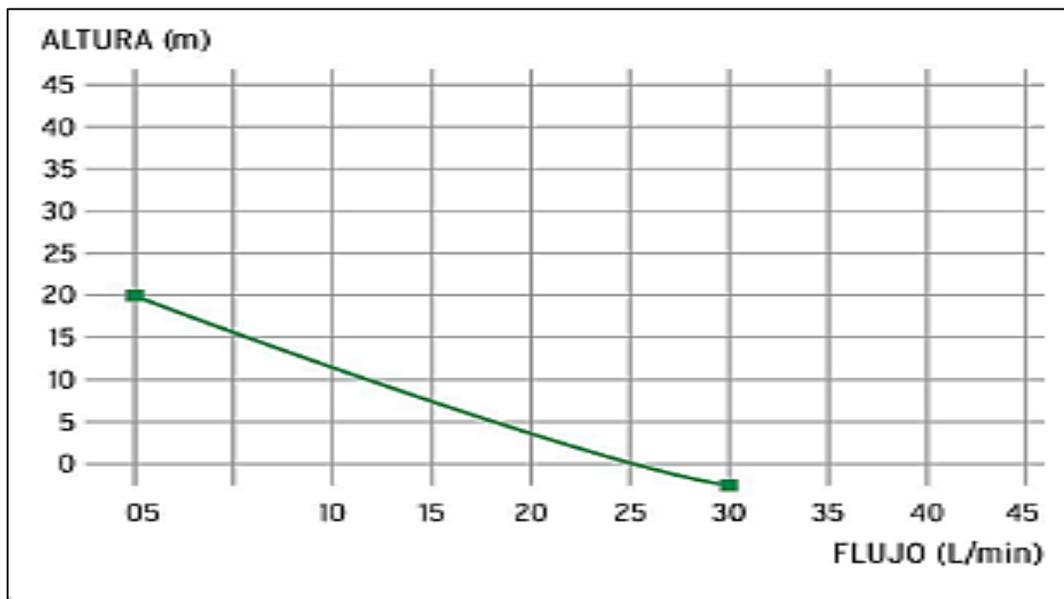
Características de la bomba

- Cuerpo de bomba en hierro fundido
- Soporte motor con sistema antibloqueo, que evita que la bomba se bloquee después de largos períodos sin uso
- Doble sistema antibloqueo en acero inoxidable
- Impulsor en bronce de alabes radiales
- Eje en acero inoxidable AISI 304
- Máxima temperatura del líquido: 60°C
- Capacidad de succión a nivel del mar: 8 m
- Sello mecánico en cerámica y grafito, con elastómero en NBR

Características del motor

- Motor de inducción cerrado con bobinado en cobre
- Aislamiento clase F
- Protección IP 44
- Máxima temperatura: 60°C
- 60 Hz, 3450 rpm. Incluye protector térmico interno en el embobinado
- Monofásico 60 Hz, 3450 rpm. 125 V

Figura 20. Curva característica de la electrobomba seleccionada



Fuente: Tomado de www.homecenter.com.co

En la figura 19 se observa la curva característica de la electrobomba seleccionada, en ella se puede determinar el punto óptimo de operación.

5.4 Selección de los medidores de temperatura

Para este punto se seleccionaron termómetros digitales TPM-10 con los cuales puede alcanzar a tomar lecturas de temperaturas en un rango comprendido entre los $-50 \sim 110^{\circ} \text{C}$, tiene una pantalla LCD resistente a la humedad y posibles interferencias, adicionalmente cuenta con una serie de especificaciones particulares que se describen en detalle a continuación:

Figura 21. Termómetros digitales del sistema



Fuente: Tomado de www.electronicspot.com.co

En la figura 20 se pueden observar la imagen del termómetro seleccionado, así como también en la tabla 5 se aprecian las especificaciones técnicas del mismo para el sistema de transferencia de calor a implementar.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del termómetro digital TPM-10

No. de Modelo.	TPM-10	Material	Medición Óptica
Tipo higrómetro	Cloruro de Litio higrómetro	Colour	White and Black
Theory	Temperature Sensor	Packing	Cartons
Guarantee Period	1 Year	Name	Digital Thermometer
Sensor	Ntc	Paquete de Transporte	500pieces in One Cartons
Especificación	30g	Marca Comercial	Santrol
Origen	China Jiangsu Xuzhou	Código del HS	9025199090
Capacidad de Producción	50000pieces/Month		

Fuente: Tomado de es.made-in-china.com

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez terminados los componentes que estarán vinculados al ICP, se procedió a su ensamblaje para los efectos anteriormente descritos. Este proceso fue bastante sencillo ya que en primera instancia se adecuó el banco que representaría la estructura sobre la cual estaría soportado el sistema. En esta se instalaron las dos electrobombas, el depósito del fluido de mayor temperatura, el intercambiador y el sistema hidráulico del mismo junto con los tableros de lectura de los indicadores de temperatura.

Figura 22. Estructura base del ICP



Fuente: Los autores

En la figura 22 se observa el montaje de los tableros donde se encuentran las pantallas de lectura de la temperatura del ICP.

De manera secuencial se instaló el ICP en el banco e instalaron las conexiones con el fin de desarrollar las pruebas de carácter técnico pertinentes, como lo son la de hermeticidad con la cual se posesiono el IC en condiciones máximas de operación en

cuanto a caudal se refiere de tal manera que se pudiese observar si había o no fugas en el sistema y si el ajuste aplicado era suficiente para las condiciones de operación establecidas en los cálculos preliminares.

Figura 23. *Instalación de los termómetros en el circuito hidráulico*



Fuente: Los autores

La figura 23 muestra el punto de toma de temperatura a la entrada del circuito hidráulico del fluido de operación.

Figura 24. *Conexiones de los termómetros 1a*



Fuente: Los autores

Al igual que la figura 23 en la 24 y 25 se muestran uno de los puntos de toma de temperatura desde dos perspectivas diferentes, aunque para el caso específico se presenta el de la salida del fluido de operación.

Figura 25. Conexiones de los termómetros 2a



Fuente: Los autores

Para el caso de los sensores asociados a la lectura de las temperaturas, estos se instalaron de tal forma que las lecturas que estos suministraran se tomaran exactamente previo a la entrada del IC y justo después de la salida del IC esto con el objetivo de obtener lecturas más precisas en el proceso, estas conexiones se pueden observar en las figuras 24 y 25.

En apartados anteriores se hizo referencia a que los cálculos que se desarrollaron no involucraban pérdidas hacia el entorno y, por otra parte, por lo tanto, es entendible el por qué la potencia que se disipa es la misma, que se consideró como referencia al inicio del proceso en cuestión. Sin embargo, vale la pena destacar que, en la realidad actual, si se

puede evidenciar que existen pérdidas de calor, aunque mínimas hacia el exterior, esto produce que no toda la potencia que el fluido caliente en sus condiciones normales de operación disipe, sea absorbida eficientemente por el fluido frío en dicho proceso, debido a esto y con el fin de sobreponer estos inconvenientes, se decidió instalar un recubrimiento de rubatex en el circuito hidráulico del fluido a transferir.

Figura 26. Montaje del banco con los recubrimientos en el circuito



Fuente: Los autores

En la imagen anterior mostrada en la figura 26 se observa el sistema de transferencia de calor ensamblado en su totalidad con la adaptación del ICP del motor SAA6D170E-3 y el recubrimiento de rubatex instalado en el circuito hidráulico de mayor temperatura.

Luego del ensamble del sistema se realizaron unas pruebas para validar el funcionamiento del equipó, en estas pruebas se alcanzaron a obtener los resultados descritos en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de las pruebas realizadas

Lecturas de las temperaturas en la entrada y salida del sistema de IC			
T del fluido a la entrada del IC	T del fluido a la salida del IC	T del refrigerante a la entrada del IC	T del refrigerante a la salida del IC
51,4	44,6	32,8	37,5
50,1	43,8	33,2	37,1
49,2	43,1	33,7	37
48,2	42,6	34,1	37,1
47,4	42,1	34,6	37,1
46,6	41,8	35	37,2
45,9	41,5	35,3	37,3
45,3	41,2	35,6	37,3
44,7	41	35,9	37,5
44,2	40,8	36,1	37,5
43,8	40,7	36,4	37,5
43,2	40,5	36,6	37,5
42,8	40,3	36,8	37,6
42,4	40,1	36,9	37,6
42	39,9	37,1	37,6
41,8	39,8	37,3	37,6
41,5	39,7	37,3	37,7
42,2	39,6	37,5	37,7
41	39,6	37,6	37,7
40,8	39,5	37,7	37,8

Fuente: Los autores

Luego de realizar las pruebas pertinentes, las cuales se desarrollaron en ciclos de tres minutos hasta obtener la totalidad de los datos consignados en la tabla 6, se pudo establecer que la eficiencia del sistema está acorde con los parámetros de diseño, dado que los resultados evidencian una transferencia significativa para ambos fluidos.

Por parte del fluido de mayor temperatura se observa de acuerdo con los resultados que el calor absorbido por el sistema es en promedio de 5 grados Celsius, durante un tiempo de tres minutos en operación del sistema.

En el caso del refrigerante este en el proceso alcanza a absorber en promedio 3 grados Celsius debido al proceso durante los tres minutos de operación, esto sumado al hecho de que se por cerrar la válvula de derivación del sistema hidráulico de refrigeración para incrementar el caudal de este.

Si bien es cierto que el calor absorbido y el cedido no representan a nivel industrial unas diferencias significativas, el principal objetivo de este proyecto se centra es básicamente en la observación directa de los fenómenos de transferencia en un escenario académico, lo que se ratifica en la funcionalidad prevista para el sistema, dado que se puede evidenciar la transferencia de calor.

Las pruebas que se desarrollaron estuvieron sujetas a tiempos reducidos de operación, dado que se evaluó la operación del sistema a intervalos de tiempos que oscilaban entre los 10 y 15 minutos, pero no se presentó una disminución mayor, esto se presenta debido a que el sistema por ser regenerativo y no contar con un medio adicional a la convección natural para ceder el calor absorbido al exterior, no es posible que se efectuó una mayor transferencia.

Con base en los resultados anteriores se recomienda adaptar un dispositivo que permita la transferencia del calor absorbido al exterior, en ese sentido sería útil la adecuación de un sistema de superficies extendida (Aletas) o en su defecto alguno que pueda ejercer un proceso de convección forzada que facilite la regeneración en el sistema.

6.1 Costos

Los costos asociados a la fabricación del sistema se desglosan en la tabla 6.

Tabla 7. Costos de fabricación del sistema

Concepto	Costo
Intercambiador	\$ 1.000.000,00
Cableado	\$ 50.000,00
Resistencia eléctrica	\$ 35.000,00
Termómetros	\$ 80.000,00
Pegante epóxido	\$ 50.000,00
Caja de breakers	\$ 135.000,00
válvulas	\$ 80.000,00
Estructura de la mesa	\$ 200.000,00
Electrobomba	\$ 240.000,00
Tubería de cobre	\$ 90.000,00
Válvula de compuerta Belt - G	\$ 25.000,00
Codos 1/4" y uniones	\$ 80.000,00
Filtro	\$ 20.000,00
Procesos de manufactura	\$ 400.000,00
Láminas de acero AISI 304	\$ 70.000,00
Electrodos soldadura SMAW de cobre	\$ 60.000,00
Tornillos cabeza hexagonal 3/16"	\$ 6.000,00
10% Imprevistos	\$ 262.100,00
Total	\$ 2.883.100,00

Fuente: Los autores

6.1 Manual de usuario

Para el correcto uso del sistema se sugiere acatar las indicaciones dadas en este apartado, con base en las condiciones en las que va a funcionar el ICP es importante resaltar que, no se considera necesario desarrollar mantenimiento alguno a corto plazo. Esto se asume teniendo en cuenta que:

- El IC será usado en promedio 6 veces (2 horas) por año.
- El fluido de trabajo se considera que será agua potable, la cual posee un bajo factor de ensuciamiento.
- Los componentes propios del ICP en contacto con el agua son altamente resistentes a la corrosión.

Siendo así se recomienda que la operación del ICP se debe realizar llevando a cabo los siguientes pasos:

1. Verifique que los depósitos tienen el nivel de fluido necesario y recomendado.
2. Asegúrese que el tomacorriente tiene la capacidad adecuada para soportar la carga de los componentes del dispositivo y evitar una sobrecarga o falla de las acometidas internas.
3. Encienda la resistencia en el depósito de líquido para que éste gane calor y aumente su temperatura.

Precaución: hágalo en periodos de tiempo de aproximadamente 5 segundos, espere alrededor de 5 segundos y repita hasta alcanzar la temperatura adecuada.

4. Encienda la bomba #1 para hacer fluir en líquido a través del intercambiador, tome nota de las temperaturas en la entrada y salida del dispositivo para ir consignándolas en sus apuntes y analizarlas.
5. Una vez que las temperaturas en la entrada y salida del intercambiador han llegado a su temperatura objetivo, en este momento coloque el interruptor de la resistencia en posición apagado.

6. Encienda la electrobomba #2 y tome nota de las temperaturas a la entrada y salida del intercambiador.

Consigne en sus apuntes para posterior análisis en la actividad.

7. En este punto y con las dos electrobombas en funcionamiento vaya tomando nota de la temperatura de la entrada y salida del fluido en el intercambiador, y de la temperatura del refrigerante a la entrada y salida del IC.

8. Una vez se igualen todas las temperaturas apague las electrobombas y realicemos los análisis en la clase.

9. Luego de la temperatura en el refrigerante a alcanzado nuevamente la temperatura ambiente haga otra prueba usando la llave de derivación a retorno ubicada en la descarga de la electrobomba # w hagamos la misma prueba cerrando la válvula para aumentar el caudal en el refrigerante y mirar cómo se comportan las temperaturas, comparemos los tiempos y analicemos en clase con el tutor o profesor para aclarar dudas.

7 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este trabajo y con base en los resultados mostrados se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Se desarrolló e instaló un sistema de intercambio de calor con fines académicos para el laboratorio de transferencia; él cuenta con los equipos e instrumentos necesarios para realizar los estudios propuestos en la guía de laboratorio y complementar así la teoría desarrollada en las clases.
2. Los caudales que se determinaron con base en las especificaciones técnicas de las bombas y el sistema hidráulico se fijaron en 16 L/min, por encima de estos valores pueden ocasionar daños en algunos elementos del dispositivo, como es el caso que, al usarse un mayor o menor caudal, la temperatura podría subir de manera abrupta, dependiendo de la temperatura ambiente en su momento, hasta 60 °C.
3. Se realizó un diseño conceptual previo del sistema de intercambio de calor, con base en la teoría de la diferencia media logarítmica para el IC y se seleccionaron para el desarrollo del diseño en este trabajo, las ecuaciones cuyos parámetros y/o condiciones en las que se hallaron se acercaban más a las condiciones en las que se operaría en el laboratorio.
4. Se construyó un sistema de intercambio de calor para el laboratorio de transferencia a través de la adaptación de un ICP de un motor diésel modelo SAA6D170E-3 y la

integración de los elementos necesarios para su correcta funcionalidad en los entornos académicos, como es el caso del sistema de bombeo, eléctrico e hidráulico.

5. Se realizó una comprobación del sistema, de intercambio de calor a través de pruebas experimentales, en estas se pudo confirmar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y la operabilidad del sistema de bombeo de manera adicional se constató el funcionamiento del ICP adaptado al sistema.
6. En la comprobación del sistema se realizaron pruebas con fluidos a temperaturas que no alcanzaran los 60°C de tal manera que no se alcanzara el valor límite de operación del sistema de bombeo registrado en la ficha técnica de las electrobombas.
7. Se pudo observar que la transferencia de calor para los caudales de operación y en reducidos tiempos, arrojaron valores de transferencia notorios, si se considera que el sistema está operando en estado estacionario y es regenerativo.
8. Se recomienda la elaboración de otras guías de laboratorio por parte de los docentes encargados de esta asignatura, de tal manera que se puedan realizar experiencias adicionales enfocadas en esta área con el objetivo de poder aprovechar al máximo el equipo desarrollado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bolívar, D. G.-M.-U. S., & 2002, undefined. (n.d.). Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. *Academia.Edu*. Retrieved September 1, 2022, from <https://www.academia.edu/download/34280679/intercambiadores-de-calor-tipos-generales-y-aplicaciones.pdf>
- Cengel, Y. (2005). *Termodinamica*. McGraw-Hill Companies.
- Chevalier, D., Nicolas, C., Amand, G., de La Morinière, A., & Cloarec, M. L. (n.d.). INTERCAMBIADORES DE CALOR. *Seleccionesavicolas.Com*. Retrieved November 16, 2022, from <https://seleccionesavicolas.com/pdf-files/2013/12/006-012-Energia-Intercambiadores-de-calor-Chevalier-SA201312.pdf>
- d'Auxi, C. (2019). *Energia*. lulu.com.
- González-Mendizabal, D. (2002). *Intercambiadores de Calor*. [https://gecousb.com.ve/guias/GECO/Fen%C3%B3menos%20De%20Transporte%20\(TF-2241\)/Material%20Te%C3%B3rico%20\(TF-2241\)/TF-2241%20Presentaci%C3%B3n%20de%20Intercambiadores%20de%20Calor%20Parte%20.pdf](https://gecousb.com.ve/guias/GECO/Fen%C3%B3menos%20De%20Transporte%20(TF-2241)/Material%20Te%C3%B3rico%20(TF-2241)/TF-2241%20Presentaci%C3%B3n%20de%20Intercambiadores%20de%20Calor%20Parte%20.pdf)
- Gómez, A. (2008). Modelo de cálculo para el análisis térmico y mecánico de intercambiadores de placas. Cartagena: Universidad politécnica
- González-Mendizábal. (2002). *Guía de Intercambiadores de Calor: Tipos Generales y Aplicaciones*. Universidad Simón Bolívar, Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, 2002.
- Herrero, J. M., & lambea, S. G. (2013). *Diseño y cálculo de intercambiadores de calor monofásicos*. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=PfVRAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=intercambiadores+de+calor&ots=PmGHdIGaAX&sig=4ug7QPSM2TToj4PpxZ7xbmV6m3Y>
- Investigación, R. M.-T. revista académica de, & 2011, undefined. (2011). Guía para seleccionar intercambiadores de calor. *Dialnet.Unirioja.Es*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7318395>
- Juárez Andrade, Vladimir y Mendoza Mendoza, Kukultzin. Metodología de cálculo para el diseño térmico de un intercambiador de calor de placas. Tesis Ingeniería Mecánica.

México. Universidad nacional autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 2015. 6 p
38

- Mediaceja, Y., Charlot, L., Árias, O., Geología, E. T.-M. y, & 2011, undefined. (2011). Coeficientes de transferencia de calor y pérdida de eficiencia en intercambiadores de calor de placas durante el enfriamiento del licor amoniacal. *Redalyc.Org*.
<https://www.redalyc.org/pdf/2235/223522424003.pdf>
- Pérez Sánchez, A., Pérez Sánchez, E. J., Heredia Sánchez, A. y Pazos Amayuela, L. (2019). Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona. *Nexo Revista Científica*, 32(01), 61–74. <https://doi.org/10.5377/nexo.v32i01.7988>
- Pino Torres, P. I. (2018). *Efecto en la transferencia de calor utilizando generadores de vórtices y aletas con persianas en intercambiadores de tubos planos*. Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168688>
- Range, J. P., & Castro, J. R. (2020). *De un intercambiador de calor de placas destinado para el desarrollo de pruebas en la asignatura de transferencia de calor*.
<http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/4772>
- Renuncio, J. A. R. (2000). *Termodinámica Química*. Síntesis Editorial
- Rivadulla Fernández, F. (2018). *Termodinámica estadística y fenómenos de transporte: introducción y aplicaciones en química*. Universidad de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico.
<https://doi.org/10.15304/9788416954636>

ANEXOS

Anexo 1. Guías de laboratorio

PRÁCTICA I: INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS

1. Objetivos

- Realizar el balance global de energía y cálculo de la eficiencia en un intercambiador de placas en flujo contra corriente y flujo paralelo
- Calcular las diferencias de temperatura media logarítmica y el coeficiente global de transferencia de calor.
- Representar la distribución de temperaturas a lo largo del intercambiador (flujo paralelo y contra corriente).

2. Marco Teórico

El área de intercambio de calor en este tipo de intercambiadores es:

$$A = N \times a = N \times L \times W$$

Donde, N es el número de placas térmicas (número total de placas menos las 2 de los extremos), a es el área de una placa, L es la altura de la placa (en la dirección del flujo) y W es el ancho de la placa. Para determinar el flujo másico de ambos fluidos a través de cada paso simple, habrá que tener en cuenta si el número de placas es impar o par. Si el número de placas es impar los flujos másicos se calculan con las fórmulas:

Para el fluido caliente

$$\dot{m}_h = \frac{2 M_h}{N+1}$$

Para el fluido frío

$$\dot{m}_c = \frac{2 M_c}{N+1}$$

Donde M_h y M_c son respectivamente los flujos másicos totales del fluido caliente y frío que entran en el intercambiador, $N + 1$ es el número de pasos totales de ambos fluidos. Si el número de placas es par, uno de los fluidos tendrá $N/2$ pasos mientras que el otro tendrá $N/2+1$ pasos simples. Así, los flujos másicos se calculan con las fórmulas:

Para el fluido caliente

$$\dot{m}_h = \frac{M_h}{N/2} \quad \text{o} \quad \dot{m}_h = \frac{M_h}{N/2+1},$$

Para el fluido frío

$$\dot{m}_c = \frac{M_c}{N/2+1} \quad \text{o} \quad \dot{m}_c = \frac{M_c}{N/2},$$

El coeficiente global de transferencia de calor, U , tendrá la misma expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{x}{K} + \frac{1}{h_c} + R_f$$

Siendo, R_f la resistencia de ensuciamiento, x el espesor de las placas, K la conductividad térmica de las placas, h_h y h_c los coeficientes de transferencia de calor del fluido caliente y el frío, respectivamente.

El coeficiente de transferencia de calor para el fluido caliente se define como:

$$h_h = \frac{Nu_h K_h}{D_e}$$

Siendo K_h la conductividad térmica del fluido caliente, D_e el diámetro equivalente y Nu_h el número de Nusselt para el fluido caliente.

El coeficiente de transferencia para el fluido frío se define de forma análoga, pero variando las propiedades del fluido al estar a distinta temperatura media.

Se define el diámetro equivalente para un intercambiador de placas de acuerdo con la ecuación:

$$D_e = \frac{4 \text{Volumen}}{\text{Área}} = \frac{4WLb}{2WL} = 2b$$

Donde b es la separación entre placas contiguas.

El número de Nusselt se obtiene a partir de las tablas de características de las placas del intercambiador. Estas tablas o gráficos suelen estar en posesión de los fabricantes. En ellas se relaciona el número de Nusselt y el número de Prandtl con el número de Reynolds.

El número de Reynolds para el fluido caliente (análogamente para el fluido frío) se definirá así:

$$Re_h = \frac{\rho_h v_h D_e}{\mu_h} = \frac{m_h D_e}{\mu_h} = \frac{2 m_h}{\mu_h W}$$

Donde μ_h es la viscosidad dinámica basada en la temperatura media del fluido caliente.

3. Materiales y Métodos

Computador, agua suavizada, unidad de intercambiador de placas ampliado, electrobombas y caja de suministro de energía.



Figura 1. Sistema de transferencia e Intercambiador de placas

El intercambiador de calor está constituido por placas de acero inoxidable corrugado, que son desmontables. El patrón de corrugado de las placas es tipo chevron. El área de transferencia de calor de cada placa es 112 mm x 283 mm y la separación entre placas es de 18 mm. El equipo además cuenta con 4 termómetros digitales, 2 destinados para medir la temperatura del agua fría (a la entrada, salida y varias posiciones intermedias) y el resto es para medir las correspondientes temperaturas en el circuito del agua caliente. Además, se cuenta con 4 conexiones para entrada y salida de agua caliente y fría. A través del intercambiador el agua fría pasa por un total de 9 canales y la caliente, por 10 canales.

4. Metodología

1. Verificar que los medidores de temperatura estén a temperatura ambiente.
2. Comprobar que el equipo se encuentre conectado a la fuente de energía de 110 V a 220 V.
3. Comprobar que las válvulas están abiertas y que se tiene configuración en flujo paralelo.
4. Comprobar que el depósito de calentamiento está lleno de agua por encima del calentador.
5. Encender las bombas y la resistencia.
6. Fijar la temperatura del depósito
7. Anotar las medidas de temperaturas registradas a la entrada y salida del sistema.
8. Repetir los pasos 3 a 7 para distintas para las configuraciones indicadas en la Tabla 1, en todos los casos esperar a que el sistema se encuentre en estado estacionario antes de anotar los datos experimentales en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos del experimento

Ensayo	Contracorriente				Paralelo			
	1	2	3	4	5	6	7	8
ST16 (°C)	60	60	60	60	60	60	60	60
ST1(°C)								
ST2(°C)								
ST3(°C)								
ST4(°C)								
ST5(°C)								
ST6(°C)								
ST7(°C)								
ST8(°C)								
ST9(°C)								

5. Análisis de resultados y conclusiones

Para cada ensayo determinar:

- Calor cedido, absorbido y pérdidas en el proceso.
- Determinar el régimen de flujo en cada ensayo.
- Coeficiente global de transferencia de calor en forma experimental.
- Coeficiente global de transferencia de calor en forma teórica a partir de la resistencia del sistema.
- Temperaturas estimadas de salida de los fluidos caliente y frío usando el método de efectividad NTU.
- Representar la distribución de temperaturas a lo largo del intercambiador para cada fluido para cada ensayo.