

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# Módulo didáctico de intercambiador de calor de placas para el laboratorio de fluidos ITM

**Nicolás Albeiro García Sierra**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Ingeniero electromecánico

Asesor

Luis Fernando Cardona Sepúlveda

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Departamento de electromecánica/mecatrónica  
Medellín, Colombia  
2024

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RESUMEN

---

En el presente documento se presenta el diseño, construcción y pruebas experimentales de un intercambiador de placas, instalado en el módulo didáctico de intercambiadores del laboratorio de fluidos de la institución. En este trabajo se tuvo en cuenta que las especificaciones del área de transferencia, caudal y presión sean similares en el intercambiador de placas y en el de coraza-tubo actualmente instalado. El objetivo de este proyecto es poder realizar una comparación de resultados de laboratorio entre los intercambiadores, para analizar su comportamiento térmico y así determinar cuál de los dos es más adecuado para el tipo de aplicación dependiendo de los fluidos que se utilicen y teniendo en cuenta los costos para su mantenimiento y construcción que se requieren para estos.

Los intercambiadores de calor generalmente en su aplicación a nivel industrial emplean diferentes fluidos; como agua-aceite, agua-refrigerante, aire-líquido y agua-agua, entre otros. En el caso de este proyecto realizado, los fluidos con los que se trabajó fueron agua-agua; con diferentes niveles de temperatura.

**Palabras claves:** Intercambiador de calor, intercambiador de placas, Banco Didáctico, Balance de Energía, Transferencia de calor.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RECONOCIMIENTOS

---

A Dios, por darme la oportunidad, como persona capacitada intelectual, física y espiritualmente para iniciar y finalizar este ciclo de formación integral de manera satisfactoria.

A mi familia especialmente a mis hijos Samantha y Anderson por brindarme su apoyo incondicional en cada una de las situaciones afrontadas, tanto en los momentos difíciles, como en los de éxitos.

Al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), por la enseñanza y formación integral adquirida durante cada semestre cursado. Por tanto, con el conocimiento obtenido permitió realizar el trabajo de grado, aplicado a la universidad.

Por su acompañamiento, asesoría y constante aporte de recursos y medios durante la ejecución de este:

Al docente Luis Fernando Cardona, Ingeniero Mecánico; por su excelente orientación, dedicación y conocimientos brindados, en el proceso de desarrollo y culminación del trabajo de grado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## ACRÓNIMOS

$A_d$	Área desarrollada de placa circular	$m^2$
$A_p$	Área proyectada de la placa circular	$m^2$
$A_x$	Área flujo placa	$m^2$
$A_{mc}$	Área mojada del canal flujo	$m^2$
<b>b</b>	Espacio canal flujo	m
$C$	Calor específico	kJ/kg. K
$C_c, C_h$	Índice de capacidad calorífica	W/°C
$C_p$	Calor específico a presión constante	kJ/kg. K
$C_v$	Calor específico a volumen constante	kJ/kg. K
$De$	Diámetro equivalente	m
$D_p$	Diámetro del puerto	m
$D_{pl}$	Diámetro de toda de la placa	m
$F$	Factor de corrección, Figura 4	
$f_{ch}$	Factor de fricción del canal	
$h$	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$
$h$	Entalpía específica	kJ/kg
$K$	Conductividad térmica del fluido	
$k_p$	Conductividad térmica de la placa	
$K_p$	Constante ecuación (14) de la figura 3	
$L$	Longitud de flujo del fluido	m
$\dot{m}$	Flujo másico	kg/s
$m_{ch}$	Velocidad de la masa del fluido por canal	
$M_{ch}$	Tasa de flujo de masa por canal	
$M_t$	Caudal de masa del fluido total	
$n$	Números de pasos	
$n_{ch}$	Número de canales por paso	
$n_{pl}$	Número total de placas	
$n_{pas}$	Número total de pasos	
$N_p$	Cantidad de pasadas del fluido	
NTU	Número de unidades de transferencia	
Nu	Numero de Nusselt	
$p$	Paso de la placa	m
$P$	Presión	kPa
$Pr$	Número Prandtl	
$P_c$	Paso de la corrugación	m
$Q$	Transferencia total de calor	kJ
$\dot{Q}$	Índice de transferencia de calor	kW
$Re$	Numero de Reynolds	
$R_{fh}$	Factor de incrustación fluido caliente, Tabla 3	

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$R_{fc}$	Factor de incrustación fluido frio, Tabla 3	
$t$	Tiempo	s
$t$	Espesor	m
$T$	Temperatura	$^{\circ}C, ^{\circ}K$
$T_{ent}$	Temperatura de entrada	$^{\circ}C, ^{\circ}K$
$T_{sal}$	Temperatura de salida	$^{\circ}C, ^{\circ}K$
$T_m$	Temperatura media	$^{\circ}C, ^{\circ}K$
$T_s$	Temperatura superficial	$^{\circ}C, ^{\circ}K$
$U$	Coficiente total de transferencia de calor	$W/m^2, ^{\circ}C$
$v$	Volumen especifico	$m^3/kg$
$V$	Volumen total	$m^3$
$\dot{V}$	Volumen volumétrico	$m^3/s$
$v_{cf}$	Volumen del canal de flujo	$m^3$
$W$	Ancho efectivo de la placa	m
$B$	Ángulo Chevron	$^{\circ}$
$P$	Densidad del fluido	$kg/m^3$
$\Delta P_{ch}$	Caída de presión del canal	kPa
$\Delta P_p$	Pérdida de presión del puerto	kPa
$\Delta P_t$	Pérdida de presión total	kPa
$\Lambda$	Factor de corrección de viscosidad, Figura 7	
$\mu$	Viscosidad dinámica	$kg/(m.s)$
$\Phi$	Factor de agrandamiento	

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## TABLA DE CONTENIDO

---

1. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1. Planteamiento del problema .....	11
1.2. Justificación .....	11
1.3. Objetivos .....	12
1.3.1. Objetivo general .....	12
1.3.2. Objetivos específicos .....	12
1.4 Organización de este trabajo .....	12
2. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1 Intercambiador de calor .....	14
2.2. Clasificación de los equipos de transferencia de calor .....	15
2.2.1. Clasificación según el tipo de servicio .....	15
2.2.2. Clasificación de acuerdo con el proceso de transferencia .....	15
2.2.3. Clasificación según la trayectoria del fluido .....	16
2.2.4. Clasificación según características de construcción .....	18
2.3. Intercambiadores de placas .....	19
2.4 Fórmulas del intercambiador de placas .....	22
2.5 Estudios previos .....	29
3. METODOLOGÍA .....	32
3.1 Búsqueda de información .....	32
3.2 Cálculos termodinámicos .....	32
3.3 Proceso de fabricación .....	32
3.4 Proceso de experimentación .....	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36
4.1 Cálculos del intercambiador .....	36
4.2 Proceso de fabricación del intercambiador .....	39
4.3 Resultados experimentales .....	53

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	59
6. BIBLIOGRAFÍA .....	61
ANEXO: GUÍA DE LABORATORIO .....	62

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Perfil de temperatura en flujo paralelo (izquierda) y contraflujo (derecha) .....	16
<b>Figura 2.</b> Perfil de temperatura - Flujo cruzado.....	17
<b>Figura 3.</b> Perfil de temperatura - flujo de un paso contracorriente - segundo paso paralelo.....	17
<b>Figura 4.</b> Funcionamiento intercambiador de placas. ....	20
<b>Figura 5.</b> Ensamble de un intercambiador de placas con los sellos visibles .....	21
<b>Figura 6.</b> Componentes del intercambiador. ....	22
<b>Figura 7.</b> Constantes para la transferencia de calor monofásica y cálculos de pérdida de presión con máximos de temperatura en °C.....	26
<b>Figura 8.</b> Factores de corrección LMTD para intercambiadores multipaso .....	26
<b>Figura 9.</b> Revisión de niveles de los reservorios .....	34
<b>Figura 10.</b> Apertura de válvulas de entrada y salida (Flechas amarillas) del ICP de agua caliente y fría .....	35
<b>Figura 11.</b> Diseño de placa circular del intercambiador con medidas en Autodesk Inventor. ....	40
<b>Figura 12.</b> Disco para calcular el área de transferencia de la placa con tabla de propiedades en Autodesk Inventor.....	41
<b>Figura 13.</b> Área de repujado de placa proyectada para calcular área de transferencia con tabla de propiedades en Autodesk Inventor.....	41
<b>Figura 14.</b> Maquinado de cabezales fijo y móvil para el intercambiador de placas. ....	42
<b>Figura 15.</b> Maquinado de troqueles de perforación de placas corrugadas. ....	43
<b>Figura 16.</b> Troquel de perforación de 10mm (Superior e inferior izquierda) y de perforación de 21mm (Superior e inferior derecha). ....	44
<b>Figura 17.</b> Maquinado de prueba de ángulo Chevron. ....	45
<b>Figura 18.</b> Cara positiva y negativa del troquel.....	46
<b>Figura 19.</b> Prensa hidráulica de 50 toneladas y montaje de troquel. ....	47
<b>Figura 20.</b> Posicionamiento de lámina de placa para troquelado (Superior izquierda); apertura del troquel luego de prensar la placa (Superior derecha), extracción de placas corrugadas terminadas del troquel (Inferior izquierda y derecha). ....	48
<b>Figura 21.</b> Placas corrugadas del intercambiador troqueladas y perforadas .....	49
<b>Figura 22.</b> Ensamble del intercambiador: Instalación de cabezal fijo, primera placa corrugada y barras guía (Superior izquierda); posicionamiento total de placas corrugadas, juntas y barras guía (Superior central); instalación cabezal móvil (Superior derecha); Instalación soportes de cabezales fijo y móvil (Inferior izquierda); Ajuste y torqueo de placas corrugadas (Inferior central) e instalación de niples de PVC (Inferior derecha) .....	50
<b>Figura 23.</b> Montaje del intercambiador en el banco del laboratorio .....	51
<b>Figura 24.</b> Modificación de posición de bombas de alimentación. ....	52

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Figura 25.** Identificación de líneas de entrada agua fría y de salida de agua caliente lado derecho del ICP (Superior) y líneas de salida agua fría y de entrada de agua caliente lado izquierdo del ICP (Inferior). ..... 54

**Figura 26.** Termograma inicial de la prueba temperatura ambiente (Superior) y Termograma final a temperaturas de trabajo del equipo durante el ensayo (Inferior)..... 55

**Figura 27.** Datos tomados durante el ensayo. .... 56

**Figura 28.** Cálculos realizados en el software de EES Fuente: propia..... 58

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Conductividad térmica para varios materiales a 100°C en W/m.K .....	23
<b>Tabla 2.</b> Materiales típicos para juntas, con máximos de temperatura en °C.....	23
<b>Tabla 3.</b> Factores de incrustación representativos (resistencia térmica debida a la incrustación para una unidad de área superficial).....	28
<b>Tabla 4.</b> Factores geométricos del intercambiador .....	36
<b>Tabla 5.</b> Resultados de transferencia de calor para el fluido caliente .....	37
<b>Tabla 6.</b> Resultados de transferencia de calor para el fluido frío .....	38
<b>Tabla 7.</b> Cálculos de coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador .....	39
<b>Tabla 8.</b> Registro de los datos del experimento.....	53
<b>Tabla 9.</b> Coeficientes de transferencia de calor.....	57

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

---

En este proyecto se realizó la construcción de un intercambiador de calor de placas; con el propósito de estudiar, analizar, verificar y entender el funcionamiento del dispositivo enfatizando en el intercambio de temperatura del fluido a medida que se desplaza por las placas. Este equipo se podría tomar como ejemplo didáctico para la enseñanza de los principios físicos de transferencia de calor aplicados en este prototipo en el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM).

La razón por la cual se tomó la decisión de realizar este proyecto con propósito de construcción de un intercambiador de placas es que se quiere demostrar de manera práctica, el intercambio de temperatura del agua con placas de diferentes materiales.

El intercambiador de placas que se construyó se puede usar con placas de cobre y se puede optar por otro tipo de materiales como acero inoxidable y acero con baño de zinc. Así mismo, se elaboró un software en Excel para realizar los cálculos del número de placas necesarias con el tipo de material para que el intercambio de calor se pueda evaluar.

## 1.1. Planteamiento del problema

Los intercambiadores de calor de placas son equipos de alta complejidad y con principios físicos bastante interesantes y a su vez son muy utilizados en la industria colombiana. Debido a esto se hace muy importante adquirir conocimientos para realizar cálculos de rendimiento y capacidad con el fin de adaptarlos a cualquier proceso en los que sea necesario su instalación, permitiendo una mejora continua en los procesos sin perder su eficiencia de diseño por la contaminación debido al ensuciamiento por incrustación. Por todo lo anterior se hace necesario que en los centros de estudios ya sea técnico, tecnológico, profesional o especialización, dedique gran parte de la formación en entender e interiorizar el cómo, cuándo y por qué intervenir los intercambiadores de calor.

## 1.2. Justificación

Actualmente los estudiantes del ITM adquieren conocimientos de algunos temas teóricos sobre principios aplicados a intercambiadores de calor en general, con la implementación

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de bancos de simulación de algunos sistemas específicos existentes en la universidad. Por lo anterior es importante que se haga la implementación de un banco de pruebas didáctico con el fin de simular la funcionalidad de un intercambiador de calor de placas y cómo se realiza la transferencia de calor en los procesos donde se instalan intercambiadores de calor, siendo más fácil la adquisición de conocimientos relacionados con estos equipos y procesos donde se aplican.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar, modelar y construir un prototipo de intercambiador de calor de placas que permita demostrar de manera didáctica, los balances de energía en el intercambio de calor entre dos fluidos a diferente temperatura.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar los cálculos de transferencia de calor para las placas que cumpla con los requerimientos establecidos de un banco de pruebas y que esté a la altura de los laboratorios de la institución que sirva de base para futuros estudiantes.
- Construir y probar funcionamiento de un prototipo del intercambiador de placas para verificar las variables que presenta al someterlo a diferentes condiciones.
- Elaborar una guía de laboratorio para cálculos de cantidad de cantidad de placas a utilizar con diferente composición de materiales de las placas.

## 1.4 Organización de este trabajo

Primero se presenta la introducción donde se hace una propuesta de fabricar un intercambiador de calor de placas didáctico para colocarlo en paralelo con el intercambiador de coraza-tubos para el laboratorio de fluidos del ITM (G-405). A continuación, se presenta el marco teórico acerca de las clases y tipos de intercambiadores, su funcionalidad, utilidad, ventajas y desventajas de unos con respecto a otros en la industria. En el siguiente capítulo se presenta la metodología, donde se

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

explica cómo se desarrolló este trabajo, el diseño y fabricación de este tipo de intercambiadores de placas buscando información con fabricantes de este tipo de equipos, también en tesis de grados en universidades y centros de investigación. En el capítulo 4 se presentan resultados de este diseño, los cuales fueron muy buenos porque se pudo realizar los ensayos experimentales donde se observa que el intercambiador realizaba bien su función de transferencia de calor entre los fluidos. Por último, se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen más ensayos en el futuro con el acondicionamiento del intercambiador con otro tipo de láminas para las placas y ampliar así la opción de más pruebas en el laboratorio con este módulo de intercambiadores.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

Los intercambiadores de calor de placa son equipos altamente eficientes, de muy alta confiabilidad y permiten ser usados tanto en la industria como en los hogares comunes. Su mayor uso en procesos de calentamientos de agua, sobre todo en países donde se presentan estaciones ya que durante el invierno es necesario calentar el agua de las tuberías para que éstas no se congelen y para tener mayor confort en los hogares.

Los intercambiadores de calor de placas se pueden clasificar según su construcción mecánica y su número de placas y uno de los parámetros más importantes para tener en cuenta para seleccionar un equipo intercambiador de calor de placas es el flujo de líquido que va a pasar por su interior.

### 2.1 Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo que permite transferir energía térmica de un fluido que está a alta temperatura a un fluido a baja temperatura, los cuales interactúan durante el paso por el equipo.

La transferencia de calor a nivel general se da por tres medios, conducción, convección y radiación; en los intercambiadores de calor aplican los mecanismos de conducción y convección:

- Conducción es la transferencia de calor entre dos puntos de un cuerpo que se encuentran a diferente temperatura sin que se produzca transferencia de materia entre ellos. La energía se transmite por la interacción molecular sin desplazamiento apreciable de las moléculas.
- Convección es una forma de transferencia del calor entre un fluido y una superficie con una temperatura distinta y mediante el movimiento interno de masas del propio fluido que tiene distinta densidad se produce la transferencia de calor por estar a diferente temperatura, como sería el caso de tener una superficie caliente que entra en contacto con agua fría, en un momento el agua se calienta se vuelve menos densa y asciende y la reemplaza la más fría y se repite el proceso.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2.2. Clasificación de los equipos de transferencia de calor

### 2.2.1. Clasificación según el tipo de servicio

- **Enfriador:** es un sistema que despeja el calor de un elemento que generalmente es agua y lo transfiere a otro sin que ocurra cambio de fase.
- **Calentador:** es un dispositivo termodinámico que utiliza energía para elevar la temperatura y la entalpia de un fluido, sin que normalmente ocurra un cambio de fase.
- **Refrigerador:** es una unidad que utiliza una sustancia de trabajo (vapor de agua, refrigerante u otras sustancias) que realiza una serie de transformaciones termodinámicas de forma cíclica para enfriar un fluido.
- **Condensador:** es una unidad en la cual los vapores de un proceso se convierten total o parcialmente en líquidos. Generalmente se utiliza agua o aire como medio de enfriamiento. El termino condensador de superficie se refiere específicamente a aquellas unidades de carcasa y tubos que se utilizan para la condensación del vapor de desecho, proveniente de las máquinas y de las turbinas a vapor. Un condensador de contacto directo es una unidad en la cual el vapor es condensado mediante contacto con gotas de agua.
- **Evaporador:** los evaporadores son intercambiadores diseñados específicamente para aumentar la concentración de las soluciones acuosas mediante la evaporación de una parte del fluido.
- **Vaporizador:** es un intercambiador que convierte líquido a vapor. El termino vaporizador se refiere normalmente a aquellas unidades que manejan líquidos diferentes al agua.

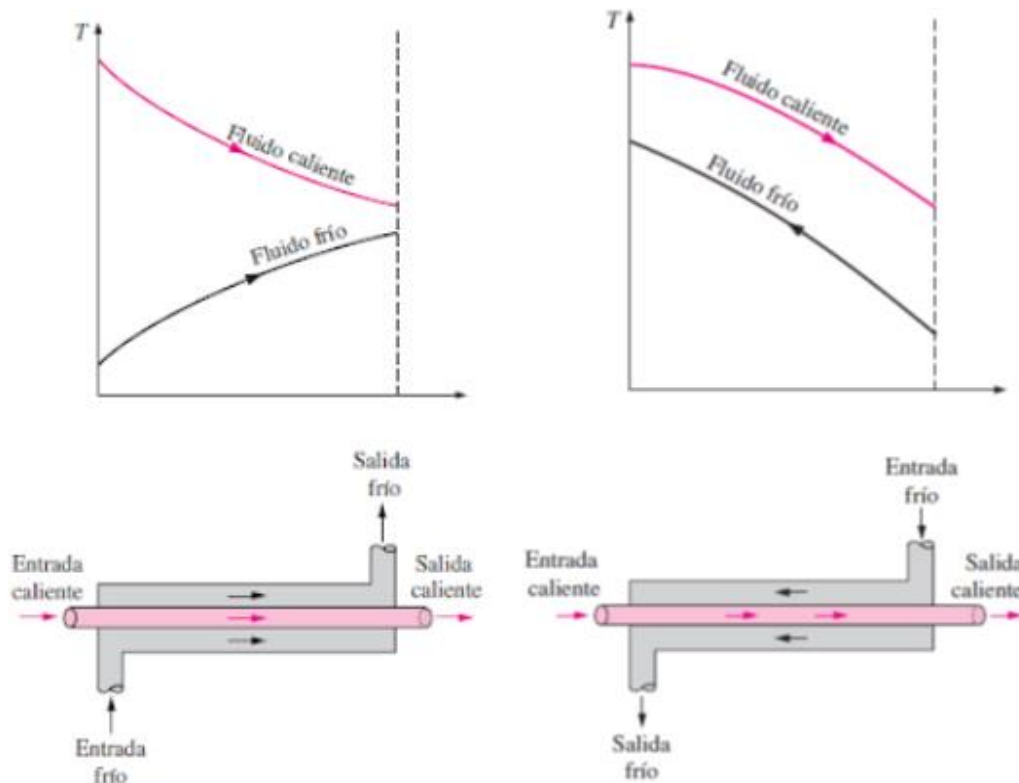
### 2.2.2. Clasificación de acuerdo con el proceso de transferencia

- **Intercambiador de calor directo:** En este tipo de equipos ambos medios están en contacto directo entre sí, pero los medios no se mezclan. Un ejemplo de este tipo de intercambiadores de calor es una torre de enfriamiento, donde el agua se enfría a través del contacto directo con el aire.

- Intercambiador de calor indirecto:** En este tipo de equipos ambos medios están separados por una pared que permite realizar transferencia de calor. Los intercambiadores de calor indirectos están disponibles en varios tipos principales (placa, carcasa y tubo, espiral, etc.) En la mayoría de los casos, el tipo de placa es el intercambiador de calor más eficiente. En general, ofrece la mejor solución a los problemas térmicos, brindando los límites más amplios de presión y temperatura dentro de la restricción del equipo actual.

### 2.2.3. Clasificación según la trayectoria del fluido

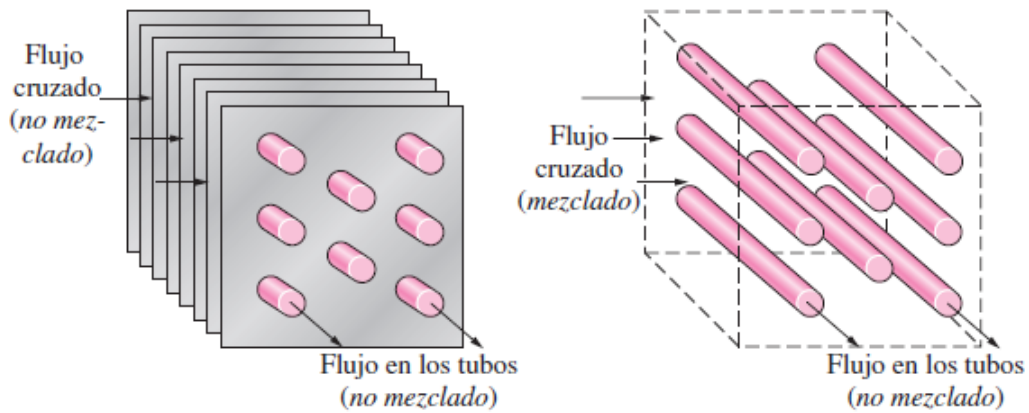
- Flujo en paralelo:** en este tipo ambos fluidos entran al equipo por el mismo extremo, fluyen en la misma dirección y salen por el otro extremo. La diferencia de temperatura es grande al principio, pero decae rápidamente al aumentar la distancia. La temperatura de salida del fluido frío nunca es mayor a la del fluido caliente, Figura 1.



**Figura 1.** Perfil de temperatura en flujo paralelo (izquierda) y contraflujo (derecha)

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2014)

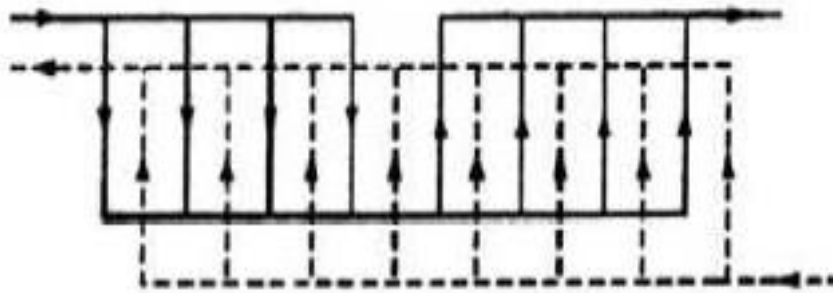
- Contraflujo:** en este tipo los fluidos fluyen en direcciones opuestas el uno del otro. Las variaciones de temperatura son idealizadas como unidimensionales. El cambio en la diferencia de temperatura, con respecto a la distancia no están grande como lo es para la región de entrada del intercambiador en flujo paralelo. La temperatura de salida del fluido frio puede ser mayor a la temperatura del fluido caliente.
- Flujo cruzado:** en este tipo de intercambiador, los flujos son normales uno al otro. Las variaciones de temperatura son idealizadas como bidimensionales. Termodinámicamente la efectividad de estos equipos es intermedia comparada con las dos anteriores, Figura 2.



**Figura 2.** Perfil de temperatura - Flujo cruzado.

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2014)

- De pasos múltiples:** Una de las ventajas de los pasos múltiples es que mejoran el rendimiento total del intercambiador, con relación al paso único.



**Figura 3.** Perfil de temperatura - flujo de un paso contracorriente - segundo paso paralelo.

Fuente: (Córdoba-Almarío, 2019)

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

#### 2.2.4. Clasificación según características de construcción

- Intercambiador de calor tubular:** Este intercambiador es generalmente construido por tubos circulares, elípticos, rectangulares, redondos y planas. Existe una considerable flexibilidad en el diseño, porque la geometría puede variar fácilmente cambiando el tubo de diámetro, posición y longitud. Este intercambiador de calor es diseñado para altas presiones relativamente. Se utilizan 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 fundamentalmente cuando la temperatura y presión de funcionamiento son muy altas.
- Intercambiador de doble tubo:** este es uno de los diseños más simples y consiste básicamente de dos tubos concéntricos, en donde una corriente circula por dentro del tubo interior mientras que la otra circula por el ánulo formado entre los tubos. Este es un tipo de intercambiador cuya construcción es fácil y económica, lo que lo hace muy útil.

La tubería interior se soporta mediante estoperos, y el fluido entra a ella a través de una conexión localizada en la parte externa del intercambiador. Las "T" tienen conexiones que permiten la entrada y salida del fluido que circula por el ánulo y el cruce de una sección a la otra a través de un cabezal de retorno. La tubería interior se conecta mediante una conexión en "U" que generalmente se encuentra expuesta al ambiente y que no proporciona superficie efectiva de transferencia de calor.

- Intercambiadores de calor de platos:** Los intercambiadores de calor de placas o platos son una máquina térmica consistente en una estructura y placas metálicas generalmente corrugada y montada a presión, que forman el área necesaria para la transferencia de calor, con orificios de acuerdo con la disposición de flujo. Estos intercambiadores no pueden soportar altas presiones ni temperaturas.
- Intercambiadores de calor de tubos y coraza:** Los intercambiadores de calor de tipo casco y tubos son aquellos en los cuales ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezcla o que no tienen contacto entre sí. Las corrientes de fluido que están involucradas en esa forma están separadas entre sí por una pared de tubo, o por cualquier otra superficie, que está involucrada en el camino de transferencia de calor. Este intercambiador es construido para evitar fugas, facilidad de limpieza, para controlar la corrosión.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

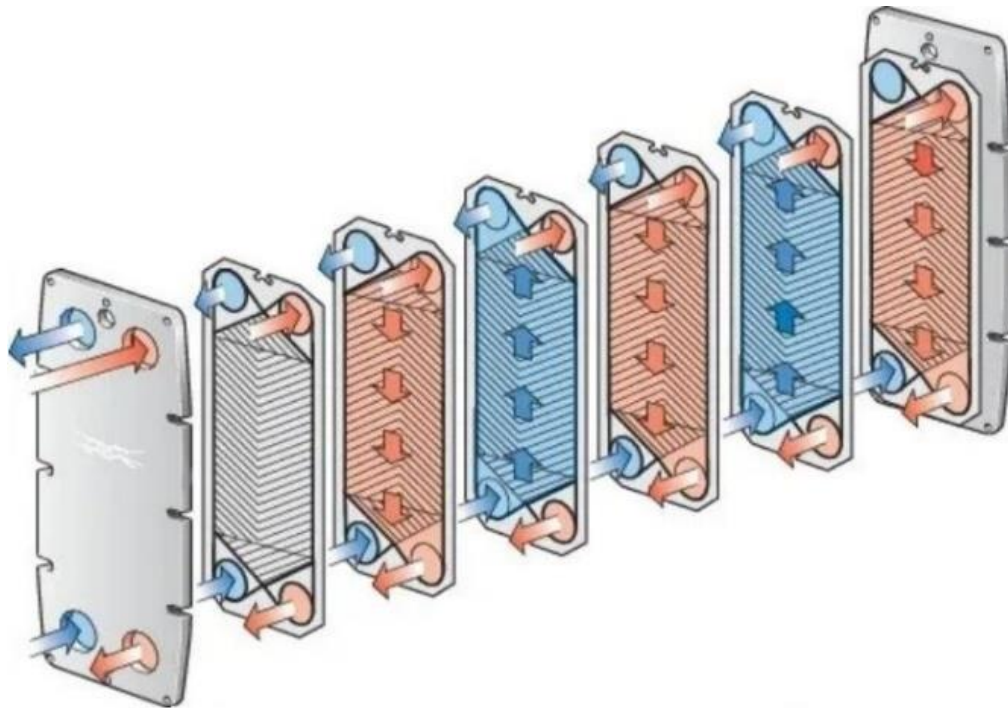
- **Intercambiadores de Placa en Espiral:** el intercambiador de placa en espiral se hace con un par de placas laminadas para proporcionar dos pasos rectangulares relativamente largos para los fluidos en flujo en contracorriente. La trayectoria continua elimina la inversión del flujo (y la caída consiguiente de la presión), las desviaciones y problemas de dilataciones. Los sólidos se pueden mantener en suspensión. Se produce turbulencia con una velocidad de flujo más baja que en el caso de los tubos rectos.

### 2.3. Intercambiadores de placas

Con un intercambiador de calor tipo placa, el calor penetra en la superficie, lo que separa el medio caliente del frío con mucha facilidad. Por lo tanto, es posible calentar o enfriar fluidos o gases que tengan niveles de energía mínimos. La teoría de la transferencia de calor de un medio a otro, o de un fluido a otro, está determinada por varias reglas básicas: Las principales características por lo que son más usados son:

- El calor siempre se transferirá de un medio caliente a un medio frío.
- Siempre debe haber una diferencia de temperatura entre los medios.
- El calor perdido por el medio caliente es igual a la cantidad de calor ganado por el medio frío, excepto por las pérdidas a los alrededores.

La Figura 4 se muestra el principio de funcionamiento de un intercambiador de calor de placas con juntas de 1 paso para líquidos/líquidos, donde los fluidos corren contracorriente a través del intercambiador de calor. El líquido caliente (ilustrado en rojo) normalmente entra por una de las conexiones superiores y sale por la conexión inferior. El líquido frío (ilustrado en azul) entra por una de las conexiones inferiores y sale por la conexión de arriba.

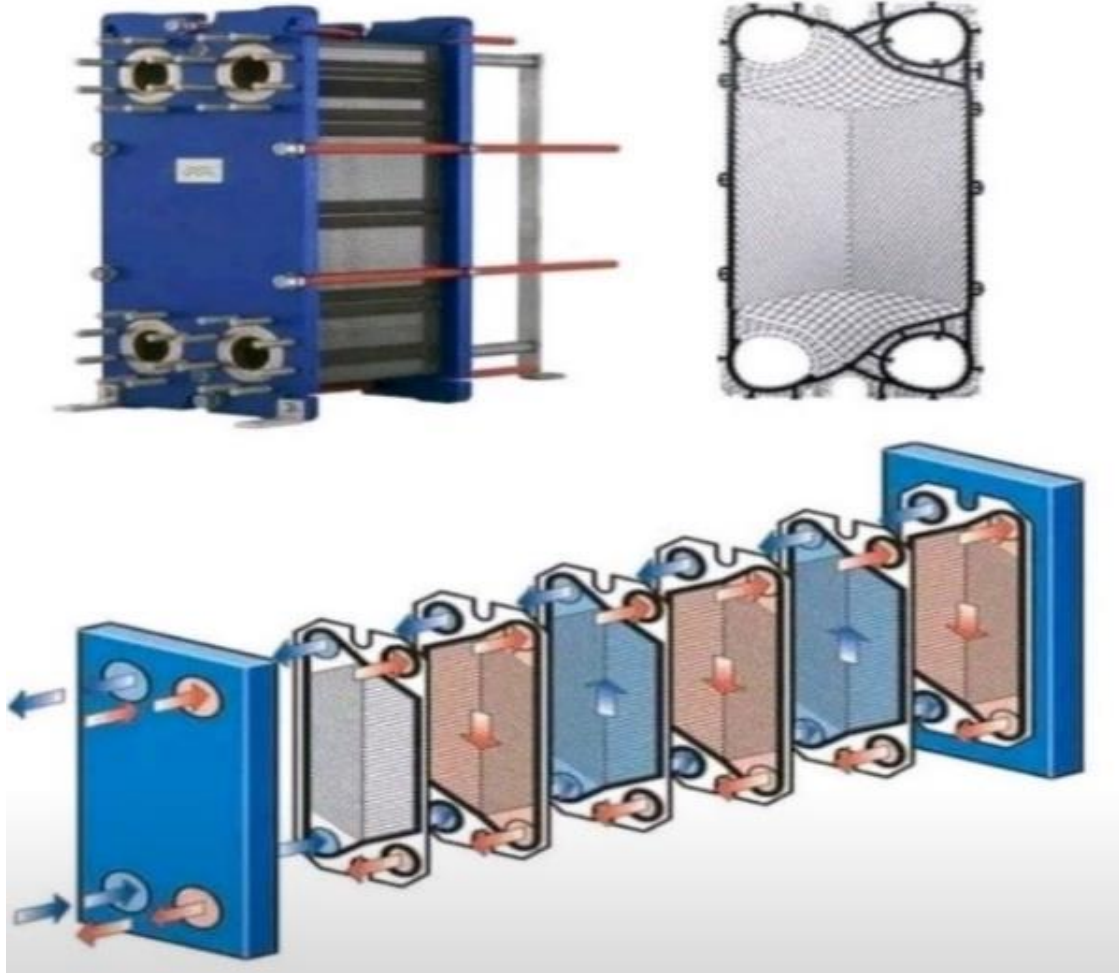


**Figura 4.** Funcionamiento intercambiador de placas.

Fuente: (Alfa Laval, 2009)

A medida que los fluidos pasan a través del intercambiador de calor, el calor se transfiere de los medios calientes a los medios fríos. El flujo de contracorriente permite las máximas posibilidades de recuperación de calor y se puede lograr una aproximación muy cercana a la temperatura. La temperatura cruzada también es posible, lo que significa que la salida caliente puede alcanzar una temperatura más baja que la salida fría. Esto sólo puede lograrse de forma limitada con intercambiadores de calor tubulares que hacen que los intercambiadores de calor de placas y bastidores sean más eficientes térmicamente.

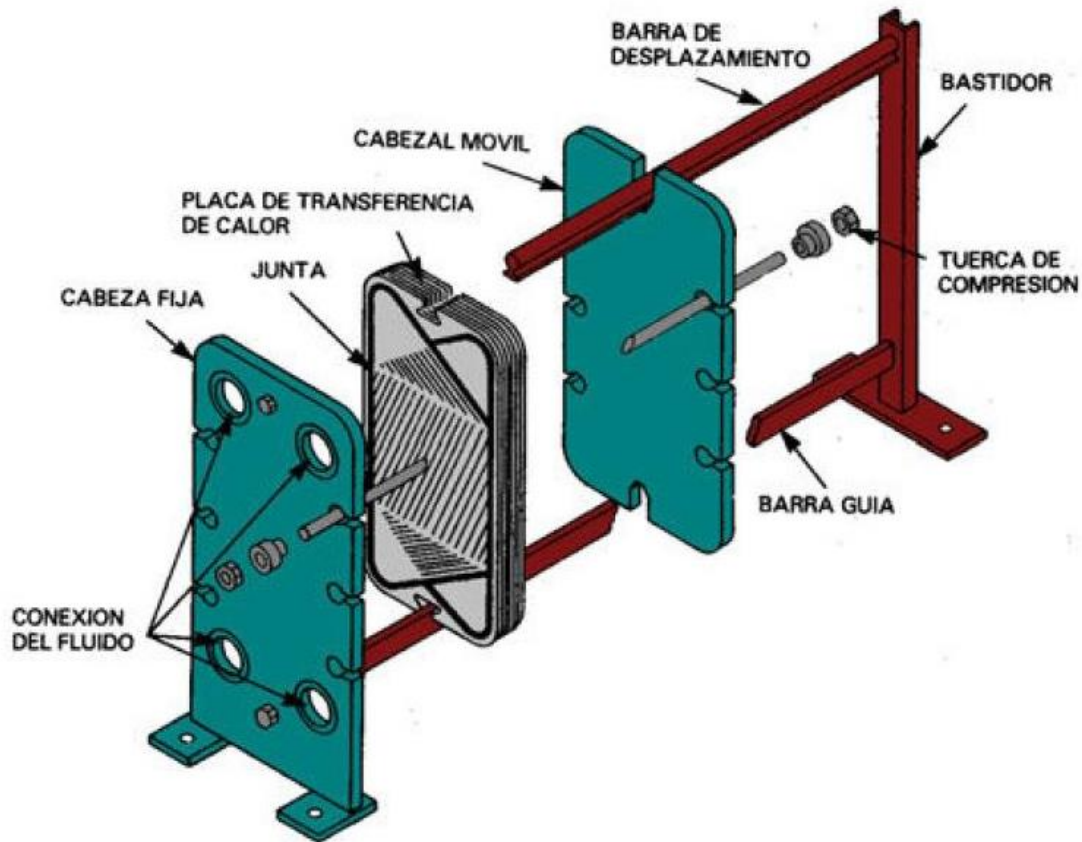
Los fluidos entran a través de las conexiones y portillas de las placas de transferencia de calor. Las juntas de estanqueidad especialmente diseñadas, situadas entre las placas, dirigen los fluidos de modo que los fluidos calientes y fríos pasan contracorriente en canales alternados. Cuando el fluido entra entre las placas, pasa sobre el área de distribución.



**Figura 5.** Ensamble de un intercambiador de placas con los sellos visibles  
Fuente: (Alfa Laval, 2009)

Típicamente, los intercambiadores de placas pueden ser de placas de cobre soldadas o de acero inoxidable soldado. A parte de las placas, las partes principales del intercambiador se presentan en la Figura 6.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 6.** Componentes del intercambiador.

Fuente: (Córdoba-Almario, 2019)

## 2.4 Fórmulas del intercambiador de placas

Debido a los diferentes factores que intervienen en el resultado final a la hora de seleccionar y diseñar un intercambiador de calor se deben tener algunas consideraciones iniciales. Para empezar, está la selección del material de la placa ya que el coeficiente de transferencia térmica de cada tipo de materia varía acorde su composición, es decir, si las placas son de aluminio tendría una eficiencia menor que el cobre.

A continuación, se presentan las fórmulas, factores y materiales a tener en cuenta para calcular el intercambiador de placas circulares que se diseñó para el equipo del laboratorio de fluidos de la institución (Mehrabian, 2009).

En la Tabla 1 se encuentra la conductividad térmica para varios materiales para placas, en su gran mayoría los materiales más utilizados para la fabricación son el acero inoxidable

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

(Tipo 316), pero otros materiales estándar para la fabricación de placas es el Titanio, aleación de Titanio y Paladio, Incoloy 825™.

**Tabla 1.** Conductividad térmica para varios materiales a 100°C en W/m.K

Cobre	389	Monel 400™	26
Aluminio	208	Titanio	20
Aleación Latón de Aluminio	100	Acero inoxidable (316)	17
Níquel 200	66	Inconel 600™	16
Aleación 90/10 Cupro-Níquel	52	Incoloy 825™	12
Aleación 70/30 Cupro-Níquel	35	Hastelloy C-276™	11

Fuente: (Mehrabian, 2009)

Además de los metales utilizados para la fabricación de la placas se debe tener en cuenta el tipo de junta o sello que utilizaremos para dar la hermeticidad o estanqueidad al sistema completo en el ICP, donde debemos tener en cuenta el tipo de fluido que utilizaremos en este caso Agua-Agua y según esto podemos utilizar un nitrilo medio, el cual nos puede soportar una temperatura de 135°C y es adecuado para nuestro sistema que manejará una temperatura máxima de 50°C, con todo esto también veremos en esta Tabla 2 otros tipo de materiales para fabricar sellos.

**Tabla 2.** Materiales típicos para juntas, con máximos de temperatura en °C

Material	Temperatura	Aplicación
Acrilonitrilo-butadieno (Caucho de nitrilo medio)	135 °C	Materiales grasos
Isobutileno-isopreno (Butilo curado con resina de goma)	150 °C	Aldehídos, cetonas y ésteres
Etileno propileno caucho (EPDM)	150 °C	Alta temperatura, resistencia para una alta gama de productos químicos
Caucho de fluorocarbono base (Vitón)™	175 °C	Minerales, vegetales y aceites animales, y combustibles
Fibra de asbesto comprimido	260 °C	Disolventes orgánicos como clorado de hidrocarburos

Fuente: (Mehrabian, 2009)

A continuación, se presentan los diferentes factores y ecuaciones para tener en cuenta para la fabricación de las placas para el intercambiador (Mehrabian, 2009).

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Ecuaciones para cálculo de factores geométricos del intercambiador		Ec.
$\varphi = \frac{Ad}{Ap}$	Factor de agrandamiento (debe estar entre 1.1 a 1.25)	1
<b>Ad</b>	Área desarrollada de la placa circular (m <sup>2</sup> ) (Se obtuvo del modelo 3D realizado en Autodesk Inventor)	
<b>Ap</b>	Área proyectada de la placa circular (m <sup>2</sup> ) Se obtuvo del modelo 3D realizado en Autodesk Inventor	
$\beta = 25^\circ$ a $65^\circ$	Ángulo Chevron (°)	
<b>b = P – t</b>	Espacio Canal flujo = paso placa – espesor placa (m)	2
<b>Ax = bw</b>	Área flujo placa = Espacio canal flujo * Ancho efectivo placa (m <sup>2</sup> )	3
<b>vcf = bAp</b>	Volumen del canal de flujo (m <sup>3</sup> )	
<b>Amc = 2Ad</b>	Área mojada del canal (m <sup>2</sup> )	
<b>De = 4 * <math>\frac{vcf}{Amc} = \frac{2b}{\varphi}</math></b>	Diámetro equivalente (m)	4

Ecuaciones para cálculo de transferencia de calor y caída de presión		Ec.
$h = \frac{Nu k}{De}$	Coefficiente de transferencia de calor del fluido caliente o del fluido frío, (W/m <sup>2</sup> °C)	5
<b>Nu<sub>De</sub> = 0,023Re<sup>0,8</sup><sub>De</sub> Pr<sup>0,4</sup></b>	Número Nusselt (Correlación Dittus Boelter)	6
$Re = \frac{m_{ch} D_e}{\mu} = \frac{M_{ch} D_e}{A_x \mu}$	Número Reynolds = (Velocidad de la masa del fluido por canal * Diámetro equivalente / Viscosidad dinámica)  Número Reynolds = (Tasa de flujo de masa por canal * Diámetro equivalente) / Área de flujo por canal * Viscosidad dinámica	7
$m_{ch} = \frac{M_{ch}}{A_x}$	Velocidad de la masa del fluido por canal = $\frac{\text{Tasa de flujo de masa por canal}}{\text{Area de flujo del canal}}$ (kg/s)	8

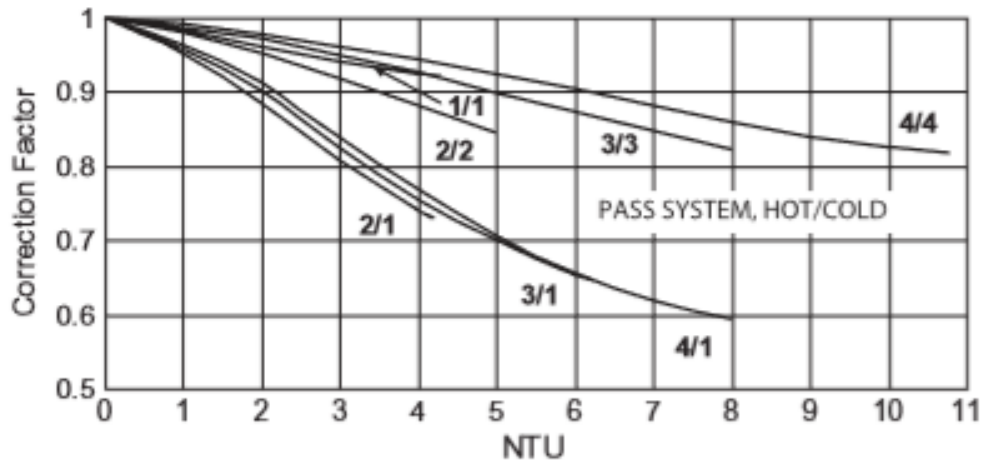
 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$M_{ch} = \frac{M_t}{n_{ch}}$	Tasa de flujo de masa por canal = $\frac{\text{Caudal de masa del fluido total}}{\text{número canales por paso}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	9
$n_{ch} = \frac{n_{pl} - 1}{n_{pass}}$	Número de canales por paso = $\frac{\text{numero total de placas}-1}{\text{número total de pasos}}$	10
$n = n_{pl} - 2 = \frac{A}{A_{eff}}$	Número de placas de transferencia de calor = Número total de placas - 2 = Área total / Área Efectiva	11
$\Delta p_{ch} = \frac{4f_{ch}Lm_{ch}^2}{2\rho D_e \lambda}$	Caída de presión del canal = 4 * Factor de Fricción del canal * Longitud de flujo por fluido * Velocidad de masa de fluido por canal (2) / 2 * Densidad del fluido * Diámetro equivalente * Factor de corrección de viscosidad (kPa)	12
$f_{ch} = \frac{K_p}{Re^z}$	Factor de Fricción del canal = Constante Figura 7 / Número Reynolds (z, Constante Figura 7)	13
$L = N_p L_p$	Longitud de flujo por fluido = Cantidad de pasadas por fluido * Longitud de flujo por pasada ó placa (m)	14
$\Delta p_p = \left( \frac{1.3m_p^2}{2\rho} \right) N_p$	Perdida de Presión del Puerto = (1.3 x Flujo de masa de fluido a través del puerto (2) / 2 Densidad del fluido) x Cantidad de pasadas por fluido (kPa)	15
$m_p = \frac{M_t}{(\pi/4)D_p^2}$	Flujo de masa de fluido a través del puerto = Flujo de masa total de fluido / (Pi / 4) * Diámetro del puerto <sup>2</sup>	16
$\Delta p_t = \Delta p_{ch} + \Delta p_p$	Pérdida de presión total = Pérdida de presión por canal + Pérdida de presión por puerto (kPa)	17

Chevron angle	Heat transfer			Pressure loss		
	$Re$	$C_h$	$y$	$Re$	$K_p$	$z$
$\leq 30^\circ$	$\leq 10$	0.718	0.349	$< 10$	50	1
	$> 10$	0.348	0.663	10–100	19.40	0.589
					$> 100$	2.990
$45^\circ$	$< 10$	0.718	0.349	$< 15$	47	1
	10–100	0.400	0.598	15–300	18.29	0.652
	$> 100$	0.300	0.663	$> 300$	1.441	0.206
$50^\circ$	$< 20$	0.630	0.333	$< 20$	34	1
	20–300	0.291	0.591	20–300	11.25	0.631
	$> 300$	0.130	0.732	$> 300$	0.772	0.161
$60^\circ$	$< 20$	0.562	0.326	$< 40$	24	1
	20–400	0.306	0.529	40–400	3.24	0.457
	$> 400$	0.108	0.703	$> 400$	0.760	0.215
$\geq 65^\circ$	$< 20$	0.562	0.326	$< 50$	24	1
	20–500	0.331	0.503	50–500	2.80	0.451
	$> 500$	0.087	0.718	$> 500$	0.639	0.213

**Figura 7.** Constantes para la transferencia de calor monofásica y cálculos de pérdida de presión con máximos de temperatura en  $^\circ\text{C}$

Fuente: (Mehrabian, 2009)



**Figura 8.** Factores de corrección LMTD para intercambiadores multipaso

Fuente: (Mehrabian, 2009)

Ecuaciones para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor		Ec.
$\Delta T_{\text{eff}} = F \times (\text{LMTD})$	Diferencia de temperatura efectiva = Factor de corrección x LMTD (°C)	18
$\text{LMTD} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)$	Temperatura Media Logarítmica = (Diferencia de temperatura 1 – Diferencia de temperatura 2) / log (Diferencia de temperatura 1 / Diferencia de temperatura 2) (°C)	19
$\Delta T_1 = T_{\text{hEnt}} - T_{\text{cSal}}$	Diferencia de temperatura 1 = Temperatura fluido caliente entrada – Temperatura fluido frío salida (°C)	
$\Delta T_2 = T_{\text{hSal}} - T_{\text{cEnt}}$	Diferencia de temperatura 2 = Temperatura fluido caliente salida – Temperatura fluido frío entrada (°C)	
$U_c = 1/(1/h_h + 1/h_c + R_w)$	Coeficiente global de transferencia de calor sin incrustación = 1 / (1 / Coeficiente de transferencia de calor fluido caliente + 1 / Coeficiente de transferencia de calor del fluido frío + Resistencia de pared (W/ m <sup>2</sup> .°C)	20
$R_w = t / k_p$	Resistencia de pared = Espesor placa / Conductividad térmica de la placa (W/ °C)	
$U_f = 1/((1/ U_c) + R_{fh} + R_{fc})$	Coeficiente global de transferencia de calor con incrustación = 1 / ((1 / Coeficiente global de transferencia de calor sin incrustación) + Factor de incrustación fluido caliente + Factor de incrustación fluido frío) (W/m <sup>2</sup> °C)	21
$R_{fh} = R_{fc}$	Factor de incrustación fluido caliente y frío, Tabla 3 (m <sup>2</sup> °C / W)	

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Tabla 3.** Factores de incrustación representativos (resistencia térmica debida a la incrustación para una unidad de área superficial)

Fluido	$R_f, m^2C/W$
Agua destilada, agua de mar, agua de río, agua de alimentación de calderas: Por debajo de 50°C Arriba de 50 °C	0.0001 0.0002
Combustóleo	0.0009
Vapor de agua (libre de aceite)	0.0001
Refrigerantes (líquido)	0.0002
Refrigerantes (vapor)	0.0004
Vapores de alcohol	0.0001
Aire	0.0004

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2014)

Ahora se da una explicación breve de los diferentes factores y ecuaciones para calcular la placa del intercambiador de calor que se fabricó (Cengel & Ghajar, 2014), (Mehrabian, 2009), (Córdoba-Almario, 2019).

- **Cálculos de transferencia de calor**

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor del intercambiador:

- Se selecciona el ángulo de Chevron de la construcción de la placa.
- La brecha media del flujo del canal se calcula a partir de la ecuación (2).
- El área de flujo del canal se calcula a partir de la ecuación (3).
- El diámetro equivalente del canal se calcula a partir de la ecuación (4).
- El coeficiente de transferencia de calor se calcula a partir de la ecuación (5).
- El flujo de masa del canal se calcula a partir de la ecuación (9).
- El número de canales por pase se calcula a partir de la ecuación (10).
- El número total de placas se calcula a partir de la ecuación (11).
- El número de pasadas se selecciona de la disposición de flujo.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Se calcula el número de Reynolds del sistema a partir de la ecuación (7).
- El factor de incrustación típico seleccionado de la Tabla 3 (Cengel & Ghajar, 2014)
- La resistencia de la pared se calcula y se utiliza en la ecuación (20) para calcular el coeficiente global de calor sin incrustación (Córdoba-Almario, 2019).
- El coeficiente global de transferencia de calor sin incrustación se calcula a partir de la ecuación (20).
- El factor de corrección LMTD se calcula de la ecuación (19).
- La diferencia de temperatura efectiva se calcula a partir de la ecuación (18).
- El coeficiente de transferencia de global de calor con incrustación se calcula a partir de la ecuación (21) (Córdoba-Almario, 2019) y para hallar ambos coeficientes de transferencia global de calor, se utiliza la tabla 3 para el factor de incrustación (Cengel & Ghajar, 2014).

- **Cálculos de pérdida de presión:**

- Teniendo el ángulo de Chevron y el Número de Reynolds, los valores de  $K_p$  y  $z$  se seleccionan de la Figura 7 (Mehrabian, 2009).
- El factor de fricción del canal se calcula a partir de la ecuación (13).
- La longitud del canal se calcula a partir de la ecuación (14).
- La caída de presión del canal se calcula a partir de la ecuación (12).
- La velocidad de la masa del puerto se calcula a partir de la ecuación (16).
- La caída de presión en el puerto se calcula a partir de la ecuación (15).
- La caída de presión total se calcula a partir de la ecuación (17).

## 2.5 Estudios previos

Existen varios estudios recientes en la literatura donde se presentan avances en el diseño y construcción de intercambiadores de placa. En un estudio de 2017 se menciona al

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

diseño de ingeniería asistido por computador (CAE) como una herramienta poderosa para el dimensionamiento de esta clase de intercambiadores (Dvorak & Vit, 2017). En dicho estudio se presentan correlaciones para el número adimensional Nusselt, las cuales ayudan a la estimación de la transferencia de calor del equipo una vez construido.

El modelado numérico del comportamiento de los intercambiadores de placa se ha efectuado también con el fin de buscar su optimización. Por ejemplo, en un estudio realizado en 2018 se realiza el modelado y se optimiza con el algoritmo NSGA-II. Se seleccionan cinco parámetros de diseño para la optimización, y se consideran como funciones objetivas la tasa de flujo de calor, el costo anual total y el número de generación de entropía. Los resultados muestran que el número de Reynolds y el espacio entre aletas son los parámetros más importantes que afectan al rendimiento del intercambiador de calor. Esta es información valiosa en el diseño de intercambiadores de calor de placas (Huizhu et al., 2018).

En otro estudio de 2019 se investigaron las características de ensuciamiento de esta clase de intercambiadores, en particular las debidas al  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$  en intercambiadores de calor de placas en diversas condiciones operativas y geométricas (diferentes concentraciones, velocidades de flujo, temperaturas y ángulos de Chevron). En ese estudio se desarrollaron correlaciones empíricas para la resistencia al ensuciamiento en función de la concentración,  $Re$ , temperatura y ángulo de Chevron. Las correlaciones proporcionaron predicciones satisfactorias con errores absolutos menores del 7% (Song et al., 2019).

Estos intercambiadores se han dimensionado también utilizando CFD (dinámica de fluidos computacional). Por ejemplo, en un estudio en 2011 se describe el proceso de modelado numérico, desde la generación de la malla hasta la resolución de las ecuaciones diferenciales y la selección de las condiciones de contorno adecuadas para simular el flujo y la transferencia de calor en el intercambiador de calor de (Gherasim et al., 2011). En un estudio más reciente, de 2019, se presenta una simulación CFD en 3D donde se analiza el efecto del flujo másico en la distribución de temperatura y la caída de presión de un intercambiador de placas. En dicho estudio se validan los resultados de la simulación con datos experimentales con una buena concordancia y se propone una forma óptima del intercambiador de calor de placas actual para mejorar su rendimiento en transferencia de calor (Nguyen et al., 2019).

En general, las simulaciones CFD han permitido encontrar patrones y fenómenos interesantes en el flujo de fluido al interior de los intercambiadores de placas. Por

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ejemplo, en 2020 se reportó un estudio donde se reporta el flujo de burbujas al interior de las placas, las cuales están influenciadas principalmente por la geometría del canal corrugado (Zhu y Haglind, 2020).

Aunque el uso de los modelos CFD es la tendencia actual, el costo computacional y la complejidad son enormes. Los diversos estudios consultados y presentados muestran que los modelos basados en correlaciones de Nusselt siguen teniendo validez para el diseño de intercambiadores de placas. Un enfoque híbrido o uno simplificado sin llegar al análisis tridimensional es una alternativa válida (Niroomand et al., 2019).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 3. METODOLOGÍA

---

### 3.1 Búsqueda de información

La información se buscó primero en las bases de datos de la biblioteca virtual de la universidad (Science Direct, IEEE Xplore, Sage, entre otras), además de tesis de grado en páginas en universidades a nivel nacional e internacional. De empresas e industrias reconocidas a nivel mundial se buscó el soporte para el diseño, fabricación y cálculo. Se identificaron diferentes métodos de diseño, algunos de ellos de alta complejidad (como el CFD) para este tipo de intercambiadores de placas. En su gran mayoría estos intercambiadores son desarrollados por medio de software especializado de código propietarios, ya que los fabricantes deben garantizar su eficiencia y efectividad al momento de su utilización por los diferentes consumidores finales en la industria.

### 3.2 Cálculos termodinámicos

Estos se tomaron de varios documentos y artículos, principalmente el realizado en 2009 por Mehrabian, por su procedimiento adecuado que facilitaba explícitamente los datos de muchas de las fórmulas (Mehrabian, 2009). Las ecuaciones de los cálculos se presentaron en la sección 2.4 de este documento. La placa corrugada del intercambiador se desarrolló con la forma circular por lo que se realizaron algunas modificaciones en los datos de las fórmulas, debido a que las placas en su gran mayoría se calculan de forma rectangular.

Para facilitar el proceso de cálculo se realizaron unas hojas de cálculo en Excel para iterar con valores en los diferentes datos de las ecuaciones utilizadas y así poder encontrar el coeficiente global de intercambio de calor y así poder garantizar que el equipo fuera más eficiente al momento de utilizarlo en el laboratorio por los estudiantes y docentes al realizar las prácticas.

### 3.3 Proceso de fabricación

En términos generales la realización del trabajo en la parte de diseño de las partes del troquel se hizo con la ayuda del programa Autodesk Inventor donde se simuló el maquinado de las placas del molde y con esto se dio el visto bueno para poder fabricar las partes del molde para el troquel con la forma de la placa circular y así continuar con la fabricación del intercambiador de calor lo que simplificó el proceso debido a que si se fabricaba en forma rectangular (como generalmente son fabricados), sería más complejo por la cantidad de materiales a utilizar. Como, por ejemplo, el material para el molde de

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

los sellos o juntas con el perfil para dar el ajuste adecuado entre placas al hacerlos con la forma rectangular que por su complejidad se requieren moldes más voluminosos con sistemas de enfriamiento para desmoldar la junta después de vulcanizada y que por el diseño del troquel de la placa de forma rectangular utiliza más materiales que para fabricar el troquel de la placa corrugada circular.

Teniendo en cuenta estos elementos los costos del trabajo se hubieran aumentado por la contratación para fabricar los sellos con planchas de calor. Debido a esto se optó por fabricar la placa corrugada en forma circular, porque la adquisición de las juntas en forma de o-ring es más comercial y de bajo costo sin necesidad de hacer pruebas a ensayo y error con materiales o reformar el molde en caso de que las juntas con la forma rectangular no hicieran la función en forma adecuada y fácil.

La parte de fabricación del troquel de las placas corrugadas fue un proceso delicado y exigente tanto en los acabados superficiales para evitar el rompimiento o perforado al momento de troquelar la lámina de la placa, como en el diseño óptimo para escoger el ángulo Chevron porque esto mejoraría en la eficiencia del intercambiador. Se eligió el ángulo de 60°, ya que en su gran mayoría los fabricantes toman este ángulo por la generación de buena turbulencia en comparación con el de 45°.

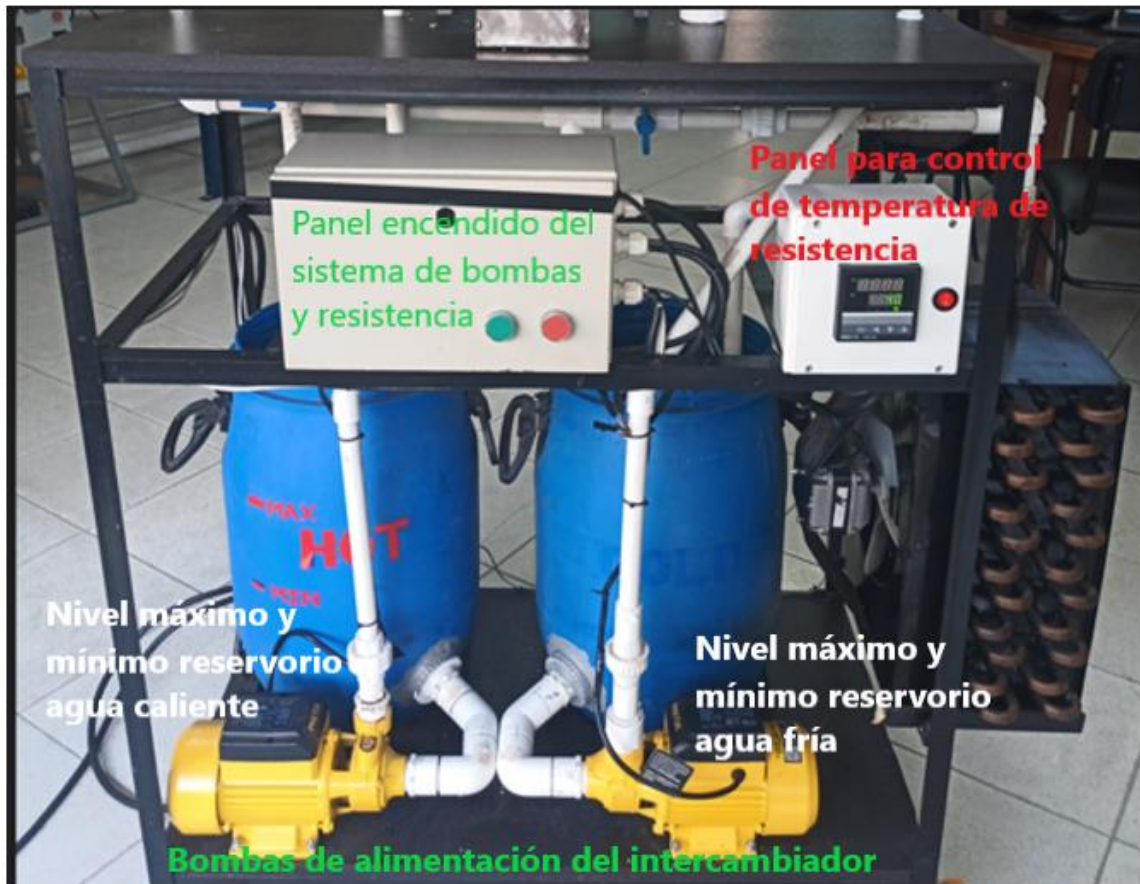
Luego de haber troquelado las placas en la prensa hidráulica se hacen las perforaciones de los conductos del canal de paso con el otro troquel de 21 milímetros de diámetro para la comunicación del fluido entre las placas. Ya con este proceso terminado se hacen las juntas de sellado con cordón de o-ring de 4 milímetros de diámetro con las medidas requeridas, de 200 milímetros para anillo externo de la placa y 35 milímetros para las conexiones entre los conductos de comunicación entre placas. Se procede a ensamblar los cabezales fijo y móvil, y con las barras guías se da el apriete adecuado a las juntas y placas del intercambiador para garantizar la estanqueidad del equipo. Se roscan los accesorios de PVC de ½" NPT para acondicionar las tuberías de entrada y salida de agua fría y caliente en el banco de intercambiadores para dejar el equipo listo para la experimentación.

### **3.4 Proceso de experimentación**

Se hace la inspección del equipo revisando los niveles en los reservorios de agua caliente y fría, además de revisar los sistemas eléctricos como la resistencia del reservorio de agua caliente que estén funcionando adecuadamente (Figura 9). Se revisa las válvulas de paso de fluido al intercambiador que se encuentren totalmente abiertas para evitar contrapresiones en las líneas de tubería del sistema (Figura 10). Se toman datos de temperatura en todas las líneas de entrada y salida con tiempo de 0 segundos. Se enciende el sistema

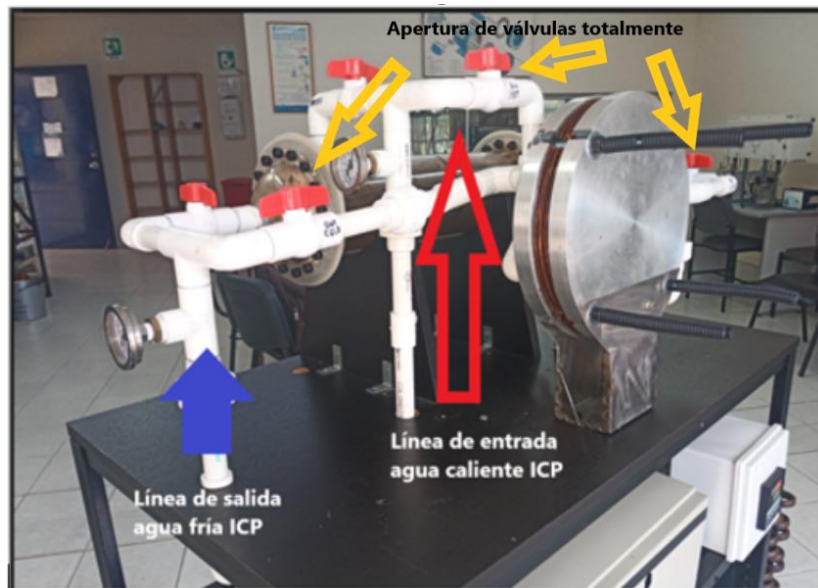
 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de calefacción del reservorio de agua caliente con un set point de temperatura de 40°C, lo mismo que las bombas de agua caliente y fría para que empiecen a recircular en el sistema y cada 2 minutos se toman los valores de temperatura garantizando el buen funcionamiento del sistema durante los 10 minutos que tarda la prueba. Con estos datos Se realizaron los cálculos experimentales. A los 20 minutos de operación se tomaron unas termografías para revisar el funcionamiento y la distribución de calor en los elementos del equipo (las cuales se presentan en el capítulo de resultados y con esto se concluyeron las pruebas y ensayos del equipo funcionando.



**Figura 9.** Revisión de niveles de los reservorios

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 10.** Apertura de válvulas de entrada y salida (Flechas amarillas) del ICP de agua caliente y fría

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Cálculos del intercambiador

En las tablas se presentan los datos que se deben ingresar a las celdas de la hoja con sus unidades de medida en color (verde) y en color (rojo) son los datos entregados por la hoja de cálculo. En la tabla 4 se presenta los resultados de los cálculos de los factores geométricos del intercambiador. El principal resultado de esta parte es el diámetro hidráulico, el cual se necesita para el cálculo del número de Reynolds y el de Nusselt.

**Tabla 4.** Factores geométricos del intercambiador

Factores geométricos intercambiador			
No. Ec.	FÓRMULA	VALOR	UNIDAD
-	Diámetro de toda la placa	0,187	m
-	Ángulo Chevron	60	
-	Paso placa (p)	0,0022	m
-	Espesor placa (t)	0,00091	m
-	Ancho efectivo placa (distancia diagonal entre centros) (w)	0,1662	m
1	Factor de Agrandamiento (phi)	1,24057031	
-	Área desarrollada de la placa circular (Ad) (INVENTOR)	0,0273645	m <sup>2</sup>
-	Área proyectada de la placa circular (Ap) (INVENTOR)	0,022058	m <sup>2</sup>
2	Espacio Canal flujo = (paso placa) – (espesor placa) (b)	0,00129	m
3	Área flujo placa = (Espacio canal flujo) * (Ancho efectiva placa) (Ax)	0,0002144	m <sup>2</sup>
-	Volumen del canal de flujo	2,8455E-05	m <sup>3</sup>
-	Área mojada del canal (m <sup>2</sup> )	0,054729	m <sup>2</sup>
4	Diámetro equivalente	0,00207969	m

Fuente: propia

La tabla 5 presenta los resultados de los cálculos de transferencia de calor y pérdida de presión del fluido caliente. En estos cálculos es muy importante el caudal del fluido, el cual inicialmente se estimó a partir del dato de las bombas, pero eventualmente se actualizó con el dato real aforado en sitio. El resultado clave es el coeficiente de transferencia de calor, el cual se requiere para el cálculo del coeficiente global del equipo.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Tabla 5.** Resultados de transferencia de calor para el fluido caliente

Transferencia de calor y características de caída a presión			
No. Ec.	FÓRMULA	VALOR	UNIDAD
-	Densidad fluido a 47° (EES)	989,4	kg/m <sup>3</sup>
-	Ángulo de chevron	60	
7	Número de Reynolds	738,529459	
-	Exponente Reynolds (y)	0,703	
-	Viscosidad dinámica del fluido 47°C (EES) ( $\mu$ )	0,0005755	kg/(m.s)
-	Conductividad térmica del fluido 47°C (EES)	0,6372	W/m.K
-	Calor específico del fluido (EES)	4181	J/kg.K
-	Número de Prandtl	3,77615427	
-	Factor de corrección de viscosidad ( $\lambda$ ) (Tabla 3)	0,9408	
5	Coeficiente de transferencia de calor (h caliente)	2363,30314	W/m <sup>2</sup> .K
6	Nusselt (Correlación Dittus-Boelter)	7,71333131	
-	Caudal de masa del fluido total (kg/s), 18,49 L/min	0,307	kg/s
-	Número total de placas (el total - 2 placas)	8	
-	Número total de pasos	1	
10	Número de canales por paso	7	
9	Tasa de flujo de masa por canal (Mch)	0,04381629	
-	Área de flujo del canal (Ax)	0,0002144	
8	Velocidad de masa del fluido por canal (mch)	204,368911	m <sup>2</sup>
11	Número de placas de transferencia de calor	6	
-	Constante Tabla 3 (Kp)	0,76	
-	Constante Tabla 3 (z)	0,215	
13	Factor de fricción del canal	0,18370226	
-	Cantidad de pasadas por fluido	3	
-	Longitud de flujo por pasada o placa (m) INVENTOR	0,141	m
14	Longitud de flujo por fluido (m)	0,423	m
12	Caída de presión del canal (Pa)	3353,1038	Pa
-	Flujo de masa total de fluido	0,307	kg/s
-	Diámetro de puerto	0,021	m
16	Flujo de masa de fluido a través del puerto	885,533773	
15	Pérdida de presión del puerto (Pa)	1545,51407	Pa
17	Pérdida de presión total (Pa)	4898,61787	Pa

Fuente: propia

La tabla 6 presenta los resultados de los cálculos de transferencia de calor y pérdida de presión del fluido frío. El caudal del fluido frío es menor al del fluido caliente aun cuando las bombas son iguales, ya que el fluido pasa primero por un radiador que enfría previamente el fluido antes de ingresar al intercambiador de placa. De nuevo, el resultado

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

clave es el coeficiente de transferencia de calor, el cual se requiere para el cálculo del coeficiente global del equipo.

**Tabla 6.** Resultados de transferencia de calor para el fluido frío

Transferencia de calor y características de caída a presión			
No. Ec.	FÓRMULA	VALOR	UNIDAD
-	Densidad fluido a 30° (EES)	995,6	kg/m <sup>3</sup>
-	Ángulo de chevron	60	
-	Número de Reynolds	200,7246293	
-	Exponente Reynolds (y)	0,529	
-	Viscosidad dinámica del fluido 30°C (EES) ( $\mu$ )	0,0007973	kg/(m.s)
-	Conductividad térmica del fluido 30°C (EES)	0,6144	W/m.K
-	Calor específico del fluido (EES)	4180	J/kg.K
-	Número de Prandtl	5,424339193	
-	Factor de corrección de viscosidad ( $\lambda$ )	0,9847	
6	Coeficiente de transferencia de calor (h caliente)	928,9663632	W/m <sup>2</sup> .K
	Nusselt (Correlación Dittus-Boelter)	3,144467447	
-	Caudal de masa del fluido total (kg/s), 7 L/min	0,115	kg/s
-	Número total de placas	8	
-	Número total de pasos	1	
11	Número de canales por paso	7	
10	Tasa de flujo de masa por canal (Mch)	0,016498514	
-	Área de flujo del canal (Ax)	0,000214398	
9	Velocidad de masa del fluido por canal (mch)	76,95274343	m <sup>2</sup>
12	Número de placas de transferencia de calor	6	
-	Constante Tabla 3 (Kp)	3,24	
-	Constante Tabla 3 (Z)	0,457	
14	Factor de fricción del canal	0,287247665	
-	Cantidad de pasadas por fluido	3	
-	Longitud de flujo por pasada o placa (m) INVENTOR	0,141	m
15	Longitud de flujo por fluido	0,423	m
13	Caída de presión del canal (Pa)	705,8102115	Pa
-	Flujo de masa total de fluido	0,115	kg/s
-	Diámetro de puerto	0,021	m
17	Flujo de masa de fluido a través del puerto	333,4374733	
16	Pérdida de presión del puerto (Pa)	217,7602147	Pa
18	Pérdida de presión total (Pa)	923,5704263	Pa

Fuente: propia

La tabla 7 presenta los resultados de los cálculos de transferencia de calor global del intercambiador de calor, teniendo en cuenta el coeficiente de transferencia de cada fluido

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

y los coeficientes de incrustación (ensuciamiento). El resultado final es 587 W/(m<sup>2</sup>.K), el cual es cercano al valor típico de 850 W/(m<sup>2</sup>.K) que se reporta en la literatura para intercambiadores agua-agua (Cengel & Ghajar, 2014).

**Tabla 7.** Cálculos de coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador

Diferencia efectiva de temperatura			
No. Ec.	FÓRMULA	VALOR	UNIDAD
-	Factor de corrección	0,93	
-	Diferencia de temperatura media logarítmica LMTD	11,88	°C
18	Diferencia de temperatura efectiva	11,0484	°C
Coeficiente general de transferencia de calor			
No. Ec.	FÓRMULA	VALOR	
-	Coeficiente de transferencia de calor fluido frío (hc)	928,97	W/m <sup>2</sup> .K
-	Coeficiente de transferencia de calor fluido caliente (hh)	2363	W/m <sup>2</sup> .K
-	Conductividad térmica placa (kp) (W/mK) EES	396,5	W/mK
20	Resistencia de pared $R_w = t/kp$	2,2951E-06	
19	Coeficiente global de transferencia de calor sin incrustación Ecuación 22 T.U.I.	665,802469	W/m <sup>2</sup> .K
	Factor de incrustación (Rfh - Rfc)	0,0001	m <sup>2</sup> K/W
21	Coeficiente global de transferencia de calor con incrustación Ecuación 23 T.U.I.	587,562374	W/m <sup>2</sup> .K

Fuente: propia

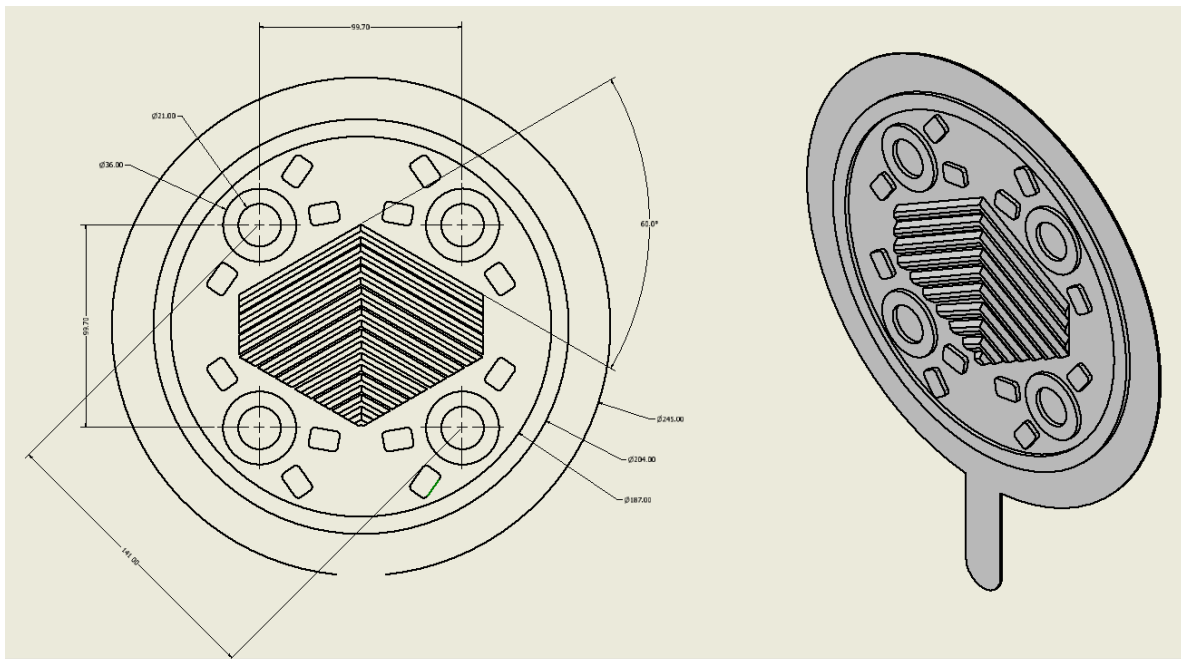
## 4.2 Proceso de fabricación del intercambiador

En el laboratorio de fluidos (G405) se realizaron y verificaron algunos elementos comerciales (Sellos O´rings de nitrilo, láminas de metales en acero, cobre, aluminio entre otros) para la consecución de estos y poder enfocarse en el cómo se diseñaría el troquel con la ayuda del programa Autodesk Inventor donde con la ayuda de unas placas corrugadas físicas de un intercambiador de placas rectangular se observaron y se dibujaron las formas de los repujados acondicionándolos al diseño de la placa circular para que ayudará a la generación de mayor turbulencia sin afectar el rompimiento de la placa al momento de ser troquelada en la prensa hidráulica. Ya con el diseño creado se simuló el maquinado de las placas del molde y con esto se dio el visto bueno para poder fabricar las partes del molde para el troquel con la forma de la placa circular y así proceder con la

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

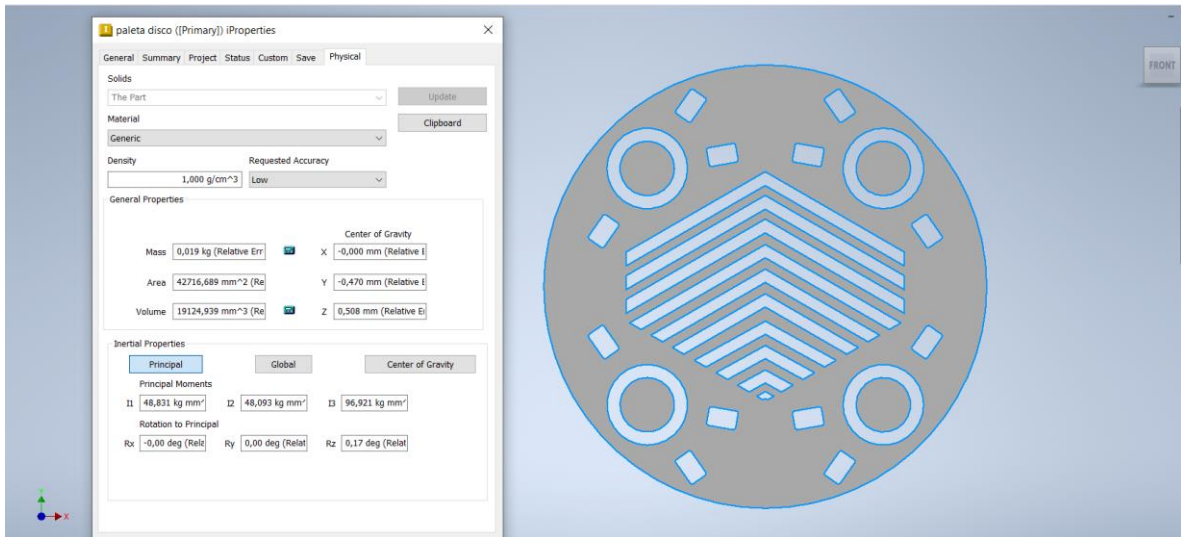
fabricación de las placas corrugada. En este trabajo se realizaron experimentos agua-agua a diferentes temperaturas en el mismo banco donde se encuentra el actual Intercambiador de coraza y tubos, debido a que ambos se iban a colocar a funcionar en paralelo, con los juegos de válvulas que se instalaron en el banco de Intercambiadores.

Revisando el diseño se modeló la placa corrugada del Intercambiador en forma circular en Autodesk Inventor (Figura 11) donde también se puede calcular el área de transferencia (Figura 12) adicionándole la parte que se repuja de la placa circular (Figura 13) y así obtener el dato exacto de esta área (necesario para los cálculos); además del diseño de la placa con la forma circular se pueden adquirir los sellos (O´rings) y no tener necesidad de fabricar moldes para hacerlos por ser muy comerciales y de fácil adquisición



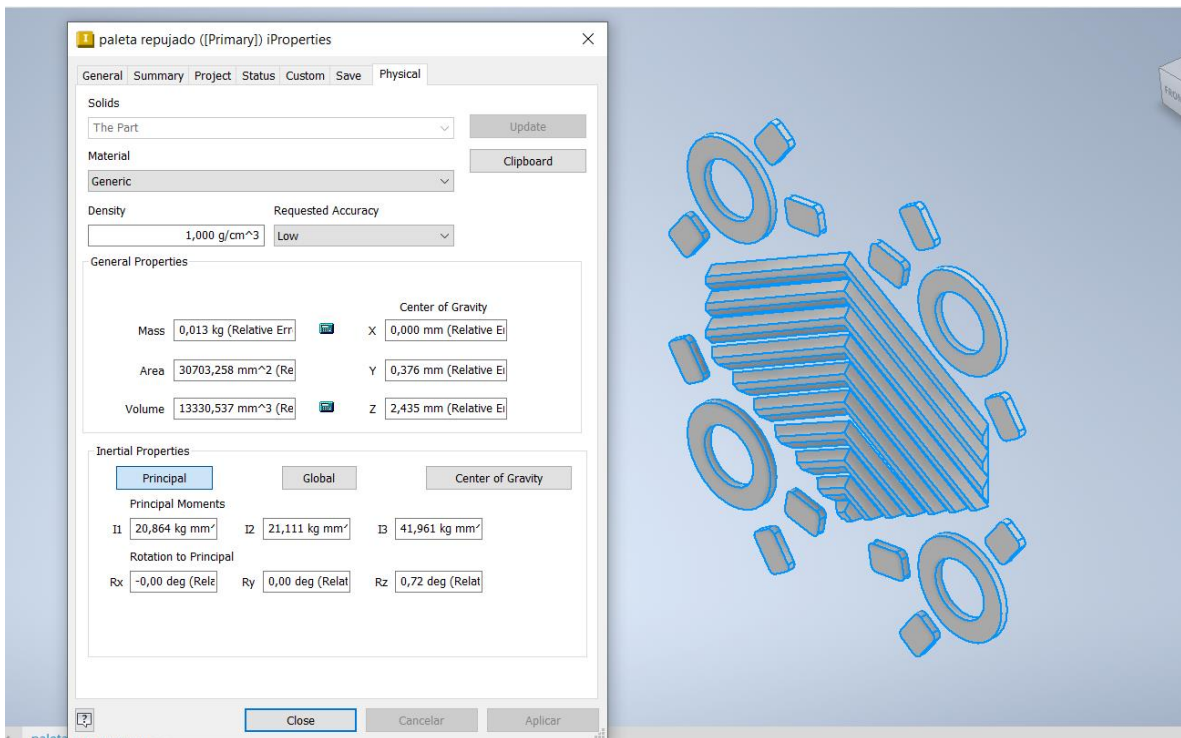
**Figura 11.** Diseño de placa circular del intercambiador con medidas en Autodesk Inventor.

Fuente: propia



**Figura 12.** Disco para calcular el área de transferencia de la placa con tabla de propiedades en Autodesk Inventor.

Fuente: propia



**Figura 13.** Área de repujado de placa proyectada para calcular área de transferencia con tabla de propiedades en Autodesk Inventor.

Fuente: propia.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Continuando con el proceso de fabricación se adquieren dos rodajas de barra de aluminio de 10 pulgadas de diámetro para realizar los cabezales fijo y móvil para el montaje de las placas corrugadas por medio de la utilización de los tornos convencionales (Figura 14) de la institución y así disminuir los costos de elaboración de estas.



**Figura 14.** Maquinado de cabezales fijo y móvil para el intercambiador de placas.  
Fuente: propia

En el proceso de maquinado (Figura 15) también se fabricaron dos troqueles en acero DF2 con diámetros de 10 y 21 milímetros (Figura 16), luego templados y afilados para realizar las perforaciones de las placas por donde pasa el fluido entre placas y las ranuras por donde atraviesan las barras roscadas de 3/8 de pulgadas en acero galvanizado que ajustan las placas corrugadas una tras otra con los sellos o juntas de nitrilo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



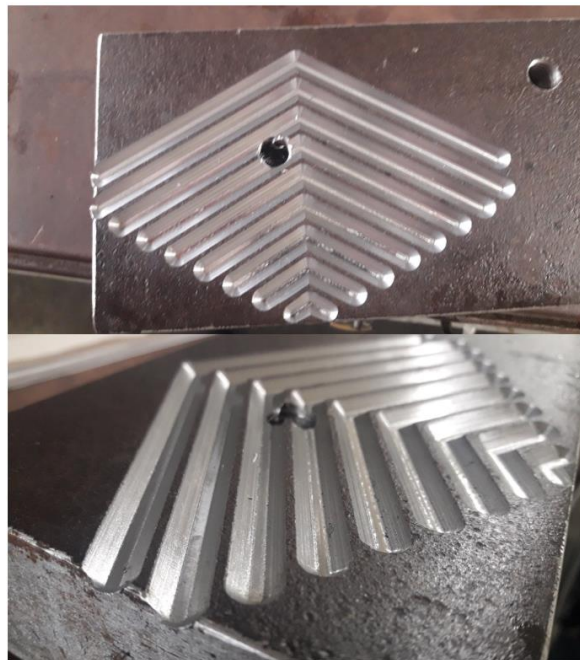
**Figura 15.** Maquinado de troqueles de perforación de placas corrugadas.  
Fuente: propia



**Figura 16.** Troquel de perforación de 10mm (Superior e inferior izquierda) y de perforación de 21mm (Superior e inferior derecha).  
Fuente: propia

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Continuando con el proceso de fabricación este desarrollo se realizó por medio del programa de diseño Autodesk Inventor, para luego proceder en el laboratorio de máquinas herramientas generando el código de programación en la CNC VM20 Milltronics para realizar pruebas con el maquinado del ángulo Chevron (Figura 17) en láminas reutilizadas de una pulgada de espesor. Esto se hizo para garantizar que la programación y herramienta de corte fueran adecuadas y que no fuese a presentar errores y daños en las placas definitivas para la construcción de las placas del molde para el troquelado y así poder dar la forma a las láminas de diferentes materiales (Cobre, Acero inoxidable, Aluminio, etc.) adquiridas para la placa corrugada del intercambiador.



**Figura 17.** Maquinado de prueba de ángulo Chevron.  
Fuente: propia

Como se muestra en la Figura 18, se hace el montaje y se coloca a correr el programa de mecanizado con cada una de las láminas de acero definitivas para realizar el troquel con la cara positiva (Macho) y la cara negativa (Hembra) para que encajen de forma perfecta y pueda formar la placa corrugada, el tiempo de mecanizado aproximado fue de 20 horas para las dos láminas.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 18.** Cara positiva y negativa del troquel  
Fuente: propia

Terminado el proceso de mecanizado se realizó un pulido adecuado y suficiente de las superficies y arista con herramientas eléctricas, neumáticas y manuales (Pulidora de 4-1/2", Mototool, limas, etc.) para darle un mejor acabado y así garantizar que al momento del troquelado en la prensa hidráulica de 50 toneladas, no se rompieran o perforasen las placas corrugadas (Figura 19).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 19.** Prensa hidráulica de 50 toneladas y montaje de troquel.  
Fuente: propia

En este proceso se utilizó una presión de trabajo de 1200 psig y se aseguró el troquel en la prensa hidráulica por medio de sujetadores para garantizar la apertura y cierre adecuado del mismo para el posicionamiento de las láminas lisas y la extracción de la placa corrugada ya troquelada (Figura 20).



**Figura 20.** Posicionado de lámina de placa para troquelado (Superior izquierda); apertura del troquel luego de presar la placa (Superior derecha), extracción de placas corrugadas terminadas del troquel (Inferior izquierda y derecha).

Fuente: propia

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la figura 21 se observan las placas troqueladas. A continuación, se procede con el proceso de apertura de los conductos o agujeros de pase de flujo entre placas y los agujero para el ensamble con la barra roscada para el ajuste de las placas para el cierre hermético del intercambiador.



**Figura 21.** Placas corrugadas del intercambiador troqueladas y perforadas  
Fuente: propia

Se continua con el proceso de armado del intercambiador ensamblando los soportes de los cabezales fijo y móvil, las barras guías, de desplazamiento y roscadas para colocar una a una las placas corrugadas dependiendo el sentido del flujo de las líneas de conducción del líquido frío o caliente según el paso que cada placa conduzca, para luego ajustar las placas corrugadas con los sellos (O´rings) de nitrilo con las barras roscadas de 3/8-16H UNC GRADO 5, con un torque de 28 lb-ft e instalarle los nipples roscado de PVC de ½ pulgada NPT para posteriormente en el laboratorio hacerlas conexiones según a la línea que correspondan. Todo este proceso se ve en la figura 22.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 22.** Ensamble del intercambiador: Instalación de cabezal fijo, primera placa corrugada y barras guía (Superior izquierda); posicionamiento total de placas corrugadas, juntas y barras guía (Superior central); instalación cabezal móvil (Superior derecha); Instalación soportes de cabezales fijo y móvil (Inferior izquierda); Ajuste y torqueo de placas corrugadas (Inferior central) e instalación de niples de PVC (Inferior derecha)  
Fuente: propia

Luego con el intercambiador ensamblado se realiza la prueba de estanqueidad aplicándole una presión de aire de 40 psig por los niples de entrada de agua fría y caliente del cabezal fijo y tapando los niples de salida, se verificó que no hubiera fugas con la aplicación de agua jabonosa y observando que no se presentarán burbujas de aire entre las juntas de nitrilo, las placas corrugadas y los cabezales fijo y móvil del equipo. Con esta prueba ya realizada se lleva para el laboratorio de fluidos de la institución para instalarlo en el banco de intercambiadores y se procede a realizar las conexiones para ponerlo a funcionar y realizar las primeras pruebas con el equipo terminado, como se ve en la figura 23.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 23.** Montaje del intercambiador en el banco del laboratorio  
Fuente: propia

Al banco de intercambiadores también se le realizaron algunas modificaciones como por ejemplo reubicar las bombas de alimentación desde la parte superior donde tenían una succión negativa a la parte inferior donde quedaron con una succión positiva, para evitar que se quedarán sin fluido o cavitando al momento de encender el control, figura 24.



**Figura 24.** Modificación de posición de bombas de alimentación.  
Fuente: propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 4.3 Resultados experimentales

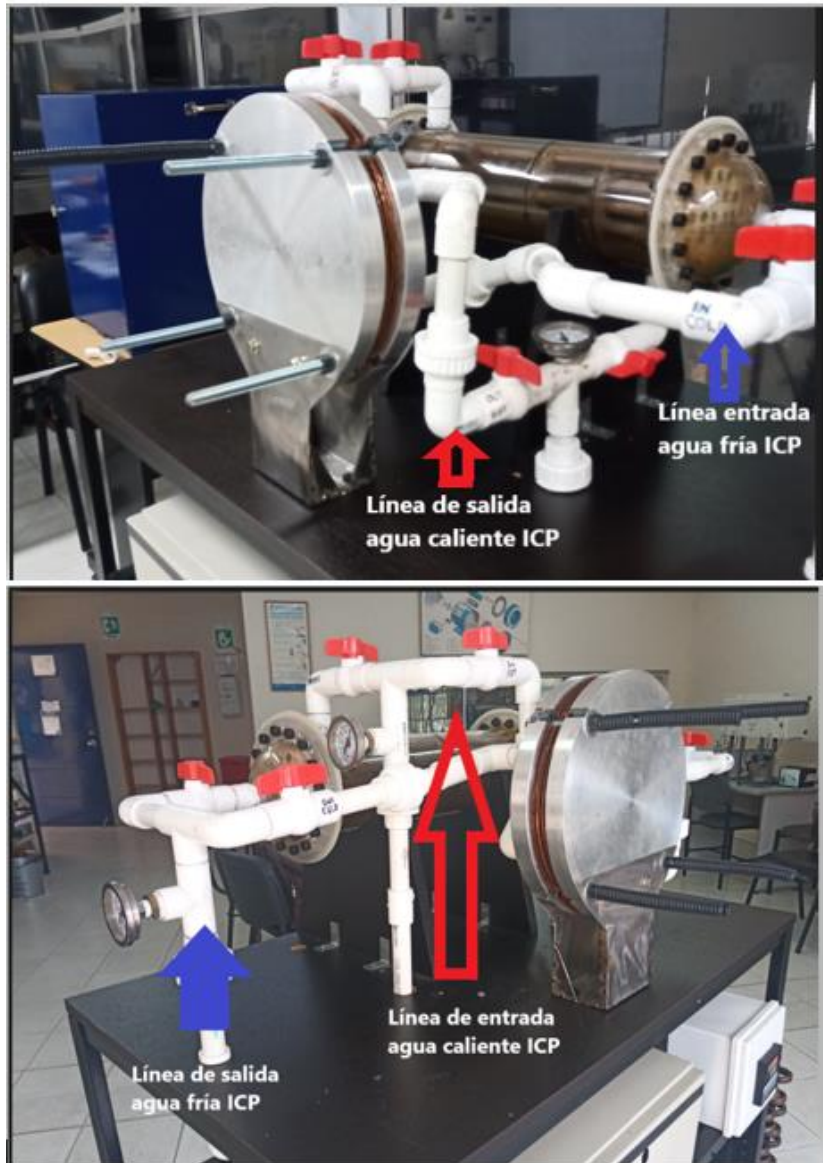
La tabla 8 presenta el registro de los datos experimentales tomados en sitio en el intercambiador de placa plana (ICP), tal como se describió en la metodología.

**Tabla 8.** Registro de los datos del experimento

Estado del equipo	T(°C) de entrada agua fría en el ICP	T (°C) de salida agua fría en el ICP	T (°C) de entrada agua caliente en el ICP	T (°C) de salida de agua caliente en el ICP	T en el control de temperatura	Tiempo (min)
Off	25	25	25	25	24	--
On	25	25	25	25	24	0
On	26	27	27	26	27	2
On	27	28	29	28	29	4
On	27	28	29	28	30	6
On	27	30	31	31	32	8
On	29	31	33	32	33	10
On	32	35	44	40	45	20

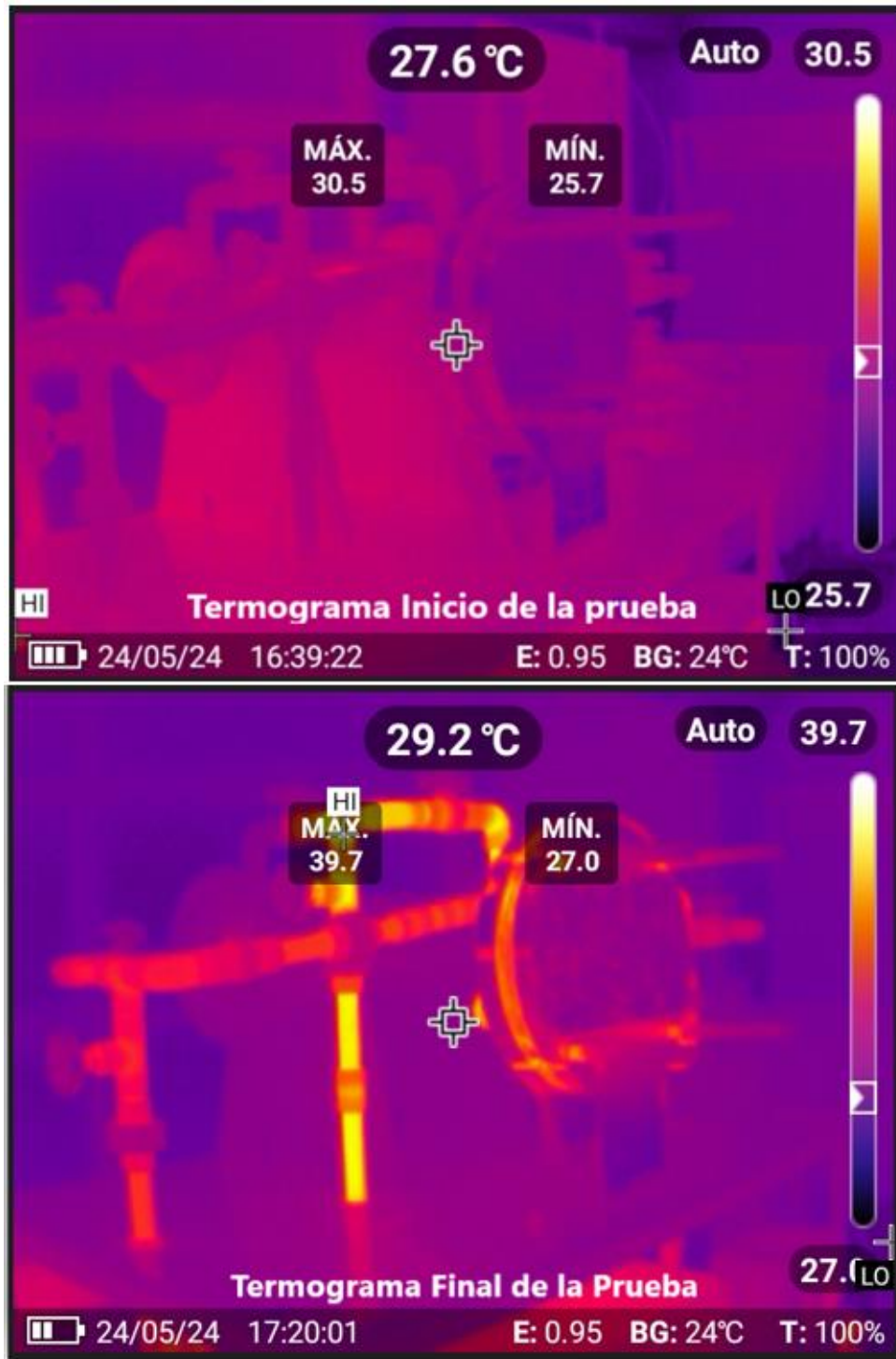
Fuente: propia

A continuación, se muestran unas figuras con las descripciones de las tuberías de entrada y salida de los dos fluidos frío y caliente (Figura 25), para luego observa en la siguiente figura las termografías de las escalas de temperatura de cómo se aprecian en momentos antes de iniciar el ensayo y otra cuando llevaba aproximadamente 20 minutos donde se nota una temperatura de 39,7°C en la línea de entrada de agua caliente (Figura 26).



**Figura 25.** Identificación de líneas de entrada agua fría y de salida de agua caliente lado derecho del ICP (Superior) y líneas de salida agua fría y de entrada de agua caliente lado izquierdo del ICP (Inferior).

Fuente: propia



**Figura 26.** Termograma inicial de la prueba temperatura ambiente (Superior) y Termograma final a temperaturas de trabajo del equipo durante el ensayo (Inferior).

Fuente: propia

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la figura 27 se muestran los datos tomados de aforado de agua fría y caliente con las temperaturas, luego de instalado el ICP para realizar los diferentes cálculos experimentales del equipo.

2024-05-07 Caudal de agua (aforado)  <b>Agua fría con enfriador:</b> toma 1: 1 Litro en 8:52 s toma 2: 1 Litro en 8:72 s  <b>Agua caliente:</b> toma 1: 1 Litro en 3:38 s toma 2: 1 Litro en 3:12 s  <b>Agua fría sin enfriador:</b> toma 1: 1 Litro en 5:90 s toma 2: 1 Litro en 6:01 s	2024-05-07 Caudal de agua (aforado)  <b>Agua fría:</b> toma 1: 1 Litro en 8:52 s ----> 7.04 L/min toma 2: 1 Litro en 8:72 s ----> 6.88 L/min Promedio 6.96 L/min 0.000116 m3/s  <b>Agua caliente:</b> toma 1: 1 Litro en 3:38 s ----> 17.75 L/min toma 2: 1 Litro en 3:12 s ----> 19.23 L/min promedio 18.49 L/min 0.00030816667 m3/s  T <sub>inh</sub> = 48°C T <sub>out</sub> = 46°C T <sub>inc</sub> = 32°C T <sub>outc</sub> = 38°C
--	--

**Figura 27.** Datos tomados durante el ensayo.

Ahora se halla la razón de transferencia real  $\dot{Q}$  (fluido frío y caliente) por medio de la primera ley de la termodinámica. En ambos casos se obtiene una transferencia de calor parecida.

$$\dot{Q}_{frío} = \dot{m} (h_{sal} - h_{ent}) = \rho * \dot{V} (h_{sal} - h_{ent})$$

$$\dot{Q}_{frío} = 994 \frac{kg}{m^3} * 0,000116 \frac{m^3}{s} * \left( 159243 \frac{J}{kg} - 134167 \frac{J}{kg} \right)$$

$$\dot{Q}_{frío} = 2891,4 \frac{J}{s} = 2891,4 W$$

$$\dot{Q}_{caliente} = \dot{m} (h_{sal} - h_{ent}) = \rho * \dot{V} (h_{sal} - h_{ent})$$

$$\dot{Q}_{caliente} = 989,4 \frac{kg}{m^3} * 0,0003082 \frac{m^3}{s} * \left( 201042 \frac{J}{kg} - 192681 \frac{J}{kg} \right)$$

$$\dot{Q}_{caliente} = 2549,5 \frac{J}{s} = 2549,5 W$$

Entonces se procede a hallar el coeficiente de transferencia de calor real del sistema con la siguiente fórmula, donde se tomar la razón de transferencia del fluido frío

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

<b>TAMAÑO Y ARREGLO DE FLUJO</b>		Ec.
$U = \dot{Q} / A_s \Delta T_{eff}$	Coeficiente global de transferencia de calor = Carga de calor / Área de transferencia de calor x (Diferencia de temperatura efectiva)	22

$$U = \dot{Q} / A_s \Delta T_{eff}$$

$$U = 2891,4 \text{ W} / (0,0273645 \text{ m}^2 * (7 \text{ placas} * 2 \text{ superficies}) * 9,8604 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$U = 765,4 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Comparando este resultado con la tabla del libro de Cengel de transferencia de calor es muy cercano resultado experimental (Cengel & Ghajar, 2014) y cercano al valor reportado en los cálculos de diseño del intercambiador.

**Tabla 9.** Coeficientes de transferencia de calor

<b>Valores representativos de los coeficientes totales de transferencia de calor en los intercambiadores de calor</b>	
<b>Tipo de intercambiador de calor</b>	<b><math>U, \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}</math></b>
Agua hacia agua	850 – 1700
Agua hacia aceite	100 – 350
Agua hacia gasolina o queroseno	300 – 1000
Calentadores de agua de alimentación	1000 – 8500
Vapor de agua hacia combustóleo ligero	200 – 400
Vapor de agua hacia combustóleo pesado	50 – 200
Condensador de vapor de agua	1000 – 6000
Condensador de freón (agua enfriada)	300 – 1000
Condensador de amoniaco (agua enfriada)	800 – 1400
Condensador de alcohol (agua enfriada)	250 – 700
Gas hacia gas	10 – 40
Agua hacia aire en tubos con aletas (agua en los tubos)	30 – 60 400 – 850
Vapor de agua hacia aire en tubos con aletas (vapor de agua en los tubos)	30 – 300 400 – 4000

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2014)

En la siguiente imagen se aprecia los cálculos realizados en el software EES de donde se tomaron los valores para realizar los cálculos experimentales como la densidad del agua fría y caliente, las entalpías, las temperaturas, las razones de transferencia de calor, entre otros utilizados en esta sección (Figura 28).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

```

x=y Equations Window

T_caliente = 47 [C] "Temperatura fluido caliente"
T_frio = 35 [C] "Temperatura fluido caliente"

P = 85[kPa]
rho_caliente=density(Water,T=T_caliente;P=P)
rho_frio=density(Water,T=T_frio;P=P)
mu=viscosity(Water,T=T_caliente;P=P)
k=conductivity(Water,T=T_caliente;P=P)
cp=cp(Water,T=T_caliente;P=P)

caudalFrio = 0,000116 [m^3/s]
T_entrada_frio = 32 [C]
T_salida_frio = 38 [C]
h_entrada = enthalpy(Water,T=T_entrada_frio;P=P)
h_salida = enthalpy(Water,T=T_salida_frio;P=P)

Q_punto_frio = rho_frio*caudalFrio*(h_salida - h_entrada)

caudalCaliente = 0,00030816667 [m^3/s]
T_entrada_caliente = 48 [C]
T_salida_caliente = 46 [C]
h_entrada_caliente = enthalpy(Water,T=T_entrada_caliente;P=P)
h_salida_caliente = enthalpy(Water,T=T_salida_caliente;P=P)

Q_punto_caliente = rho_caliente*caudalCaliente*(h_entrada_caliente - h_salida_caliente)

```

**Figura 28.** Cálculos realizados en el software de EES

Fuente: propia

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

En este trabajo se diseñó, fabricó y se probó experimentalmente un intercambiador de calor de placas planas. Los cálculos de diseño y los experimentos arrojan un coeficiente global de transferencia de calor similar, por lo que la metodología seguida en este trabajo permite dimensionar adecuadamente un intercambiador de este tipo. Este intercambiador se deja instalado en el laboratorio de fluidos (G405) de la institución para su uso en prácticas académicas o de investigación.

El diseño propuesto en este trabajo es de fácil mantenimiento, porque las placas se pueden desmontar sin mayores problemas. Esto permite intervenir las placas por medio de prácticas de lavados a presión, con vapor o con ensayos no destructivos como líquidos penetrantes que nos permiten garantizar que las placas no presenten desgastes erosivos y demás deterioros por incrustaciones con el tiempo.

Se dejaron placas corrugadas adicionales de otros materiales para que puedan ser cambiadas por los mismos estudiantes con el apoyo del laboratoristas que se pueden entrenar en la parte de montaje y desmontaje del intercambiador con las forma de posicionar la placas con sus respectivas juntas de sellado que evitan la mezcla de los fluidos, con esto los estudiantes pueden interpretar las ventajas que tienen los diferentes materiales con respecto a otras aplicaciones suponiendo como si fueran con otros fluidos (corrosivos, viscosos, ácidos, gases, etc.) .

Se puede continuar mejorando el módulo de intercambiadores con futuros proyectos de grado con estudiantes que puedan independizar el sistema de enfriamiento forzado, con una bomba adicional para este, ya que actualmente está instalado directamente en la línea de salida del agua de enfriamiento de los intercambiadores causando una baja del caudal significativa lo que influye directamente en la eficiencia de los equipos para la transferencia de calor, adicional a esto se puede automatizar esta parte del módulo para que se mantenga controlada esta temperatura a 20°C ya sea aumentando el caudal o la ventilador de tiro forzado por medio de un PLC.

Se pueden hacer otros tipos de mejoras a futuro con otros proyectos por medio de la automatización de los sistemas de bombeo para que controlen por medio de un PLC los caudales, flujos, presiones y demás variables que se puedan intervenir en el módulo de intercambiadores para poder realizar diferentes tipos de prácticas de laboratorio y sean más funcionales los equipos y así enriquecer el manejo de estos equipos que cada vez son más utilizados en la industria para sus diferentes procesos y motivar a los próximos

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ingenieros a sacar el mejor provecho de esta tecnología para implantarlas en esas diferentes áreas.

Según investigaciones de universidades acerca del diseño, estudio y fabricación de para el desarrollo de software es una parte que poco se ha explorado porque las empresas fuertes en el sector son muy herméticos en el tema de sus desarrollos, por esta razón se puede enfatizar a los estudiantes en proyectarse a la creación de software donde se puedan también realizar los modelos matemáticos y diferentes simulaciones con estos equipos y así posiblemente poder competir con estas empresas del sector y en la creación de sus empresas para suplir la demanda tanto para fabricación y mantenimiento, como para la simulación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 6. BIBLIOGRAFÍA

---

- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2014). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (Quinta ed.). New York: McGraw Hill.
- Córdoba-Almarino, J. P. (2019). *Diseño térmico y mecánico de un intercambiador de calor de placas*. Ibagué: Universidad de Ibagué.
- Dvorak, V., & Vit, T. (2017). CAE methods for plate heat exchanger design. *Energy procedia*, 234-243. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.613
- Gherasim, I., Galanis, N., & Nguyen, C. T. (2011). Heat transfer and fluid flow in a plate heat exchanger. Part II: Assessment of laminar and two-equation turbulent models. *International journal of thermal sciences*, 1499-1511. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.03.017
- Huizhu, Y., Jian, W., Simin, W., & Yanzhong, L. (2018). Thermal design and optimization of plate-fin heat exchangers based global sensitivity analysis and NSGA-II. *Applied Thermal Engineering*, 136, 444-453.
- Mehrabian, M. A. (2009). Construction, performance, and thermal design of plate heat exchangers. *Proceeding of the institution of mechanical engineers, Part E: journal of process mechanical engineering*, 223, 123-131. doi:10.1243/09544089JPME270
- Nguyen, B. C., Oh, J.-T., Asano, H., & Tomiyama, Y. (2019). Investigation of Experiment and Simulation of a Plate Heat Exchanger. *Energy procedia*, 5635-5640. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.575
- Niroomand, R., Saidi, M. H., & Hannani, S. K. (2019). A quasi-three-dimensional thermal model for multi-stream plate fin heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 113730. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.113730
- Song, K. S., Junyub, L., Sungho, Y., Dongwoo, K., & Yongchan, K. (2019). Composite fouling characteristics of CaCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub> in plate heat exchangers at various operating and geometric conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 136, 555-562. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.032
- Zhu, X., & Haglind, F. (2020). Computational fluid dynamics modeling of liquid–gas flow patterns and hydraulics in the cross-corrugated channel of a plate heat exchanger. *International Journal of Multiphase Flow*, 122, 103163. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103163

## ANEXO: GUÍA DE LABORATORIO

### Apéndice A. Protocolo de mantenimiento de equipo de laboratorio

EQUIPO	MÓDULO DIDÁCTICO- INTERCAMBIADORES DE CALOR TIPO DE PLACAS Y DE TUBOS – CORAZA
ITEM	ACTIVIDAD
<b>Inspección visual</b>	
1.	Verificar el estado de las ruedas (no estén pegadas)
2.	Estado del cableado eléctrico
3.	Estado de los suiches e interruptores de mando
4.	Revisar los niveles de los tanques 1 y 2
5.	Termómetros en buen estado de las tuberías
6.	Asegurar el correcto sentido de giro en las bombas
7.	Garantizar una buena calidad del agua (limpia)
8.	Válvulas de bola abiertas completamente (evitar sobrepresiones) dependiendo del intercambiador que se vaya a utilizar en la práctica (Placas o de coraza-tubos)
9.	Estanqueidad del sistema, en cuanto al agua en el de placas y/o el de coraza-tubos (no fugas)
10.	Válvulas de drenajes cerradas
<b>Inspección de funcionamiento</b>	
11.	Bombas con tuberías en buen estado
12.	No presencia de partículas o suciedad en los tanques.
13.	Puesta en funcionamiento del equipo para realizar chequeos
14.	Revisión con tester las señales de voltajes
15.	Set point del control de temperatura por debajo de 50°C
16.	Configurar las corrientes de los guardamotores en 5A
17.	Chequeo de corriente en la resistencia y motores

<b>Ubicación:</b>	Laboratorio de Fluidos G 405.
-------------------	-------------------------------

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## Apéndice B. Guía de laboratorio

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA

<b>Nombre de la guía:</b>	Reconocimiento de un intercambiador de calor de placas
<b>Código de la guía (No.):</b>	001
<b>Taller(es) o Laboratorio(s) aplicable(s):</b>	Laboratorio de fluidos
<b>Tiempo de trabajo práctico estimado:</b>	1 hora
<b>Asignatura(s) aplicable(s):</b>	Termodinámica y transferencia de calor
<b>Programa(s) Académico(s) / Facultad(es):</b>	Ingeniería electromecánica

COMPETENCIAS	CONTENIDO TEMÁTICO	INDICADOR DE LOGRO
Análisis del funcionamiento de un intercambiador de placas en cobre	Transferencia de calor en un intercambiador de placas	Identifica las partes de un intercambiador de calor de placas. Conoce el funcionamiento y aplicación de un intercambiador de calor.

### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo para transferir energía térmica de un fluido que está a alta temperatura a un fluido a baja temperatura, los cuales interactúan durante el paso por el equipo.

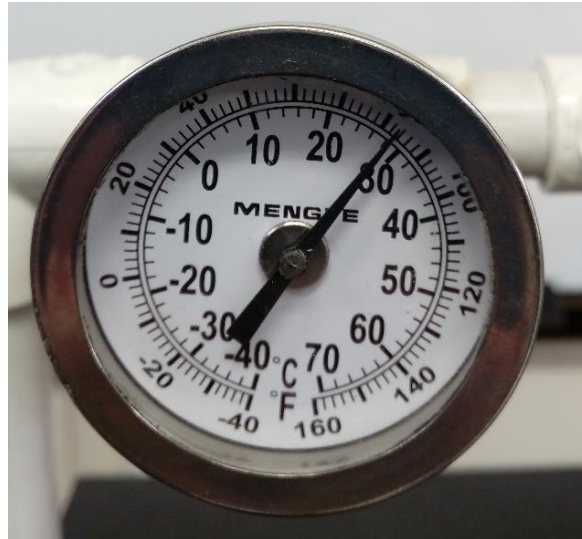


**Figura 1.** Intercambiador de calor

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### Termómetros

Es un instrumento de medición de temperatura de fluidos.



**Figura 2.** Termómetro banco de intercambiadores

### Control de temperatura.

Es un instrumento que se usa para controlar y censar la temperatura. El controlador de temperatura recibe datos de un sensor de temperatura y emite datos conectados a un elemento de control.



**Figura 3.** Control de temperatura.

### Termopar tipo J

El termopar es un sensor de temperatura muy común ampliamente utilizado en la industria. Un termopar se hace con dos alambres de distinto material unidos en un

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de milivoltios el cual aumenta con la temperatura. Un termopar "tipo J" está hecho con un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel)



**Figura 4.** Termocupla tipo J ITM.

### **Motobombas**

Una motobomba es un dispositivo utilizado para mover fluidos como líquidos y lodos. Las motobombas desplazan un volumen por la acción física o mecánica. Genéricamente son accionadas por un motor eléctrico.



**Figura 5.** Motobombas

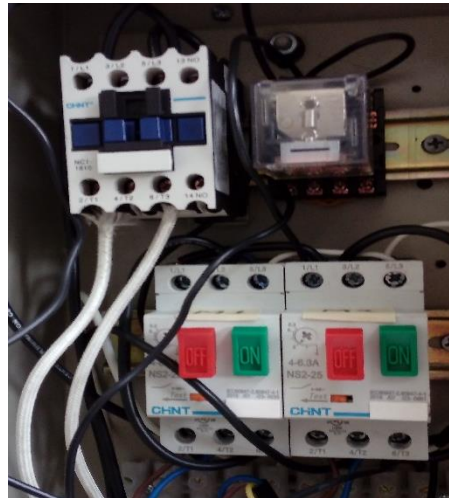
### **Guarda motores y contactor.**

Un guarda motor es un interruptor magneto térmico, especialmente diseñado para la protección de motores eléctricos. Este diseño especial proporciona al dispositivo una

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

curva de disparo que lo hace más robusto frente a las sobre intensidades transitorias típicas de los arranques de los motores.

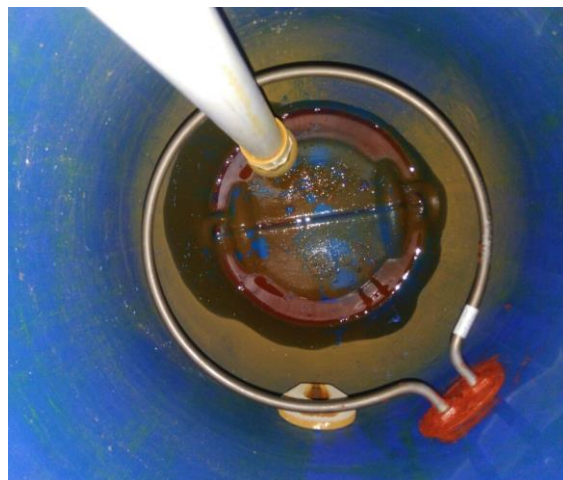
El contactor es un interruptor automático que sirve para restablecer los enlaces entre distintos circuitos y aparatos eléctricos.



**Figura 6.** Guarda motores y contactor

### Resistencia eléctrica

Es toda oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones; cuando la resistencia es elevada, comienzan a chocar unos con otros y a liberar energía en forma de calor.



**Figura 7.** Resistencia eléctrica 12.5 Amperios

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### Tanques de almacenamiento del fluido (agua)

Los tanques de almacenamiento son elementos que contiene el volumen del agua, en este caso dos; uno con 20 litros de fluido caliente y el otro con 30 litros de agua a temperatura ambiente.



**Figura 8.** Tanques de almacenamiento ITM

### 3. OBJETIVOS

- Identificar las partes de un intercambiador de calor de placas.
- Analizar el comportamiento del fluido que pasa por las placas del intercambiador de calor.
- Analizar capacidad carga de calor ( $Q$ ), LMTD y coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ )

### 4. RECURSOS REQUERIDOS

Banco didáctico de intercambiadores de calor de placas y de tubos-coraza del laboratorio G-405 del ITM.

### 5. PROCEDIMIENTO O METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

- Con el equipo apagado identifique cada uno de los componentes del equipo.
- Verifique que el agua este en el nivel indicado, encienda las bombas y realice el aforado en las tuberías de salida de fluido caliente y frío corroborando el dato dos o tres veces (Utilizar una probeta de 1 litro y el cronometro) apunte los valores y hacer un promedio de flujo.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE AFORADO	FLUIDO CALIENTE	FLUIDO FRÍO
1		
2		
3		

- Conecte el equipo y pulse el suiche para encender la resistencia con 20 minutos de anticipación.
- Tome los valores iniciales que se visualiza en la pantalla del control de temperatura y en los cuatro termómetros ubicados en el intercambiador de calor.

**Tabla No. 1. Registro de los datos del experimento**

Estado del equipo	T (°C) de entrada agua fría en el ICP	T (°C) de salida agua fría en el ICP	T (°C) de entrada agua caliente en el ICP	T (°C) de salida de agua caliente en el ICP	T en el control de temperatura	Tiempo (min)
Off						--
On						0
On						2
On						4
On						6
On						8
On						10

#### **Análisis de la tabla No.1**

Con los datos obtenidos en la tabla, realice una relación de tiempo-temperatura y explique los cambios que se generan en los fluidos.

#### **6. PARÁMETROS PARA ELABORACIÓN DEL INFORME**

- Explique con sus propias palabras y de manera breve cómo funciona un intercambiador de placas
- Anexe el análisis de los datos tomados en el equipo basados en la tabla de registros.
- Enumere cinco aplicaciones de los intercambiadores de calor de placas.
- Realice un cuadro comparativo entre los diferentes tipos de intercambiadores de calor, resaltando sus principales diferencias y aplicaciones.
- Buscar en una base de datos confiable un artículo en el que se investiguen métodos o posibles mejoras a intercambiadores de calor de placas.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 7. CÁLCULO EXPERIMENTAL

Con la tabla de aforado calcular el volumen de fluido y con las temperaturas promedio de la tabla 1 hallar la carga de calor  $\dot{Q}$  por la primera ley de termodinámica. Con este valor se procede a hallar el coeficiente de transferencia de calor real del sistema con la siguiente fórmula, donde tomaremos la razón de transferencia del fluido frío.

TAMAÑO Y ARREGLO DE FLUJO		Ec.
$U = \dot{Q} / A_s \Delta T_{eff}$	Coeficiente global de transferencia de calor = Carga de calor / Área de transferencia de calor x (Diferencia de temperatura efectiva)	1
$A_s = 0,0273645 \text{ m}^2$	Esta es el área superficial de las placas del ensamble del intercambiador de placas con que está diseñado	

$$U = \dot{Q} / A_s \Delta T_{eff}$$

Comparar este resultado con la Tabla del libro de Cengel. Coeficientes de transferencia de calor (Tabla 11-1 Libro de Cengel de Transferencia de calor), y debería ser este valor aproximado al de la tabla

Valores representativos de los coeficientes totales de transferencia de calor en los intercambiadores de calor	
Tipo de intercambiador de calor	$U, \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Agua hacia agua	850 – 1700
Agua hacia aceite	100 – 350
Agua hacia gasolina o queroseno	300 – 1000

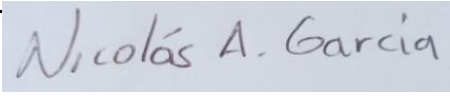
## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke\\_resistencia/ke\\_resistencia\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_resistencia/ke_resistencia_1.htm)
- <http://www.tecnochile.cl/content/16-motobombas>
- <http://instrumentosdelaboratorio.org/uso-del-termometro>
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4984/fichero/6.+INTERCAMBIADORES+DE+CALOR.pdf>
- <http://materias.fi.uba.ar/6731/intercambiadores1>

<b>Elaborado por:</b>	Nombre del docente y del profesional del Taller o Laboratorio
<b>Revisado por:</b>	Nombre persona designada por el Comité de Laboratorios
<b>Versión:</b>	Número de la versión de la guía
<b>Fecha:</b>	Fecha de aprobación de la guía

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTE




---



---

FIRMA ASESOR



---



---

Informe final de trabajo de grado  
aprobado

FECHA ENTREGA: 2024-08-27 6:00 pm