



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

---

CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

“PROTOTIPO DIDÁCTICO DE INTERCAMBIADOR  
DE CALOR DE TUBO Y CORAZA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

María Celeste Santiago Zavala

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Manuel Riesco Ávila

CODIRECTOR DE TESIS:

M. en I. James Ronald Vera Rozo

SALAMANCA, GUANAJUATO

JUNIO 2021



**Asunto:** Notificación de Dictamen de Modalidad de Titulación.

**C. SANTIAGO ZAVALA MARÍA CELESTE**  
**ESTUDIANTE DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**PRESENTE.**

Una vez concluido el análisis y discusión sobre la propuesta del proyecto titulado: **"Prototipo Didáctico de Intercambiador de Color de Tubo y Coraza"**, bajo la revisión del Asesor(es): RIESCO AVILA José Manuel, Dr. y VERA ROZO James Ronald, M. en I., el Comité de Obtención de Grado de Licenciatura del H. Consejo Divisional, acordó la siguiente resolución:

Con fundamento en las fracciones primera a cuarta del Artículo 67, el Artículo 68 del Estatuto Académico 2008 y el artículo Noveno Transitorio del Reglamento Académico 2019, el comité acordó **POR UNANIMIDAD DE VOTOS AUTORIZAR SU MODALIDAD DE TITULACIÓN POR TRABAJO DE TESIS** designando el siguiente jurado:

**Presidente:** LUVIANO ORTIZ José Luis, Dr.

**Secretario:** RIESCO AVILA José Manuel, Dr.

**Vocal:** BELMAN FLORES Juan Manuel, Dr.

Se extiende la presente notificación de la resolución el día 07 de Septiembre del 2020.

**ATENTAMENTE**  
**"LA VERDAD OS HARÁ LIBRES"**

**DRA. ROCÍO ALFONSINA LIZÁRRAGA MORALES**  
**DIRECTORA SUPLENTE**

E.c.p. DR. CARLOS HUGO GARCÍA CAPULÍN – Secretario Académico de la División de Ingenierías  
RIESCO AVILA José Manuel, Dr. y VERA ROZO James Ronald, M. en I. – Asesor(es)  
Archivo

**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS – CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA**

Domicilio conocido, Comunidad de Palo Blanco, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5 +1.8. Salamanca, Gto., C.P. 36885. Tel (464) 647 99 40 Ext. 2300.

## Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi familia por siempre apoyarme y motivarme, día con día. Especialmente agradezco a mi papá por siempre confiar en mí, a veces creo que confía más de lo que yo lo hago en mí misma. Agradezco a mi mamá por siempre escuchar y guiarme hacia lo que es mejor para mí, gracias por enseñarme que la vida es mucho más que solo ser una buena estudiante. Gracias a mi sister por siempre apoyarme incondicionalmente en todo, por escuchar mis momentos de preocupación y siempre estar de mi lado.

Quiero agradecer a mi tío Felipe el de la ferretería Ferre Valle y a su esposa mi tía mago, y a mi tío Wicho de la tornillería El Edén, ya que durante mi estancia en la licenciatura y en mi trabajo de tesis, siempre recurrí a ellos para ideas u opiniones en cuanto a proyectos prácticos, puesto que no lo sé todo y agradezco siempre su amable atención hacia mí.

Otro agradecimiento más es para mí asesor de tesis el Dr. Riesco, quien me dio la oportunidad de trabajar en este proyecto de tesis que me gustó mucho y a través del cual aprendí muchas cosas nuevas, con la guía de mi asesor James, a quien de igual forma agradezco mucho, por su enseñanza en áreas del conocimiento que anteriormente no había intentado, además de su paciencia y colaboración.

Gracias a todos aquellos amigos que estuvieron conmigo durante los cinco años de carrera, gracias por los buenos momentos, los momentos estresantes que en compañía se hicieron más llevaderos y por todas las experiencias que nos llevamos.

Gracias a todos y cada uno de los maestros que fueron parte de mi formación académica, agradezco su paciencia y dedicación, de cada uno de ellos me llevo un pedacito de su conocimiento, pues es lo que me ha llevado hasta este momento.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros de laboratorio quienes en muy poco tiempo se han vuelto parte importante en este proceso de formación, en este tiempo de pandemia fueron un apoyo para terminar mi proyecto de tesis. Ya sea pasando por mí y llevándome a la universidad o compartiendo ideas y sus experiencias. Espero en el futuro sigamos compartiendo más momentos de aprendizaje y apoyo.

## Índice General

Agradecimientos.....	III
Índice General .....	IV
Índice de Figuras .....	VII
Índice de Tablas .....	X
Tabla de símbolos.....	XII
Resumen .....	XIV
Abstract .....	XIV
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	15
1.1. JUSTIFICACIÓN .....	17
1.2. OBJETIVOS .....	20
Objetivo General .....	20
Objetivos Particulares .....	20
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>21</b>
2.1. HISTORIA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	21
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	22
2.2.1 Intercambiadores tubulares .....	23
2.2.2. Intercambiadores de calor tipo placa.....	24
2.2.3. Intercambiadores de calor de superficie extendida .....	24
2.2.4. Regeneradores .....	24
2.3. INTERCAMBIADOR DE TUBO Y CORAZA .....	25
2.3.1. Tubos.....	26
2.3.2. Coraza .....	27
2.3.3. Deflectores .....	28
2.3.4. Métodos de solución.....	29
2.4. NORMATIVIDAD .....	32

2.4.1. Materiales .....	32
2.4.2. Diseño .....	33
2.4.3. Fabricación .....	35
2.4.4. Generalidades de Fabricación con Soldadura.....	35
2.4.5. Diseño de uniones de soldadura .....	36
2.4.6. Fabricación de Uniones con Soldadura .....	40
2.4.7. Reglas para Conexiones de Brida Atornillada con Juntas Tipo Anillo .....	41
2.5. PROTOTIPOS DIDÁCTICOS PARA EDUCACIÓN COSTOS Y CÓMO SON .....	41
<b>CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR .....</b>	<b>46</b>
3.1. EQUIPO DISPONIBLE.....	46
3.2. ACTUALIZACIÓN DE EQUIPO .....	53
3.2.1. Reservorio de agua y su recirculación.....	59
3.2.2. Flujómetro electrónico de agua .....	61
3.2.3. Monitoreo constante a través interfaz de usuario y pantalla LCD .....	61
3.2.4. Configuración de flujo .....	62
3.3. INSTRUMENTACIÓN .....	63
3.3.1. Medición de temperatura.....	66
3.3.1.1 Termistores.....	70
3.3.1.2. Termopares.....	75
3.3.2. Medición de caudal .....	80
3.3.2.1. Rotámetro.....	86
3.3.2.2. Flujómetro de tipo turbina.....	86
3.3.2.3. Medición de caudal volumétrico de aceite .....	88
3.4. INTERFAZ DE USUARIO .....	93
<b>CAPÍTULO 4. PRUEBAS .....</b>	<b>99</b>
4.1. PRÁCTICAS PROPUESTAS .....	99
4.2. PRUEBAS REALIZADAS .....	99
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>107</b>

ANEXOS.....	109
ANEXO 1 PROGRAMA PARA INTERFAZ DE LABVIEW .....	110
ANEXO 2 PRÁCTICA DE LABORATORIO.....	114
ANEXO 3 CÓDIGO EN ARDUINO .....	119
ANEXO 4 MANUAL DE OPERACIÓN. ....	122

## Índice de Figuras

Figura 2. 1. Clasificación de intercambiadores de acuerdo con su construcción.[5].....	23
Figura 2.2. Regenerador Giratorio. ....	25
Figura 2.3. Geometrías en tubos de intercambiadores de coraza y tubos.....	26
Figura 2.4. Aletas en la cubierta del tubo. ....	27
Figura 2.5. Arreglo de los tubos.....	27
Figura 2.6. Placas de deflectores.....	28
Figura 2.7. Localización típica de uniones de soldadura de las categorías A,B, y D. ....	36
Figura 2.8. Unidad para intercambiador didáctico.....	42
Figura 2.9. Intercambiador de calor de tubo concéntrico. ....	42
Figura 2.10. Intercambiador de calor de placas. ....	43
Figura 2.11. intercambiador de carcasa y tubo. ....	43
Figura 2.12 Intercambiador de calor de tubo concéntrico extendido. ....	44
Figura 2.13 Intercambiador de flujo turbulento de agua.....	44
Figura 3.1 Intercambiador de calor de uso didáctico. [11] .....	47
Figura 3.2 Dimensiones del intercambiador de calor uso didáctico. ....	48
Figura 3.3 Detalle 1 y dimensiones de las bridas.....	48
Figura 3.4 Haz de tubos.....	49
Figura 3.5 Dimensiones de los tubos. ....	49

Figura 3.6 Arreglo de tubos del intercambiador de uso didáctico. ....	50
Figura 3.7. Diagrama de Unidad Hilton.....	51
Figura 3.8. Diagrama de instalación de circulación de aceite en intercambiador de tubos y coraza. ....	52
Figura 3.9. Diagrama general de banco de pruebas didáctico. ....	54
Figura 3.10. Vista lateral de banco de pruebas. ....	55
Figura 3.11. Diagrama de conexiones eléctricas.....	57
Figura 3.12. Diagrama de conexiones de la placa Arduino y sensores. ....	59
Figura 3.13. Instalación de reservorio de agua y bypass. ....	60
Figura 3.14 Pantalla LCD. ....	62
Figura 3.15. Instrumentos ideales. ....	64
Figura 3.16. Diagrama de flujo de la señal. ....	65
Figura 3.17. Termómetro de vidrio capilar. ....	69
Figura 3.18. Termistores .....	72
Figura 3.19. Circuito de termómetro de resistencia con una fuente de voltaje constante.....	72
Figura 3.20. Resistencia-Temperatura característica de los termistores.....	74
Figura 3.21. Circuito básico termoelectrónico.....	75
Figura 3.22. Circuito básico para un solo termopar.....	77
Figura 3.23. Diagrama de flujo de volumen de control utilizado para el análisis de flujo interno a través de una tobera. ....	82
Figura 3.24. Rotámetro con válvula de estrangulamiento. ....	83

Figura 3.25. Flujómetro de tipo turbina. ....	87
Figura 3.26. Diagrama de flujómetro de aceite.....	89
Figura 3.27. Diagrama de altura de recipiente de medición H y altura de nivel de aceite h.....	91
Figura 3.28. Válvula de paso 1/2 in. ....	92
Figura 3.29. Montaje de servomotor a la válvula de paso. ....	92
Figura 3.30. Menú de inicio de interfaz. ....	94
Figura 3.31. Interfaz de cálculo de efectividad.....	95
Figura 3.32. Diagrama de solución empleado para calcular efectividad. ....	96
Figura 3.33. Interfaz para cálculo de temperaturas de salida.....	97
Figura 3.34. Diagrama de flujo para cálculo de temperatura de salida. ....	98

## Índice de Tablas

Tabla 2.1 Eficiencias máximas permisibles para uniones de soldadura de arco y gas. [9].....	37
Tabla 3.1. Descripción de dispositivos en del diagrama general.....	56
Tabla 3.2 Definición de Diferentes Termómetros. ....	67
Tabla 3.3. ventajas y desventajas de diversos tipos de sensores.....	69
Tabla 3.4. Tipos de Termopares Estandarizados. ....	78
Tabla 3.5 Características de flujómetros. [17] .....	82
Tabla 4.1. Propiedades de agua.....	100
Tabla 4.2. Propiedades del aceite SAE 5W-30 .....	100
Tabla 4.3 A Resultados de cálculo de efectividad. Un paso por los tubos. Flujo Paralelo.....	101
Tabla 4.3 B Comparación entre temperaturas de salida teóricas y experimentales. Un paso por los tubos. Flujo Paralelo.....	102
Tabla 4.4 A Resultados de cálculo de efectividad. Un paso por los tubos. Flujo contracorriente.....	102
Tabla 4.4 B Comparación entre temperaturas de salida teóricas y experimentales. Un paso por los tubos. Flujo Contracorriente.....	103
Tabla 4.5 Comparación entre flujo paralelo y Flujo contracorriente. Un paso por los tubos. ....	103
Tabla 4.6 A Resultados de cálculo de la efectividad. Dos pasos por los tubos. ....	104

Tabla 4.6 B Comparación entre temperaturas de salida teóricas y  
experimentales. Dos pasos por los tubos. .... 104

## Tabla de símbolos

Símbolo	Descripción
$A$	Área de transferencia de calor. [ $\text{m}^2$ ]
$C$	Capacidad calorífica. [kW]
$C_c$	Capacidad calorífica de fluido frío. [kW]
$C_h$	Capacidad calorífica de fluido caliente. [kW]
$C_{max}$	Capacidad calorífica máxima. [kW]
$C_{min}$	Capacidad calorífica mínima. [kW]
$c_p$	Calor específico. [kJ/kg · K]
$c_{p,eff}$	Calor específico para cambio de fase. [kJ/kg · K]
$C_R$	Coefficiente de rotámetro.
$D_S$	Distancia que registra el sensor ultrasónico. [m]
$E$	Fuerza Electromotriz (FEM). [V]
$E_0$	Medición de Fuerza Electromotriz (FEM). [V]
$E_s$	Fuerza Electromotriz (FEM) de generador de potencia. [V]
$g$	Gravedad. [ $\text{m/s}^2$ ]
$h$	Altura de nivel de aceite. [m]
$H$	Altura de recipiente de medición de aceite. [m]
$I$	Corriente eléctrica. [A]
$\dot{m}$	Flujo másico. [kg/s]
$\dot{m}_c$	Flujo másico fluido frío. [kg/s]
$\dot{m}_h$	Flujo másico fluido caliente. [kg/s]
$\dot{m}_{teorico}$	Flujo másico teórico. [kg/s]
$P$	Presión. [Pa]
$q$	Flujo de calor real. [kW]
$q_{max}$	Flujo de calor máximo. [kW]
$Q$	Caudal Volumétrico. [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_{Aceite}$	Caudal Volumétrico de aceite. [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_{Agua}$	Caudal Volumétrico de agua. [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$QO$	Caudal volumétrico de aceite. [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
$\dot{Q}_p$	Flujo de calor relacionado a efecto Peltier. [W]

$\dot{Q}_T$	Flujo de calor relacionado a efecto Thompson. [W]
QW	Caudal volumétrico de agua. [L/min]
R	Resistencia. [ $\Omega$ ]
$R_f$	Resistencia de resistor fijo. [ $\Omega$ ]
RO	Reservorio de aceite.
$R_t$	Resistencia de sensor. [ $\Omega$ ]
RW	Reservorio de agua.
s	Proporción de resistencia.
$S^*$	Entropía. [V/°C]
t	Tiempo. [s]
T	Temperatura. [°C]
$T_{c,i}$	Temperatura de fluido frío de entrada. [°C]
$T_{c,o}$	Temperatura de fluido frío de salida. [°C]
Td	Temperatura lado derecho de fluido frío. [°C]
Te	Temperatura de entrada de fluido caliente. [°C]
$T_{h,i}$	Temperatura de fluido caliente de entrada. [°C]
$T_{h,o}$	Temperatura de fluido caliente de salida. [°C]
Ti	Temperatura lado izquierdo de fluido frío. [°C]
Ts	Temperatura de salida de fluido caliente. [°C]
U	Coefficiente de transferencia de calor global. [kW/m <sup>2</sup> · K]
v	Velocidad. [m/s]
V	Volumen. [m <sup>3</sup> ]
$V_{aceite}$	Volumen de aceite. [m <sup>3</sup> ]
z	Altura. [m]
$\varepsilon$	Efectividad.
$\rho$	Densidad. [kg/m <sup>3</sup> ]

---

## **Resumen**

En el presente trabajo se describe la realización de la restauración y actualización de un intercambiador de calor de tubos y coraza del laboratorio de termofluidos de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, con la finalidad de contar con un equipo didáctico para que los alumnos de la División puedan realizar prácticas y así mejorar su calidad educativa. Como resultado se obtuvo un banco de pruebas totalmente didáctico en el cual los alumnos podrán manipular el equipo con total libertad atendiendo a las indicaciones de la persona que dirija la práctica, de esta forma motivamos a alumnos a investigar, intervenir y aprender.

## **Abstract**

In the present work is described shell and tubes heat exchanger restoration and actualization, of term fluids lab in the División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, thus obtained a didactic device where the students will do practices thereby improve de quality education. As a result, is obtained a testing bench, completely didactic where students could be able to use de equipment in all the aspects, attending indications of the practice operator, in this way students can be more motivated to investigate, participate and learn.

---

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

En el presente proyecto se realiza una descripción de la rehabilitación de un intercambiador de tubos y coraza del laboratorio de termofluidos de la División de ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, con la finalidad de obtener un banco de pruebas didáctico para uso de los alumnos de la universidad, en el cual puedan aplicar conceptos teóricos a base de prácticas propuestas en este proyecto. Parte importante de la realización de este proyecto es la mejora a través de la inmediata de la obtención de datos, es decir, lograr un monitoreo contante del intercambiador con la mínima intervención del operario, puesto que toda la información será visible de forma automática gracias a una interfaz desarrollada dentro del mismo proyecto.

### 1.1. Descripción del problema

En este proyecto se presenta el modelo de un intercambiador de calor de tipo coraza y tubos para su uso didáctico. Se proponen prácticas para su estudio y comprobación de los conocimientos adquiridos en el aula de clases.

La formación que un estudiante de ingeniería debe ser integral, es decir, que adquiera los conocimientos teóricos y que también sea capaz de llevar sus conocimientos a la práctica, por lo tanto, durante su formación debe contar con prototipos para uso didáctico, en los cuales pueda realizar prácticas que le permitan comprobar los fundamentos teóricos adquiridos previamente en el aula de clase. Así es que surge la necesidad de rehabilitar un intercambiador de tubo y coraza para su estudio dentro de las instalaciones de la Universidad, con la finalidad de proporcionar a los estudiantes de la División un prototipo que puedan manipular y usar para el estudio de intercambiadores de calor.

Existen varios factores que influyen en la eficiencia de los intercambiadores de calor, como geometría, flujos másicos, y tipo de fluidos. Por lo tanto, las prácticas que se proponen incluyen la variación de estos factores para que los estudiantes puedan analizarlos y tener una referencia tangible del funcionamiento de los intercambiadores de calor de coraza y tubos, para que finalmente infieran sus propias conclusiones basadas en un caso de estudio de campo.

El equipo didáctico está compuesto por un intercambiador de coraza y tubos, el cual tiene la opción de hacer un paso por los tubos o dos pasos por los tubos, así como también la configuración de flujo paralelo y cruzado independiente del número de pasos. Otras opciones con las que cuenta el banco didáctico son las variaciones del flujo másico del fluido caliente (aceite) y fluido frío (agua). Con las diferentes configuraciones se pretende que el alumno reconozca o llegue a la conclusión de la configuración que sea más eficiente basado en su conocimiento y en su práctica. A su vez el banco didáctico cuenta con un sistema de monitoreo eficiente que permite inspeccionar en tiempo real temperaturas de entrada y salida del intercambiador, así como flujos másicos de los diferentes fluidos de trabajo, lo que permite realizar cálculos precisos que pueden ser comparados en el momento con los cálculos teóricos, debido a que, ambos cálculos son presentados en la interfaz con la que cuenta el equipo. Se pretende que los alumnos que sean partícipes de las prácticas propuestas por este trabajo lleguen a la misma solución teórica que la que se muestra en la interfaz, para así finalmente garantizar que los conocimientos adquiridos en clase, fueron asimilados efectivamente.

La interfaz de trabajo del equipo didáctico resulta amigable para su uso, debido a que muestra de manera gráfica y simplificada los resultados, puesto que toda la programación queda oculta. La programación que se utilizó en la interfaz se basa en diagrama de bloques.

## 1.1. Justificación

La Universidad de Guanajuato [1] tiene como objetivo formar ingenieros mecánicos competentes en las diversas áreas del conocimiento de su profesión que les permitan desempeñarse eficientemente en la industria, en la investigación, en la educación, en los sectores productivos, económicos y sociales, tanto nacionales como internacionales, con un adecuado manejo de las tecnologías de la información y un alto sentido de responsabilidad social, por tanto es innegable la importancia que tiene para un estudiante de ingeniería poder desarrollar prácticas de laboratorio que le permitan reforzar los conocimientos adquiridos en el aula. Para que los estudiantes tengan la mejor formación posible, se deben añadir aspectos prácticos que ayuden a complementar la teoría. Las prácticas de laboratorio han sido parte de la educación científica durante más de dos siglos, junto con conferencias, tutoriales y seminarios como, componentes básicos de la educación superior en ciencias.

Los objetivos de los laboratorios de formación son múltiples. Los estudiantes que se comprometen con buenos laboratorios de formación pueden conseguir apreciar el método científico y hacer que su materia “cobre vida”. Los laboratorios de formación brindan muchas oportunidades para desarrollar habilidades prácticas, habilidades intelectuales y habilidades transferibles, el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI) [2] describe en su manual la infraestructura mínima en los laboratorios para complementar la educación teórica de los alumnos, indicando la necesidad de un intercambiador de calor en el laboratorio de termofluidos para quienes estudian ingeniería mecánica. Desafortunadamente, no siempre es posible contar con laboratorios bien equipados en las Universidades públicas, por lo que se deben buscar alternativas creativas que ayuden a fortalecer la infraestructura experimental. Una de estas alternativas es la construcción de prototipos por parte de los propios estudiantes, ya sea a través de proyectos de clase o, como en este caso, tesis de licenciatura.

En este trabajo se plantea el diseño y la construcción de un prototipo didáctico que ayude a comprender de manera práctica, el funcionamiento de los intercambiadores de calor de tubo y coraza. Mediante este prototipo será posible estudiar diferentes configuraciones de un intercambiador de calor y analizar la influencia que tienen diferentes parámetros en su operación.

Con la construcción del prototipo se espera complementar conocimientos adquiridos en UDAS con enfoque en el área de termofluidos.

Los intercambiadores de calor de coraza y tubos en sus diversas configuraciones son probablemente los más utilizados en las industrias [3], especialmente en la industria química, petrolera (oil and gas), plantas de potencia y operaciones de metalurgia. Lo que los convierte en dispositivos ampliamente

estudiados, ya que poseen la cualidad de contar con diversas configuraciones geométricas y físicas, permitiendo así poder realizar diversos análisis para encontrar una configuración adecuada y eficiente según la aplicación del intercambiador. Por lo tanto, se justifica ampliamente la implementación de un banco de pruebas dentro de la División de Ingenierías, debido a la relevancia industrial que los intercambiadores de coraza y tubo tienen, para de esta manera asegurar que el alumno sea capaz de interactuar y conocer el funcionamiento del intercambiador. El banco de pruebas no está limitado solo hacia los alumnos que buscan un desarrollo industrial, ya que, intercambiadores como el que se propone en el banco de pruebas permiten a los alumnos que se interesan por la investigación la opción de conocer más a detalle el funcionamiento de este prototipo, incentivando su capacidad de análisis para proponer más configuraciones, ya sea de tipo geométricas o físicas a través de las practicas que se proponen en el trabajo actual, de esta manera los alumnos pueden elaborar sus propias conclusiones basados en el intercambiador del banco de pruebas y comprobar la veracidad de su análisis previo.

Wakui & Yokoyama [4] afirman que, para compensar la simplificación del mantenimiento y una adecuada gestión de diversos sistemas de energía, es necesario establecer su operación autónoma, la cual funciona como monitoreo y diagnóstico para detectar e identificar fallas en el sistema durante la operación, así como, sus causas. Se reconoció la necesidad de adaptar el equipo existente agregando diversos componentes que permiten su actual monitoreo constante, con lo que se pretende conocer el comportamiento pleno del dispositivo, para que su estudio resulte más sencillo de visualizar y comprender, además el banco de pruebas permite conocer la comparativa de lo que está sucediendo de forma experimental con lo que se espera que suceda, lo que logra conjugar los conocimientos adquiridos en clase con la experiencia de trabajar con un modelo de estudio real. Es posible conocer el deterioro del dispositivo si se llega al caso de que lo experimental no coincide con lo teórico, dando paso así a un análisis completo del intercambiador y de los diversos componentes que lo conforman, para así conocer la causa de la falla, realizando así un mantenimiento preventivo, lo que también deriva en un aprendizaje importante para los alumnos, puesto que les permite identificar el hecho de que si algo no funciona como se espera, se debe realizar una búsqueda de la falla, resultando así en la formación completa de un ingeniero que es capaz de identificar el momento adecuado para realizar un mantenimiento, conocimiento que es ampliamente valorado en el campo laboral y que solo es posible obtener con la realización de prácticas, como es el caso del proyecto que se propone en este trabajo.

La finalidad completa de este trabajo es poder ampliar la forma de recibir el conocimiento de los alumnos de ingenierías, específicamente del área de termofluidos con enfoque en intercambiadores de calor, ya que actualmente la experiencia práctica es sumamente valorada en el ámbito laboral.

Demostrar las bases teóricas en la práctica y aplicarlas para una mejora se convierte entonces en una labor de gran relevancia para cumplir con los objetivos establecidos por la Universidad de Guanajuato [1], por ello el interés de contar con un banco didáctico de pruebas, que permita cumplir con dichos objetivos, además de proporcionar un valor agregado al laboratorio permitiendo así cumplir con uno de los requisitos mínimos con los que debe contar un laboratorio de termofluidos según el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI) [2].

## 1.2. Objetivos

### Objetivo General

Contar con un prototipo didáctico de intercambiador de calor de tubo y coraza, que permita a los estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica, familiarizarse con diferentes configuraciones de estos equipos.

### Objetivos Particulares

- 1.2.1. Que el prototipo permita analizar el funcionamiento de los intercambiadores de calor de tubo y coraza en las siguientes configuraciones:
  - Un paso por los tubos y un paso por la coraza con flujo paralelo.
  - Un paso por los tubos y un paso por la coraza con flujo a contracorriente.
  - Dos pasos por los tubos y un paso por la coraza.
- 1.2.2. Analizar de manera práctica, cuáles son los factores que afectan la rapidez de la transferencia de calor en un intercambiador de calor.
- 1.2.3. Determinar cómo afectan las diferentes variaciones de las condiciones de operación en el desempeño de los intercambiadores de calor.

---

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1. Historia de los intercambiadores de calor

Shah & Sekulic [5] mencionan que, a partir del último cuarto de siglo pasado, la importancia de los intercambiadores de calor se ha incrementado desde el punto de vista de conservación de energía, conversión, recuperación y la implementación exitosa de nuevos recursos de energía. Los intercambiadores de calor son usados en procesos de potencia, transporte, aire acondicionado y refrigeración, criogenia, recuperación de energía, combustibles alternativos y en la industria manufacturera.

El intercambiador de define como el dispositivo en el cual ocurre un proceso de transferencia de calor entre dos fluidos a temperaturas diferentes y separadas por una pared sólida, evitando que se mezclen entre sí ambos fluidos. Los intercambiadores de calor tienen a la fecha una gran relevancia en el ámbito industrial y de investigación, ya que constantemente se encuentran bajo diversas investigaciones, debido a la búsqueda de una mejor efectividad, en sus diferentes clasificaciones y aplicaciones. A través de los intercambiadores de calor, se puede apreciar gran parte de la esencia de conceptos básicos de transferencia de calor, ya que es muy sencillo apreciar el fenómeno completo. Además permite idear diversas configuraciones para su estudio, permitiendo así una infinidad de posibilidades para su estudio y mejora, las cuales van desde la geometría hasta los factores físicos que intervienen en su funcionamiento como los fluidos de trabajo y a su vez sus características particulares.

## 2.2. Clasificación de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar de acuerdo con diversos criterios, como de acuerdo con el proceso de transferencia, número de fluidos, tipo de construcción, arreglo de fluido y al mecanismo de transferencia de calor.

Las clasificaciones más comunes de acuerdo con Incropera et al. [6], son de acuerdo con el arreglo de fluido y tipo de construcción.

De acuerdo con el arreglo del fluido se pueden tener dos configuraciones, flujo paralelo y a contra flujo.

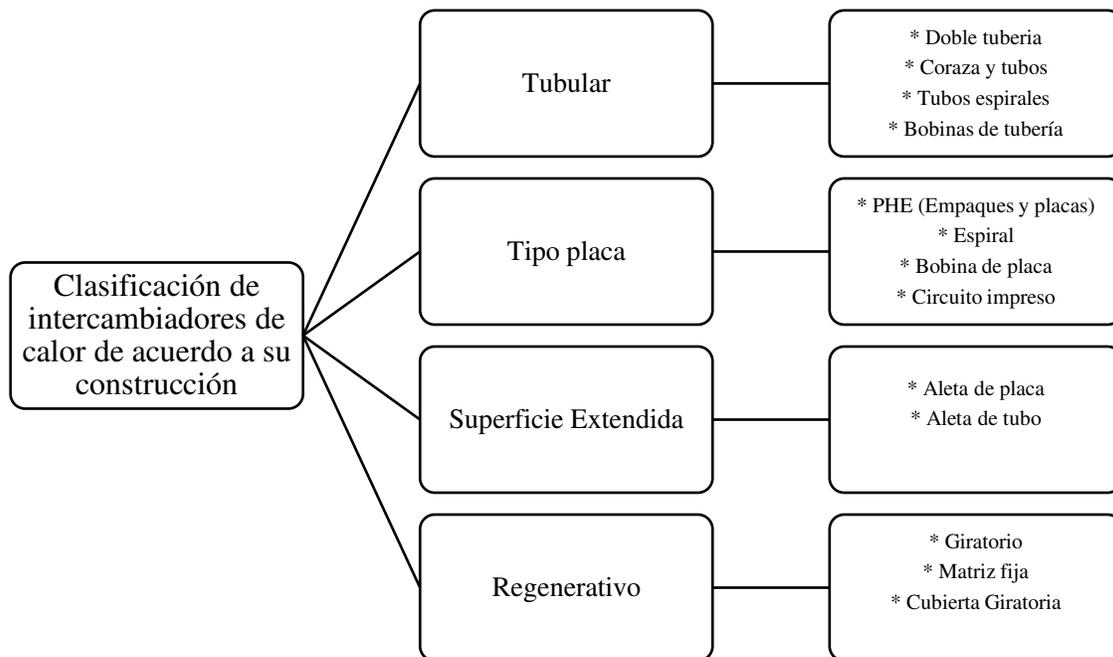
### **Flujo paralelo**

Se presenta esta configuración cuando el fluido frío y el fluido caliente van en la misma dirección.

### **Contraflujo**

La configuración a contra flujo es debida a que los fluidos entran al intercambiador por extremos opuestos, fluyendo en direcciones opuestas.

De acuerdo con su tipo de construcción existen diversos tipos que se muestran en la *Figura 2.1*, la clasificación de acuerdo con su tipo de construcción se utiliza con mucha frecuencia.



*Figura 2. 1. Clasificación de intercambiadores de acuerdo con su construcción.[5]*

### 2.2.1 Intercambiadores tubulares

Los intercambiadores tubulares generalmente son construidos por tubos circulares, elípticos, rectangulares [5]. Existe una gran diversidad de combinaciones en cuanto al diseño, ya que la geometría puede ser modificada fácilmente cambiando el diámetro de tubo, su longitud, y el arreglo de los tubos. Los intercambiadores tubulares pueden ser diseñados para presiones relativamente altas al medio ambiente y altas diferencias de presión entre los fluidos. Los intercambiadores tubulares son usados principalmente para aplicaciones de transferencia de calor entre líquidos-líquidos y líquidos-cambio de fase. Son usados para aplicaciones de transferencia de calor entre gas-líquido y gas-gas cuando la temperatura de operación y /o presión son muy altas.

### 2.2.2. Intercambiadores de calor tipo placa

Los intercambiadores de tipo placa, son construidos de placas delgadas. Las placas pueden ser lisas o tener forma corrugada, pueden ser planas o enrolladas. Este tipo de intercambiadores no son recomendables para presiones muy elevadas, temperaturas altas, o diferencias altas de presión y temperatura.

### 2.2.3. Intercambiadores de calor de superficie extendida

En los intercambiadores de calor tubulares y de tipo placa [5], son de calor superficial principalmente, excepto por el intercambiador de calor de coraza y tubos, que cuenta con pequeñas aletas debido a los tubos internos. La efectividad de los intercambiadores usualmente se encuentra por debajo del 60 % y la densidad de área de transferencia de calor es menor a  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . La efectividad de los intercambiadores es muy importante para algunas aplicaciones, por lo que se requiere una superficie más compacta, por lo tanto, es necesaria una superficie de transferencia de calor más grande. Para lograr ese objetivo por lo general se agrega una superficie extendida (aletas), y se usan aletas tanto como sea posible en un lado o ambos del fluido, dependiendo del diseño requerido. El coeficiente de transferencia de calor puede ser mayor o menor que en las superficies que no tienen aletas. Generalmente, incrementando la densidad de las aletas se reduce el coeficiente de transferencia de calor asociado a las aletas. Interrupciones de flujo (aletas de con persianas, etc.) pueden incrementar el coeficiente de transferencia de calor dos o cuatro veces para la superficie correspondiente de aleta lisa.

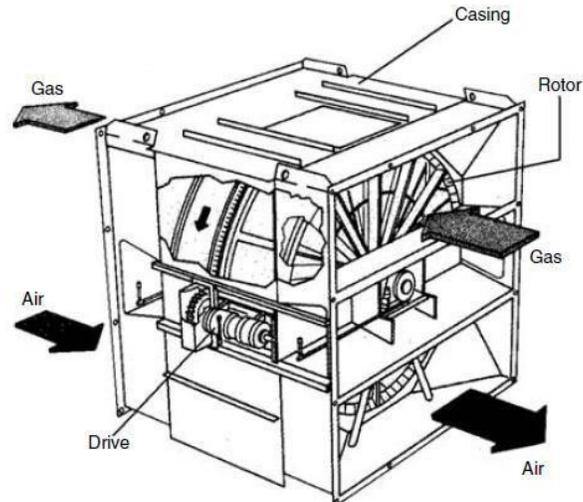
### 2.2.4. Regeneradores

Intercambiadores de tipo regenerativo son los que se relacionan con el paso alternado de las corrientes de los fluidos caliente y frío a través de la misma área de flujo [7]. Existen dos tipos de intercambiadores regenerativos, el estático y el dinámico, a continuación, se explican cada uno de ellos.

El intercambiador regenerativo de tipo estático se considera como una masa porosa que tiene la capacidad de almacenar calor. Los fluidos caliente y frío fluyen a través de la masa porosa de forma alternada.

El regenerador de tipo dinámico tiene un tambor giratorio *Figura 2.2*, ambos fluidos, el frío y el caliente pasan por diferentes partes del tambor giratorio, de tal forma que partes del tambor giratorio

pasan de forma periódica a través de la corriente caliente almacenando calor y posteriormente a través de la corriente fría, rechazando el calor almacenado. De modo que, el intercambiador de calor funciona como medio de transporte entre la corriente caliente hacia la corriente fría.



*Figura 2.2. Regenerador Giratorio.*

### 2.3. Intercambiador de tubo y coraza

Los intercambiadores de tubo y coraza son construidos por un haz de tubos que se encuentra dentro de una cubierta cilíndrica, de tal forma que el haz de tubos se encuentra paralelo al eje de la cubierta cilíndrica. Uno de los fluidos de trabajo pasa a través del haz de tubos y el otro fluye a lo largo y ancho de los tubos internos.

De acuerdo con Shah & Sekulic [5] los tres tipos más comunes de intercambiadores de tubo y coraza son

- a) Diseño de placa de tubo fija
- b) Diseño de tubo en U
- c) Tipo de cabezal flotante

En los tres tipos el cabezal delantero es estacionario mientras que el cabezal trasero puede ser estacionario o flotante.

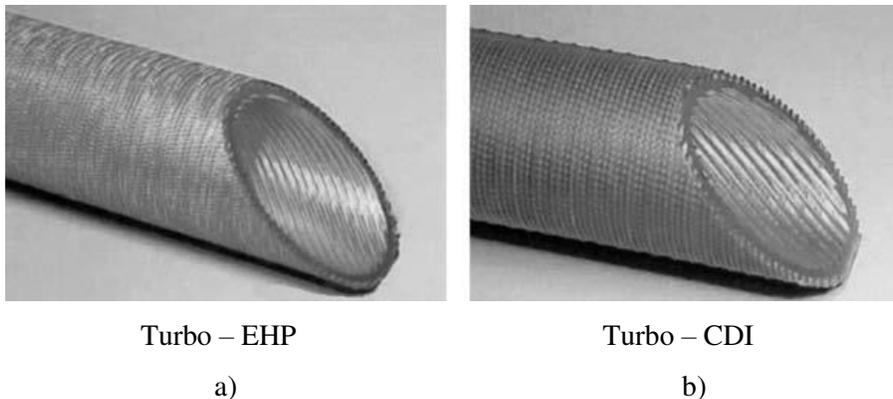
Los intercambiadores tubulares son ampliamente usados en la industria, debido a su versatilidad de operación, ya que pueden operar a presiones muy elevadas, ser utilizados para la criogenia, altas

temperaturas, e incluso pueden operar a cualquier tipo de diferencia de temperaturas, su única limitante son los materiales para su construcción. Pueden ser diseñados para superficies de área muy pequeñas ( $0,1 \text{ m}^2$ ), o muy grandes ( $10^5 \text{ m}^2$ ).

Los intercambiadores de tubo y coraza tienen múltiples aplicaciones en la industria petrolera y química como generadores de vapor, condensadores, boiler, calentadores de agua de alimentación y enfriadores de aceite en plantas de potencia, también funcionan como condensadores y evaporadores en aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado.

### 2.3.1. Tubos

De acuerdo con Shah & Sekulic [5] existen varias formas de tubos para los intercambiadores de calor de tubo y coraza, el haz de tubos en forma de U y rectilíneo es de los más comunes, no obstante también la geometría de los tubos ha sido mejorada como se muestra en la *Figura 2.3*.



*Figura 2.3. Geometrías en tubos de intercambiadores de coraza y tubos. a) Tubo de un evaporador mejorado interna y externamente. b) Tubo de condensador mejorado interna y externamente. [5]*

La mayor parte del tiempo los tubos se encuentran lisos, aunque, existen algunas aplicaciones para las que se requiere que los tubos tengan cubiertas especiales, como aletas pequeñas y finas, especialmente para aplicaciones en donde se utiliza gas o algún líquido con un bajo coeficiente de calor. *Figura 2.4*.

Los tubos son hechos de metales, plástico y cerámicas dependiendo de su aplicación.

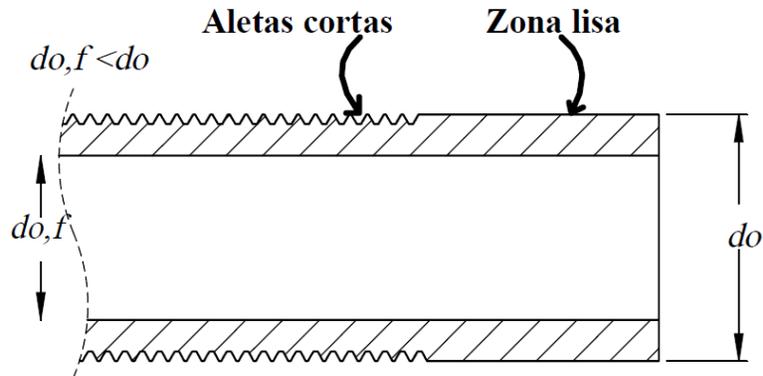


Figura 2.4. Aletas en la cubierta del tubo. [5]

El arreglo de los tubos internos puede ser de varios tipos como se muestra en la Figura 2.5.

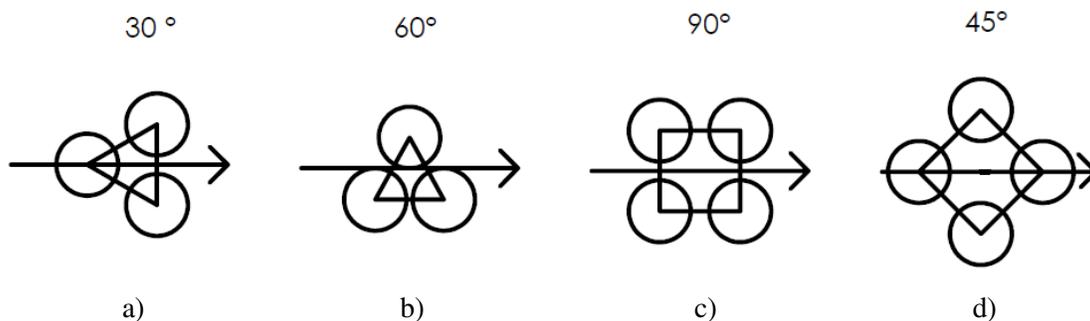


Figura 2.5. Arreglo de los tubos. a) Triangular, b) triangular rotado, c) cuadrado, d) cuadrado rotado. [8]

En el arreglo cuadrado de tubos, el haz de tubos puede ser removido para su limpieza mecánica, siempre y cuando lo indique el comprador, si se remueven los tubos debe existir un carril continuo para los tubos.

En el arreglo triangular no debe ser usado cuando la coraza es limpiada mecánicamente.

### 2.3.2. Coraza

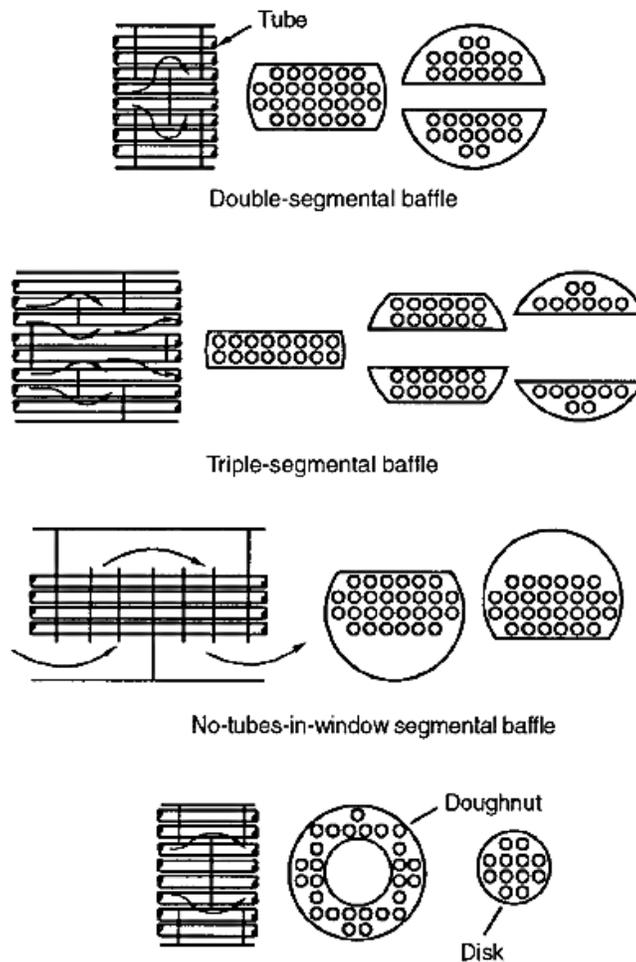
La coraza es usualmente cilíndrica con una sección transversal circular. La coraza se fabrica de tubo para tubería cuando su diámetro es menor a 0,6 m (2 ft) y a partir de placa metálica rolada cuando su diámetro es mayor a 0,6 m (2 ft).

### 2.3.3. Deflectores

Los deflectores se clasifican en longitudinales y transversales. El propósito de los deflectores longitudinales es controlar la dirección del fluido de la coraza, así como distribuir correctamente las dos corrientes de fluido.

Los deflectores transversales se pueden clasificar como placas de deflectores o rejillas.

Las placas de deflectores son usadas para soportar los tubos durante el ensamble y su operación. Las placas de deflectores incrementan la turbulencia del fluido de la coraza y minimiza la diferencia de temperatura de tubo a tubo. *Figura 2.6.*



*Figura 2.6. Placas de deflectores. [5]*

### 2.3.4. Métodos de solución

De acuerdo con Incropera et al. [6] cuando se tiene conocimiento solamente de las temperaturas de entrada de un intercambiador es más factible aplicar un análisis efectividad-NTU ( $\epsilon$ -NTU).

Shah & Sekulic [5] señalan las suposiciones que se deben hacer para realizar un análisis a los intercambiadores de calor.

El intercambiador de calor opera bajo condiciones de estado estable.

Perdidas de calor de o hacia los alrededores son despreciables.

No hay fuentes de energía térmica en las paredes del intercambiador o fluidos, como calentamiento eléctrico, reacciones químicas o procesos nucleares.

La temperatura de cada fluido es uniforme a través de cada sección en flujo paralelo y a contraflujo.

La resistencia térmica de la pared es distribuida de forma uniforme en todo el intercambiador.

1. No hay cambio de fases (condensación o evaporación) en la corriente del fluido a través del intercambiador o la fase ocurre bajo las siguientes condiciones. El cambio de fase ocurre a temperatura constante, así como para un fluido de un solo componente a una presión constante. El calor específico  $c_{p,eff}$  para un cambio de fase es infinito por lo tanto la capacidad calorífica se expresa como  $C_{max} = \dot{m}c_{p,eff} \rightarrow \infty$ , en donde  $\dot{m}$  es el flujo masico.
2. Calor por conducción a lo largo de las paredes y del fluido es despreciable.
3. Los coeficientes de transferencias de calor son constantes a través del intercambiador de calor, incluyendo el caso de cambio de fase de fluidos de la consideración 6.
4. El calor específico de cada fluido es constante a través del intercambiador, en consecuencia, su capacidad calorífica en cada lado es tratado como constante.

Para realizar un análisis de transferencia de calor de un intercambiador el objetivo principal es relacionar el flujo de calor  $q$ , el área de transferencia de calor  $A$  y la capacidad calorífica  $C$  de cada fluido, coeficiente de transferencia de calor total  $U$ , y las temperaturas de salida de los fluidos. Dos principios básicos son empleados para lograr este propósito.

1. Balance de energía basado en la primera ley de la termodinámica.
2. Ecuaciones de velocidad para transferencia de calor.

#### El método $\epsilon$ -NTU

De acuerdo con Shah & Sekulic [5] en el método efectividad-NTU ( $\epsilon$ -NTU), el flujo de transferencia de calor del fluido caliente al fluido frío en el intercambiador de calor se expresa en la ecuación (2.1).

$$q = \varepsilon C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) = \varepsilon C_{min} \Delta T_{max} \quad (2.1)$$

En donde  $\varepsilon$  se refiere a la efectividad del intercambiador de calor,  $C_{min}$  es el mínimo entre  $C_c$  y  $C_h$ ,  $T_{max} = T_{h,i} - T_{c,i}$  es la diferencia de temperatura de las entradas, por lo que se denomina como la diferencia máxima de temperatura que puede existir en el intercambiador de calor. La efectividad del intercambiador es un parámetro adimensional y por lo general su valor depende de las unidades de transferencia de calor NTU, la capacidad calorífica  $C^*$  y el arreglo de flujo.

La efectividad se expresa en (2.2) como:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (2.2)$$

La efectividad es un término que se refiere a la eficiencia del intercambiador, así que, el termino no debe ser confundido con eficiencia, ya que la eficiencia hace referencia a la eficiencia de convertir energía de una forma a otra, y en un dispositivo como es el intercambiador de calor no existe una conversión de energía de una forma a otra, puesto que solo cumple su función que es enfriar y/o calentar un fluido.

Sí no existen fugas en el intercambiador de calor  $q$  representa la entalpía ganada o perdida, mientras  $q_{max}$  se refiere a un caso ideal en el cual se tiene un intercambiador de calor perfecto, en donde la entalpía perdida de un fluido es la misma que la ganada en el otro fluido. Por ello el caso ideal de un intercambiador de calor perfecto, permite medir la efectividad del intercambiador que se está analizando, como se muestra en la expresión (2.2), mencionada anteriormente. Los valores de la efectividad van de 0 a 1.

Siguiendo con el caso de in intercambiador perfecto a contraflujo a continuación se explica cómo obtener  $q_{max}$ . Teniendo en cuenta la primera ley de la termodinámica se realiza un balance de energía como se muestra en (2.3), para el intercambiador de calor a contra flujo suponiendo que tiene una superficie de área infinita, se obtiene el flujo de calor actual.

$$q = C_h(T_{h,i} - T_{h,o}) = C_c(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2.3)$$

Para poder lograr el equilibrio térmico que representa la ecuación (2.3), se deben de tomar en cuenta varias sentencias como se explican posteriormente [5].

- $C_h < C_c, (T_{h,i} - T_{h,o}) > (T_{c,o} - T_{c,i})$

- $C_h > C_c, (T_{c,o} - T_{c,i}) > (T_{h,i} - T_{h,o})$

Siguiendo las condiciones anteriores entonces para lograr conocer  $q_{max}$  es necesario conocer la diferencia de temperatura máxima la cual sería la diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada del fluido caliente y la temperatura de entrada del fluido frío, y la capacidad calorífica mínima entre ambos fluidos, como se muestra en la siguiente expresión (2.4).

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) = C_{min} \Delta T_{max} \quad (2.4)$$

La determinación de  $q_{max}$  en (2.4) es válida para cualquier arreglo de flujo. Por consiguiente, la ecuación de la efectividad (2.2), se puede reescribir como (2.5) y es válida para todos los arreglos de fluido.

$$\varepsilon = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.5)$$

La expresión (2.5) depende de directamente de las temperaturas de operación y sus capacidades caloríficas.

El número de transferencia de unidades de transferencia NTU, se define como la razón conductividad térmica global y la capacidad calorífica mínima (2.6).

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (2.6)$$

$NTU$  se denomina de forma adimensional la transferencia de calor del intercambiador de calor y por ende un parámetro de diseño.  $NTU$  provee un componente de medida de transferencia de calor por medio del producto del área de transferencia de calor  $A$  y el coeficiente global de transferencia de calor  $U$ .  $NTU$  no necesariamente indica el tamaño físico del intercambiador de calor, aunque, el área de transferencia de calor impacta en el tamaño físico del intercambiador de calor. Mientras el valor de  $NTU$  sea menor la efectividad también lo será, y a valores altos de  $NTU$  la efectividad del intercambiador será mayor.

## 2.4. Normatividad

En la siguiente sección se explicarán algunos requisitos importantes, para el diseño y fabricación de intercambiadores de calor, de tal forma que se asegure que el dispositivo funcione correctamente para la aplicación requerida.

Los dispositivos en operación como los intercambiadores de calor requieren de ciertos requisitos de diseño y de fabricación para asegurar que su uso sea el correcto para la aplicación que se le va a dar, por esta razón, las normas son documentos que presentan una serie de requisitos, que se deben cumplir para asegurar el buen funcionamiento de los dispositivos además para garantizar la seguridad de los operarios.

### 2.4.1. Materiales

De acuerdo con el código para recipientes a presión de The American Society of Mechanical Engineers (ASME) [9], el material seleccionado para la construcción de dispositivos como el intercambiador de tubos debe ajustarse a las necesidades de aplicación con respecto a un apropiado uso de sus propiedades mecánicas, resistencia, corrosión, erosión y oxidación, así como cualquier otro deterioro que pueda sufrir durante la vida en servicio del dispositivo.

De acuerdo con ASME [9] Para la construcción de los recipientes a presión existen diversos métodos como:

1. Placas. Desde el concepto básico de un cilindro, se pueden construir recipientes a presión a partir de placas u hojas de acero.
2. Forjado. Es posible utilizar este método para construcción de recipientes a presión, siempre que el material se haya trabajado lo suficiente para proporcionar una estructura adecuada para la aplicación de trabajo.
3. Fundición. El método de fundición también se puede utilizar en la construcción de recipientes a presión y partes que lo conformen.
4. Tubería y tubos. son utilizados para construcción de carcasas y partes de recipientes a presión.

Para la adquisición de partes preformadas o prefabricadas para recipientes a presión es importante tomar en cuenta que el equipo sea adecuado para las condiciones de trabajo, así como que cuente con sus respectivos códigos que indiquen que se aplica el código ASME para recipientes a presión, además debe incluir restricciones de uso, con la finalidad de asegurar que la adquisición sea adecuada.

## 2.4.2. Diseño

Más adelante se presentan requerimientos de diseño estipulados por ASME [9] que tienen relevancia para los intercambiadores de calor.

*Espesor mínimo de componentes de retención de presión.* El espesor mínimo permitido para carcasas y cabezales es de 1.6 mm (1/16 in) exclusivo de cualquier tolerancia a la corrosión. Existen algunas excepciones para este espesor mínimo:

1. El mínimo espesor no aplica para intercambiadores de calor de tipo placa.
2. El mínimo espesor no aplica para intercambiadores de calor de tubo interno o doble tubería y para tubos en intercambiadores de coraza y tubos, en donde los diámetros nominales de los tubos o tubería sean de 150 mm (6 in) o menos. Esta excepción aplica independientemente de que el tubo exterior o carcasa sean construidos según las normas del código.
3. El mínimo espesor para carcasas y cabezales de vapor sin calentar puede ser 6 mm (1/4 in) exclusivo de cualquier tolerancia a la corrosión.
4. El mínimo espesor para carcasas y cabezales usados para aire comprimido, vapor y agua, pueden tener un espesor de 2.4 mm (3/32 in) exclusivo de cualquier tolerancia a la corrosión.

*Tolerancia del fresado.* La placa de material no debe ser más delgada que el espesor de diseño. Recipientes a presión hechos de placa manejan tolerancias no mayores al valor mínimo de 0,3 mm (0,01 in) o de 6% de el espesor del diseño completo. Si las especificaciones de la placa permiten una mayor tolerancia, el espesor de los materiales debe ser lo suficientemente mayor que el diseño del espesor, por lo tanto, el espesor del material utilizado no debe ser mayor que el mínimo de. 0,3 mm (0,01 in) o 6% debajo del diseño de espesor.

*Diseño de temperatura.* La temperatura máxima en el diseño no debe ser menor que la temperatura media del metal (a través del espesor) esperada bajo condiciones de operación. La temperatura mínima usada en el diseño debe ser menor a la esperada en servicio.

*Diseño de presión.* La presión de trabajo máxima permitida para un recipiente a presión, es la presión máxima permisible en la parte superior del recipiente en su posición normal de operación a la temperatura designada coincidente para la presión especificada. La presión máxima permisible para las partes del recipiente a presión corresponde a la máxima presión interna o externa, incluyendo la cabeza estática.

*Cargas.* Las cargas que deben ser consideradas en el diseño de los recipientes a presión son las siguientes:

1. Presión interna y externa.
2. Peso del recipiente y contenido bajo condiciones de operación o condiciones de prueba.
3. Reacción estática superpuesta debida al peso de los equipos acoplados, como motores, maquinaria, otros recipientes a presión, tubería, recubrimientos y aislamiento.
4. El acoplamiento de
  1. Internos.
  2. Soportes de recipientes.
5. Reacciones cíclicas y dinámicas debidas a la presión o variaciones térmicas, o del equipo montado sobre el recipiente, y cargas mecánicas.
6. Viento, nieve, reacciones sísmicas.
7. Reacciones de impacto como las provocadas por el choque de fluido.
8. Gradientes de temperatura y diferencial térmico de expansión.
9. Presiones anormales como las causadas por la deflagración.

*Corrosión.* Se debe indicar las tolerancias de corrosión del equipo, si el equipo no contiene tolerancias de corrosión se debe especificar ese hecho.

Equipos o partes del equipo sujetos a adelgazamiento debido a la corrosión, erosión, o abrasión mecánica, deber ser hecho para durar el tiempo de vida deseado, como un aumento en el espesor marcado por el diseño, o utilizando algún método de protección. Si se agrega material para evitar la corrosión, no es necesario agregar a todo el dispositivo y a las partes que lo conforman, ya que dependerá de donde se espera la corrosión y en qué medida.

Orificios delatadores pueden ser utilizados para verificar si el espesor no se ha dañado en un grado crítico, sin embargo, solo se deben emplear cuando las sustancias dentro del dispositivo no son peligrosas.

Las aberturas para desagüe son otra opción para dispositivos sujetos a corrosión, esta abertura debe ser colocada en el punto con menor operación de trabajo.

*Entradas de inspección.* Es importante proveer al equipo con entradas para poder inspeccionar y limpiar, el recipiente en si o parte de sus accesorios. Existen casos para los cuales las entradas de inspección pueden ser omitidas:

1. Cuando se utiliza aire comprimido al cual se le ha removido la humedad para proveer un punto rocío atmosférico de  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-50\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) o menos.
2. Cuando existen orificios delatores en lugar de entradas de inspección.
3. Cuando las entradas de inspección son omitidas en placas de tubos de intercambiadores de calor.
4. Cuando su aplicación no implica generación de corrosión.

### 2.4.3. Fabricación

*Placas de corte y otros.* Placas, bordes de cabezales y otras partes pueden ser cortadas de manera mecánica, como maquinado, cizallamiento, trituración, o con oxígeno por arco de corte. Toda decoloración perjudicial al material debido a los métodos antes mencionados, de ser eliminada de forma mecánica.

*Identificación del material.* El material del recipiente, así como de sus partes debe ser expuesto, cuando el dispositivo este completado. Por lo que debe contar con marcas o códigos especiales, de tal forma que el material siempre pueda ser identificable.

### 2.4.4. Generalidades de Fabricación con Soldadura

De acuerdo con ASME [9] recipientes a presión o partes de recipientes a presión, fabricados con soldadura deben cumplir con ciertos requisitos de los que se hablarán a continuación, ya que algunos requisitos competen en la fabricación de intercambiadores de calor.

*Restricciones.* Cuando se contiene sustancias letales ya sean líquidas o en forma gaseosa, todas las uniones de soldadura deber ser completamente inspeccionadas con radiografía. Cuando un recipiente es fabricado de acero al carbono o de baja aleación, el recipiente debe ser tratado térmicamente después de la soldadura.

*Categoría de uniones de soldadura.* El termino de categoría se refiere a la localización de la unión en el recipiente y no al tipo de unión. En la *Figura 2.7* se ilustran las categorías de uniones de soldadura.

1. Categoría A. Uniones soldadas longitudinales dentro del carcasa principal, comunicación entre cámaras, transiciones de diámetro o toberas. Cualquier unión en una esfera, dentro de

una cabeza plana o formada o placas laterales, uniones soldadas en la circunferencia conectando cabezales hemisféricos a la carcasa principal.

2. Categoría B. Uniones circunferenciales en la carcasa principal, comunicando con cámaras, toberas, o transiciones de diámetro incluyendo uniones entre la transición, uniones soldadas en la circunferencia conectando cabezales hemisféricos a la carcasa principal.
3. Categoría C. Uniones de soldadura que conectan bridas, placas de tubos, o cabezales planos a la carcasa principal, a cabezales, a transiciones de diámetro, a toberas o para comunicar cámaras, cualquier unión que conecta un lado de la placa con otro lado de la placa.
4. Categoría D. Uniones de soldadura que conectan cámaras o toberas con la carcasa principal, a esferas, a transición de diámetro, a cabezales o partes planas del recipiente, y todas uniones comunican cámaras (para toberas en el extremo pequeño de una transición de diámetro).

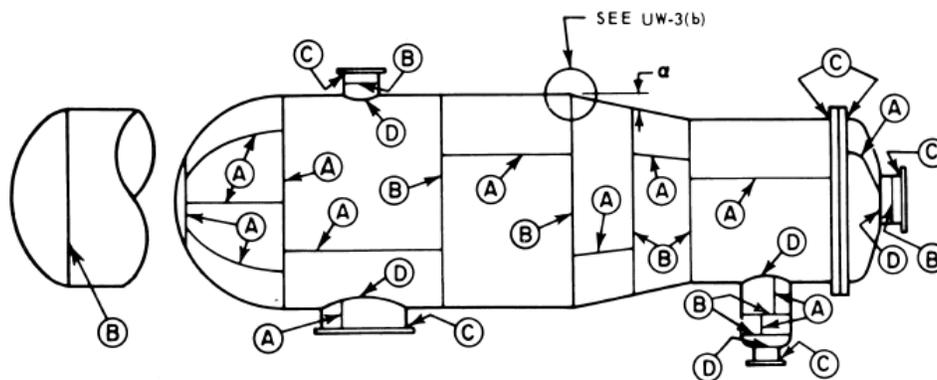


Figura 2.7. Localización típica de uniones de soldadura de las categorías A, B, y D. [9]

Cuando se requiere una unión de soldadura de la categoría B, debe ser considerado el ángulo  $\alpha$  en transiciones de diámetro y este ángulo no debe exceder los  $30^\circ$ .

#### 2.4.5. Diseño de uniones de soldadura

ASME [9] indica que existen uniones de soldadura que son denominados permisibles en procesos de soldadura de arco y gas, los cuales se muestran en la *Tabla 2.1*.

**Tabla 2.1 Eficiencias máximas permisibles para uniones de soldadura de arco y gas. [9]**

No. Tipo	Descripción De Unión	Limitaciones	Categoría De Unión	Grado de Examinación Radiográfica		
				(a) Full <sup>2</sup>	(b) Spot <sup>3</sup>	(c) None
(1)	Uniones en los extremos atadas por doble soldadura o por otros medios por los cuales obtendrá la misma calidad de la soldadura depositada dentro y fuera de las superficies soldadas. Soldaduras que utilizan tiras de metal de respaldo que permanecen en su lugar están excluidos.	Ninguna	A, B, C y D	1,00	0,85	0.70
(2)	Única unión de soldadura con tira de respaldo (1).	a) Ninguna b) a menos que sea una unión circunferencial con un desplazamiento de placa	A, B, C y D A, B y C	0,90 0,90	0,80 0,80	0,65 0,65
(3)	Única unión de soldadura sin tira de respaldo.	Uniones de soldadura circunferenciales solamente, no arriba de 16 mm, (5/16 in) de grosor y no más de 610 mm (24 in) de diámetro exterior.	A, B y C	NA	NA	0,60
(4)	Solapa de doble filete completo.	a) Uniones longitudinales no mayores a 10 mm (3/8 in) de espesor. b) Uniones circunferenciales no mayores a 16 mm (5/8 in)	A B y C	NA NA	NA NA	0,55 0,55

(5)	Solapa de filete completo con tapones de soldadura.	a)	Uniones circunferenciales para unir dos cabezales no mayores de 610 mm (24 in) de diámetro exterior a carcasas no mayores a 13 mm (1/2 in) de espesor.	B	NA	NA	0,50
		b)	Uniones circunferenciales para fijar carcasas de cubierta no mayor a 16 mm (5/8 in) en espesor nominal en donde la distancia del centro del tapón de soldadura al contorno de la placa no es menor que 1 ½ veces el diámetro del orificio del tapón.	C	NA	NA	0,50
(6)	Solapa de filete completo sin tapones de soldadura.	a)	Para fijar cabezales convexos de presión a carcasas no mayores a 16 mm (5/8 in) de espesor requerido, solamente el uso del filete de soldadura del lado de la carcasa.	A y B	NA	NA	0,45
		b)	Para fijar cabezales con presión em ambos lados, a carcasas no mayores a 610 mm (24 in) de diámetro interior y no mayor a 6 mm (1/4 in) como espesor requerido con filete de soldadura sobre la parte	A y B	NA	NA	0,45

exterior de los cabezales de  
 las bridas.

(7) Uniones de esquina, penetración completa y parcial, y/o filete de soldadura.	C y D	NA	NA	NA
(8) Uniones de ángulo.	B, C y D	NA	NA	NA

## 2.4.6. Fabricación de Uniones con Soldadura

### *Aspectos generales.*

Cada manufacturera debe ser responsable de la calidad de la soldadura que realiza a través de su compañía, además de asegurarse de que el proceso y el producto es adecuado también deben asegurar que las habilidades de quien realiza el trabajo son las necesarias para entregar un producto de calidad de acuerdo a los requisitos que la norma establece, ya que como se mencionó anteriormente, la responsabilidad del producto entregado es totalmente de la manufacturera, por lo que debe ser muy cuidadosa con las personas y procedimientos involucrados en la elaboración del producto final.

### *Proceso de soldadura.*

Procesos de arco de soldadura: hidrogeno atómico, electro gas, arco de gas de metal, arco de gas tungsteno, arco de plasma, arco de metal blindado, soldadura de perno, arco sumergido, haz de electrones, destello, electro escoria, inducción, inercia y fricción continua, rayo láser, gas oxi combustible, resistencia y termita.

Arco de soldadura de pernos y de resistencia son usados solamente para accesorios que no soportan presión.

Soldadura de electro escoria y electro gas, se emplean solamente en aceros ferríticos e inoxidables austeníticos.

*Calidad del proceso de soldadura.* Cada proceso de soldadura empleado en la construcción debe ser registrado por el fabricante.

Cada proceso de soldadura, así como soldador deber ser registrado y marcado con un código por el fabricante, además de su estudio para comprobar que el trabajo realizado cumple con los requisitos establecidos por la norma [9], cuando el proceso de soldadura es realizado de forma automática el estudio para verificar el resultado del proceso no es necesario.

*Temperatura más baja permisible para soldadura.* Se recomienda de acuerdo con la norma ASME [9] que no se debe realizar ningún proceso de soldadura cuando el metal base se encuentra por debajo de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). En el rango de temperaturas de entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) y  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), la superficie de todas las áreas a 76 mm (3 in) de donde comenzara el proceso de soldadura deben ser calentadas al menos a  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $60\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) antes de que se comience a soldar. Se recomienda no realizar procesos de soldadura cuando las superficies se encuentran mojadas, cubiertas con hielo, cuando este nevando

sobre las superficies que requieren ser soldadas o en periodos de fuertes vientos, a menos que los soldadores y todo su equipo se encuentren protegidos apropiadamente.

*Reparación de defectos de soldadura.* Defectos como grietas, pequeños agujeros y fusiones incompletas, detectadas de forma visual o por una examinación hidrostática o neumática, debería ser removida esa soldadura de forma mecánica o por un proceso de ranurado térmico, después toda la unión debe volverse a soldar.

*Granallado.* Metal soldado y zonas afectadas por el calor pueden ser granalladas manualmente, eléctricamente, o por métodos neumáticos cuando es necesario para controlar la distorsión, para aliviar la tensión residual, o para mejorar la calidad de la soldadura. Es importante saber que el granallado no debe realizarse en la capa (raíz) de la soldadura ni en la parte final (superficie) a menos que posterior al proceso de soldadura reciba un tratamiento térmico. Métodos similares al granallado que tratan de mejorar las propiedades de la superficie de los recipientes a presión y sus partes, deben ser realizados después de las pruebas no destructivas y de las pruebas de presión.

#### **2.4.7. Reglas para Conexiones de Brida Atornillada con Juntas Tipo Anillo**

Para mantener cerrados los intercambiadores de calor por lo general se requiere de bridas, las cuales deben ser reguladas para asegurar su calidad y su buen funcionamiento dentro del dispositivo en operación. Por consiguiente se hablara a cerca de requisitos establecidos por la norma ASME [9] en lo que refiere a las bridas de recipientes a presión, específicamente de lo que compete a intercambiadores de calor como el que se trata de forma principal en este proyecto.

#### **2.5. Prototipos Didácticos para Educación Costos y Cómo Son**

Los equipos didácticos para educación se pueden adquirir en empresas especializadas, sin embargo, los costos son elevados, a continuación se presenta la cotización de un equipo didáctico el cual se puede manipular de tal forma que es posible tener diversos tipos de intercambiadores de calor en una sola unidad.

En la *Figura 2.8*, se observa una unidad para intercambiador didáctico de calor, el cual funciona con agua como fluido de trabajo tanto para el fluido caliente y el fluido frío. No cuentan con reservorio

de agua fría, ya que su abastecimiento depende la red de agua con la que se cuente, para variar el flujo de agua se utilizan caudalímetros de área variable. Cuenta con una bomba para el agua caliente.

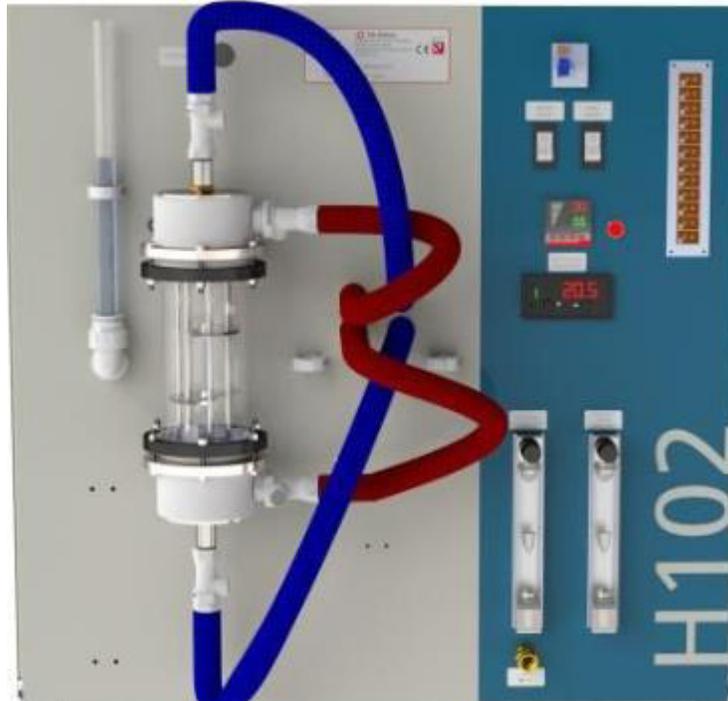


Figura 2.8. Unidad para intercambiador didáctico. [10]

La unidad mostrada en la *Figura 2.8*, cuenta con diversos tipos de intercambiadores que se muestran en las *Figuras 2.9-2.13*. Todos los intercambiadores están listos para ser utilizados en la unidad didáctica mostrada en la *Figura 2.8*.



Figura 2.9. Intercambiador de calor de tubo concéntrico. [10]

En la *Figura 2.9* se muestra un intercambiador de tubos concéntricos, formando una U, de tal forma que se puede monitorear la temperatura de entrada salida e intermedia del fluido frío y del fluido caliente.



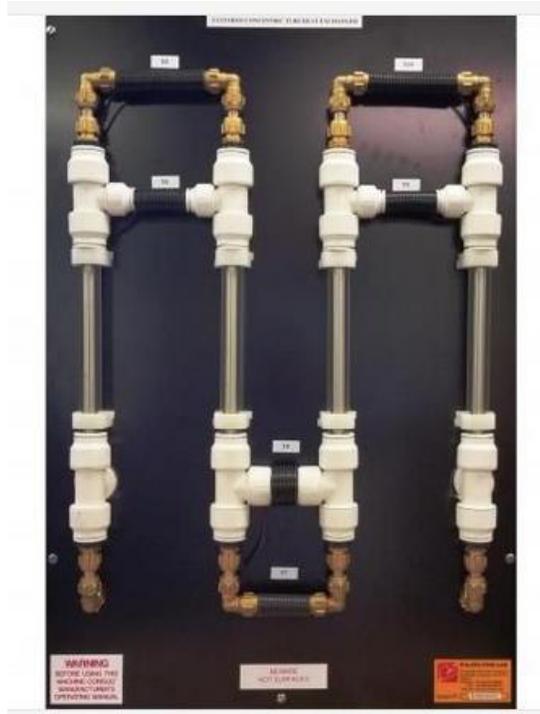
*Figura 2.10. Intercambiador de calor de placas. [10]*

La *Figura 2.10* ilustra un intercambiador de calor de tipo placa, esta soldado de cuatro placas. Cada placa está corrugada para promover la turbulencia.



*Figura 2.11. intercambiador de carcasa y tubo. [10]*

En la *Figura 2.11* se muestra el intercambiador de carcasa y tubo de la unidad didáctica. Cuenta con siete tubos de acero inoxidable.



*Figura 2.12 Intercambiador de calor de tubo concéntrico extendido. [10]*

La *Figura 2.12* muestra un intercambiador de tubos concéntricos extendido, lo que permite tener tres puntos de medición intermedia.



*Figura 2.13 Intercambiador de flujo turbulento de agua. [10]*

El intercambiador de la *Figura 2.13*, permite la medición de temperatura de entrada, salida e intermedia.

El costo total de los cinco tipos de intercambiadores y la unidad que permite su montaje y monitoreo es de un millón treinta y un mil cuatrocientos veinte y dos pesos. (\$ 1,031, 422.70).

La unidad didáctica mostrada anteriormente se puede visualizar como un equipo bastante práctico para los alumnos de la universidad, sin embargo, su costo es elevado y al tener un proveedor de este dispositivo no se permite la intervención de alumnos en la fabricación e instalación del prototipo. Por otro lado para su uso, al tener un costo elevado impide la manipulación del equipo con total libertad, ya que se protege más al equipo debido a que sus reparaciones podrían no ser de fácil acceso, ya que se habla de un prototipo extranjero, mientras que el intercambiador que se describe en el trabajo presente cuenta con piezas que fácilmente se pueden cambiar en caso de ser necesario, lo que permite o da más libertad al operario y alumnos de manipular el equipo y aprender que es la finalidad total de este trabajo, el aprendizaje práctico para los alumnos.

---

## CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

---

### 3.1. Equipo Disponible

En el laboratorio de Termofluidos de la División de Ingenierías, se encontraba un intercambiador de calor de tubo y coraza. Se decidió retomararlo para su mejora y actualización, adaptándolo para su uso didáctico en las UDAS que se crea conveniente su uso, especialmente en el área de termofluidos. El intercambiador está diseñado para un paso y dos pasos por los tubos dependiendo del montaje de los cabezales, con el cabezal 1 y 3 se tiene un paso por los tubos mientras que con el cabezal 1 y 2 se obtiene la configuración de dos pasos por los tubos.

La coraza del intercambiador de calor es 5 in de diámetro interior, fabricado de tubo de acero al carbón, como se muestra en la *Figura 3.1*, en las *Figuras 3.2* y *3.3* se muestra más a detalle las dimensiones de intercambiador.

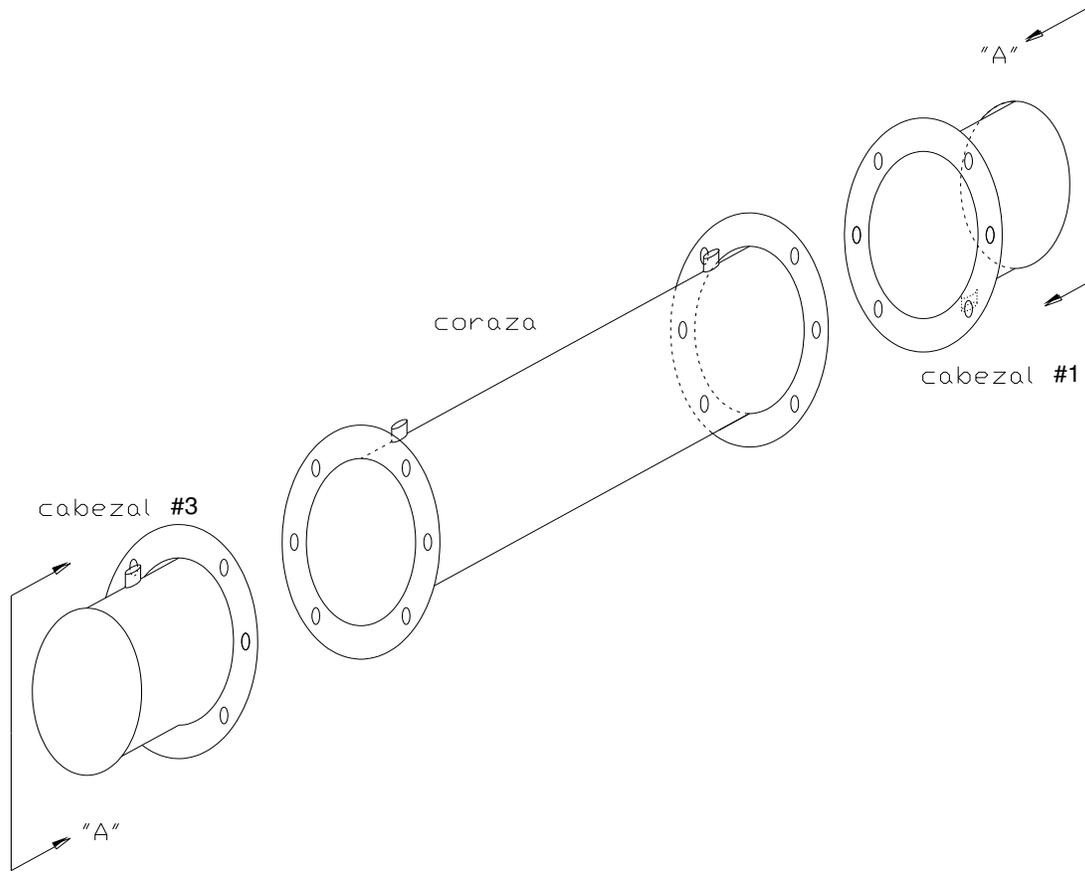


Figura 3.1 Intercambiador de calor de uso didáctico. [11]

En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran las dimensiones del intercambiador de calor.

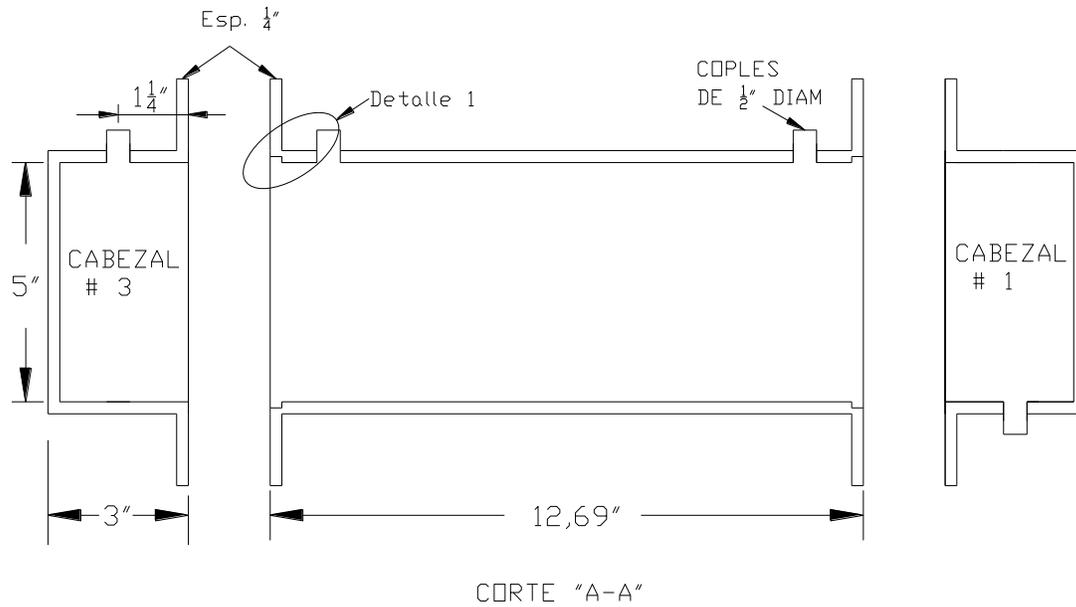


Figura 3.2 Dimensiones del intercambiador de calor uso didáctico. [11]

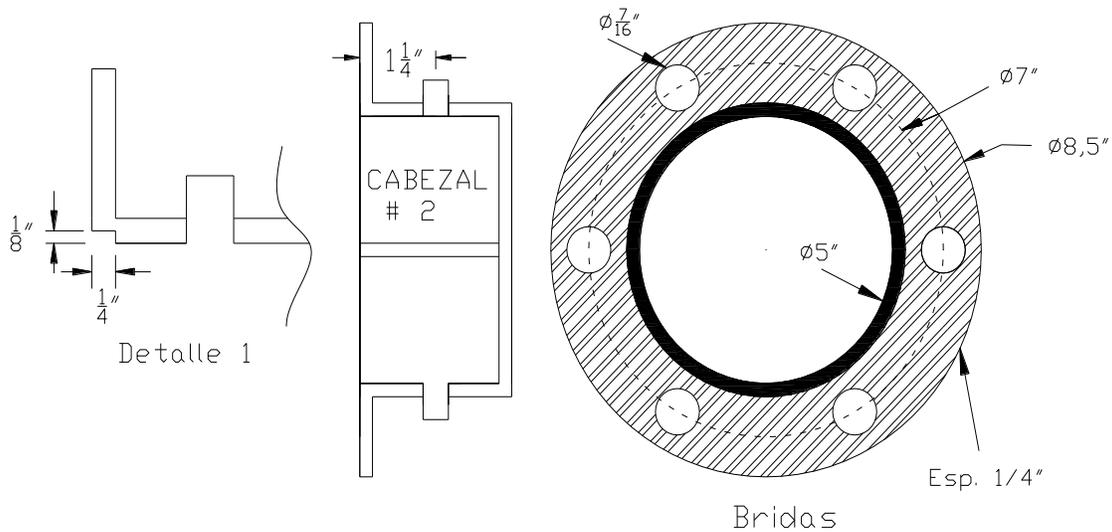


Figura 3.3 Detalle 1 y dimensiones de las bridas. [11]

El haz de tubos utilizado consta de 172 tubos de cobre y 9 deflectores del 75% segmentados como los mostrados en la *Figura 3.4*.

En la *Figura 3.5* se muestran las dimensiones de los tubos del intercambiador de uso didáctico, de 12 in de longitud de cobre de 1/4 in de diámetro exterior, de espesor 1/64 in.

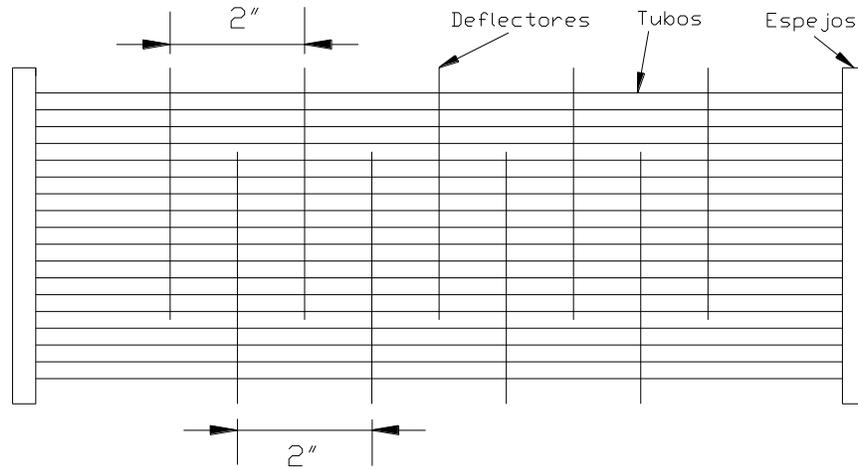


Figura 3.4 Haz de tubos. [11]

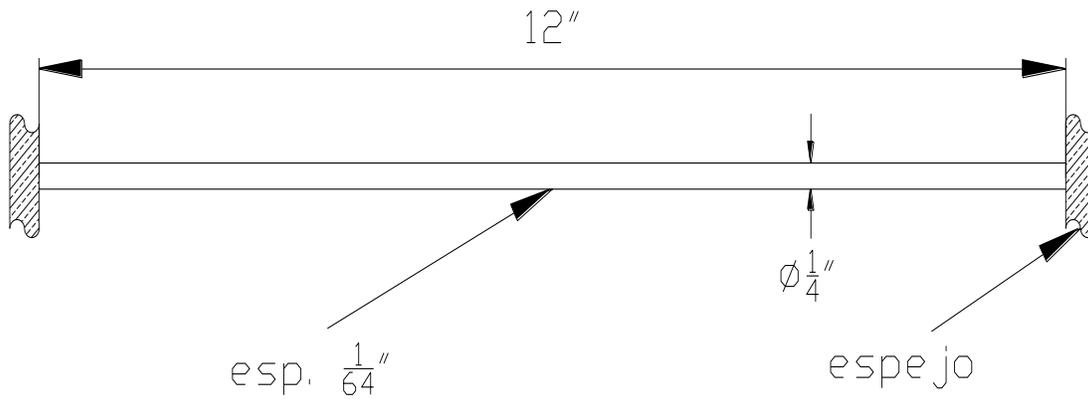


Figura 3.5 Dimensiones de los tubos. [11]

En la *Figura 3.6* se muestra el arreglo de tubos del intercambiador, el cual consta de 172 tubos en un arreglo de tipo triangular, así como las dimensiones del espejo.

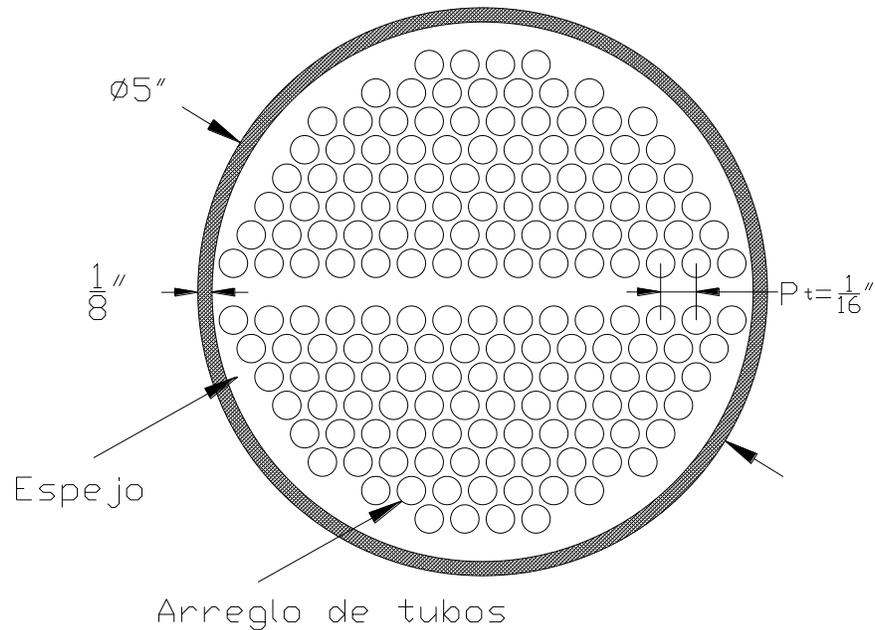


Figura 3.6 Arreglo de tubos del intercambiador de uso didáctico. [11]

El intercambiador se encontraba montado a una unidad Hilton la cual tiene un tanque de calentamiento de aceite con una capacidad de 2.5 litros con tapa y un calentador de 500 W controlado por una unidad de atenuación.

Contaba con un tanque de medición para aceite de vidrio pírex de capacidad efectiva de 0,5 Litros equipado con tapa, indicador de contenido y un control combinado de desagüe y rebalse. *Figura 3.7*. Como se aprecia en la *Figura 3.7* se ilustra el intercambiador de tubos concéntricos, así como las partes que lo conforman para monitorear las temperaturas del agua y del aceite, así como sus respectivos flujos másicos. El equipo únicamente era capaz de obtener medidas digitales de las temperaturas de agua y aceite, ya que para el registro de los flujos másicos era necesario tomar datos y posteriormente procesarlos para obtener la información completa.

Por otro lado, el intercambiador de calor de tubos y coraza se encontraba equipado con cuatro Termopares tipo K, para la medición de la temperatura de entrada y salida de agua y aceite. Para la captura de los datos de temperatura era necesario conectar los termopares a algún dispositivo capaz de mostrar la temperatura en grados Celsius, lo que implicaba una acción muy poco práctica. El intercambiador de calor de tubos y coraza se encontraba conectado a la bomba de aceite de la unidad Hilton, así como la salida de aceite se encontraba conectada al retorno del aceite como se ilustra en la *Figura 3.8*.

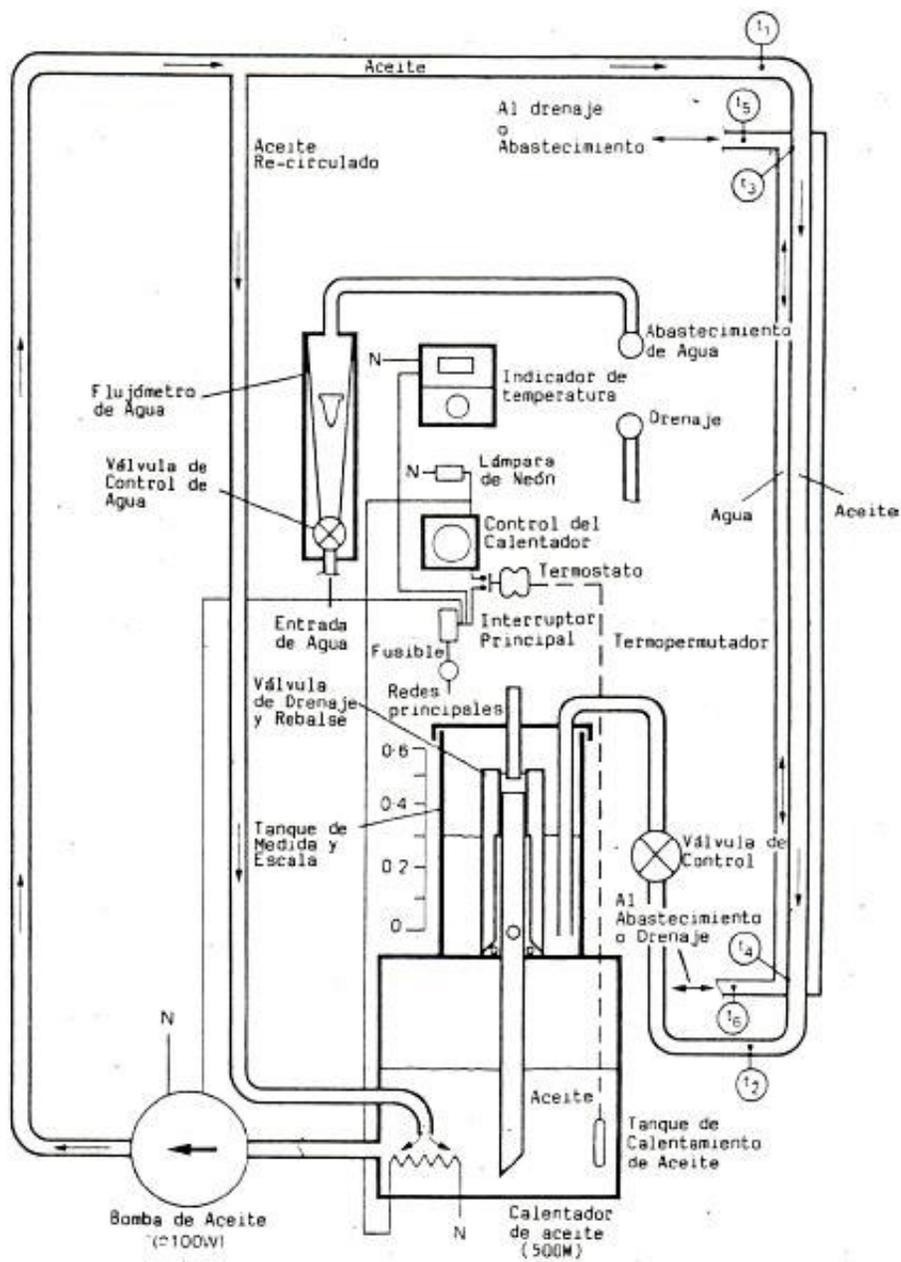


Figura 3.7. Diagrama de Unidad Hilton. [12]

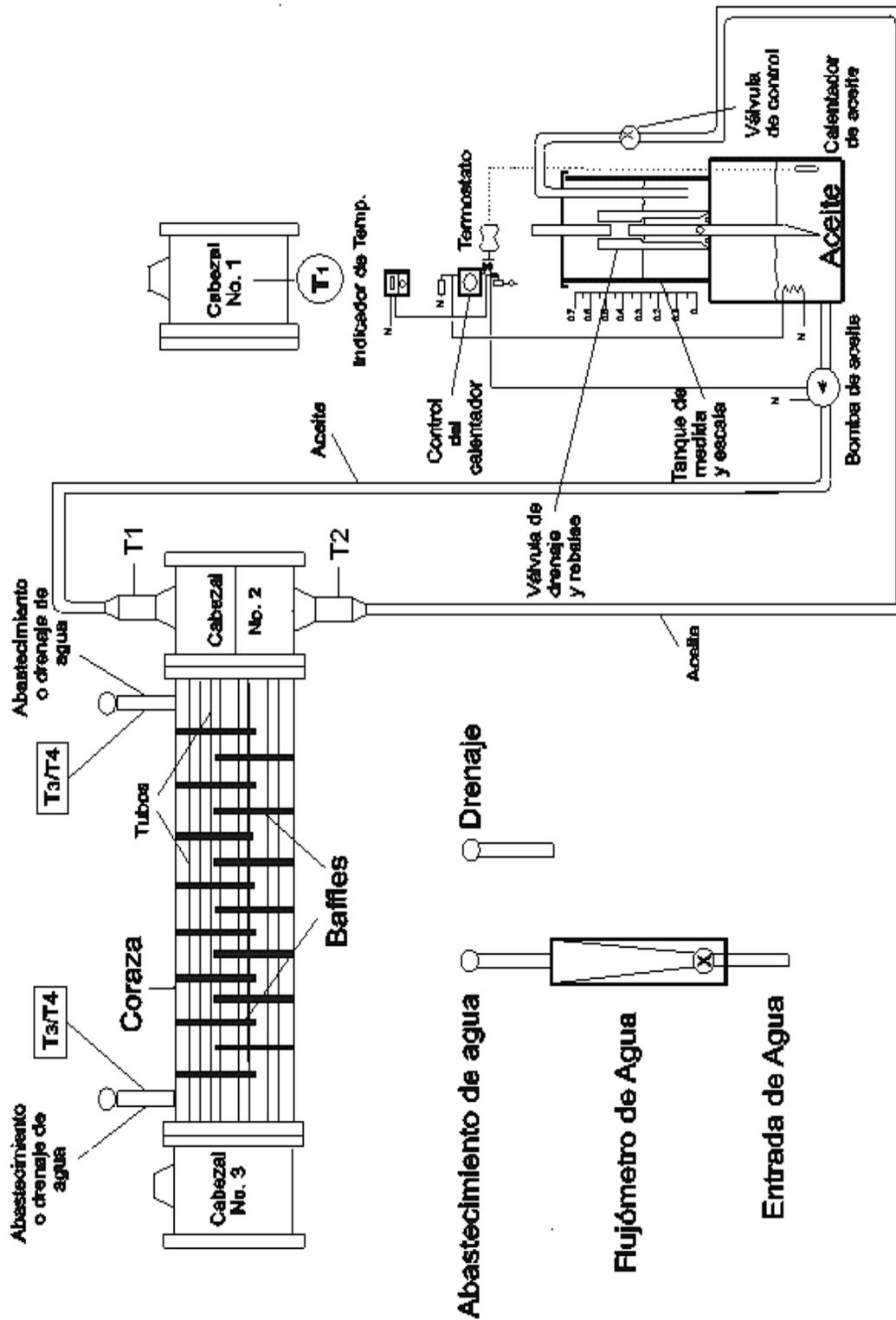


Figura 3.8. Diagrama de instalación de circulación de aceite en intercambiador de tubos y coraza. [11]

### 3.2. Actualización de equipo

Para la mejora y actualización del intercambiador, se plantearon las diversas áreas de mejora en el banco de pruebas.

1. Reservorio de agua y su recirculación.
2. Flujómetro electrónico de agua.
3. Monitoreo constante a través interfaz de usuario y pantalla LCD.
4. Juego de mangueras que permita seleccionar una configuración de flujo paralelo o contracorriente.
5. Flujómetro electrónico de aceite.

Los puntos descritos anteriormente fueron las áreas de mejora en el banco de uso didáctico, ya que son áreas que permiten tener un mejor control en el proceso de estudio del intercambiador, así como de su instalación y arranque.

Se describirá de manera más detallada cada una de las mejoras en el intercambiador. En la *Figura 3.9* se presenta un diagrama general del montaje del intercambiador de calor.

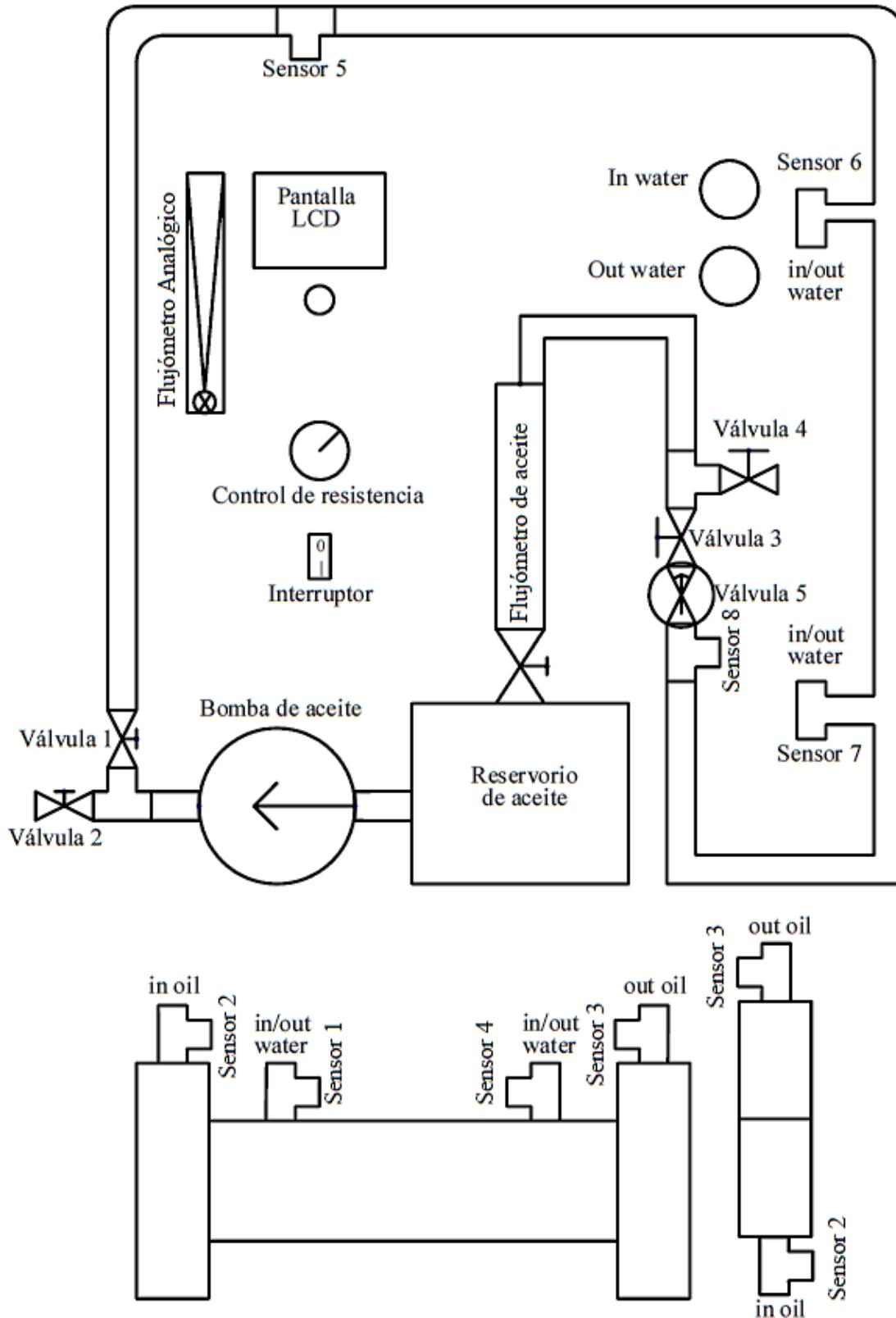
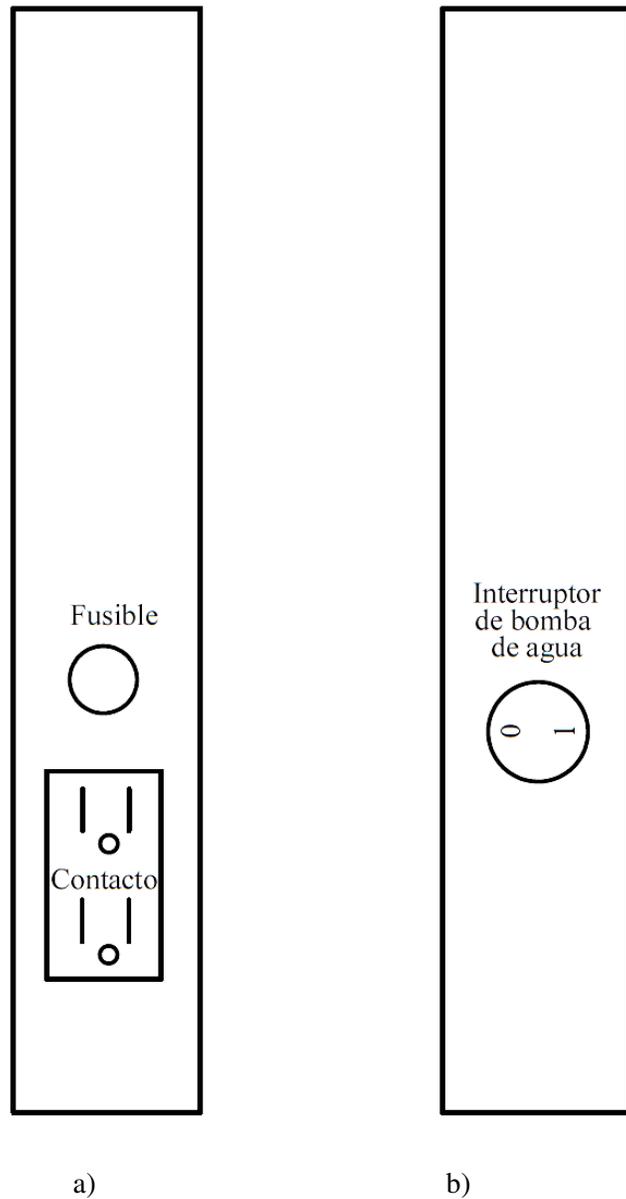


Figura 3.9. Diagrama general de banco de pruebas didáctico.



*Figura 3.10. Vista lateral de banco de pruebas. a) Vista lateral izquierda de banco de pruebas. b) Vista lateral derecha de banco de pruebas.*

En la *Figuras 3.9 y 3.10*, se aprecia el diagrama general del banco de pruebas, se observan ocho sensores que son los encargados que registrar las temperaturas de entrada y salida del intercambiador. Los sensores se identifican como ds18b20, el sensor tiene un rango de operación de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una exactitud de  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dentro de un rango de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El sensor es adecuado en el banco de pruebas, debido a su instalación la cual impide la existencia de fugas en la parte donde se posiciona

el sensor y su rango de operación de temperatura también lo hace adecuado para operar en el banco de pruebas.

A continuación, en la *Tabla 3.1*, se explica la función de cada uno de los dispositivos ilustrados en el diagrama de la *Figura 3.9* y *3.10*.

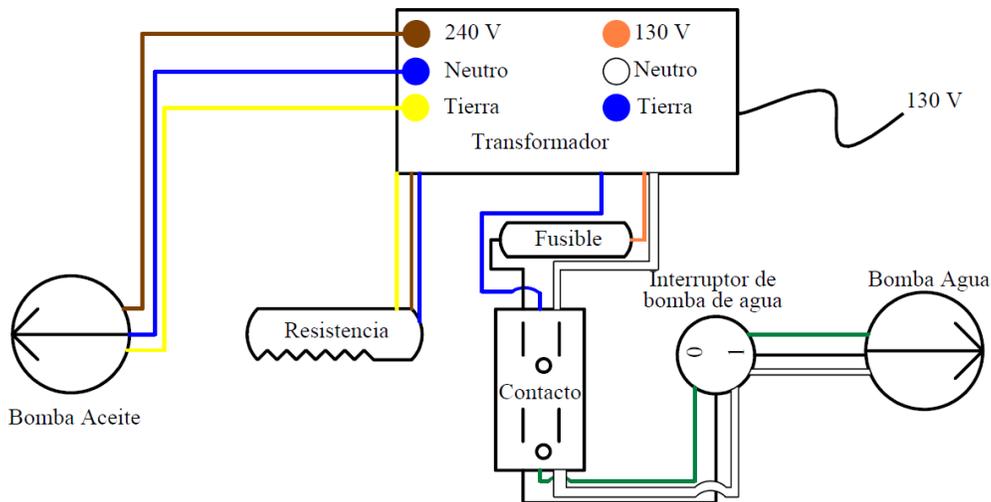
***Tabla 3.1. Descripción de dispositivos en del diagrama general.***

Nombre de dispositivo	Descripción
Sensor 1	Registra la entrada y/o salida del lado izquierdo, de agua.
Sensor 2	Registra la temperatura de entrada del aceite al intercambiador.
Sensor 3	Registra la temperatura de salida del aceite en el intercambiador.
Sensor 4	Registra la entrada y/o salida del lado derecho, de agua.
Sensor 5	Registra la temperatura de aceite de entrada en el intercambiador de tubos concéntricos.
Sensor 6	Registra la entrada y/o salida de agua de la parte superior del intercambiador de tubos concéntricos.
Sensor 7	Registra la entrada y/o salida de agua de la parte inferior del intercambiador de tubos concéntricos.
Sensor 8	Registra la temperatura de salida de aceite del intercambiador de tubos concéntricos.
Válvula 1	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la entrada de flujo de aceite hacia el intercambiador de tubos concéntricos.
Válvula 2	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la entrada del flujo de aceite hacia el intercambiador de tubos y coraza.
Válvula 3	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la salida de aceite del intercambiador de tubos concéntricos.
Válvula 4	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la salida de aceite del intercambiador de tubos y coraza.
Válvula 5	Válvula de estrangulamiento, para modular el flujo de aceite.
Pantalla LCD	Pantalla que muestra información del intercambiador de tubos y coraza.
Control de resistencia	Perilla que controla la resistencia para modular la temperatura del aceite dentro del reservorio.
Reservorio de aceite	Contenedor del aceite. Dentro del reservorio se eleva la temperatura del aceite. Capacidad de 2.5 Litros aproximadamente.

Bomba de aceite	Bomba de aceite centrífuga que lleva el aceite del reservorio hacia la entrada del intercambiador de tubos concéntricos o de tubos y coraza, según sea la configuración deseada. La bomba cuenta con tres variaciones de flujo masico de aceite.
Interruptor	Enciende la bomba de aceite y la resistencia con controla la temperatura del reservorio de aceite.
Interruptor de bomba de agua	Enciende la bomba de agua.
agua	
Fusible	Protege a todo el circuito eléctrico.
Contacto	Contacto para conectar cualquier aparato, como computadoras, laptops o cualquier otro dispositivo que sea necesario.

Anteriormente se explicaron algunos dispositivos que conforman el banco didáctico de pruebas. Se menciona a cerca de un intercambiador de tubos concéntricos, debido a que la unidad Hilton contaba con dicho intercambiador, sin embargo, fueron necesarias modificaciones al intercambiador de tubos concéntricos, como la instalación de válvulas que permitan dirigir el fluido al intercambiador con el cual se desea trabajar y la instalación de sensores de temperatura nuevos.

En la *Figura 3.11*, se ilustra el diagrama de conexiones eléctricas necesarias para el funcionamiento adecuado del banco de pruebas.



*Figura 3.11. Diagrama de conexiones eléctricas.*

En la *Figura 3.11*, se observa en una primera instancia un transformador con una bobina primaria de 110, 115, 120 y 130 V entregando un voltaje de 240 V, esto es debido a que la bomba de aceite y la resistencia trabajan con voltaje de 240 V. Del mismo transformador se puede obtener voltaje 110 a 130 V, por lo tanto, a la línea de 130 V se conectó un contacto, la bomba de agua y su interruptor, con la finalidad de tener un sistema eléctrico práctico y seguro.

La *Figura 3.12*, contiene el diagrama de conexiones de la placa Arduino y los sensores necesarios para registrar los datos del banco de pruebas.

Los sensores de temperatura para los reservorios de agua y aceite se encuentran señalados en el diagrama de la *Figura 3.12* como *Sensores T. R.*, mientras que para los sensores de temperatura de las entradas del intercambiador *Sensores T. I.*, el sensor ultrasónico se encuentra expresado como *Sensor Ult.* y las conexiones correspondientes a *SDA* y *SCL* son las entradas analógicas para la pantalla LCD.

Los colores amarillo, naranja, verde, azul y morado pertenecen a las entradas digitales de los sensores. El color rojo representa la entrada de voltaje y el color café representa las conexiones a tierra.

En la *Figura 3.12*, se observa que el servomotor es alimentado por una fuente externa, ya que de esta forma es posible que el servomotor realice su función de forma adecuada.

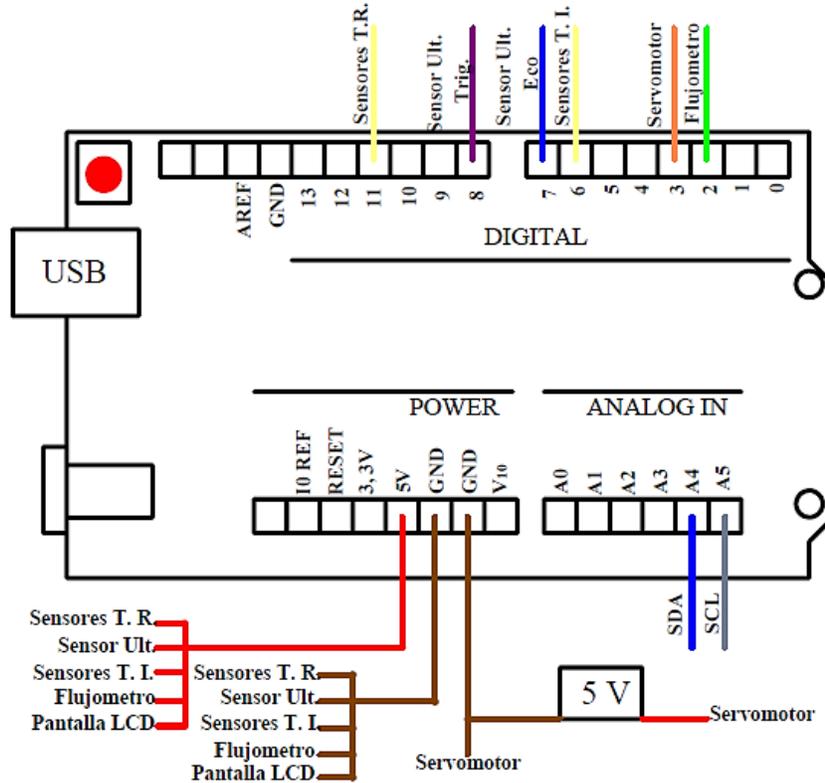


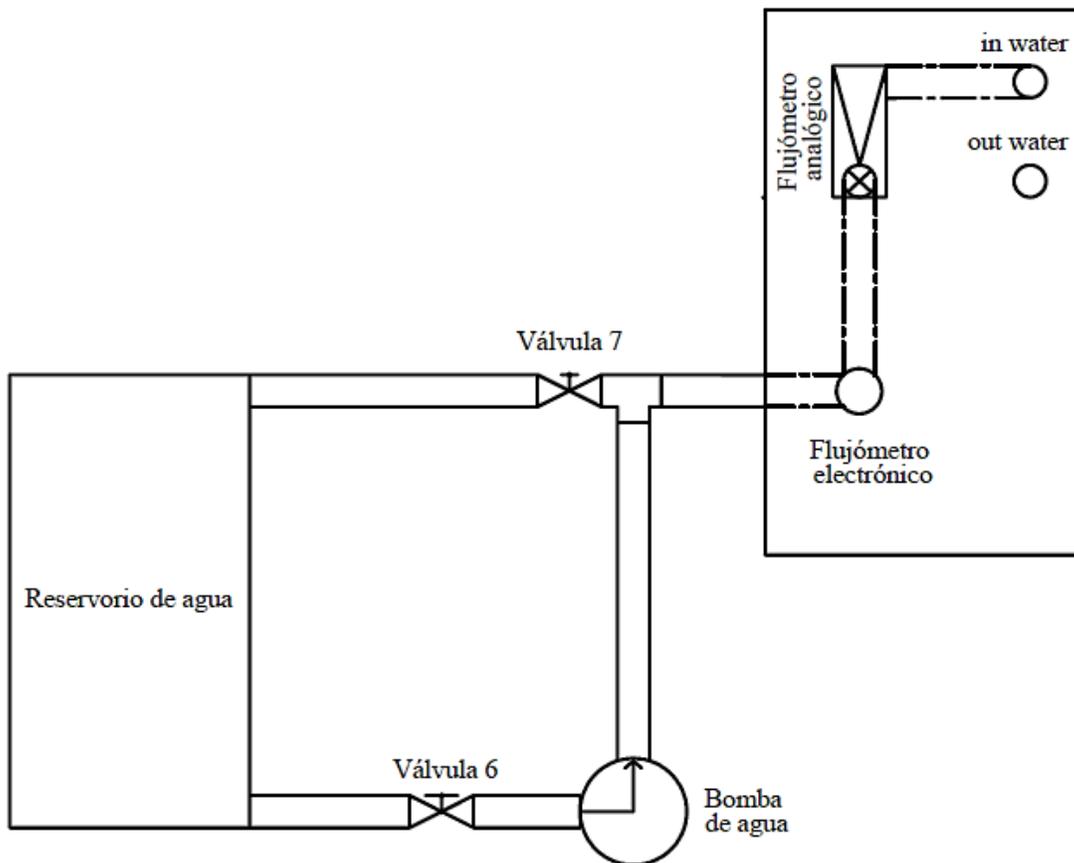
Figura 3.12. Diagrama de conexiones de la placa Arduino y sensores.

### 3.2.1. Reservorio de agua y su recirculación

El reservorio de agua y su recirculación figuraron como uno de los aspectos más importantes a modificar, debido a que, el reservorio de agua permite tener una mejor manipulación del equipo para su operación.

El reservorio de agua es un tanque con capacidad de 80 litros, el reservorio permite enviar el flujo de agua hacia la entrada del intercambiador por medio de la instalación de una bomba en la parte inferior del tanque de agua, debido a que la bomba de agua no cuenta con un sistema para variar el flujo masico, se realizó un bypass a la bomba como se muestra en la *Figura 3.13*, de esta forma se permite variar el flujo másico dentro del intercambiador para su estudio. Para la recirculación de agua simplemente se dirigió la salida del agua del intercambiador hacia el reservorio de agua por medio de una manguera que va desde la salida del intercambiador hacia la salida que se observa en la *Figura 3.9* y *3.13* instalada en el equipo Hilton y finalmente hasta el reservorio de agua por medio de una manguera.

En la *Figura 3.13* se presenta la instalación del bypass para la obtención de diferentes flujos masicos de agua a la entrada del intercambiador. En la *Figura 3.13*. se observa la válvula 6 que funciona como apertura de flujo de agua del reservorio de agua hacia la bomba, posteriormente la bomba se encarga de transportar el flujo de agua en este caso hacia una conexión tipo T, en este punto es donde se encuentra el bypass, ya que el flujo se dirige hacia la válvula 7 y hacia el intercambiador, en cambio si la válvula 7 se encuentra completamente cerrada el flujo se dirigirá por completo hacia el intercambiador, por el contrario si la válvula 7 se encuentra abierta el fluido se repartirá entre el retorno con dirección hacia el reservorio y la entrada de intercambiador, por lo tanto el bypass funciona con la siguiente sentencia, mientras mayor apertura de la válvula 7 menor caudal volumétrico hacia el intercambiador y mientras menor apertura de la válvula 7 mayor caudal volumétrico hacia el intercambiador de tubos y coraza.



*Figura 3.13. Instalación de reservorio de agua y bypass.*

### 3.2.2. Flujómetro electrónico de agua

Contar con una medición de forma digital del flujo másico de agua formó parte de los puntos esenciales para la mejora del intercambiador, ya que, es una modificación que permitió conocer el caudal volumétrico de agua de manera inmediata dentro del intercambiador de calor, facilitando así el trabajo de monitoreo y prueba, además de que especialmente la variación de flujo de agua toma un papel relevante, debido a que, con anterioridad no era posible realizar pruebas experimentales con diferentes flujos masicos de agua, como consecuencia se decidió agregar esta variante para su estudio. La instalación del flujómetro electrónico se aprecia en la *Figura 3.13*, el flujómetro se encuentra a la salida de la bomba después del bypass y a la entrada del flujómetro analógico intercambiador, posterior al flujómetro analógico se conecta a la entrada de agua como se muestra en la *Figura 3.13* para finalmente de ahí se conecta una manguera hacia la entrada del intercambiador de calor. Se decidió conservar el flujómetro de agua analógico para tener doble medición.

El sensor que permite la medición de caudal volumétrico de agua se identifica como YF-S201, tiene un rango de operación de 1 a 30 L/min, opera a temperaturas de hasta 80 °C, el sensor es conectado a un Arduino tipo uno, para de esta forma obtener su información de forma digital y procesarla para su visualización amigable a través de una interfaz.

En secciones posteriores de este trabajo se describe con más detalle el principio de funcionamiento de el sensor empleado.

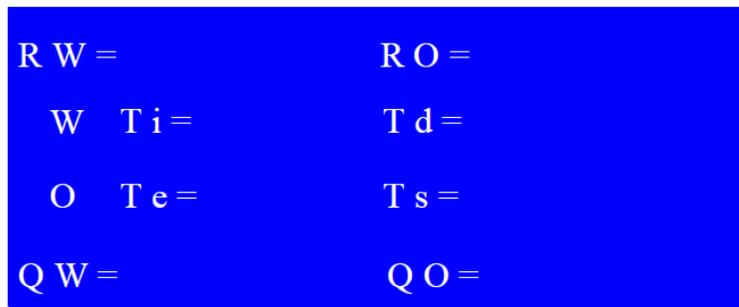
### 3.2.3. Monitoreo constante a través interfaz de usuario y pantalla LCD

Conocer en tiempo real y de manera sencilla lo que sucede con el intercambiador de calor, se vuelve uno de los temas más importantes en cuanto a su actualización, es decir, la posibilidad de obtener una medición de todas las variantes importantes del intercambiador con la implementación de una interfaz que se encarga de registrar todas esas variantes para así permitir al usuario dedicar su atención solamente a la observación de la pantalla.

En el actual modelo de uso didáctico existen dos formas de observar las mediciones del intercambiador de calor. La primera es través de la interfaz, la cual permite al usuario conocer las mediciones de los flujos masicos del fluido caliente y del fluido frío, además de las predicciones de temperatura y de las temperaturas reales de salida, así como el cálculo de la efectividad del intercambiador. Este modo de observación se recomienda para el docente o el encargado de la práctica, ya que, contiene toda la información del intercambiador.

Por otro lado se encuentra el sistema de observación a través de una pantalla LCD, que solo muestra los datos necesarios para que el usuario realice cálculos de efectividad y predicción de temperaturas de salida del intercambiador, este sistema de observación es recomendado para los alumnos que sean participes de la práctica, puesto que, deben realizar cálculos aprendidos en clase para corroborar los datos experimentales observados en la práctica. La localización de la pantalla LCD se observa en la *Figura 3.9*.

La información obtenida de todos los elementos de medición es representada en la pantalla LCD y en la interfaz a través de la conexión de un Arduino tipo uno, que es el dispositivo que recibe la información de los sensores, la procesa y la muestra en su propia interfaz en términos que en el campo ingenieril son bien conocidos, en otras palabras, muestra de forma digital la información recibida.



*Figura 3.14 Pantalla LCD.*

### 3.2.4. Configuración de flujo

Parte de gran importancia en el estudio del intercambiador de calor son las diferentes configuraciones que puede tener para su estudio, como se explicaba anteriormente. Por ende, contar con las dos principales configuraciones de flujo fue una actualización relevante dentro del presente trabajo, por tanto en la *Figura 3.9*, se ilustra el espacio para la entrada de agua y la salida de agua fijas en la estructura de la unidad Hilton, una manguera se encuentra conectada a esta entrada y otra manguera a la salida fija para dirigir el fluido a la entrada del intercambiador de calor o a su salida según sea el caso de estudio. Como se aprecia en la *Figura 3.9* en el intercambiador de calor tanto del lado izquierdo como del lado derecho de entradas y salidas de fluido frío se encuentran etiquetadas como entrada y salida, esto se debe a que dependiendo el tipo de configuración de flujo que se desee tener se cambiara la manguera de entrada de agua al lado izquierdo o derecho y la manguera de salida de agua al lado contrario. De modo que, para una configuración de flujo paralelo la manguera de entrada de agua se instala en el lado izquierdo del intercambiador y la salida del lado derecho, mientras que para

una configuración a contraflujo se instala de forma contraria. Así con este sistema o juego de mangueras se pretende facilitar al usuario o usuarios que deseen operar el equipo, el cambio de configuración de flujo.

### 3.3. Instrumentación

Conocer lo que ocurre en el funcionamiento del intercambiador de calor es uno de los objetivos clave para los usuarios que manipulen el banco de pruebas, por consiguiente, el monitoreo de las variables físicas para el estudio del intercambiador es un aspecto considerable en este trabajo, además de que el monitoreo permitirá identificar y prevenir fallas en el dispositivo. La instrumentación requerida para desarrollar el sistema de monitoreo del intercambiador de calor se basa en dispositivos electrónicos que en general son sensores o transductores.

Según Coombs [13] la instrumentación y los sistemas que participan en los diferentes ámbitos y topologías van de un rango de muy simple a extremadamente complejos, e incluyen diversas aplicaciones como:

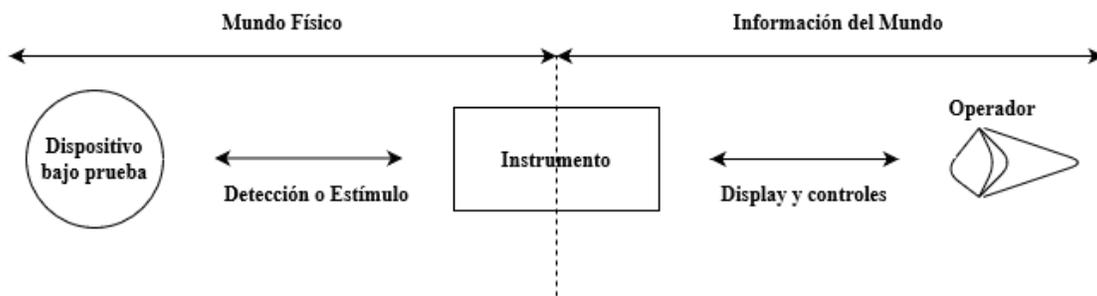
- Verificación del diseño en un trabajo de ingeniería.
- Probar componentes en la industria de semiconductores en expansión.
- Monitoreo y prueba de redes de telecomunicaciones multinacionales.

En aplicaciones de prueba y medición es común referirse a la parte física que es de interés como dispositivo bajo prueba. Un instrumento de medición es usado para determinar el valor o la magnitud de una variable física de un dispositivo bajo prueba. El propósito principal de la instrumentación es detectar o generar cosas en el mundo físico. El funcionamiento de un instrumento puede ser entonces entendido y caracterizado con los siguientes conceptos.

- Conexión a la variable de interés.
- Sensibilidad se refiere al valor mínimo de la propiedad física que es detectable.
- Resolución especifica el mínimo cambio de la propiedad física que causa un cambio en la medición.
- Rango dinámico se refiere al intervalo de el valor mínimo al máximo de estímulos detectables.
- Linealidad especifica como es el cambio de la salida respecto a la entrada. La salida de un dispositivo perfectamente lineal siempre incrementara de manera proporcional al incremento de su entrada.

- Exactitud se refiere al grado en que la medida corresponde al valor real de la entrada física.
- Tiempo de retraso y asentamiento se refiere a la cantidad de tiempo de los lapsos entre la solicitud de medición o la salida y el resultado que está siendo obtenido.
- Frecuencia de muestreo es el tiempo entre mediciones sucesivas.

En la *Figura 3.15* se explica el papel que tiene un instrumento como transductor relacionando propiedades físicas en información. El transductor tiene dos interfaces primarias; la entrada es conectada al mundo físico (dispositivo bajo prueba) y la salida es la información mostrada al operador.



*Figura 3.15. Instrumentos ideales.* [13]

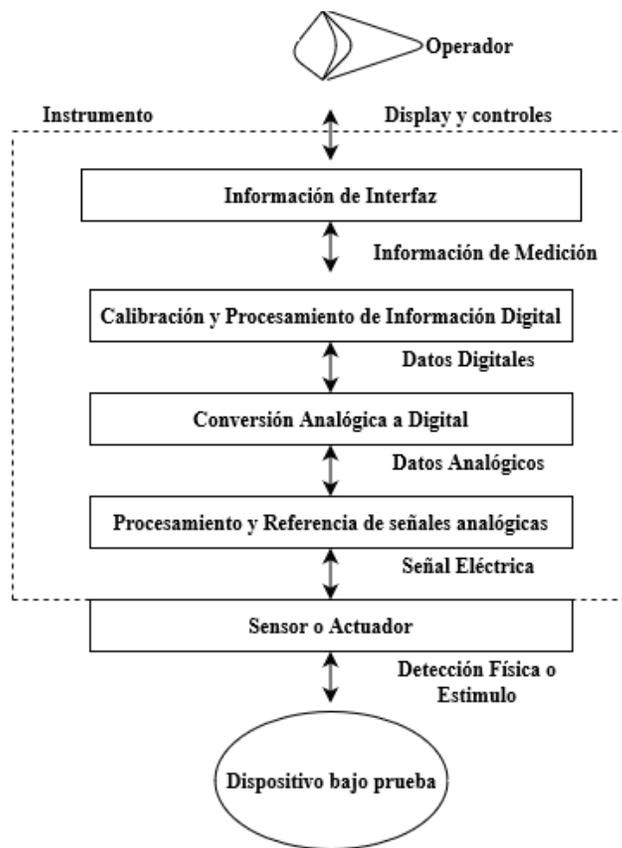
Todos los instrumentos de medición comparten el mismo papel básico. Algunos instrumentos son usados para medición, mientras que otros son diseñados para proveer estímulos. En la *Figura 3.15* se aprecian los elementos principales presentes en la gran variedad de instrumentos que existen.

1. La interfaz del dispositivo bajo prueba depende de las condiciones de la propiedad física que está siendo medida y el tipo de conexión el instrumento.
2. La interfaz del operador está determinada por el tipo de información deseada sobre la propiedad física y los medios por los cuales la información es comunicada. La interfaz puede ser con una pantalla colorida para los humanos o puede ser una interfaz para una computadora.
3. La medida en que el instrumento real se comporta como un instrumento real. Es el tercer elemento que diferencia a los instrumentos.

De acuerdo con Coombs [13] los instrumentos electrónicos tienen muchas ventajas sobre los instrumentos que son completamente mecánicos. Los instrumentos electrónicos pueden ser muy sofisticados para realizar mediciones, incorporando rutinas de calibración y presentan información para los usuarios en diversos formatos. Los instrumentos electrónicos pueden ser usar computadoras

como sus controladores para tener sistemas de medición completamente automáticos, como es el objetivo de este proyecto, en cuanto a la obtención de mediciones de las diversas variables físicas presentes en el intercambiador de calor de coraza y tubos.

La *Figura 3.16* ilustra un diseño genérico de un instrumento digital electrónico. Se muestra una cadena de elementos de procesamiento de señales, cada uno convierte la información a un formulario requerido para ingresar al siguiente bloque. Anteriormente la mayoría de los instrumentos eran totalmente analógicos, con datos analógicos alimentando directamente a pantallas analógicas. Actualmente gran parte de los instrumentos están siendo desarrollados para procesar información digital como se muestra en la *Figura 3.16*.



*Figura 3.16. Diagrama de flujo de la señal.* [13]

Como se muestra en la *Figura 3.16* en la parte inferior al inicio del diagrama se encuentra el dispositivo bajo prueba. El propósito principal como ya se ha mencionado es obtener información acerca de la propiedad física del dispositivo bajo prueba, así que, la conexión debe ser entre el instrumento y el dispositivo bajo prueba, por lo tanto es muy importante tomar en consideración las

condiciones de operación, para asegurar que el instrumento electrónico funcione correctamente y no se dañe como consecuencia de las condiciones de trabajo.

En la *Figura 3.16* se observa el sensor, este elemento debe estar en contacto con el dispositivo bajo prueba. El sensor debe responder a la variable física de interés y convertir esa información en una señal eléctrica. Un sensor ideal no debe afectar a la toma de mediciones. Al realizar mediciones fluye un poco de energía entre el sensor y el dispositivo bajo prueba, si al realizar la medición existe un impacto mínimo en la propiedad que está siendo medida, entonces la cantidad de energía tomada del dispositivo de prueba debe ser minimizado. El sensor debe ser sensible para el parámetro físico de interés mientras permanece insensible a otros efectos. Por lo general la salida de un sensor es voltaje, resistividad o corriente eléctrica que es proporcional a la magnitud de la variable física de interés. En el caso de un instrumento de estimulación, el escenario cambia para convertir una señal eléctrica en un estímulo físico del dispositivo bajo prueba. En este caso alguna forma de actuador es usada. Ejemplos de actuadores son solenoides y motores que convierten señales eléctricas en movimientos mecánicos y los calentadores que convierten señales eléctricas en energía térmica, como es el caso de la resistencia que calienta el aceite dentro del reservorio del presente trabajo.

### 3.3.1. Medición de temperatura

La temperatura se considera una propiedad intensiva y de acuerdo con Moran & Shapiro [14] el concepto de temperatura se origina con la precepción de nuestros sentidos. El sentido del tacto del ser humano es capaz de identificar los objetos “calientes” de los objetos fríos incluso es capaz de clasificarlos por orden de acuerdo con cual objeto es más caliente que otro. No obstante, por muy sensible que sea el cuerpo humano, es posible medir esta cualidad con precisión. Por tanto, termómetros y escalas de temperatura han sido diseñadas para medir temperatura. De acuerdo con Rohsenow et al. [15] la definición científica o termodinámica de temperatura proviene de Kelvin, quien definió la relación de las temperaturas termodinámicas o absolutas de dos sistemas como igual a la relación del calor agregado y el calor rechazado por un motor reversible operando entre dos sistemas. Esta escala única de temperatura requiere solamente un punto fijo, el punto triple del agua, para su definición.

Parte principal de los instrumentos para la medición de temperatura (o termómetro) consiste en un sensor (o transductor) que tiene la única respuesta a los cambios en su temperatura, siendo un cambio en la longitud, un cambio en la fuerza electromotriz (FEM), o un cambio en la resistencia eléctrica [15].

Diferentes tipos de termómetros han sido usados para la medición de temperatura. Los más comunes son aquellos en los que la variable medida es dependiente de la temperatura como:

1. Volumen o longitud de un sistema, como termómetros con líquido en un vidrio capilar.
2. Resistencia eléctrica (platino y otras resistencias, incluyendo los termistores).
3. Fuerza electromotriz (FEM), particularmente usada como termopares.
4. Radiación emitida por una superficie.

Cualquier cuerpo en el que al menos una propiedad medible cambie con la temperatura puede ser usado como termómetro. Esta propiedad es llamada propiedad termométrica, la sustancia que presenta este cambio se le conoce como sustancia termométrica. [14], [15].

A continuación, en la *Tabla 3.2* se presentan definiciones y tipos de diferentes termómetros.

**Tabla 3.2 Definición de Diferentes Termómetros.** [15]

Estándar de tipos de termómetros	
Termómetro Primario	Utiliza una ley física para definir una relación física exacta entre la temperatura y la cantidad física medida.
Termómetro Secundario	Termómetro usado en la definición de ITS-90; calibración realizada en la definición de puntos fijos o contra otra definición estándar.
Termómetro estándar de transferencia	Un estándar intermedio utilizado para minimizar el uso y la deriva de un termómetro estándar definido.
Termómetro estándar de trabajo	Un estándar utilizado en calibración que es el mismo tipo de termómetro que los termómetros para ser calibrados. Para la calibración se requiere de un termómetro definido estándar o termómetro de transferencia estándar en intervalos periódicos para asegurar su exactitud.
Tipos de termómetros con abreviaciones	
DWRT	Termómetro de radiación de doble longitud de onda.
PRT	Termómetro de resistencia de platino.

RTD	Detector de temperatura de resistencia.
SPRT	Termómetro estándar de resistencia de platino.
Termopar tipo S	Platino-10% rodio vs termopar de platino.
Termopar tipo R	Platino-13% rodio vs termopar de platino.
Termopar tipo B	Platino-30% rodio vs termopar platino-6% rodio-.
Termopar tipo T	Cobre-Constantán termopar.
Termopar tipo J	Acero-Constantán termopar.
Termopar tipo E	Cromo-Constantán termopar.
Termopar tipo K	Cromel-Alumel termopar.
Termopar tipo N	Nicrosil-Nisil termopar.

Casi todos los termómetros usados en aplicaciones prácticas pertenecen a la clase de termómetros secundarios se pueden categorizar de acuerdo con su función dependiente de temperatura, representada por el tipo de transductor de salida empleado. Incluyen sistemas en donde la temperatura está indicada por:

1. Cambios en dimensión. Ocurre en dispositivos que tienen un cambio en una dimensión física cuando ocurre un cambio en la temperatura. Como es el caso del termómetro de líquido en vidrio capilar *Figura 3.17*.
2. Efectos eléctricos. Métodos eléctricos son convenientes ya que la señal puede ser procesada fácilmente. Termómetros de resistencia y termopares son los más utilizados.
3. Radiación. La radiación térmica emitida por un cuerpo es una función de la temperatura del cuerpo, por tanto, la medición de la energía de radiación puede ser usada para medir la temperatura. Comúnmente los sensores empleados son termómetros ópticos, escáneres infrarrojos entre otros.
4. Otros métodos. Los más comunes con los métodos ópticos en los cuales se determina la variación del índice de refracción y partiendo de esto la temperatura.

Los diferentes tipos de dispositivos cuentan con sus respectivos rangos de operación, ya que, no todos los dispositivos funcionan para todas las temperaturas que pueden existir en el ambiente físico, la selección del dispositivo depende mucho del proceso en el cual se requiera que opere el dispositivo que proporcionará datos para la obtención de temperatura.

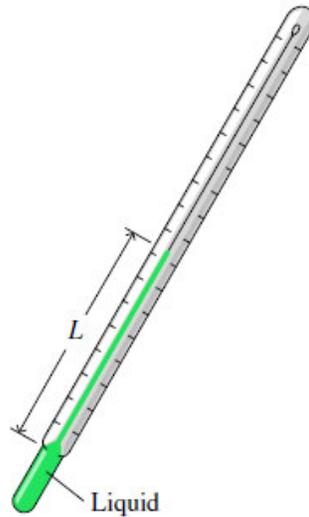


Figura 3.17. Termómetro de vidrio capilar. [14]

En la *Tabla 3.3* se describen las ventajas y desventajas de algunos dispositivos para medir temperatura.

*Tabla 3.3. ventajas y desventajas de diversos tipos de sensores.*  
[15]

Sensor	Ventajas	Desventajas
Termómetro de Mercurio	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estable.</li> <li>2. Barato.</li> <li>3. Buena exactitud.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiempo lento de respuesta.</li> <li>2. Automatización no es práctica.</li> </ol>
Termopares	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Amplio rango de temperaturas.</li> <li>2. Respuesta rápida.</li> <li>3. Fácil detección remota.</li> <li>4. Costo razonable.</li> <li>5. Resistente.</li> <li>6. Pequeño.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necesita unión de referencia.</li> <li>2. No tiene una extrema sensibilidad y estabilidad.</li> <li>3. Precisión justa.</li> </ol>
Termistores	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Respuesta rápida.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Altamente no lineal.</li> </ol>

	2. Fácil detección remota.	2. Rango de temperatura pequeño.
	3. Bajo costo.	3. Intercambiabilidad limitada.
	4. Resistente.	
Termómetros de resistencia de platino	1. Buena linealidad.	1. Respuesta lenta.
	2. Amplio rango de temperatura.	2. Vibración y fragilidad por impacto.
	3. Buena estabilidad incluso a alta temperatura.	3. Alto costo.
	4. Buena precisión y exactitud.	

Para el banco de pruebas del presente trabajo es importante tomar en cuenta factores como respuesta rápida, automatización, resistencia y por su puesto exactitud. Tomando esos factores en cuenta los dispositivos apropiados para el banco de pruebas son los termopares o los termistores, debido a que cumplen con los factores importantes a considerar en el banco de pruebas de acuerdo con el análisis de ventajas y desventajas de la *Tabla 3.3*.

### 3.3.1.1 Termistores

Rohsenow et al. [15] indican que la resistencia eléctrica de un material es función de la temperatura, esta dependencia es la base de operación de los termómetros de resistencia.

Los materiales utilizados en los termómetros de resistencia incluyen platino, cobre, níquel, rodio-acero y algunos semiconductores conocidos como termistores.

Los termistores son hechos de comúnmente de óxido de metal cerámico, tienen un gran coeficiente de temperatura negativo de resistencia eléctrica. El termistor es la contracción de la resistencia termosensible, el rango de operación recomendable es de  $-55^{\circ}$  a  $300^{\circ}$  C. Los termistores son hechos de semiconductores que tienen grandes coeficientes de temperatura (cambio en la resistencia con temperatura) comparados con los sensores de resistencia de alambre de metal. Coeficientes de temperatura positivos y negativos de los termistores son disponibles, aún así solo los negativos son utilizados para sensores de temperatura. Su alta resistencia permite que se puedan usar de forma remota, ya que la resistencia del cable se puede ignorar. Los termistores comerciales se pueden clasificar en dos grandes clases:

1. Los de tipo perlas de plomo incrustado, (recubiertas de vidrio o sin recubrimiento), termistores de sonda de vidrio y de varilla de vidrio.
2. Los de tipo contacto metálico, incluidos termistores de disco, chips, varillas, arandelas entre otros.

Esta clasificación o división se basa en los medios para conectar los cables. Los termistores del primer tipo usan sinterización de óxido metálico en los hilos conductores. Este tipo de termistores tienen una respuesta muy rápida, son estables, pueden usarse en temperaturas superiores de 300 °C. Los termistores de segundo tipo tienen los cables conductores soldados una vez que el termistor es fabricado y son utilizados en temperaturas menores da 125 °C, tienen respuestas más lentas que los termistores del primer tipo.

*Medida de resistencia.* Los métodos comunes para la medición de la resistencia en termómetros de resistencia son el método de puente y el método del potenciómetro. El método de puente utiliza la resistencia y dos resistores fijos para formar cuatro ramales del circuito convencional de Wheatstone. Por otro lado el método de potenciómetro, también llamado medio puente, conecta la resistencia del sensor en serie con el resistor conocido. La diferencia entre ambos métodos es que en el método de puente la resistencia es medida directamente comparando la resistencia del sensor con el resistor conocido, mientras que, en el método del potenciómetro, la caída de voltaje es usada para determinar la resistencia del sensor. El método del puente es más complicado y poco práctico para la automatización, mientras que, el circuito del potenciómetro es más versátil y ampliamente utilizado. En la *Figura 3.19*, se ilustra un circuito simple usado para determinar la resistencia del termistor usando una fuente constante de voltaje.

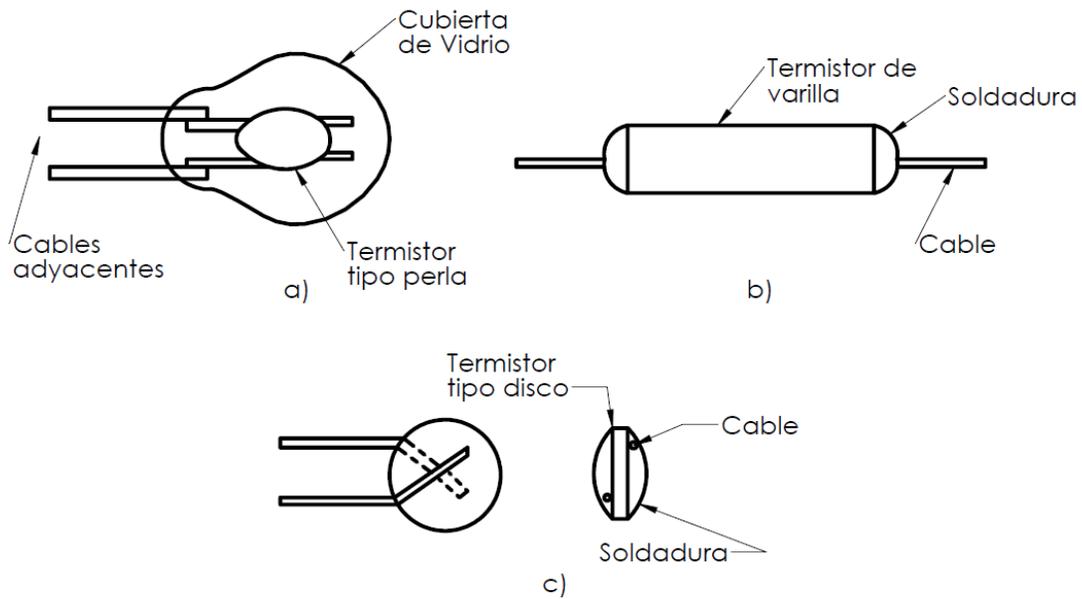


Figura 3.18. Termistores: a) Termistor de tipo perla, b) Termistor de tipo varilla c) Termistor de tipo disco. [15]

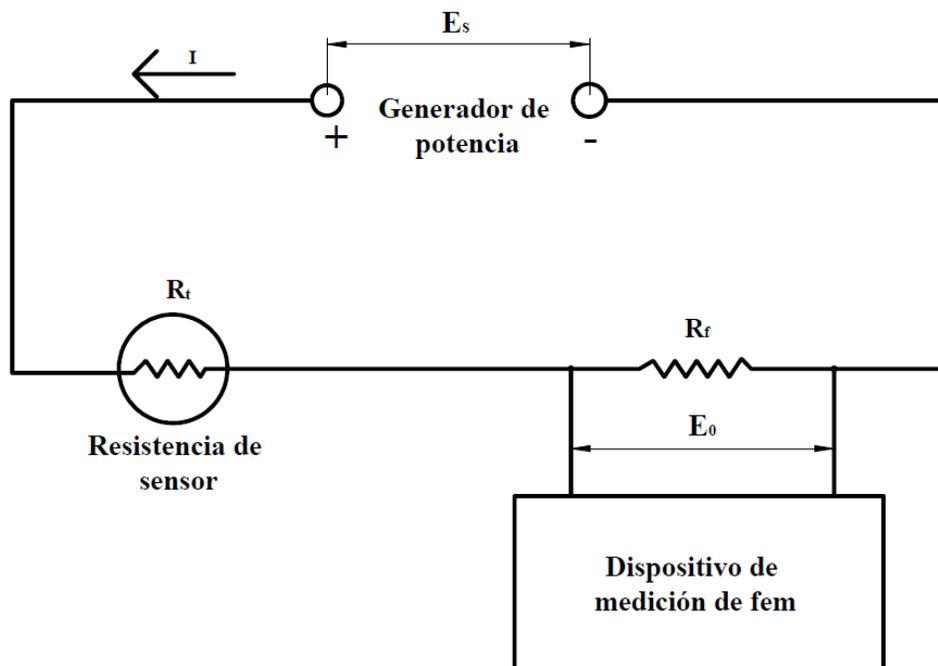


Figura 3.19. Circuito de termómetro de resistencia con una fuente de voltaje constante. [15]

*Conversión Resistencia-Temperatura.* La medición del circuito ya sea por el método de puente o del potenciómetro puede proporcionar la resistencia del sensor en el termómetro de resistencia. Posterior a la obtención de la resistencia es importante convertir ese valor en términos de temperatura.

La resistencia del termistor varía aproximadamente de manera exponencial con la temperatura [15].

La relación ideal de un termistor se puede escribir como (3.1).

$$R = ae^{\frac{b}{T}} \quad (3.1)$$

La existencia de impurezas causa una desviación en la relación exponencial (3.1), por lo que para la mayoría de las aplicaciones una alternativa es utilizada. En la medida de la resistencia del termistor usualmente un resistor fijo es conectado en serie con el sensor. Si la fuente constante de voltaje ( $E_s$ ) es usada, la corriente del circuito es inversamente proporcional con la resistencia total, entonces la relación entre la caída de voltaje a través del resistor fijo y la temperatura del termistor puede ser casi lineal en todo el rango de temperatura. (3.2)

$$E_0 = IR_f = \frac{E_s}{R_t + R_f} R_f \quad (3.2)$$

En donde  $R_t$  y  $R_f$ , mostrados en la *Figura 3.19*, expresan las resistencias del resistor fijo y del termistor, respectivamente.

La resistencia del termistor usualmente es expresada en términos de la resistencia a la temperatura de referencia estándar de 25 °C,  $R_{25}$ , con la introducción la constante de proporción de la resistencia  $\gamma$  característica (3.3).

$$\gamma = \frac{R_t}{R_{25}} \quad (3.3)$$

La dependencia de  $\gamma$  en  $T$  puede provenir de la ecuación (3.1), o alguna variación de esta, para el termistor particular usado. Desde que  $R_{25}$  es un valor fijo conocido, la proporción de resistencia  $s = \frac{R_{25}}{R_t}$  es una constante en el circuito. Por lo tanto considerando  $\gamma$  y  $s$ , la ecuación (3.2) se convierte en (3.4).

$$\frac{E_0}{E_s} = \frac{R_f}{R_t + R_f} = \frac{1}{1 + R_t/R_f} = \frac{1}{1 + s\gamma} = F(t) \tag{3.4}$$

La función  $F(t)$  define las curvas de la *Figura 3.20*. Con la variación del parámetro  $s$ , se pueden generar una familia de curvas, las cuales pueden ser usadas para definir los estándares de curvas de diferentes materiales de termistores. Las curvas pueden ser casi lineales en un rango de 40 a 60 °C de temperatura por arriba de 0 °C y cerca de un rango de 30 °C debajo de 0 °C.

*Fiabilidad.* Los termistores tienen una alta sensibilidad o resolución (habilidad para detectar un cambio de temperatura), debido a sus altos valores de resistencia y altos coeficientes de resistencia a la temperatura. Actualmente los termistores han tomado relevancia en la comunidad biomédica, sin embargo, en el pasado no eran tan populares debido a sus limitaciones en cuanto a la estabilidad por lo tanto tener un termistor con baja desviación y una respuesta rápida fue posible debido al desarrollo del resistor tipo perla (plomo incrustado). Cuando son calibrados adecuadamente, son capaces de mostrar errores de temperatura de menos de 1 mK a 25 °C y 5 mK a 125 °C. En consecuencia la combinación de su estabilidad, con su diseño resistente lo hace un termómetro estándar bueno para mediciones de temperatura.

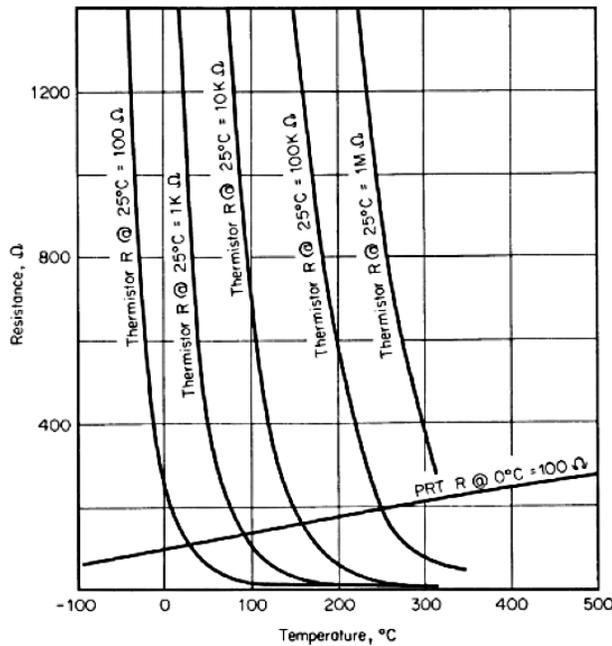


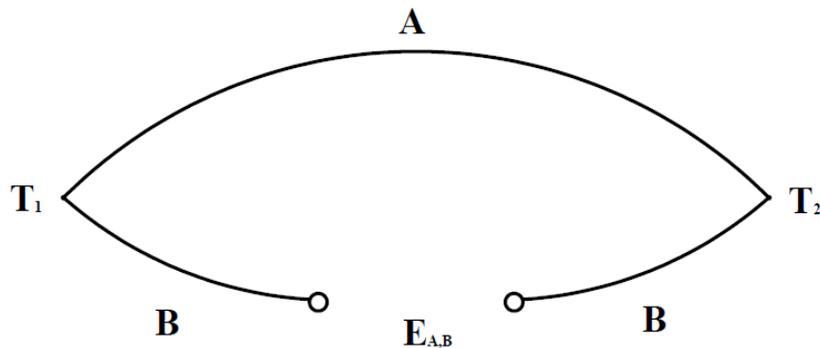
Figura 3.20. Resistencia-Temperatura característica de los termistores.[15]

### 3.3.1.2. Termopares

Los termopares son dispositivos ampliamente utilizados para la medición de temperatura. Entre las ventajas de los termopares figuran la simplicidad de su construcción, fácil medición a distancia, flexibilidad en su construcción, fácil operación y procesamiento de señal y la disponibilidad de cables para termopar a un costo nominal [15].

El principio de operación de un termopar es descrito por el efecto de Seebeck, el cual dicta que cuando dos materiales diferentes son unidos en dos uniones y estas uniones son mantenidas a diferentes temperaturas, una fuerza electromotriz (FEM) existe a través de estas dos uniones. En la *Figura 3.21* se observa el circuito básico de un termopar. La FEM generada en el circuito es función de los materiales usados y la temperatura de unión.

Los efectos que están relacionados con el efecto de Seebeck y están presentes en las mediciones de los termopares incluyen efecto de Joule y conducción térmica como fenómenos irreversibles y como fenómenos reversibles el efecto Peltier y el efecto Thompson.



*Figura 3.21. Circuito básico termoeléctrico. [15]*

El efecto de Joule es la energía de disipación que ocurre con una corriente eléctrica fluyendo a través de un resistor y tiene magnitud  $I^2R$ . La conducción térmica es cuantificada determinando de la ley de Fourier: el calor de conducción en un material es proporcional al gradiente de temperatura.

El efecto de Peltier está relacionado con la reversible absorción o rechazo de calor en la unión de los dos materiales a través de los cuales fluye una corriente eléctrica. La cantidad de calor absorbido o rechazado es proporcional a la corriente eléctrica.

$$\dot{Q}_p = \pi_{AB} I \quad (3.5)$$

En donde  $\pi_{AB}$ , el coeficiente de Peltier para la unión, es una función de la temperatura y de los materiales A y B empleados.

De acuerdo con Rohsenow et al. [15] el efecto de Thompson se refiere a la adición o rechazo de calor por unidad de longitud de un conductor. El calor agregado es proporcional al producto de la corriente eléctrica y el gradiente de temperatura a lo largo del conductor. La tasa de transferencia de calor de Thompson por unidad de longitud de un cable (conductor) está dado por  $\sigma_T dT/dx$ , donde  $\sigma_T$  es el coeficiente de Thompson. La integración sobre la longitud del cable proporciona el calor de Thompson como sigue en (3.6).

$$\dot{Q}_T = \int_{a \text{ lo largo del cable}} \left( \sigma_T I \frac{dT}{dx} \right) dx = I \cdot \int_{a \text{ lo largo del cable}} \sigma_T dT \quad (3.6)$$

El coeficiente de Thompson es función del material, el cual se asume como homogéneo, en el conductor y del nivel de temperatura.

Una forma simple de determinar la FEM generada en un circuito de termopar complejo puede ser derivada de la relación de irreversibilidades termodinámicas. El resultado del análisis es que la corriente cero de la FEM para un cable homogéneo de longitud  $dx$  es (3.7).

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{I=0} = -S^* \frac{dT}{dx} \quad (3.7)$$

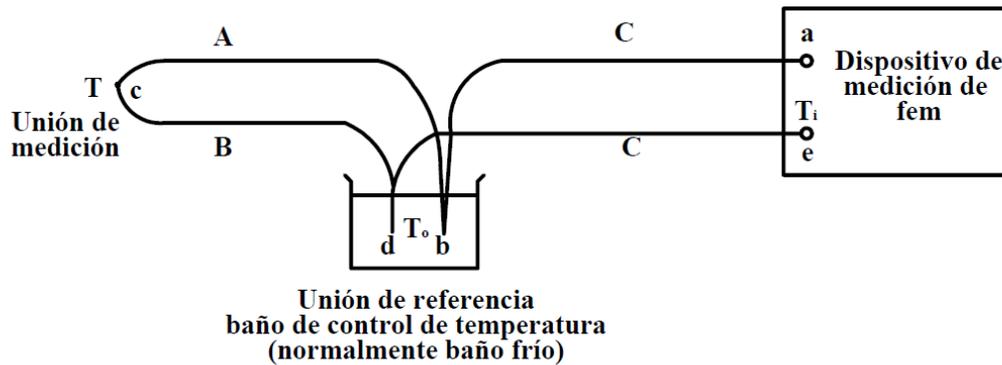
Y sobre todo la longitud finita del cable.

$$\Delta E = - \int_0^L S^* \frac{dT}{dx} dx = - \int_{a \text{ lo largo del cable}} S^* dT \quad (3.8)$$

$S^*$ , el parámetro de entropía de transferencia es la relación entre el transporte de entropía impulsado por corriente eléctrica y el transporte de corriente eléctrica mismo en el conductor.

Considerando un circuito básico de termopar *Figura 3.22*. Los dos termoelementos **A** y **B** son unidos en el punto **c** para formar la unión de medición de la temperatura  $T$ . Los termoelementos son conectados a los cables **C** en los puntos **b** y **d**, ambos sumergidos en un baño frío a  $T_0$ . Los dos cables **C** son conectados a la entrada del dispositivo de medición de la FEM. Los puertos de entrada, **a** y **e**, están mantenidos a temperatura ambiente  $T_i$ . Aplicando la ecuación (3.8) a lo largo del circuito se obtiene (3.9).

$$E_a - E_e = \int_{T_0}^T (S_A^* - S_B^*) dT = E_{AB} \quad (3.9)$$



*Figura 3.22. Circuito básico para un solo termopar. [15]*

La diferencia  $(S_A^* - S_B^*)$  es llamada coeficiente de Seebeck  $\alpha_{AB}$  el cual es función del material A, material B, y la temperatura. Finalmente, la ecuación (3.9) se puede reescribir como (3.10).

$$E_{AB} = \int_{T_0}^T \alpha_{AB} dT \quad (3.10)$$

*Materiales de termopares.* Las propiedades termoeléctricas de diferentes materiales pueden ser representadas por sus coeficientes de Seebeck.

Se pueden utilizar dos diferentes materiales para hacer termopares, es decir, existe una gran cantidad de combinaciones y posibilidades, aunque, solo algunas combinaciones con usadas en aplicaciones de campo, esto es debido a que por lo general se usan las combinaciones que tienen el reconocimiento

de él Instituto Nacional Americano de Normas (ANSI), se ha establecido un estándar que denomina a ocho tipos de termopares. En la *Tabla 3.4*, se presentan características de los ocho termopares estandarizados.

*Tabla 3.4. Tipos de Termopares Estandarizados.* [15]

Letra Designada	Nombre popular	Materiales (código de color) (material positivo aparece primero)	Rango típico de temperatura [°C]	Coefficiente de Seebeck a 100 °C (212 °F) $\mu V/^{\circ}C$
S	-	Platino-10% Rodio vs. Platino	-50 a 1767	7.3
R	-	Platino-13% Rodio vs. Platino	-50 a 1767	7.5
B	-	Platino-30% Rodio vs. Platino	0 a 1820	0.9
T	Cobre-Constantán	Cobre (azul) vs. Aleación de Cobre-níquel (rojo)	-270 a 400	46.8
J	Acero-Constantán	Acero (blanco) vs. Aleación ligeramente diferente de cobre-níquel (rojo)	-210 a 760	54.4
E	Cromel-Constantán	Aleación de níquel-cromo (morado) vs. Aleación de cobre-níquel (rojo)	-270 a 1000	67.5
K	Cromel-Alumel	Aleación de níquel-cromo (amarillo) vs. Aleación de níquel-aluminio (rojo)	-270 a 1372	41.4
N	Nicrosil-Nisil	Aleación níquel-cromo-silicio (anaranjado) vs. Aleación Cromo-magnesio (rojo)	-270 a 1300	29.6

Con el pasar del tiempo y de acuerdo el tipo de aplicaciones, se han desarrollado una gran cantidad de combinaciones entre diversos materiales para su uso como termopares. Ejemplo de ello es la introducción de los termopares a base de metales, para la reducción de costos y obtención de FEM más altas, si bien, esto no es estático ni limitado, ya que el termopar tipo T fue desarrollado para ser utilizado principalmente en temperaturas bajo 0 °C. Por lo ende, es importante reconocer el tipo de aplicación y las condiciones de trabajo a las cuales el termopar requerido será sometido.

Los materiales de los termopares se pueden dividir en cuatro categorías [15], (1) Metales Nobles, (2) Base Metal, (3) Metales Refractarios y (4) No Metálicos. De los ocho tipos de termopares estandarizados tres pertenecen a la primera categoría y cinco a la segunda. Existen más combinaciones de termopares adicionales a las ocho ya mencionadas que no están estandarizadas, pero son comerciales.

*Componentes y Fabricación de los Termopares.* El ensamble de un termopar incluye, conjunto de elemento sensor, extensión de cables, unión de referencia, conexión de cables, dispositivo de medición de la FEM, tubos de protección entre otros elementos.

El conjunto de elemento sensor incluye dos termoelementos unidos para formar una unión con el apropiado aislamiento eléctrico para evitar un cortocircuito entre los dos termoelementos a excepción de la unión de medición.

La cubierta de los cables del termopar está disponible en diferentes formas: cables expuestos, cables aislados y cables con fundas.

La fabricación de termopares deber ser realizada por expertos, debido a que requiere algunas habilidades, en especial cuando se trata de fabricación de termopares de cables de diámetros pequeños. La unión de medición debe realizarse con buenos contactos térmicos y eléctricos producidos, evitando la destrucción de las propiedades termoeléctricas en la unión de cables. Para aplicaciones debajo de los 500 °C, la soldadura de plata con flujo bórax es suficiente para la mayoría de los termopares de tipo base metal, sin embargo, la soldadura es recomendable solo para aplicaciones por encima de los 500 °C. Métodos comunes de soldadura incluyen gas, arco eléctrico, resistencia, tungsteno, y arco de plasma.

En la unión de referencia de cada termoelemento está soldado un cable de conexión de cobre separado. Este cable de cobre es conectado a la terminal de entrada de dispositivo de medición de la FEM. Dependiendo de la aplicación y de la exactitud requerida, existen diferentes dispositivos de medición de la FEM.

1. Lector directo de FEM, normalmente un voltímetro de precisión digital.
2. Lector de automático de compensación, entrega una lectura directa de temperatura.

Ambas opciones son buenas, ahora bien su uso, dependerá del tipo de aplicación y precisión requerida, ya que el lector que proporciona la temperatura de forma directa proporciona comodidad para su uso, sin embargo, es probable que su precisión este un poco limitada. Por otro lado, el lector

de FEM, proporciona una mayor precisión, pese a que, requiere calibración y cálculos para la obtención de temperatura.

### 3.3.2. Medición de caudal

Como ya se ha mencionado, conocer lo que ocurre con las variables de un sistema en operación es de gran importancia para conocer detalladamente el proceso, así como los fenómenos que lo conforman. De acuerdo con Mc Millan & Vegas [16] mientras más se incremente el número y calidad de mediciones, exponencialmente se incrementa el conocimiento de lo que está ocurriendo en un proceso y de lo que podría suceder.

La medición del caudal dentro de un intercambiador de calor es de gran relevancia debido a que esta variable permite llevar a cabo los sistemas de solución con éxito para conocer o predecir temperaturas de salida del intercambiador, así como su efectividad. La medición del caudal debe llevarse a cabo para los fluidos que intervienen en el funcionamiento del intercambiador de calor, es decir, se debe medir el caudal del fluido frío y del fluido caliente.

Según Fox et al. [17] la selección del dispositivo de medición de caudal dependerá de factores como la exactitud requerida, rango, costo, complejidad del caso de estudio, facilidad de obtención de datos así como de su lectura y tiempo que se espera permanezca en operación el dispositivo. Se debería seleccionar el dispositivo más barato que proporcione buena exactitud.

El principio básico para la medición de caudal es medir cierta cantidad de masa o volumen en un determinado intervalo de tiempo, sin embargo, la exactitud de este método dependerá de la capacidad de medir apropiadamente el volumen o la masa en ese intervalo de tiempo. La comprensibilidad debe ser considerada para la medición de flujo másico de gases. La densidad de los gases es muy pequeña por lo tanto la obtención de flujo másico de forma directa, no resulta práctica si de exactitud se habla. Para aplicaciones remotas, caudalímetros de desplazamiento positivo son los indicados, en los cuales el fluido mueve un componente como un pistón alternativo o un disco oscilante como si pasara a través del dispositivo [17].

La restricción más importante en los medidores de flujo interno está basada en la aceleración de la corriente del fluido a través de algún tipo de tobera, como se ilustra en la *Figura 3.23*. El cambio en la velocidad permite un cambio de presión, y dicha velocidad puede ser medida con un dispositivo de medición de presión (electrónico o mecánico), y la tasa de fluido puede ser obtenida por medio de un análisis teórico o una correlación experimental del dispositivo. La tasa de flujo teórica puede ser

obtenida del diferencial de presión entre la sección 1 y la sección 2 del diagrama de la *Figura 3.23*, aplicando las ecuaciones de continuidad (3.11) y Bernoulli (3.12), posteriormente factores empíricos de corrección pueden ser aplicados para obtener la tasa de flujo real.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (3.12)$$

Las consideraciones para aplicar las ecuaciones son:

1. Flujo estacionario.
2. Flujo incompresible.
3. Flujo a lo largo de línea de corriente.
4. No fricción.
5. Velocidad uniforme en la sección 1 y 2 del diagrama.
6. Presión uniforme a través de las secciones de área.
7.  $z_1 = z_2$

Finalmente se obtiene el flujo másico teórico como se muestra en la ecuación (3.13).

$$\dot{m}_{teorico} = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \quad (3.13)$$

La selección de un medidor de flujo dependerá de factores como costo, exactitud, calibración, facilidad de instalación y mantenimiento, *Tabla 3.5*.

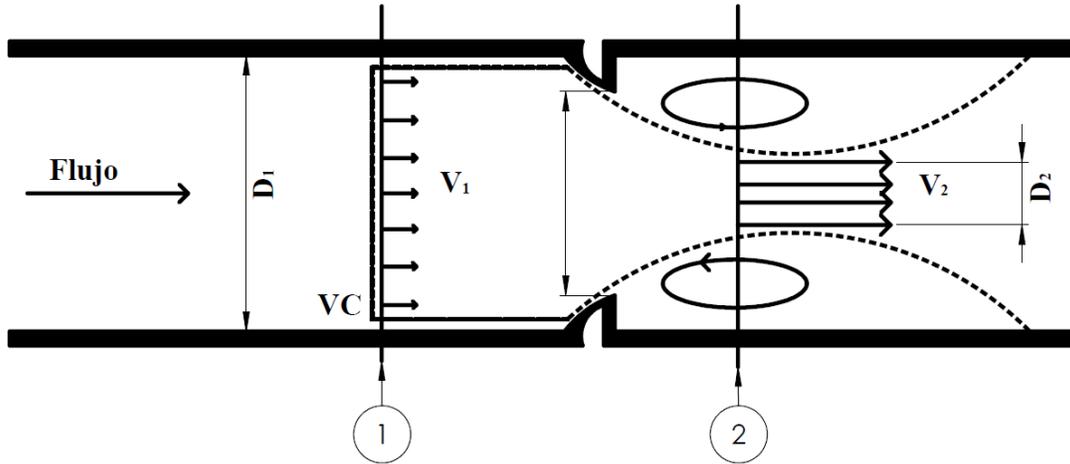


Figura 3.23. Diagrama de flujo de volumen de control utilizado para el análisis de flujo interno a través de una tobera.[17]

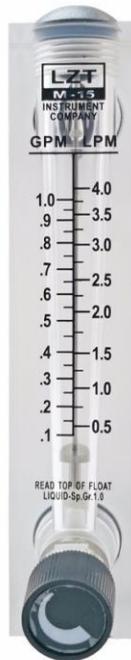
Tabla 3.5 Características de flujómetros. [17]

Tipo de flujómetro	Caída de presión	Costo inicial
Orificio	Alta	Bajo
Tobera	Intermedia	Intermedia
Venturi	Baja	Alta

Existen diversas clasificaciones para los dispositivos que permiten medir el flujo de cualquier fluido, indican Mc Millan & Vegas [16] y Fox et al. [17].

Una desventaja en los medidores de flujo es que la medición de salida ( $\Delta P$ ) no es lineal con el caudal de flujo [17]. Existen muchos tipos de flujómetros que producen salidas que son directamente proporcionales a la tasa de flujo, los cuales producen señales que no requieren la medición de la diferencia de presiones. Estos dispositivos son los que se mencionan a continuación como medidores lineales de flujo, como es el caso de los medidores de flujo de tipo flotador comúnmente llamados rotámetros, indican directamente el caudal de flujo de líquidos y gases, Figura 3.24, por otro lado los dispositivos que consisten en el montaje de paletas rotativas en una sección de área cilíndrica se les conoce como flujómetros de turbina, dispositivos que producen una tasa de velocidad de rotación proporcional a la tasa de flujo volumétrico.

- a. Placa de orificio.
- b. Tobera de flujo.
- c. Venturi.
- d. Coriolis.
- e. Diferencia de presión en el flujo.
- f. Medidores lineales de flujo.
  - Medidor de flotador.
  - Medidor de flujo de turbina.
  - Medidor de flujo de vórtice.
  - Medidor de flujo electromagnético.
  - Medidor de flujo Magnético.
  - Medidor de flujo ultrasónico.



*Figura 3.24. Rotámetro con válvula de estrangulamiento.*

De manera más específica solo para la medición de flujo de agua, Lindell et al. [18] menciona que los métodos de medición de caudal se pueden clasificar en dos grupos.

- a. Métodos de velocidad.
  - Medidor de corriente.
  - Tubo de Pitot.
  - Color.
  - Velocidad de la sal.
- b. Métodos de descarga directa.
  - Gravímetro.
  - Volumétrico.
  - Vertederos.
  - Orificios.
  - Diagrama de Gibson tiempo-Presión.
  - Medidor de Venturi.
  - Orificio de tubería.
  - Tobera estandarizada.
  - Tubería californiana.
  - Canal Venturi.
  - Medidor de profundidad crítica.
  - Apertura contraída.
  - Medición química.
  - Medidor de flujo electromagnético.

Mc Millan & Vegas [16] indica que la medición de corriente, el canal de Venturi, la apertura contraída y el medidor de profundidad crítica son utilizados para la medición de flujo en canales abiertos. El método de color, velocidad de la sal, el método de Gibson, medidor de Venturi, orificios en tubería, tobera estandarizada y la tubería californiana son métodos utilizados para la medición de flujo en tuberías. Tubos de Pitot y medición química, son utilizados en conductos abiertos y cerrados. Orificios son solo utilizados para la medición de cantidades relativamente pequeñas de agua.

Los métodos de velocidad-área requieren la determinación de real de la velocidad media de agua. La descarga es el producto del área y de la velocidad media. Los métodos de color y la velocidad de la sal determinan la velocidad media desde una simple observación. La medición de corriente y el método de tubo de Pitot proporcionan la velocidad en un punto para cada observación.

Métodos de descarga directa no involucran la medición de velocidad. En algunos métodos la determinación de la velocidad es un paso en ellos procedimiento, pero no es la medición real de la velocidad.

De lo descrito anteriormente se observa que existe una gran cantidad de dispositivos para medición de flujo de líquidos, sin embargo, la selección de los dispositivos en el caso que se pretenda analizar dependerá de ciertos factores. De acuerdo con Aguilar Moreno [11] los criterios básicos de selección en dispositivos de medición de flujo son los siguientes:

- Tipos de fluido (líquido o gas).
- Presión y temperaturas críticas dentro del proceso.
- Propiedades químicas del fluido.
- Variación de las propiedades, que puedan interferir en la obtención de las mediciones correspondientes.
- Rango de trabajo de caudales de flujo.
- Indicación local o remota.
- Indicación analógica o digital.
- Precisión.
- Costos.

Para el banco de pruebas se contaba con la medición de flujo masico de agua y de aceite, ambos con dispositivos que permiten conocer el flujo masico de manera directa de forma analógica, por lo que en las siguientes secciones se explica el funcionamiento de los medidores de flujo como el rotámetro y posteriormente de un dispositivo de medición de tipo turbina, ya que para la mejora del banco de pruebas se implementó un dispositivo electrónico que permite conocer el caudal volumétrico de agua de manera digital haciendo posible su monitoreo de forma remota. Finalmente se explica la medición de caudal volumétrico de aceite.

### 3.3.2.1. Rotámetro

Los rotámetros son dispositivos de medición de flujo del tipo área variable los cuales se basan en el estrangulamiento de la corriente de flujo que será medida, el estrangulamiento de área se encuentra arreglado de tal forma que su medida puede ser variada para acomodar el flujo mientras la diferencia de presión permanece constante. [19].

El rotámetro se ha convertido en uno de los más populares flujómetros en los procesos químicos industriales. Sadegh & Worek [20] indican el funcionamiento del rotámetro el cual consiste en un flotador posicionado dentro de un tubo cónico que sube por acción del fluido fluyendo a través del tubo (el área se incrementa mientras el flotador sube). El diferencial de presión se encuentra fijo y para satisfacer la ecuación de flujo volumétrico (3.14), el área anular debe incrementar con la tasa de flujo, así que, el rotámetro debe ser calibrado para el flujo de trabajo, grabando en la superficie del tubo de vidrio una escala apropiada. La calibración dependerá de las dimensiones del flotador, tubo cónico y las propiedades del fluido.

$$Q = C_R(A_T - A_F) \left[ \frac{2gV_F}{\rho A_F} (\rho_F - \rho) \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

En donde  $A_T$  = área de sección transversal del tubo (en la posición del flotador),  $A_F$  = área efectiva del flotador,  $V_F$  = volumen del flotador,  $\rho_F$  = densidad del flotador,  $\rho$  = densidad del fluido y  $C_R$  = coeficiente del rotámetro (usualmente entre 0.6 y 0.8).

Los tubos del rotámetro pueden ser de vidrio o metal. Green & Southard [19] mencionan que un solo dispositivo puede cubrir un rango de flujo de 10 veces y por proporcionar flotadores de diferentes densidades un rango de 200 veces es factible.

### 3.3.2.2. Flujómetro de tipo turbina

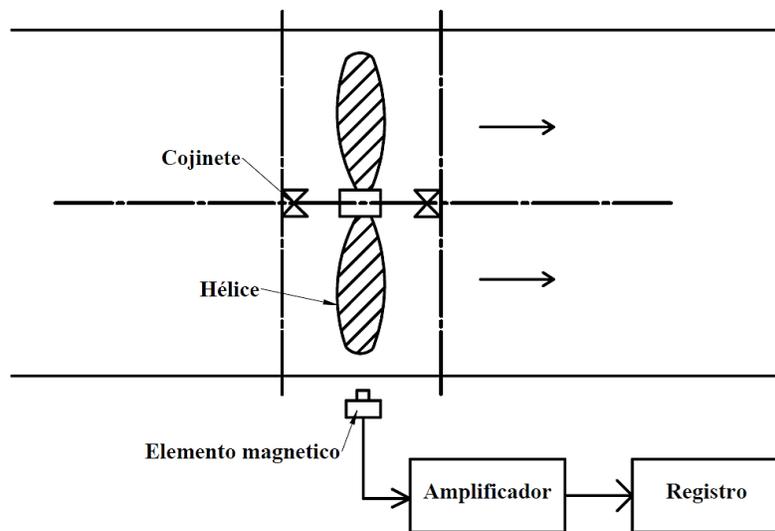
El principio de funcionamiento de los flujómetros consiste en hacer incidir el flujo del fluido en las hélices de la turbina, la velocidad angular producida por el rotor de la turbina es directamente proporcional a la velocidad axial del fluido a través de la tubería. Este tipo de medidores de flujo son utilizados principalmente para flujo de agua y líquidos a base de agua. Además, menciona que existe una gran variedad de diseños, estilos y materiales de construcción [20]. Algunos dispositivos son mecánicos y utilizan engranes y levas para convertir la rotación del rotor en un incremento en el contador electromecánico. En otros dispositivos se utilizan pastillas de estado sólido como bobinas

de inducción magnética y sensores de efeto Hall para detectar la velocidad de rotación de el rotor, *Figura 3.25*, este último dispositivo es del tipo de flujómetro que se encuentra instalado para la medición de caudal de agua entrante al intercambiador de calor de tubo y coraza.

La ventaja más importante es este tipo de flujómetros es que cada pulso eléctrico es proporcional a un pequeño incremento de volumen de flujo. El ángulo de las hélices a la corriente impacta en la velocidad angular y en la frecuencia de salida del medidor. Hélices más finas proporcionan una mayor frecuencia de salida. Las hélices por lo general se encuentran entre 20 y 40 grados al flujo, ángulos pequeños proporcionan una baja velocidad angular y perdida de repetibilidad, mientras que ángulos muy grandes dan como resultado un excesivo empuje final.

La repetibilidad del este sistema asegura la calidad de la medición de los fluidos en un rango amplio de tazas de flujo, temperaturas, composiciones y viscosidades.

Posteriormente se describen características importantes de los flujómetros de tipo turbina, que son importantes para su consideración en la aplicación de diversos procesos o análisis [16].



*Figura 3.25. Flujómetro de tipo turbina. [20]*

**Precisión.** Se refiere a que tan cerca es la medición de flujo que proporciona el dispositivo a la medición real de flujo. Precisión a una tasa de flujo particular puede un orden de magnitud mejor que la precisión del rango de flujo nominal.

**Linealidad.** Los medidores de tipo turbina tiene un factor nominal  $K$ , que representa el número de pulsos por unidad de volumen medida. Linealidad es la medida de variación en el factor  $K$  en el rango de flujo nominal de el medidor.

*Repetibilidad.* Es la habilidad del dispositivo de proporcionar la misma medida de flujo en cada lectura bajo las mismas condiciones del fluido. El dispositivo de medición de tipo turbina cuenta con una excelente repetibilidad.

*Resolución.* Es la medida del incremento más pequeño del flujo total que puede ser reconocido individualmente, los flujómetros de tipo turbina disponen de una resolución alta, la resolución está definida por el número de hélices en el rotor.

*Rango.* Normalmente los medidores de tipo turbina cuentan con un rango de 10:1, pero este factor dependerá de las medidas del dispositivo, así como la linealidad requerida para la aplicación.

Este tipo de medidores son ampliamente utilizados para pequeños y grandes diámetros de tubería, en procesos donde intervienen hidrocarburos ligeros, productos refinados. Los medidores de tipo turbina operan con fluidos limpios que no contienen sólidos o gas, también son usados en flujos que no cambian de velocidad rápido.

Al seleccionar un flujómetro de tipo turbina se deben considerar ciertos aspectos como:

- Tipo de líquido que será medido.
- Rango de operación de la tasa de flujo y si el flujo será continuo o intermitente.
- Características de rendimiento, linealidad, repetibilidad, etc.
- Rango de temperatura.

### **3.3.2.3. Medición de caudal volumétrico de aceite**

La medición de caudal volumétrico del fluido caliente, en este caso aceite, es una de las variables importantes a considerar para el análisis completo del intercambiador de calor, por ello, conocer su magnitud en la interfaz de monitoreo es muy importante, además representa una de las mejoras operativas en el banco de pruebas, puesto que con anterioridad la obtención de la magnitud de esa variable era solo de tipo analógica e indirecta.

Para poder obtener la medición de forma directa en la interfaz de monitoreo fue necesario implementar un flujómetro que contiene tres elementos básicos.

1. Sensor ultrasónico
2. Recipiente de medición de volumen de aceite.
3. Válvula de cierre y apertura.

Es decir, fue necesario fabricar un flujómetro que se adapte a las necesidades de operación y que su costo no representara mucho presupuesto. Lo que dio como resultado el flujómetro de la *Figura 3.26*.

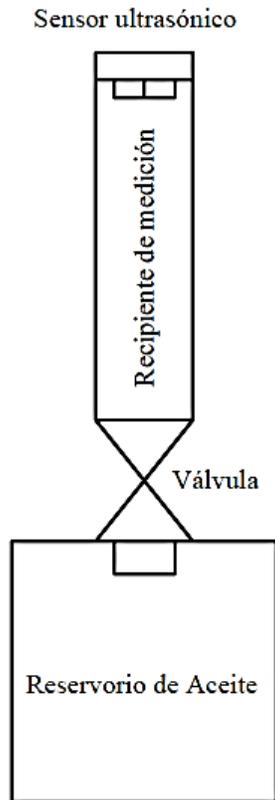


Figura 3.26. Diagrama de flujómetro de aceite.

En el diagrama anterior se ilustran los elementos principales de funcionamiento del medidor de flujo de aceite.

Su funcionamiento es sencillo, básicamente flujo volumétrico es definido como cierta cantidad de volumen de fluido en un intervalo de tiempo.

En el diagrama de la *Figura 3.9*, se ilustra la salida de aceite del intercambiador de calor, así como su llegada al recipiente que contendrá el aceite para su medición, mientras el aceite es depositado en el recipiente de medición de aceite la válvula permanece cerrada durante cierto tiempo, el tiempo que la válvula permanezca cerrada dependerá del caudal de aceite, ya que la válvula se abre cuando el sensor detecta un nivel de aceite previamente definido dentro del programa que controla los sensores, el tiempo que la válvula permanece cerrada se registra y se guarda, de tal forma que se pueda utilizar la ecuación (3.15), obteniendo así el caudal de forma continua.

$$Q_{Aceite} = \frac{V_{aceite}}{t} \quad (3.15)$$

En donde  $V_{aceite}$  pertenece al volumen de aceite que se va registrando debido a la medición de altura con el sensor ultrasónico, y  $t$  como el intervalo de tiempo que se registra continuamente, mientras la válvula permanece cerrada.

A continuación, se explica el funcionamiento con mayor detalle de cada uno de los elementos que conforman el flujómetro de aceite.

#### *Sensor ultrasónico.*

El sensor ultrasónico utilizado es el hc-sr04, el sensor detecta objetos y proporciona la distancia a la que se encuentra dicho objeto, por lo tanto su función dentro del flujómetro de aceite es proporcionar la altura  $h$  que se observa en el diagrama de la *Figura 3.26*, la cual corresponde a la altura del nivel de aceite, conocer esta altura es necesaria para posteriormente conocer el volumen de aceite y así finalmente usar la ecuación (3.15) para obtener el caudal de aceite dentro del sistema de operación.

El sensor simplemente detecta la distancia a la que se encuentra el aceite, esta medición no es lo que se requiere, ya que de esta forma se obtiene el volumen vacío del recipiente, para obtener  $h$  se empleó la ecuación (3.16) dentro del programa que permite conocer la información del sensor, para obtener de forma directa la altura  $h$  correspondiente al nivel de aceite dentro del recipiente de medición.

$$h = H - D_S \quad (3.16)$$

En donde  $D_S$  corresponde a la distancia que el sensor registra que se encuentra el nivel de aceite, por lo tanto, si el recipiente se encuentra vacío al ejecutarse la fórmula (3.16), el programa arrojará una  $h = 0$ , lo que es correcto, debido a que el sensor detecta el fondo del recipiente que se encuentra a una distancia  $H$  del sensor. En consecuencia, en cada lectura del sensor se aplica la ecuación (3.16), para con la altura  $h$  obtener el volumen de aceite de forma continua.

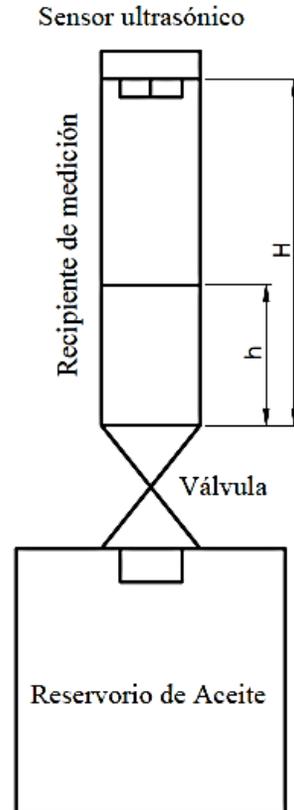


Figura 3.27. Diagrama de altura de recipiente de medición  $H$  y altura de nivel de aceite  $h$ .

#### *Recipiente de medición de volumen de aceite.*

El recipiente de medición de flujo de aceite es un cilindro de acrílico de 4.35 cm de diámetro el cuál se encuentra acoplado a una válvula de paso de 1/2 in en la parte inferior como se ilustra en la *Figura 3.26*, y en la parte de arriba cuenta con la entrada de flujo de aceite a través de una maguera que recibe el flujo de salida del intercambiador de tubo y coraza, de igual forma el sensor ultrasónico se encuentra en la parte superior del recipiente.

#### *Válvula de cierre y apertura.*

La válvula de cierre y apertura es muy importante en el flujómetro de aceite, debido a que permite que se capture el volumen de aceite, sin embargo, la gran relevancia de la válvula es debida a que es el dispositivo que permite registrar un intervalo de tiempo, que resulta de utilidad para el uso de la ecuación (3.15) con la cual se obtiene el caudal de aceite.

La válvula es una válvula de paso de 1/2 in como la que se muestra en la *Figura 3.28*, fue necesario adaptar un servomotor a la válvula para poder controlar su cierre y apertura de forma remota, para así

mejorar la manera de tomar la medición de flujo másico de aceite. La modificación a la válvula de paso permite conocer el flujo de aceite sin la necesidad de contabilizar el tiempo manualmente o con dispositivos externos y posteriormente realizar cálculos para obtener el flujo de aceite.



*Figura 3.28. Válvula de paso 1/2 in.*

El servomotor utilizado es el mg995, el servomotor fue montado como se observa en la *Figura 3.29* para abrir y cerrar la válvula de forma automática.



*Figura 3.29. Montaje de servomotor a la válvula de paso.*

El cierre de la válvula depende de la distancia  $D_S$ , debido a que se estableció que la válvula solo puede ser abierta cuando la distancia  $D_S$  llegue a 20 cm, por lo tanto, esta configuración permite que el flujómetro de aceite funcione para cualquier caudal de aceite permitido por la bomba de aceite.

### 3.4. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario se planteó como uno de los objetivos de mejora para el banco de pruebas didáctico, ya que, a través de este medio de comunicación entre el equipo y el usuario se pueden realizar cálculos de forma rápida, así como comparaciones entre los cálculos obtenidos y los datos experimentales, para que en tiempo real se obtenga toda la información y así monitorear el equipo.

La manipulación de la interfaz se propone únicamente para uso del usuario que se encargara de dirigir las practicas con los estudiantes de la División, puesto que en la interfaz se puede apreciar toda la información del intercambiador de calor.

La interfaz funciona debido a la comunicación que se establece con los sensores a través de la programación en Arduino, toda la información de los sensores llega a la interfaz y es procesada según corresponde. Para la obtención de los resultados teóricos de aplico el método de solución  $\varepsilon$ -NTU.

En la *Figura 3.30* se muestra el menú inicial de la interfaz, en el menú principal se tienen dos opciones principales para realizar cálculos; la eficiencia y las temperaturas de salida, posteriormente existen dos opciones más que permiten decidir el cálculo de eficiencia o de las temperaturas de salida, de acuerdo con la configuración del intercambiador de calor.

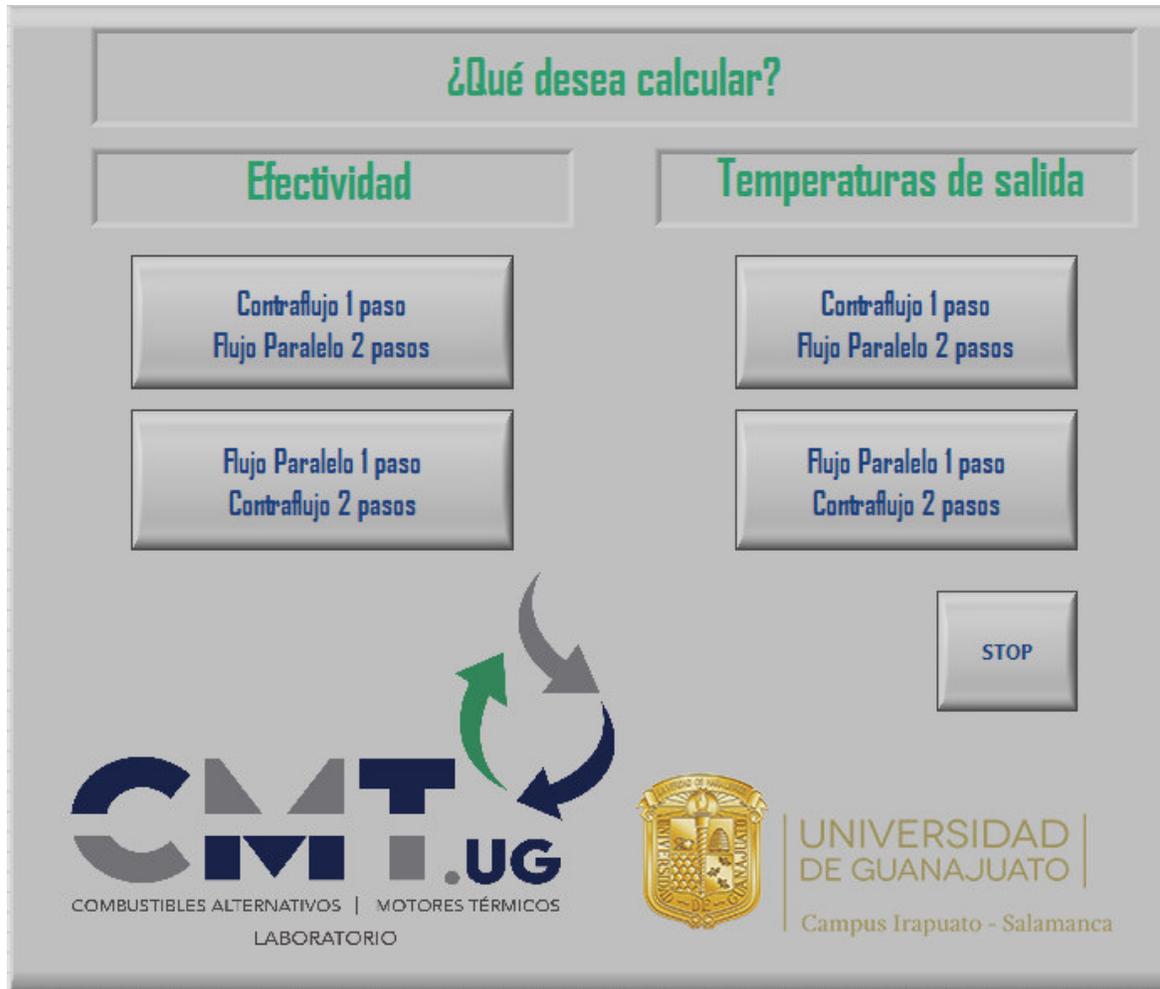
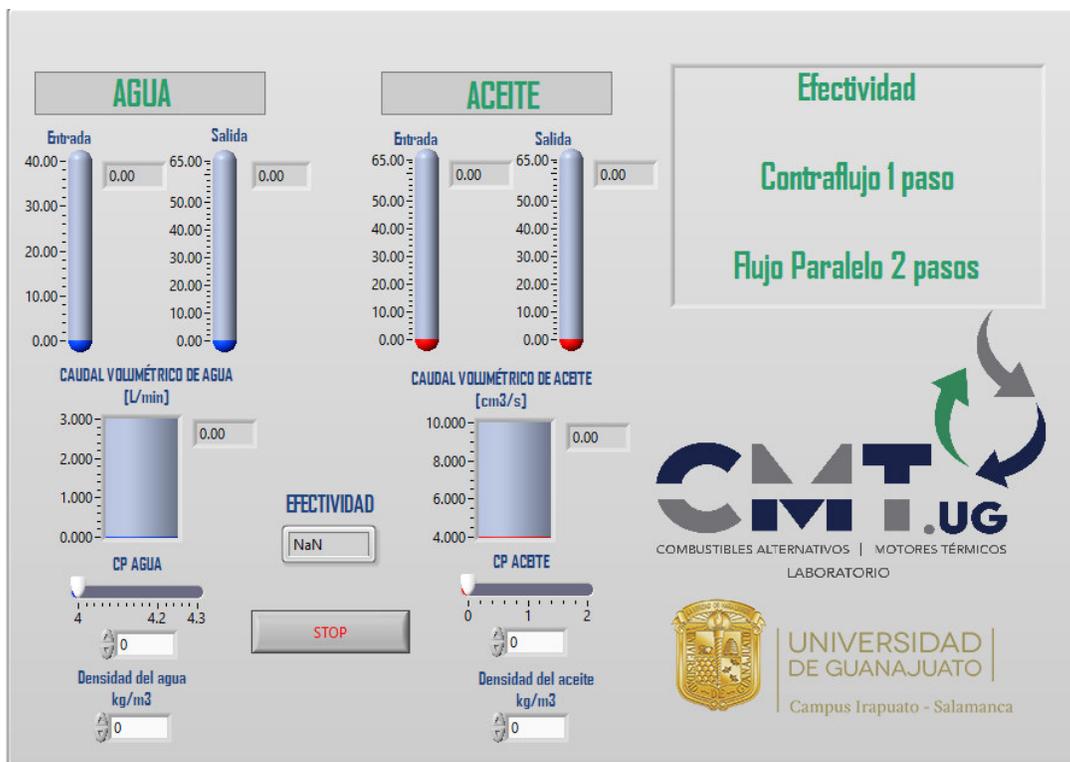
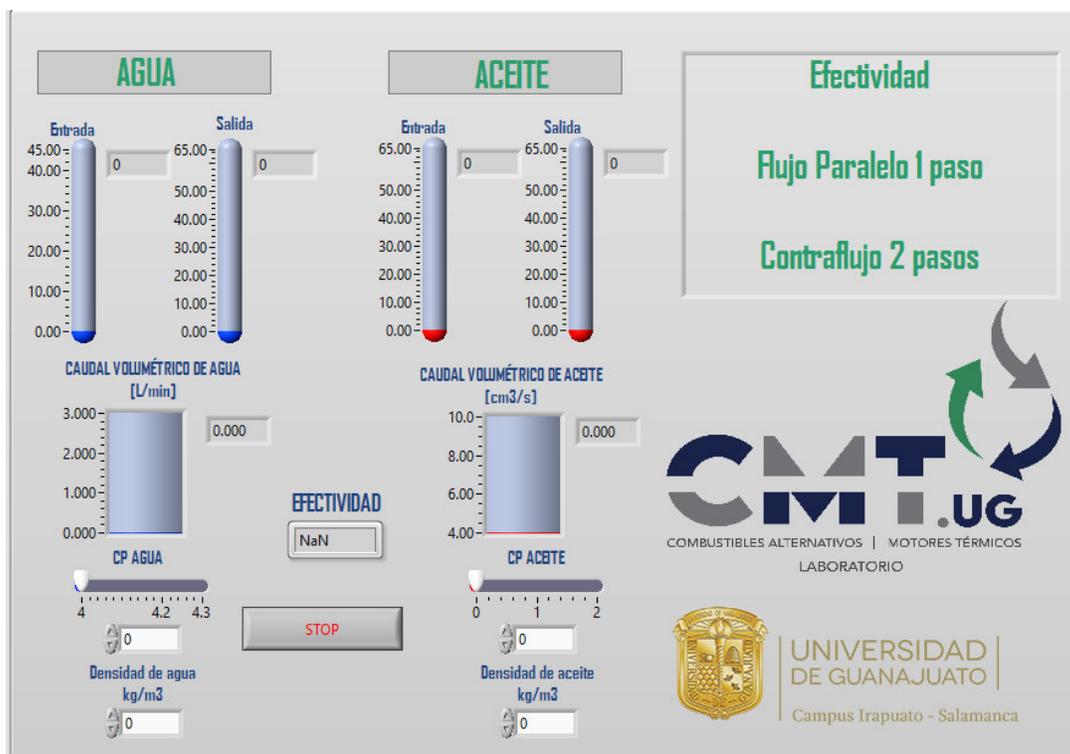


Figura 3.30. Menú de inicio de interfaz.

La Figura 3.31 ilustra la interfaz para el cálculo de eficiencia, como se observa se tiene un monitoreo total de las variables del dispositivo. Los únicos campos que es necesario llenar de forma manual son los campos correspondientes a las propiedades de los fluidos, ya que el equipo está preparado para su experimentación y manipulación total, es decir, si se desea cambiar los fluidos de trabajo se puede hacer sin la necesidad de modificar el programa que se encuentra detrás de la interfaz.



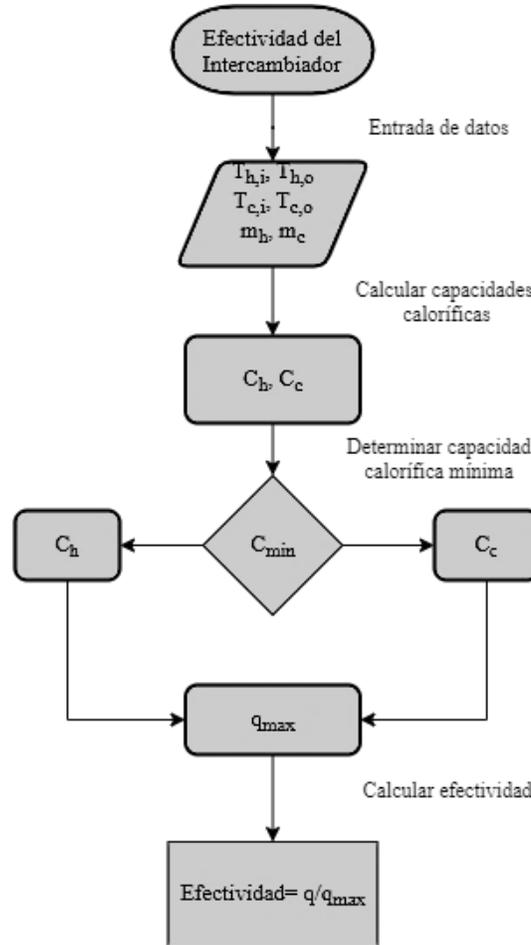
a)



b)

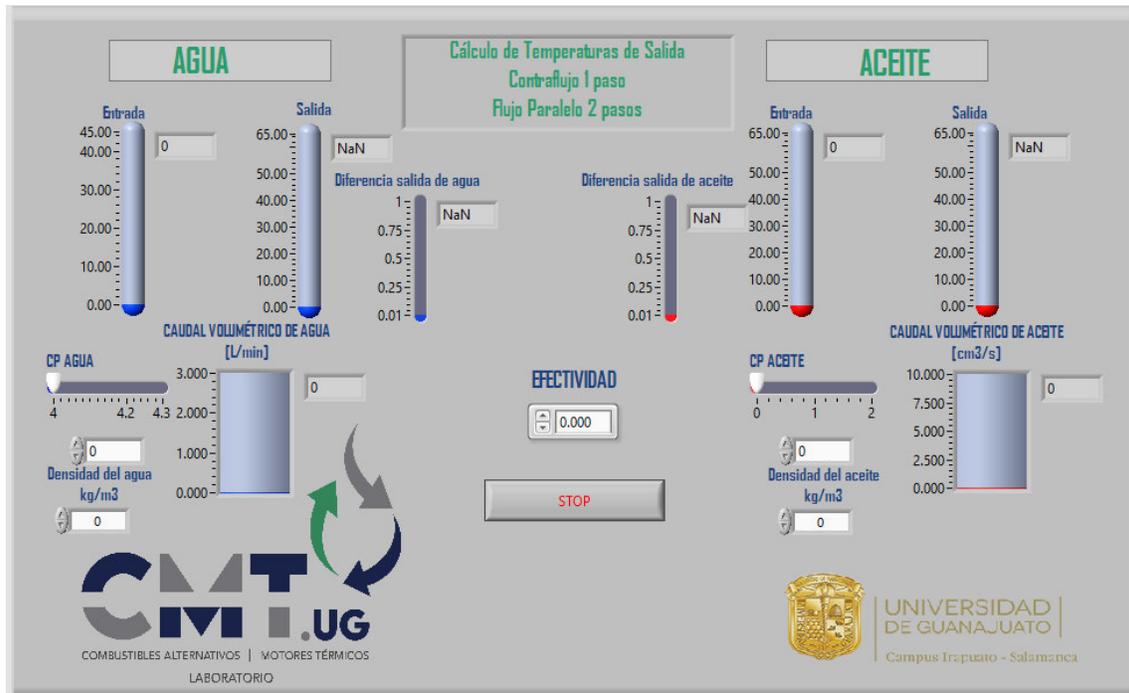
Figura 3.31. Interfaz de cálculo de efectividad.

En la *Figura 3.32*, se ilustra el método de programación de la interfaz que calcula la efectividad, el cual se basa en el método  $\varepsilon$ -NTU, visto previamente.

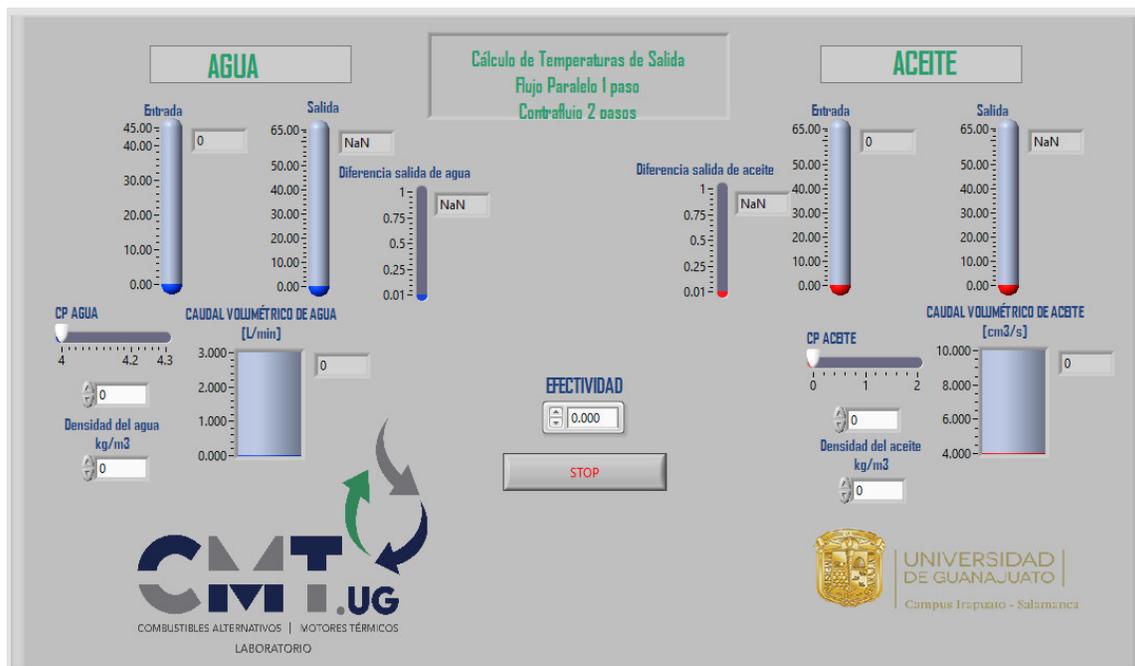


*Figura 3.32. Diagrama de solución empleado para calcular efectividad.*

La *Figura 3.33*, muestra la interfase de usuario para el cálculo de las temperaturas de salida, además realiza el cálculo de la diferencia que existe entre las temperaturas de salida reales y las calculadas, por lo que de manera casi inmediata se puede comprobar la teoría con los datos experimentales.



a)



b)

Figura 3.33. Interfaz para cálculo de temperaturas de salida.

En la Figura 3.34, se muestra el proceso de solución utilizado para encontrar las temperaturas de salida a partir de las temperaturas de entrada y de la eficiencia del intercambiador.

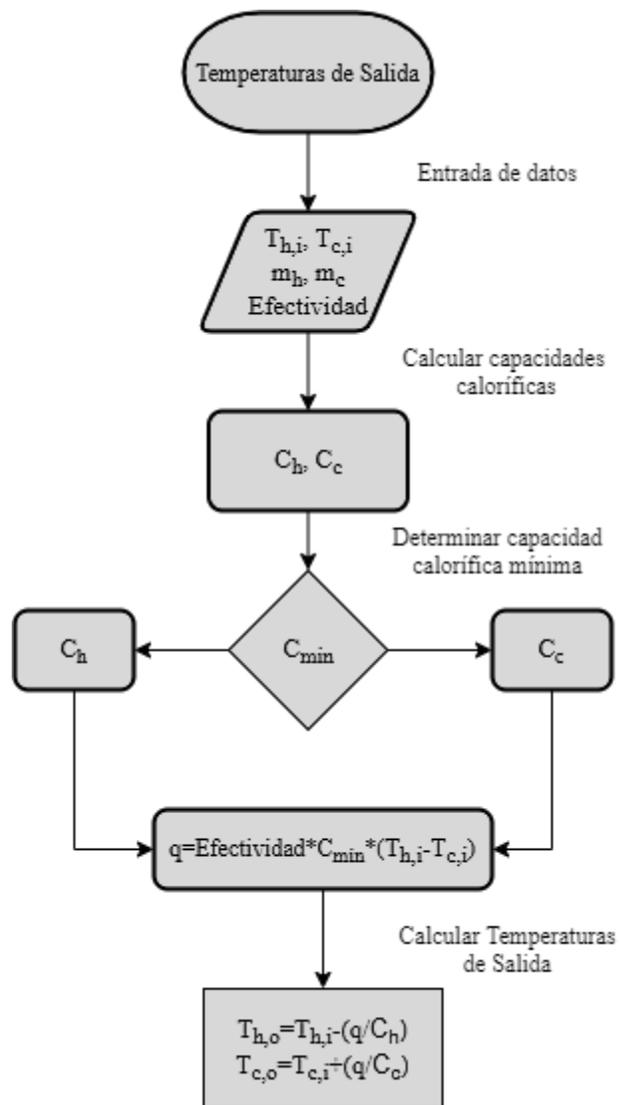


Figura 3.34. Diagrama de flujo para cálculo de temperatura de salida.

---

## CAPÍTULO 4. PRUEBAS

---

Para implementar el banco de pruebas para su uso didáctico se proponen prácticas para que los alumnos experimenten con diferentes configuraciones de flujo, ya sea paralelo o contracorriente, además de experimentar con las diferentes variables como diferentes flujos máscicos de agua y de aceite, para que siguiendo esta metodología sean los mismo alumnos quienes a través de la experimentación y el análisis matemático realicen sus propias inferencias a cerca del intercambiador de tubos y coraza y así comprueben los conocimientos adquiridos en clase.

### 4.1. Prácticas propuestas

Para la realización de las prácticas se propone la práctica del Anexo 2, en el cual los alumnos podrán registrar datos experimentales, para posteriormente realizar los cálculos necesarios para predecir las temperaturas de salida y así comparar la práctica experimental con los conocimientos teóricos.

La práctica descrita en el Anexo 2, funciona para cualquier tipo de configuración que se tenga o se desee tener en el intercambiador, lo importante es conocer las conclusiones de los alumnos una vez que realicen la práctica y su experiencia al comprobar los datos teóricos con los experimentales.

Aunado a lo anterior, se pretende que los alumnos conozcan un poco a cerca de cómo funciona la interfaz de usuario, a través de la asignación de los diagramas de flujo que ellos sugieren o suponen que es el adecuado para la obtención de resultados y como sería esta suposición aplicada en la programación de la interfaz.

### 4.2. Pruebas realizadas

Para realizar pruebas en el prototipo didáctico de intercambiador de tubos y coraza se requieren dos fluidos de trabajo, el fluido frío y el fluido caliente. Para el fluido frío se utilizó agua y para el fluido frío se utilizó aceite SAE 5W-30, las propiedades de los fluidos se observan en las *Tablas 4.1* y *4.2*, respectivamente.

**Tabla 4.1. Propiedades de agua. [14]**

Temperatura [K]	Densidad [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	Cp [ $\text{kJ}/\text{kg}^* \text{K}$ ]
275	999.9	4.211
300	996.5	4.179
305	994.6	4.180
325	987.1	4.182

**Tabla 4.2. Propiedades del aceite SAE 5W-30**

Propiedad	
Gravedad especifica	0.8514
Temperatura [K]	Cp [ $\text{kJ}/\text{kg}^* \text{K}$ ]
275	1.805
300	1.909
305	1.930
325	2.014

Los resultados obtenidos en la interfaz se muestran a continuación en las *Tablas 4.3 a 4.6*.

La *Tabla 4.3 A*, ilustra la efectividad obtenida según las condiciones del intercambiador, en una configuración de un paso por los tubos y flujo paralelo. Los pasos para una configuración de este tipo se describen en el Anexo 4.

**Tabla 4.3 A Resultados de cálculo de efectividad. Un paso por los tubos. Flujo Paralelo.**

Aceite		Agua			Efectividad	
$T_{h,i}$ [°C]	$T_{h,o}$ [°C]	$Q_{Aceite}$ [cm <sup>3</sup> /s]	$T_{c,i}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]	$Q_{Agua}$ [Lt/min]	$\varepsilon$
43.94	28.5	4.050	24.8	28.8	1.167	0.807
43.94	28.5	5.630	24.8	28.7	1.11	0.807
43.88	28.44	4.830	24.9	28.8	1.11	0.812
40.69	26.81	4.050	25.1	27.1	1.056	0.891
40.69	26.81	4.050	25.1	27.1	1.111	0.891
40.69	26.75	4.050	25.1	27.1	1.111	0.895
45.69	26.62	9.21	24.12	25.44	2.27	0.904
45.69	26.62	8.44	24.12	25.5	2.33	0.904
45.75	26.56	8.31	24.12	25.44	2.27	0.904
45.69	26.5	7.72	24.12	25.5	2.27	0.904

Es importante notar que la efectividad aumenta al aumentar el caudal volumétrico de agua, a pesar de tener una temperatura de entrada de aceite mayor que el primer caso de estudio.

La *Tabla 4.3 B*, muestra la diferencia que existe entre las temperaturas de salida experimentales y las teóricas, en una configuración de un paso por los tubos y flujo paralelo. Se puede observar en la *Tabla 4.3 B*, que la efectividad aumenta al tener una menor temperatura de entrada de aceite, debido a que se requiere enfriar menos el aceite.

**Tabla 4.3 B Comparación entre temperaturas de salida teóricas y experimentales. Un paso por los tubos. Flujo Paralelo.**

$\varepsilon$	Aceite			Agua			Teórico		Diferencia Experimental teórico	
	$T_{h,i}$ [°C]	$Q_{Aceite}$ [ $cm^3/s$ ]	$T_{c,i}$ [°C]	$Q_{Agua}$ [Lt/min]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]		
0.807	43.06	4.22	24.9	1.111	26.38	26.1	0.760	1.41		
0.807	42.94	4.16	24.9	1.111	28.41	26.2	0.054	1.31		
0.807	42.75	3.75	24.9	1.111	28.38	26.1	0.757	1.33		
0.891	40.31	3.38	25.1	1.056	26.78	26.2	0.085	0.781		
0.891	40.31	4.5	25.1	1.056	26.84	26.6	0.218	0.374		
0.891	40.38	3.38	25.2	1.111	26.85	26.85	26.2	0.693		

La Tabla 4.4 A, muestra los resultados de la efectividad en una configuración de un paso por los tubos y flujo a contracorriente.

**Tabla 4.4 A Resultados de cálculo de efectividad. Un paso por los tubos. Flujo contracorriente.**

Aceite			Agua			Efectividad
$T_{h,i}$ [°C]	$T_{h,o}$ [°C]	$Q_{Aceite}$ [ $cm^3/s$ ]	$T_{c,i}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]	$Q_{Agua}$ [Lt/min]	$\varepsilon$
48.50	27.06	2.70	26.87	28.06	2.22	0.955
48.50	27	3.38	26.81	28.12	2.22	0.955
41.3	26.1	4.22	25.37	28.2	1.11	0.953
41.3	26.1	4.50	25.31	28.2	1.17	0.949
41.2	26.1	4.73	25.31	28.2	1.11	0.949

En la tabla anterior se observa que la efectividad en ambos casos de estudio es casi la misma, sin embargo, el primer caso tiene mayor temperatura de entrada del fluido caliente, y se aprecia que mantiene una efectividad muy similar al caso que tiene una menor temperatura de entrada, esto se debe al aumento en el caudal volumétrico de fluido frío, ya que este aumento permite una mejor transferencia de calor.

En la Tabla 4.4 B, se observa la diferencia que existe entre las temperaturas de salida del intercambiador experimentales y las teóricas.

**Tabla 4.4 B Comparación entre temperaturas de salida teóricas y experimentales. Un paso por los tubos. Flujo Contracorriente.**

	Aceite		Agua		Teórico		Diferencia Experimental teórico	
$\varepsilon$	$T_{h,i}$ [°C]	$Q_{Aceite}$ [ $cm^3/s$ ]	$T_{c,i}$ [°C]	$Q_{Agua}$ [Lt/ $min$ ]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]
0.955	46	3	27	2.22	27.95	27.7	0.95	0.33
0.955	46	2	27	2.22	27.95	27.4	0.95	0.55
0.950	40.69	4.05	25.5	1.111	26.26	26.8	0.50	0.92
0.950	40.69	4.05	25.6	1.111	26.32	26.8	0.62	0.87
0.950	40.56	4.05	25.5	1.167	26.25	26.7	0.633	0.93

Se observa que el cálculo de las temperaturas en la interfaz es muy similar a las temperaturas teóricas, ya que tienen una diferencia mínima.

En la *Tabla 4.5*, se ilustra la comparación entre un flujo paralelo y a contracorriente, con condiciones similares de operación.

**Tabla 4.5 Comparación entre flujo paralelo y Flujo contracorriente. Un paso por los tubos.**

	Aceite		Agua		Teórico		Diferencia Experimental teórico	
$\varepsilon$	$T_{h,i}$ [°C]	$Q_{Aceite}$ [ $cm^3/s$ ]	$T_{c,i}$ [°C]	$Q_{Agua}$ [Lt/ $min$ ]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]
Flujo paralelo								
0.891	40.31	3.38	25.1	1.056	26.78	26.2	0.085	0.781
0.891	40.31	4.5	25.1	1.056	26.84	26.6	0.218	0.374
0.891	40.38	3.38	25.2	1.111	26.85	26.2	0.225	0.693
Flujo contracorriente								
0.950	40.69	4.05	25.5	1.111	26.26	26.8	0.50	0.92
0.950	40.69	4.05	25.6	1.111	26.32	26.8	0.62	0.87
0.950	40.56	4.05	25.5	1.167	26.25	26.7	0.633	0.93

La *Tabla 4.5* demuestra que para una mejor efectividad una configuración de flujo a contracorriente es la opción más viable.

En las *Tablas 4.6 A* y *4.6 B*, se presentan los resultados de la efectividad, así como las comparaciones entre las temperaturas de salida teóricas y experimentales del intercambiador de calor con una configuración de dos pasos por los tubos.

**Tabla 4.6 A Resultados de cálculo de la efectividad. Dos pasos por los tubos.**

Aceite			Agua			Efectividad
$T_{h,i}$ [°C]	$T_{h,o}$ [°C]	$Q_{Aceite}$ [cm <sup>3</sup> /s]	$T_{c,i}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]	$Q_{Agua}$ [Lt/min]	$\epsilon$
43.69	33.69	6.76	24.37	25.56	1.89	0.526
43.75	33.69	6.76	24.37	25.56	1.83	0.526
43.81	33.75	6.76	24.37	25.56	1.83	0.526

**Tabla 4.6 B Comparación entre temperaturas de salida teóricas y experimentales. Dos pasos por los tubos.**

$\epsilon$	Aceite		Agua		Teórico		Diferencia Experimental teórico	
	$T_{h,i}$ [°C]	$Q_{Aceite}$ [cm <sup>3</sup> /s]	$T_{c,i}$ [°C]	$Q_{Agua}$ [Lt/ min]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]	$T_{h,o}$ [°C]	$T_{c,o}$ [°C]
0.526	43.19	5.5	25	2.16	25.6	33.53	0.532	0.436
0.526	43.13	5	24.37	2.16	24.6	33.01	0.006	1.4
0.526	43.13	5.5	25	2.16	25.6	33.53	0.532	0.436

---

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

---

En el trabajo se logró demostrar la importancia del intercambiador de calor dentro de un laboratorio de termofluidos del tipo universitario, ya que se fundamentó la importancia que un intercambiador tiene en el ámbito industrial y de investigación. Así como la importancia que tiene en la formación de futuros ingenieros la realización de prácticas de laboratorio que les permitan a los alumnos ilustrar lo que alguna vez analizan en el salón de clases.

Como resultado del trabajo realizado se obtuvo un prototipo totalmente didáctico para uso de los alumnos de la División de Ingenierías, dicho prototipo puede ser manipulado en su totalidad por los alumnos con la previa lectura del manual de operación y con la supervisión de quien esté a cargo de la práctica. El prototipo no solo explica los fundamentos básicos de transferencia de calor, también permite que los alumnos conozcan el monitoreo y como este puede ser llevado a cabo a través de las diferentes herramientas que se adquieren en el trascurso de la licenciatura, aunado a ello, al momento de cambiar las configuraciones del dispositivo se enseña a los alumnos a usar las herramientas adecuadas para su montaje lo que significa que el banco de pruebas va más allá de un prototipo que ilustra la transferencia de calor de un fluido a otro.

La actualización de equipos como el que se presentó en este trabajo realizada por propios alumnos de la división permite que los alumnos exploren las posibilidades, imaginen y optimicen en recursos, ya que realizar un trabajo de este tipo requiere de el planteamiento de diversos escenarios de operación del equipo y dependerá de los alumnos la selección de los mejores materiales, accesorios y utensilios para el uso más conveniente del equipo, caso contrario si los equipos se compraran totalmente nuevos, ya que al adquirir dispositivos totalmente nuevos se tienen varias desventajas como: en primer lugar el costo, como se describió en el trabajo el costo de un prototipo nuevo es muy elevado, se desconoce la facilidad de adquirir refacciones y debido al elevado costo, su manipulación se ve limitada, puesto que para conservar el equipo de la mejor manera, como se hace en muchos equipos de la universidad se limita el uso de dichos equipos de los mismo alumnos de la división, y si bien también es una forma de aprender considero no es la ideal.

El equipo y su interfaz demuestran el funcionamiento correcto para los fines de aprendizaje de los alumnos, y como se muestra en los resultados las variantes son muchas y se pueden hacer inferencias

para cada una de ellas. El prototipo está abierto a las posibilidades que surjan en el transcurso de su uso, ya que es versátil y cuenta con lo necesario para la obtención de la información completa del dispositivo.

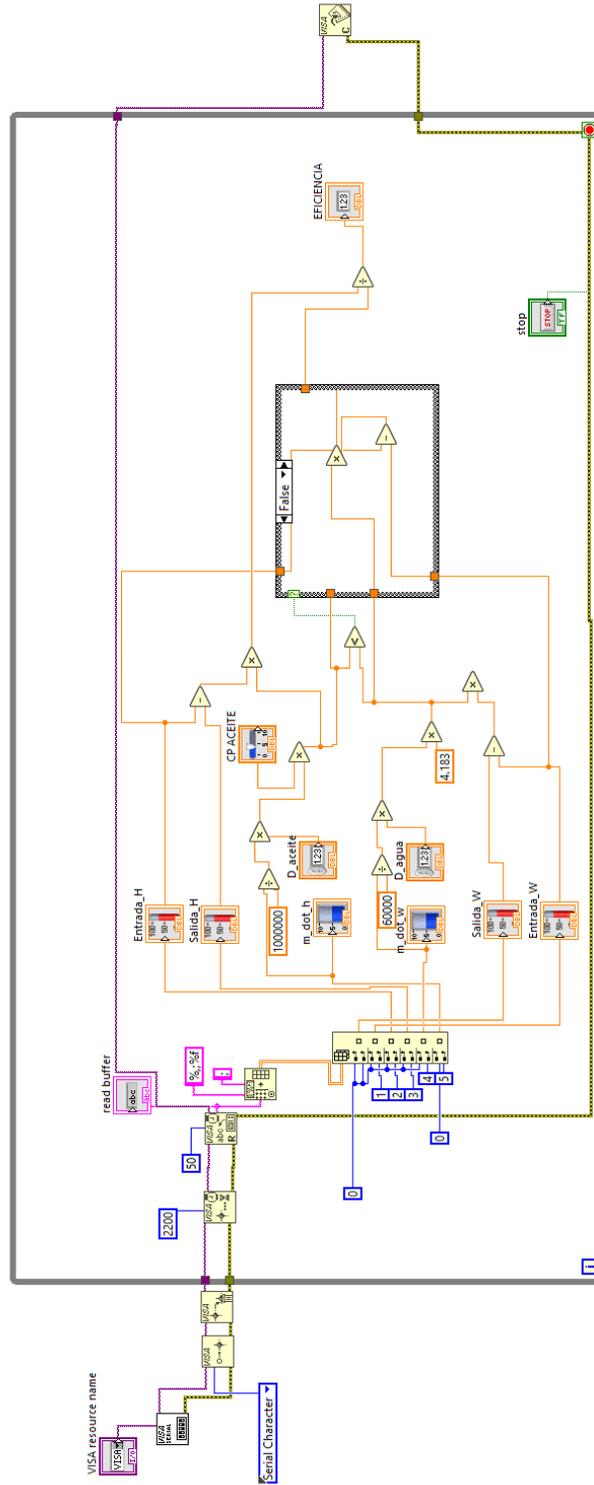
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Universidad de Guanajuato, “Ingeniería Mecánica.” <https://www.ugto.mx/licenciaturas/por-area-del-conocimiento/ingenierias/ingenieria-mecanica> (accessed Jan. 26, 2021).
- [2] “Manual del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI).” .
- [3] E. Pal, I. Kumar, J. B. Joshi, and N. K. Maheshwari, “CFD simulations of shell-side flow in a shell-and-tube type heat exchanger with and without baffles,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 143, pp. 314–340, 2016, doi: 10.1016/j.ces.2016.01.011.
- [4] T. Wakui and R. Yokoyama, “On-line model-based performance monitoring of a shell-and-tube type heat exchanger using steam and water,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 10, pp. 2669–2677, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.04.009.
- [5] R. K. (Rochester I. of T. Shah and D. P. (University of K. Sekulic, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, 1st ed. New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC., 2003.
- [6] F. P. (College of E. U. of N. D. Incropera *et al.*, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [7] Y. A. (Universit. of N. Çengel and A. J. (Oklahom. S. U. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, 4th ed. New York: : McGraw-Hill Education, 2011.
- [8] TEMA, *Standars of the tubular exchanger manufacturers association*, 8th ed. New York: Tubular Exchanger Manufacturers Association., 1999.
- [9] ASME, “Boiler and Pressure Vessel Code.” .
- [10] P. Hilton, “Heat Exchanger Service Unit.” <https://www.p-a-hilton.co.uk/products/heat-transfer/heat-exchanger-service-unit>.
- [11] A. A. (Universidad de G. Aguilar Moreno, “Diseño y Construcción de un Intercambiador de Calor para Uso Didáctico,” Universidad de Guanajuato, 2008.
- [12] P. A. Hilton, “Manual Experimental de Operación y Mantenimiento Unidad de Transferencia de Calor Flujo Laminar/ Viscoso.” Hampshire, 1991.
- [13] C. F. Coombs, *Electronic Instrument Handbook*, 3rd ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000.
- [14] M. J. (The O. S. U. Moran and H. N. (Iowa S. U. of S. and T. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics: Si Version*, 5th ed. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [15] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, and Y. I. Cho, *Handbook of Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill Education, 1998.
- [16] G. K. Mc Millan and P. H. Vegas, *Process Industrial Instruments and Controls Handbook*, 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

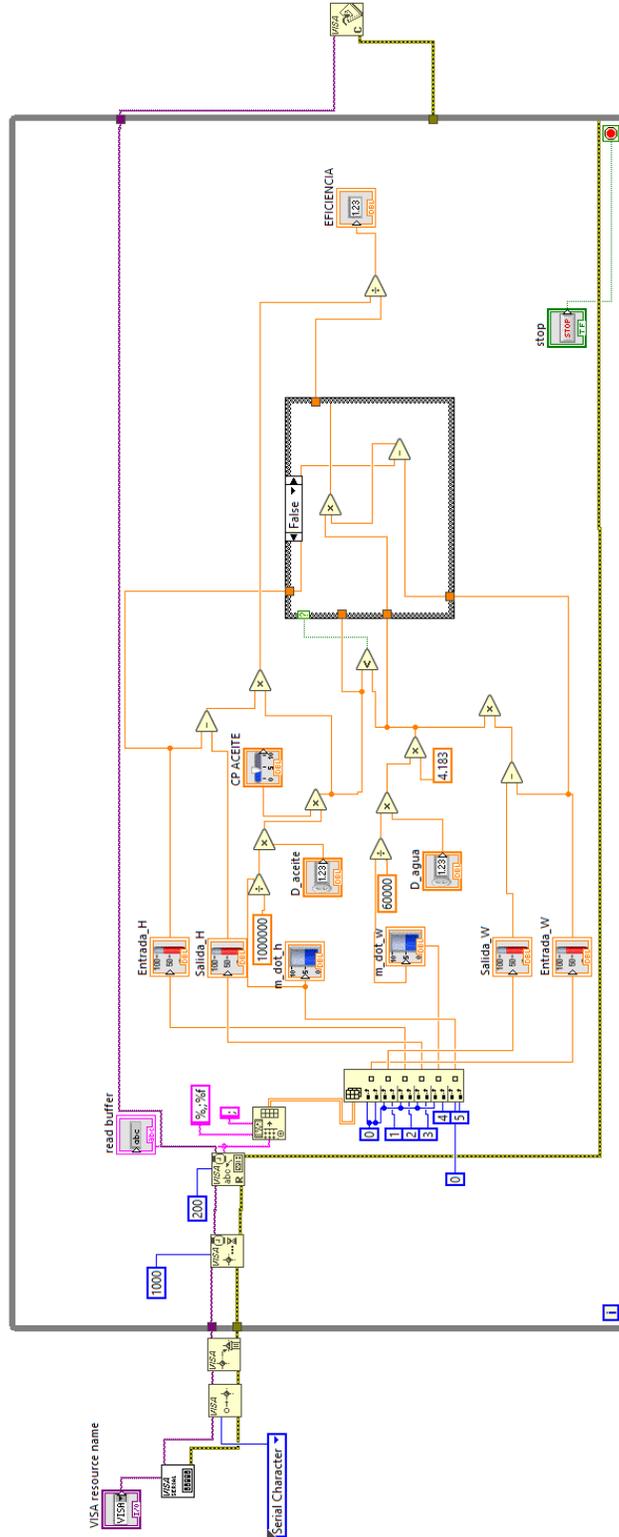
- [17] R. W. Fox, A. T. McDonald, and P. J. Pritchard, *Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [18] J. E. Lindell, W. P. Moore, and H. W. King, *Handbook of Hydraulics*, 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- [19] D. W. Green and M. Z. Southard, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [20] A. M. Sadegh and W. M. Worek, *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers, 12th Edition*, 12th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.

## ANEXOS

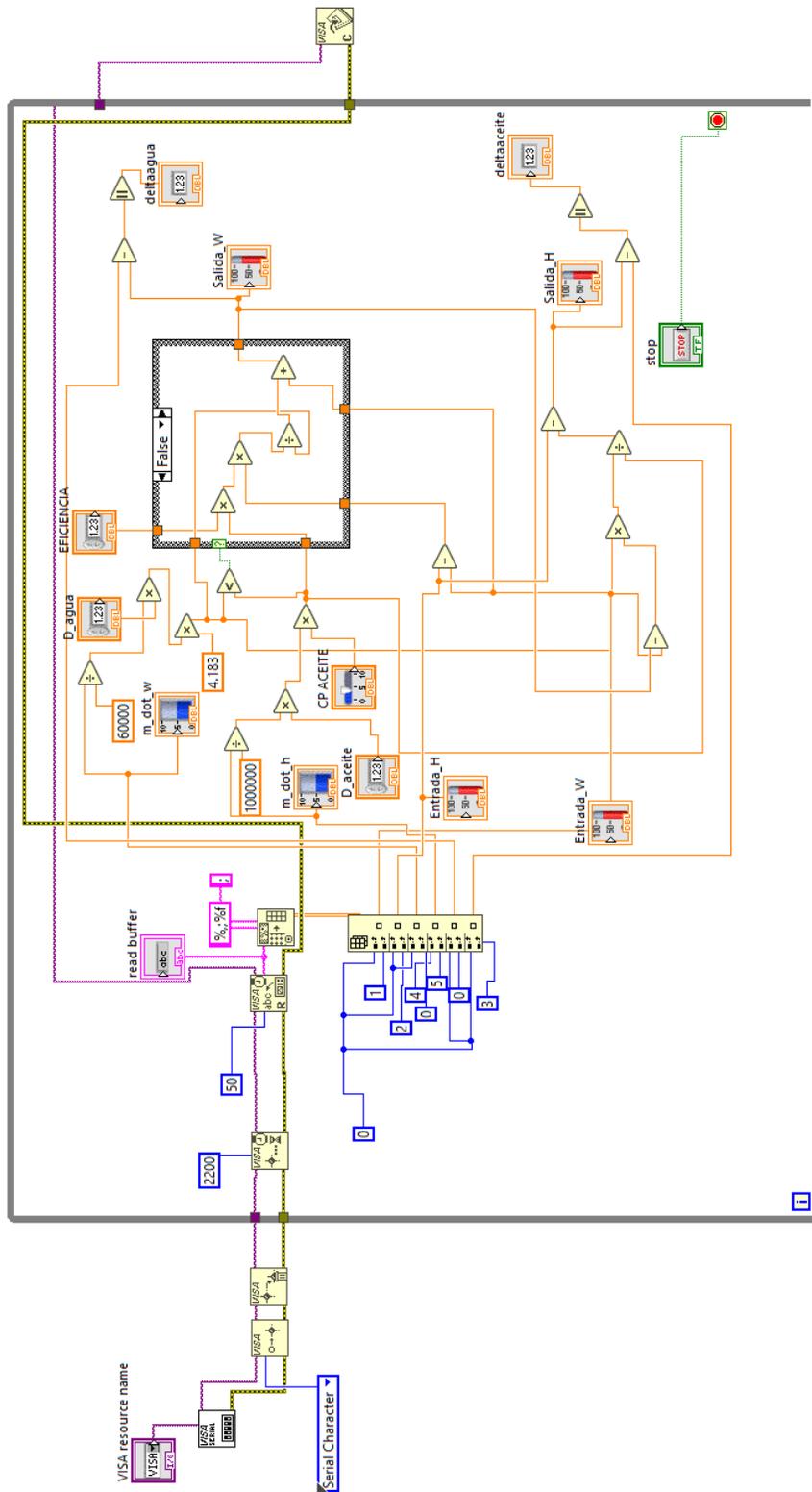
## Anexo 1 Programa para interfaz de LabView



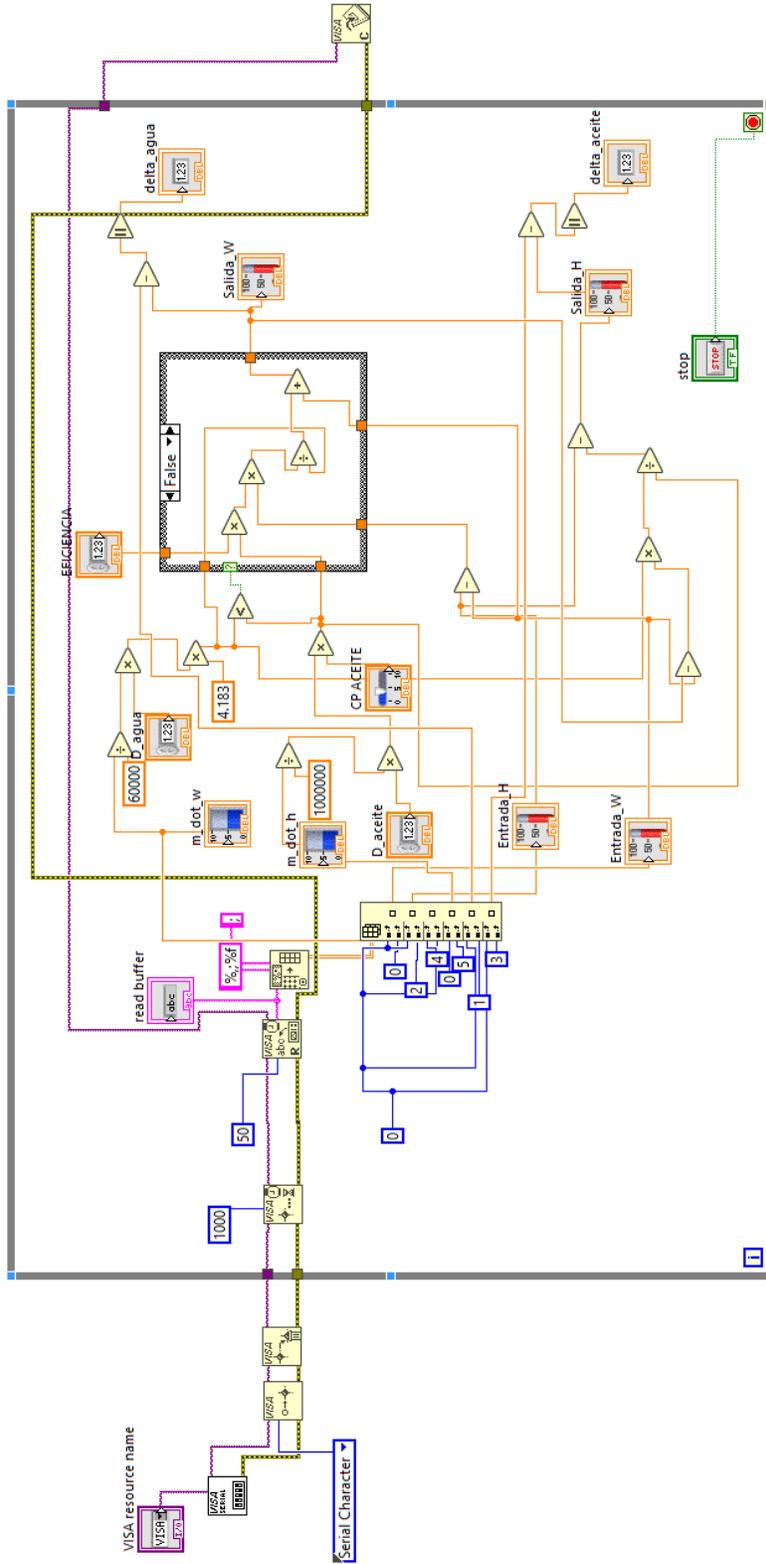
*Cálculo de efectividad en contraflujo*



*Cálculo de efectividad en flujo paralelo*



*Cálculo de temperaturas de salida a contraflujo*



*Cálculo de temperaturas de salida en flujo paralelo*

---

# Práctica de Laboratorio

---



UNIVERSIDAD  
DE GUANAJUATO  
Campus Irapuato - Salamanca



## Intercambiador de Calor Tubo y Coraza

---

Fecha:

Nombres de Integrantes del equipo:

---

### OBJETIVOS.

- Observar las diferentes configuraciones del intercambiador de tubo y coraza. (un paso por los tubos y dos pasos por los tubos) y analizar el efecto que tienen en la efectividad del equipo.
- Analizar los efectos que las variables de entrada (flujo másico, temperatura de entrada) ocasionan en la efectividad del dispositivo.
- Comparar las temperaturas de salida reales con las temperaturas de salida aproximadas por el método de solución teórico.

### FUNDAMENTO TEÓRICO.

El intercambiador de define como el dispositivo en el cual ocurre un proceso de transferencia de calor entre dos fluidos a temperaturas diferentes y separadas por una pared sólida, evitando que se mezclen entre sí ambos fluidos. A partir del último cuarto de siglo los intercambiadores de calor han adquirido gran relevancia en el campo industria y de investigación, Los intercambiadores de tipo coraza y tubos son utilizados ampliamente en la industria debido a su versatilidad de operación, teniendo como única limitante los materiales para su construcción.

Los intercambiadores de calor se encuentran formados por tres elementos principales.

#### **Coraza.**

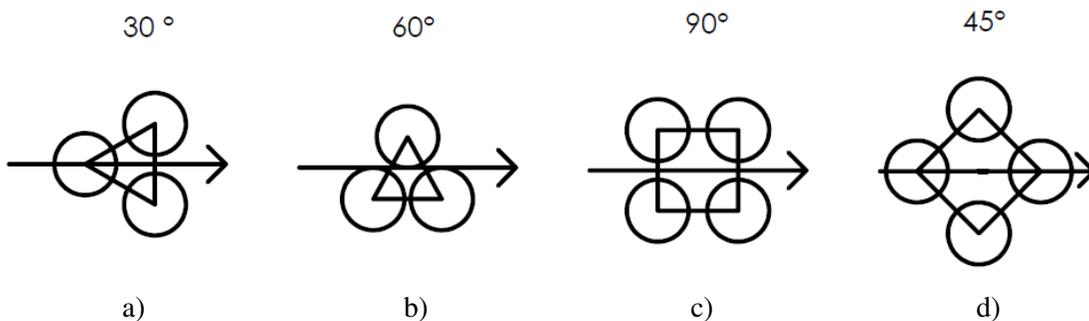
La coraza es por lo general cilíndrica con una sección transversal circular. En la *Figura 1*, se muestra la coraza del intercambiador que se encuentra en el laboratorio de termofluidos de la División.



*Figura 1. Coraza de intercambiador de calor*

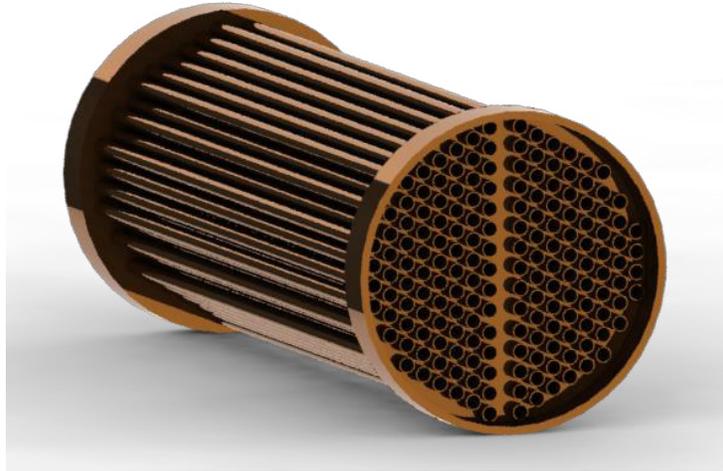
**Tubos.**

Existen varias formas de tubos para los intercambiadores de calor de tubo y coraza, el haz de tubos en forma de U y rectilíneo es de los más comunes. El arreglo de los tubos internos puede ser de varios tipos como se muestra en la *Figura 2*.



*Figura 2. Arreglo de los tubos. a) Triangular, b) triangular rotado, c) cuadrado, d) cuadrado rotado. (TEMA, 1999)*

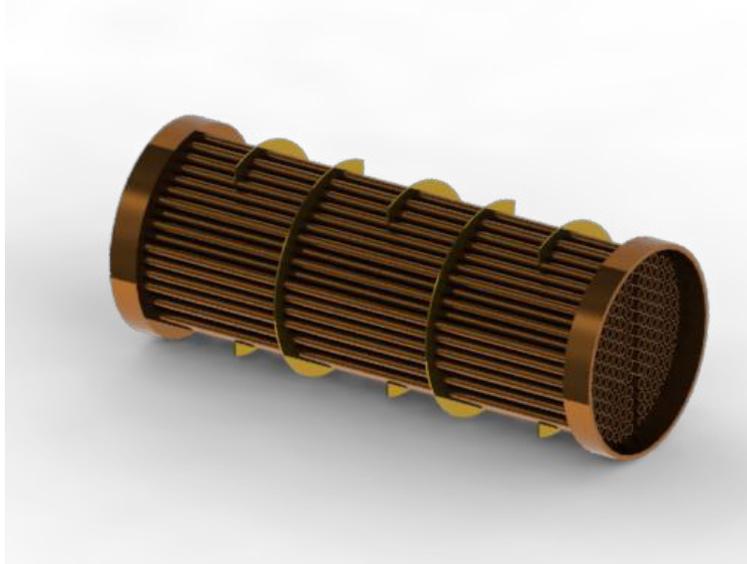
En la *Figura 3.*, se ilustran los tubos del intercambiador de calor del laboratorio.



*Figura 3. Arreglo de tubos de intercambiador de calor.*

### **Deflectores.**

Los deflectores se clasifican en longitudinales y transversales. El propósito de los deflectores longitudinales es controlar la dirección del fluido de la coraza así como distribuir correctamente las dos corrientes de fluido. Los deflectores transversales se pueden clasificar como placas de deflectores o rejillas. Las placas de deflectores son usadas para soportar los tubos durante el ensamble y su operación. En la *Figura 4*, se muestran los deflectores de intercambiador de calor.



*Figura 4. Deflectores de intercambiador de calor.*

El método de solución para los intercambiadores de tubo y coraza es el  $\varepsilon$ -NTU.

el flujo de transferencia de calor del fluido caliente al fluido frío en el intercambiador de calor se expresa a continuación (1).

$$q = C_h(T_{h,i} - T_{h,o}) = C_c(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (1)$$

La efectividad se expresa en (2) como.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (2)$$

Para conocer  $q_{max}$  es necesario conocer la diferencia de temperatura máxima la cual sería la diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada del fluido caliente y la temperatura de entrada del fluido frío, y la capacidad calorífica mínima entre ambos fluidos, como se muestra en la siguiente expresión (3).

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) = C_{min} \Delta T_{max} \quad (3)$$

## PROCEDIMIENTO.

### Cálculo de efectividad.

Una vez que el encargado de la practica verifico el dispositivo para su uso y encendió el equipo se procede a seguir los siguientes pasos.

- Esperar 5-10 minutos a que el aceite se caliente.
- Modificar el flujo de aceite desde la bomba, la cual cuenta con tres caudales diferentes, según el giro de la perilla.
- Modular el caudal de agua, con la llave de paso que controla el bypass.
- Una vez seleccionadas las variables de salida se procede a tomar nota de los datos con ayuda de la *Tabla 1*.
- Calcular la efectividad del dispositivo.

*NOTA: El encargado de la práctica proporcionara la magnitud de la efectividad del dispositivo, con el propósito de que se compruebe el cálculo realizado por el alumno.*

*Tabla 1. Datos para calcular eficiencia*

Dato	Aceite	Agua	Configuración de flujo	Cruzado
				<input type="text"/>
Caudal volumétrico			Número de pasos	Paralelo
				<input type="text"/>
Temperatura de entrada			Efectividad	Uno
Temperatura de salida (Experimentales)				Dos
Temperatura de salida (Teóricas)				

#### **Cálculo de temperaturas de salida.**

- Una vez que el encargado de la práctica proporcionó la magnitud de la efectividad se procede a realizar el cálculo para la obtención de las temperaturas de salida, con los datos previamente anotados (caudal, temperaturas de entrada)
- Finalmente se realiza una comparación entre las temperaturas de salida experimentales y las teóricas.

#### **Pre-informe**

- Investigar aplicaciones de intercambiadores de calor de tubo y coraza en la industria.
- Diagrama de flujo de método de solución  $\epsilon$ -NTU para obtención de efectividad a partir de temperaturas de salida y entrada conocidas.
- Diagrama de flujo de método de solución  $\epsilon$ -NTU para obtención de temperaturas de salida, a partir de temperaturas de entrada y efectividad.

#### **Resultados esperados**

- Realizar un reporte con introducción, desarrollo y conclusiones de lo visto en la práctica.

## Anexo 3 Código en Arduino

```

//Declaración de librerías
#include <OneWire.h> //Librería para
sensores de temperatura
#include <DallasTemperature.h> //Librería para
sensores de temperatura
#include <Wire.h> //Librería para sensores
de temperatura
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //Librería para
pantalla LCD
#include <Ultrasonic.h> //Librería para sensor
ultrasonico
#include <Servo.h> //Librería para
servomotor
Ultrasonic ultrasonic (8,7);//(trig PIN, Echo
PIN)Declaración de pines para sensor de distancia
//Declaración de variables
float vol; //Variable de volumen
float Q_dot; //Variable para caudal
volumetrico de aceite
int necesario = 0; //Variable para la distancia
detectada por sensor ultrasonico
float tiempo = 0; //Variable de tiempo
int distancia;

//PROGRAMA PARA SENSORES DE
TEMPERATURA
OneWire ourWire(6);//Se establece el pin 6 como
bus OneWire, los sensores del intercambiador
//se encuentran juntos en este mismo
pin
DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se
declara una variable u objeto para los sensores
DeviceAddress address1 = {0x28, 0x6C, 0x16,
0x79, 0xA2, 0x0, 0x3, 0x20};//termopar izquierdo
agua
DeviceAddress address2 = {0x28, 0x42, 0xBD,
0x79, 0xA2, 0x1, 0x3, 0x2};//termopar izquierdo
aceite ENTRADA
DeviceAddress address3 = {0x28, 0x86, 0x8D,
0x56, 0xB5, 0x1, 0x3C, 0xE0};//termopar derecho
Aceite SALIDA
DeviceAddress address4 = {0x28, 0xCE, 0x20,
0x79, 0xA2, 0x1, 0x3, 0xCE};//termopar derecho
agua

OneWire ourWire2(11);//Se establece el pin 11
como bus OneWire, los sensores de los reservorios
//y temperatura ambiente se encuentran
en este mismo pin
DallasTemperature sensors2(&ourWire2);
DeviceAddress address5 = {0x28, 0x10, 0x81,
0x82, 0x12, 0x19, 0x1, 0x98};//reservorio de aceite

DeviceAddress address6 = {0x28, 0x1, 0xE1, 0xF,
0x14, 0x19, 0x1, 0x70};//temperatura ambiente
DeviceAddress address7 = {0x28, 0x79, 0x98,
0xD4, 0x1E, 0x19, 0x1, 0x28};//reservorio de agua

//PROGRAMA PARA CAUDALIMETRO DE
AGUA
volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad
de pulsos recibidos
int PinSensor =2; //Sensor conectado en el pin 2
float factor_conversion=18; //para convertir de
frecuencia a caudal

//Función que se ejecuta en interrupción
void ContarPulsos ()
{
    NumPulsos++;//incrementamos la variable de
pulsos
}

//Función para obtener frecuencia de los pulsos
int ObtenerFrecuencia()
{
    int frecuencia;
    NumPulsos = 0; //se pone a 0 el número de pulsos
interrupts(); //Se habilitan las interrupciones
delay(1000); //Muestra de 1 segundo
noInterrupts(); //Se deshabilitan las interrupciones
frecuencia=NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
return frecuencia;
}

//PROGRAMA PARA PANTALLA LCD
//Se crea el objeto lcd con la dirección 0x3F, 20
columnas y 4 filas
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

//PROGRAMA PARA SERVOMOTOR
Servo Servo_1;
int Angulo = 0; // Variable que contendrá el
angulo de giro del servo

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    //SENSORES DE TEMPERATURA
    sensors.begin(); //Se inicia el sensores
    sensors2.begin(); //Se inicia el sensores
    //CAUDALIMETRO DE AGUA
    pinMode(PinSensor, INPUT);
    attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING);
    //(Interrupcion 0,funcion,Flanco de subida)

```

```

//PANTALLA LCD
//Encendemos la luz de fondo.
lcd.backlight();
// Inicializamos el objeto lcd
lcd.init();
//SERVOMOTOR
Serial.begin (9600);
Servo_1.attach(3);// Definir el pin (3) que se
utilizara para el control del servo

Servo_1.write(150);//Se indica un angulo de 150
del servomotor para que cierre la válvula
delay(200);
}

void loop()
{
//SENSORES DE TEMPERATURA
sensors.requestTemperatures(); //Se envía el
comando para leer la temperatura
float temp1= sensors.getTempC(address1);//Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 1
float temp2= sensors.getTempC(address2);//Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 2
float temp3= sensors.getTempC(address3);//Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 3
float temp4= sensors.getTempC(address4);//Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 4
sensors2.requestTemperatures(); //Se envía el
comando para leer la temperatura
float temp5= sensors2.getTempC(address5);//Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 5
float temp6= sensors2.getTempC(address6);//Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 6
float temp7= sensors2.getTempC(address7);//Se
obtiene la temperatura en °C del sensor 7
delay(1000);
//CAUDALIMETRO
float frecuencia=NumPulsos;
NumPulsos=0;
float caudal_L_m=frecuencia/factor_conversion;
//Se calcula el caudal en L/m
float caudal_L_h=caudal_L_m*60; //Se calcula el
caudal en L/h
//SENSOR ULTRASONICO
necesario=ultrasonic.read(CM); //Se indica la
variable en la que se guarda la lectura del sensor
//SERVOMOTOR
// Se indica una condición para el rango en el cual
se deb contabilizar el tiempo
if (necesario >20 && necesario <=38){
tiempo=tiempo+2.2; //tiempo por cada ciclo y
obtención de lectura (contador)
}
if (necesario == 20){ //Condición que indica en
que momento debe abrirse la valvula,es decir,

```

```

//girar el servomotor a un angulo
de 0
distancia=ultrasonic.read(CM);
Servo_1.write(100);
delay(4000); //Permanece abierta a válvula
4 segundos
Servo_1.write(150); // Se indica nuevamente su
cierre
necesario=0; //Se indica como 0 necesario
para volver a empezar
tiempo=0; //Se indica como 0 tiempo para
volver a contar
}
if (necesario <20){ //Condición de
seguridad, en caso de que se registre una distancia
menor a 20 cm
// se abre la válvula para evitar
tirar aceite
distancia=ultrasonic.read(CM);
Servo_1.write(100);
delay(4000);
Servo_1.write(150);
necesario=0;
tiempo=0;
}
vol=3.141516*2.175*2.175*(38-necesario); // se
calcula el volumen de aceite
Q_dot=(vol)/(tiempo); //[cm3/s] Se calcula el
caudal volumetrico

//SALIDA DE DATOS EN INTERFAZ
ARDUINO Y PARA LABVIEW
Serial.print(temp1); //TEMPERATURA
IZQUIERDA AGUA
Serial.print(';');
Serial.print(temp3); //TEMPERATURA
DERECHA ACEITE (SALIDA)
Serial.print(';');
Serial.print(temp2); //TEMPERATURA
IZQUIERDA ACEITE (ENTRADA)
Serial.print(';');
Serial.print(temp4); //TEMPERATURA
DERECHA AGUA
Serial.print(';');
Serial.print (caudal_L_m,3); //CAUDAL
VOLUMETRICO DE AGUA [L/min]
Serial.print(';');
Serial.print(Q_dot); //CAUDAL
VOLUMETRICO DE ACEITE [cm3/s]
// Serial.print(';');
// Serial.print(temp5); //TEMPERATURA
RESERVORIO DE ACEITE
// Serial.print(';');
// Serial.print(temp6); //TEMPERATURA
AMBIENTE
// Serial.print(';');

```

```

// Serial.print(temp7);          //TEMPERATURA
RESERVORIO DE AGUA
// Serial.print(';');
// Serial.print(necesario);     //DISTANCIA QUE
REGISTRA EL SENSOR ULTRASONICO
// Serial.print(';');
// Serial.print(tiempo);       //TIEMPO
Serial.println('\n');

//IMPRESIÓN EN PANTALLA LCD
// Ubicamos el cursor en la primera
posición(columna:0) de la segunda línea(filas:1)
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("RW=");
lcd.setCursor(3,0);
lcd.print(sensors2.getTempC(address7));
lcd.setCursor(9,0);
lcd.print("RO=");
lcd.setCursor(12,0);
lcd.print(sensors2.getTempC(address5));
lcd.setCursor(1, 1);
lcd.print("W");
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print("Ti="); //Ti(IZQUIERDO AGUA)
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print(sensors.getTempC(address1));
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print("Td="); //Td(DERECHO AGUA)
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print(sensors.getTempC(address4));
lcd.setCursor(1, 2);
lcd.print("O");
lcd.setCursor(3, 2);
lcd.print("Te="); //ENTRADA de aceite izquierdo
lcd.setCursor(6, 2);
lcd.print(sensors.getTempC(address2));
lcd.setCursor(12, 2);
lcd.print("Ts="); //SALIDA de aceite derecho
lcd.setCursor(15, 2);
lcd.print(sensors.getTempC(address3));
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("QW=");
lcd.setCursor(3, 3);
lcd.print(caudal_L_m,3);
lcd.setCursor(12, 3);
lcd.print("QO=");
lcd.setCursor(15, 3);
lcd.print( Q_dot);
}

```

## **Anexo 4 Manual de operación.**

**Universidad de Guanajuato**

**División de Ingenierías Campus Irapuato  
Salamanca**

**Manual de operación de Intercambiador de  
Coraza y Tubos**



UNIVERSIDAD  
DE GUANAJUATO  
Campus Irapuato - Salamanca



## **Introducción.**

Los intercambiadores de calor tienen una gran importancia en la industria y en el campo de la investigación, ya que proporcionan una infinidad de combinaciones para su uso y estudio, desde su geometría hasta las condiciones de trabajo.

Especialmente los intercambiadores de tipo coraza y tubos, son muy comunes en diferentes áreas de la industria, ya que son empleados en la industria química, alimenticia hasta en aplicaciones de refrigeración. Su amplio uso se debe a la versatilidad que tienen para ser operados, ya que se adaptan a todo tipo de condiciones desde presiones muy elevadas y bajas, hasta temperaturas altas y muy bajas, su única limitante son los materiales para su construcción.

Dada la gran relevancia que tienen los intercambiadores de calor, es importante estudiarlos desde la formación de ingenieros en las aulas, por ello es importante la realización de prácticas en un intercambiador de calor didáctico, en donde los alumnos puedan interferir en su manipulación, montaje y monitoreo.

En el presente manual se explican diversos aspectos del intercambiador de calor, para que sea utilizado correctamente y sea de beneficio para los alumnos de la división de ingenierías.

# Índice

Introducción.....	2
Índice .....	3
Descripción del equipo.....	4
PANTALLA LCD.....	10
RESERVORIO Y RECIRCULACIÓN DE AGUA.....	11
Funcionamiento del Bypass y circulación de agua.....	11
JUEGO DE MANGUERAS PARA CONFIGURACIÓN DE FLUJO.....	13
MEDICIÓN DE CAUDAL VOLUMÉTRICO DE ACEITE.....	14
MONTAJE PARA CONFIGURAR PASOS POR LOS TUBOS.....	16
Configuración de un paso por los tubos.....	19
Configuración de dos pasos por los tubos.....	23
CONEXIONES ELÉCTRICAS.....	23
Conexiones eléctricas.....	24
Conexiones electrónicas.....	25
Interfaz para encargado de práctica.....	27
Encendido del equipo.....	30
Propiedades de los fluidos de trabajo.....	30

## Descripción del equipo.

El laboratorio cuenta con un intercambiador de calor de tubos y coraza didáctico, *Figura 1*. Cada uno de los sensores que componen el banco de pruebas se describen en la *Tabla 1*. Los sensores presentes en el banco de pruebas funcionan con ayuda de una placa ARDUINO tipo uno.

El intercambiador está configurado para funcionar por un paso por los tubos con flujo paralelo y flujo a contracorriente, además de una configuración con dos pasos por los tubos con flujo paralelo y flujo a contracorriente. Para obtener la configuración de dos pasos por los tubos o un paso por los tubos, solo es necesario desmontar y montar la brida derecha que se muestra en el diagrama de la *Figura 1*. El banco de pruebas cuenta con un reservorio de aceite con capacidad de 2.5 litros, el cual cuenta con una resistencia de 500 W, la cual es controlada con la perilla que se muestra en la *Figura 1*, lo que permite elevar la temperatura del aceite haciendo de este el fluido caliente de trabajo a través del intercambiador de calor. El aceite es transportado debido a la bomba de aceite que se encuentra después del reservorio de aceite, la bomba cuenta con tres variaciones diferentes de caudal volumétrico. De manera general el aceite sale del reservorio, pasa por la bomba, entra al intercambiador de calor y sale hacia el flujómetro de aceite para tomar su magnitud y finalmente regresar al reservorio de aceite.

El recorrido del fluido frío, en este caso agua en términos generales comienza en el reservorio de agua, para continuar por la bomba, la cual se encarga de llevar el fluido hacia el flujómetro de agua digital el cual captura el caudal volumétrico para después pasar al flujómetro analógico para posteriormente ingresar a la entrada del intercambiador de calor, finalmente sale del intercambiador y regresa al reservorio.

A continuación se describirá con mayor detalle el funcionamiento del intercambiador.

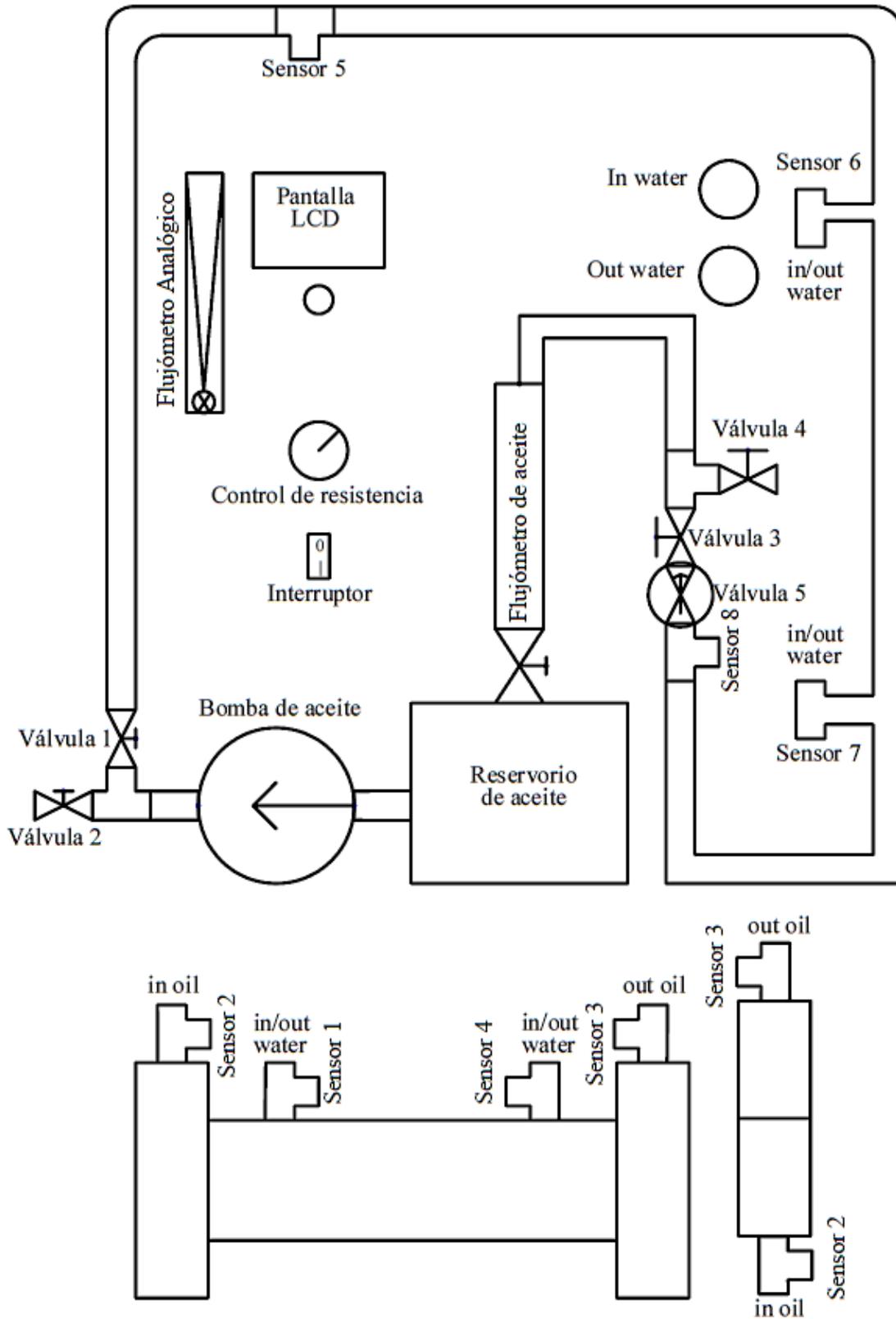
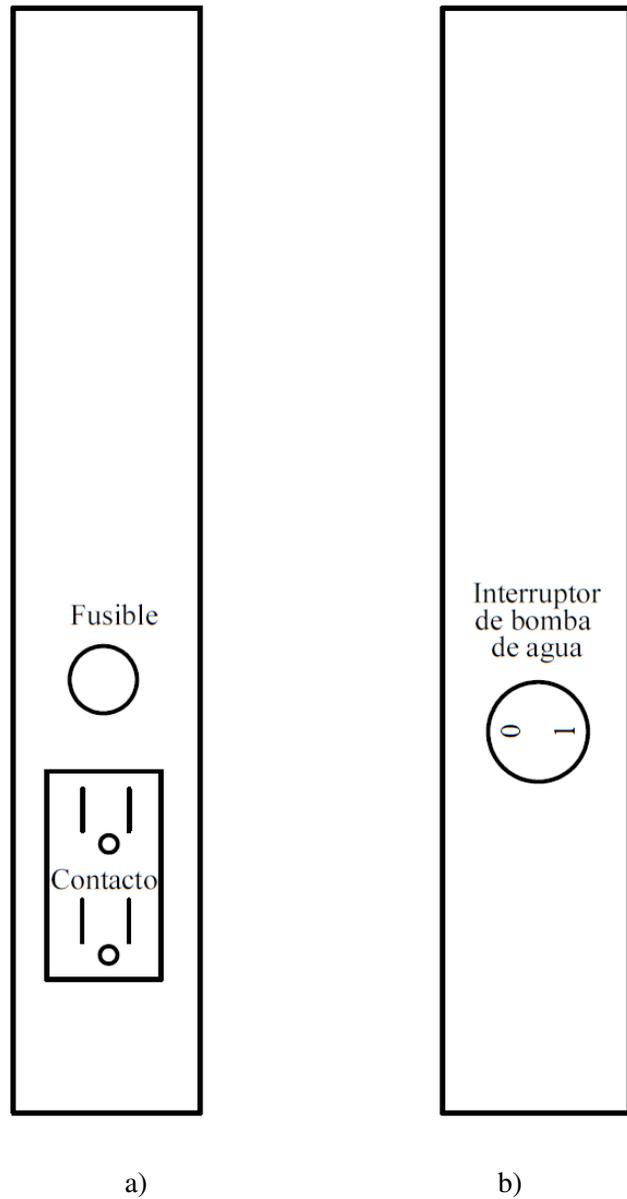


Figura 1. Diagrama general de banco de pruebas didáctico.

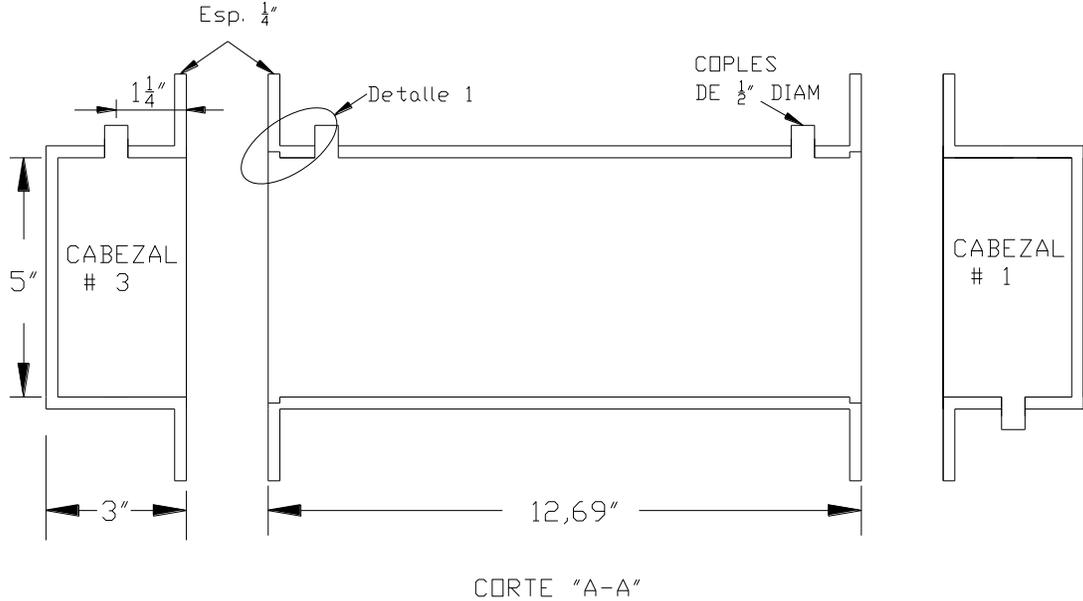
La *Figura 1* ilustra un diagrama general del banco didáctico de pruebas.



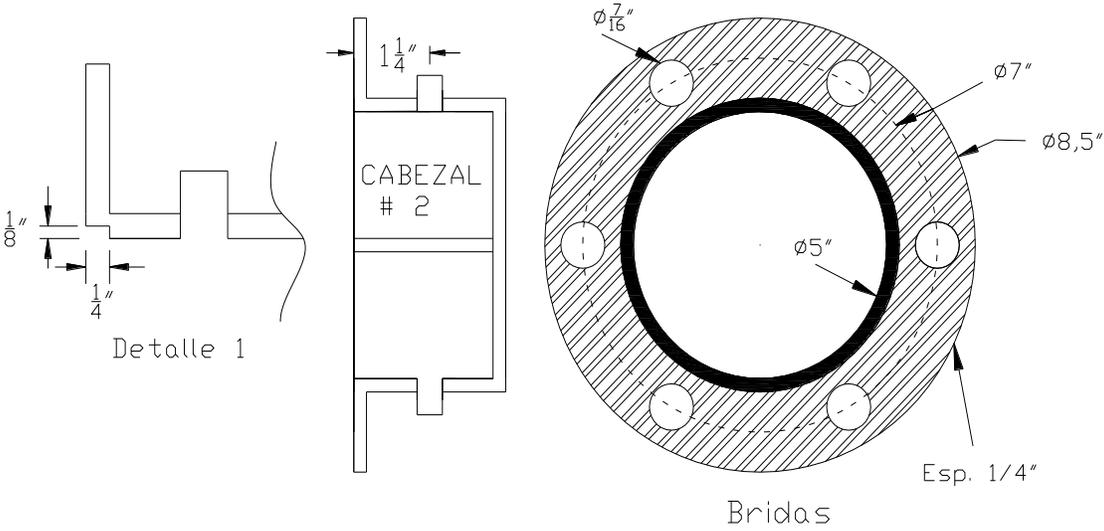
*Figura 2. Vista lateral de banco de pruebas. a) Vista lateral izquierda de banco de pruebas. b) Vista lateral derecha de banco de pruebas.*

La *Figura 2*, muestra lo que se encuentra en los laterales de la estructura del intercambiador de calor.

En la *Figura 3*, se observan las dimensiones del intercambiador de calor así como las bridas 1 y 3 que sirven para la configuración de un paso por los tubos, mientras que en la *Figura 4* se muestran detalles de las bridas así como la brida 2 que se requiere para una configuración de dos pasos por los tubos.



*Figura 3. Dimensiones del intercambiador de calor uso didáctico. [11].*



*Figura 4. Detalle 1 y dimensiones de las bridas. [11].*

*Tabla 1. Descripción de dispositivos en del diagrama general.*

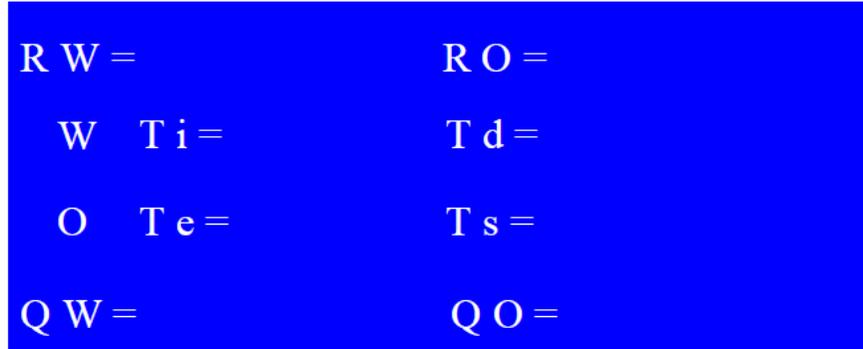
Nombre de dispositivo	Descripción
Sensor 1	Registra la entrada y/o salida del lado izquierdo, de agua.
Sensor 2	Registra la temperatura de entrada del aceite al intercambiador.
Sensor 3	Registra la temperatura de salida del aceite en el intercambiador.
Sensor 4	Registra la entrada y/o salida del lado derecho, de agua.
Sensor 5	Registra la temperatura de aceite de entrada en el intercambiador de tubos concéntricos.
Sensor 6	Registra la entrada y/o salida de agua de la parte superior del intercambiador de tubos concéntricos.
Sensor 7	Registra la entrada y/o salida de agua de la parte inferior del intercambiador de tubos concéntricos.
Sensor 8	Registra la temperatura de salida de aceite del intercambiador de tubos concéntricos.
Válvula 1	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la entrada de flujo de aceite hacia el intercambiador de tubos concéntricos.
Válvula 2	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la entrada del flujo de aceite hacia el intercambiador de tubos y coraza.
Válvula 3	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la salida de aceite del intercambiador de tubos concéntricos.
Válvula 4	Válvula de 1/2 in de tipo globo que controla la salida de aceite del intercambiador de tubos y coraza.
Válvula 5	Válvula de estrangulamiento, para modular el flujo de aceite.
Pantalla LCD	Pantalla que muestra información del intercambiador de tubos y coraza.
Control de resistencia	Perilla que controla la resistencia para modular la temperatura del aceite dentro del reservorio.
Reservorio de aceite	Contenedor del aceite. Dentro del reservorio se eleva la temperatura del aceite. Capacidad de 2.5 Litros aproximadamente.
Bomba de aceite	Bomba de aceite centrífuga que lleva el aceite del reservorio hacia la entrada del intercambiador de tubos concéntricos o de tubos y coraza, según sea la configuración deseada. La bomba cuenta con tres variaciones de flujo masico de aceite.

Interruptor	Enciende la bomba de aceite y la resistencia con controla la temperatura del reservorio de aceite.
Interruptor de bomba de agua	Enciende la bomba de agua.
Fusible	Protege a todo el circuito eléctrico.
Contacto	Contacto para conectar cualquier aparato, como computadoras, laptops o cualquier otro dispositivo que sea necesario.

---

## Pantalla LCD.

La pantalla LCD, es el dispositivo que permite conocer la información del intercambiador, sus temperaturas de entrada y salida de fluido frío y fluido caliente, caudales volumétricos, así como temperatura de los reservorios. *Figura 5.*



*Figura 5. Pantalla LCD.*

En la siguiente *Tabla 2*, se describe la simbología de la pantalla LCD.

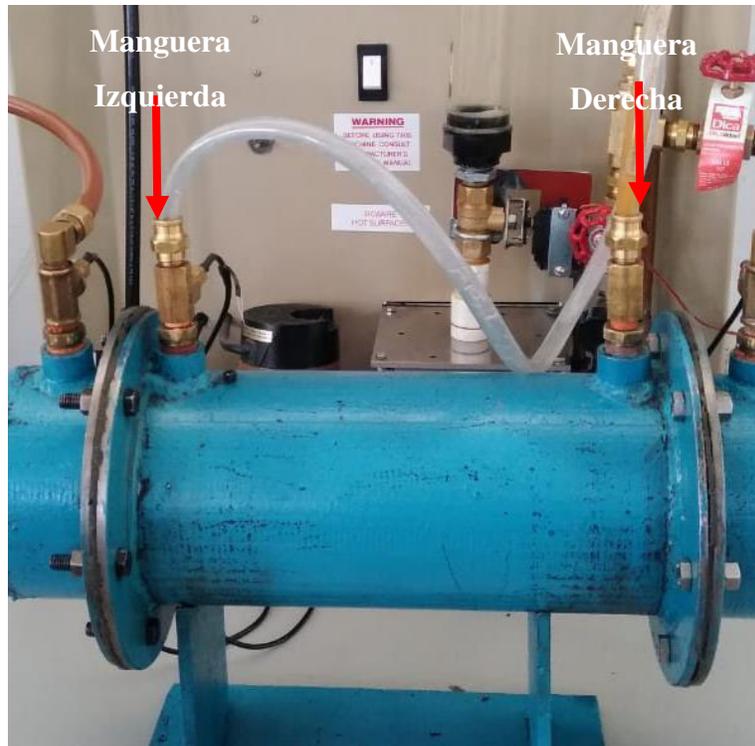
*Tabla 2. Descripción de pantalla LCD.*

Símbolo	Característica
RW	Temperatura de reservorio de fluido frío. [°C]
RO	Temperatura de reservorio de fluido caliente. [°C]
W	Temperaturas referentes a fluido Frío.
Ti	Temperatura izquierda del fluido Frío. [°C]
Td	Temperatura derecha del fluido Frío. [°C]
O	Temperaturas referentes a fluido caliente.
Te	Temperatura de entrada de fluido caliente. [°C]
Ts	Temperatura de salida de fluido caliente. [°C]
QW	Caudal volumétrico del fluido frío. [lt/min]
QO	Caudal volumétrico de fluido caliente. [cm <sup>3</sup> /s]

## **Reservorio y recirculación de agua.**

### **Funcionamiento del Bypass y circulación de agua.**

1. Verificar el estado del agua dentro del reservorio.
2. Verificar que la válvula 6 se encuentre abierta antes de encender la bomba.
3. Revisar que las mangueras que van hacia la entrada y salida del intercambiador estén bien conectadas. *Figura 7.* Para realizar una correcta inspección de las mangueras, se debe presionar la manguera hacia la entrada del intercambiador, y posteriormente dar unos tirones, para asegurar que no existan fugas.
4. Encender la bomba de agua. El botón de encendido de la bomba se encuentra del lado lateral izquierdo de la estructura de la unidad Hilton.
5. Para modular el caudal volumétrico pasando a través del intercambiador, girar la válvula 7. Mientras más abierta este la válvula 7 menos caudal volumétrico pasara hacia el intercambiador de calor, y mientras más cerrada se encuentre la válvula 7 más caudal volumétrico de agua pasara por el intercambiador.
6. El caudal volumétrico de agua se expresa en la pantalla LCD como **QW** [Lt/min], como se muestra en la *Figura 5.*
7. Posteriormente se muestra el caudal en el flujómetro analógico.
8. El agua ingresa al intercambiador de calor sale y regresa al reservorio de agua. Detrás de la estructura de la unidad Hilton se encuentra una manguera que conduce el fluido frío hacia el reservorio del fluido frío.



*Figura 7. Ubicación de las mangueras para el fluido frío.*

Notas:

Si se desea cambiar el agua del reservorio o desmontar la bomba, es necesario como primer paso verificar que la bomba se encuentre apagada y desconectada, posteriormente:

1. Se debe cerrar la válvula 6, para así impedir el paso de agua del reservorio hacia la bomba.
2. Se debe cerrar la válvula 7, para evitar salida de agua.
3. Finalmente se deben abrir la junta que se encuentra después de la válvula 6 para separar el reservorio de la bomba. *Figura 8.*



*Figura 8.* Conexión del reservorio de fluido frío a la bomba.

### **Juego de mangueras para configuración de flujo.**

Para configurar el equipo para un flujo paralelo o un flujo a contracorriente, se requiere de identificar en una primera instancia que configuración de pasos tiene, es decir si está a dos pasos por los tubos o a uno. Si se encuentra la brida derecha con la entrada por debajo y la salida por arriba de la misma brida entonces el intercambiador se encuentra en una configuración de dos pasos por los tubos. Si la brida izquierda contiene la entrada de aceite entonces se habla de un paso por los tubos.

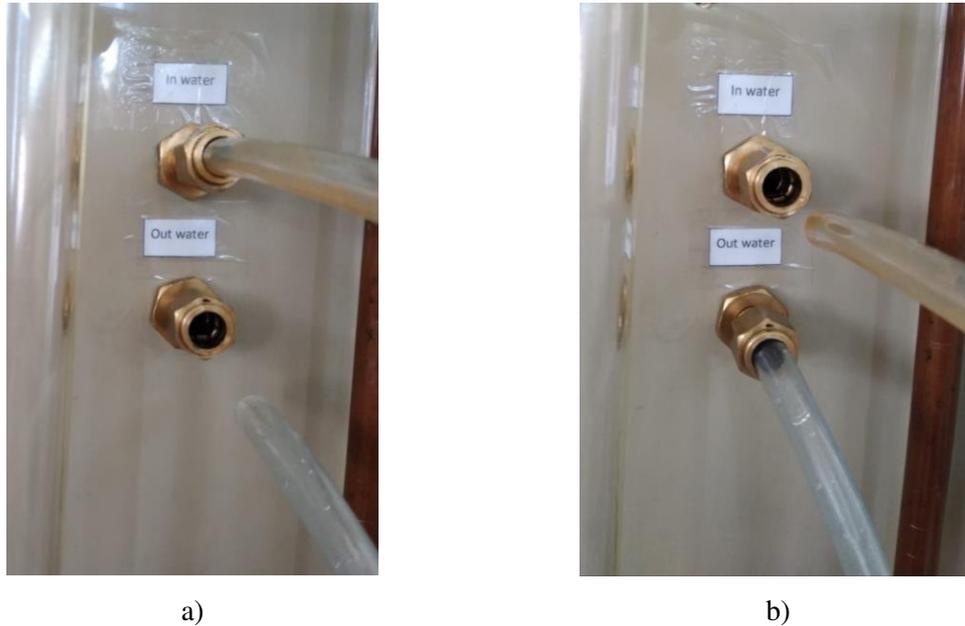
*Montaje de mangueras para configuración de dos pasos.*

1. Para un **flujo paralelo** será necesario posicionar la manguera de la derecha del intercambiador, *Figura 7*, en la entrada que se encuentra marcada en la estructura de la unidad Hilton, es decir, el desmontaje y montaje de mangueras solo será desde la estructura de la unidad Hilton, *Figura 9*, y la manguera de la izquierda del intercambiador de calor de posiciona en el señalamiento de salida.
2. Para un **flujo a contracorriente**, es necesario posicionar la manguera de la izquierda del intercambiador de calor, *Figura 7*, en la entrada de fluido frío marcada en la estructura de la unidad Hilton, *Figura 9*, mientras que la manguera de la derecha del intercambiador de calor debe posicionarse en la salida del intercambiador de calor.

*Montaje para configuración de un paso.*

1. Para un **flujo paralelo**, se requiere posicionar la manguera de la izquierda del intercambiador de calor, *Figura 7*, en la entrada de agua marcada en la estructura de la unidad Hilton, *Figura 9*. Y la manguera de la derecha en la salida de agua.

2. Para **un flujo a contracorriente**, es necesario posicionar la manguera izquierda del intercambiador en la salida, *Figura 7*, de agua señalada en la estructura de la unidad Hilton, mientras que, se debe posicionar la manguera del lado derecho del intercambiador en la entrada de agua marcada en la estructura de la unidad Hilton, *Figura 9*.



*Figura 9. Montaje de mangueras. a) Montaje a la entrada de agua y desmontaje a la salida de agua. b) Desmontaje a la entrada de agua y montaje a la salida de agua.*

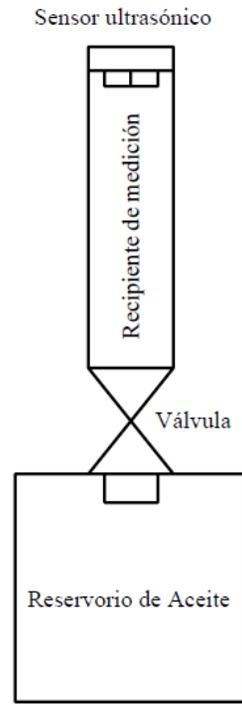
**NOTA:**

Una vez montadas las mangueras en la estructura Hilton, se debe revisar que no exista fuga de líquido, por lo que se debe presionar la manguera y posteriormente tirar un poco para verificar que la manguera está bien colocada.

### **Medición de caudal volumétrico de aceite.**

La medición del caudal volumétrico de aceite es realizada de manera autónoma por el sistema del bando de pruebas. El flujómetro de aceite tiene en la parte superior un sensor ultrasónico, *Figura 10*, que monitorea el nivel de aceite y a través del programa que controla los sensores se obtiene el caudal volumétrico de aceite. Para mantener cierto intervalo de tiempo el aceite dentro del recipiente de medición es necesario mantener la válvula de cierre y apertura cerrada y cuando se tenga cierto nivel de aceite abrirla, esto es gracias al servomotor que fue montado a la válvula, *Figura 11*, el cual recibe las condiciones de apertura y cierre.

Es necesario conectar al contacto del lado lateral derecho del banco de pruebas, *Figura 2*, la fuente que alimenta al servomotor, para que el flujómetro de aceite funcione correctamente.



*Figura 10. Flujómetro de aceite.*



*Figura 11. Servomotor montado a la válvula de cierre y apertura de flujómetro de aceite.*

## Montaje para configurar pasos por los tubos.

El intercambiador de calor cuenta con la posibilidad de ser operado para un paso por los tubos y dos pasos por los tubos, para lo cual es necesario conocer la forma de montar y desmontar la brida que permitirá cambiar de configuración.

Antes de realizar el cambio de brida, cualquier tipo de configuración por los tubos, es necesario descargar el aceite contenido en el intercambiador de calor, siguiendo los pasos que se describen a continuación:

1. Asegurarse de que la bomba de aceite este pagada así como la bomba de agua.
2. Cerrar la válvula 2, *Figura 1*, ya que es la válvula que dirige el aceite hacia el intercambiador.
3. Cerrar la válvula 4, *Figura 1*, para evitar el paso de aceite hacia el reservorio.
4. Desconecte las mangueras de entrada y salida de agua desde la estructura de la unidad Hilton, *Figura 9*.
5. Tenga cerca dos recipientes de al menos 2 litros de capacidad para el descargue de agua.
6. Gire el intercambiador unos 90 ° hacia usted de tal forma que las entradas de agua queden mirando hacia usted de forma perpendicular, *Figura 12*, coloque las mangueras en los recipientes para el descargue de agua y espere a que se descargue el agua contenida en el intercambiador.

NOTA: Si el agua no comienza a salir, gire un poco más el intercambiador de tal forma que las entradas de agua queden casi totalmente hacia abajo.

7. Una vez que el agua termino de ser descargada verifique que configuración de pasos por los tubos tiene el intercambiador. Si el intercambiador se encuentra con las bridas 1 y 3 se encuentra en una configuración de 1 paso por los tubos, si el intercambiador se encuentra instalado con las bridas 3 y 2 se encuentra en una configuración de dos pasos por los tubos.
8. Desconecte las mangueras que dirigen el flujo de aceite hacia el intercambiador y hacia el flujómetro de aceite, las mangueras deberán ser desconectadas justo después de las válvulas 2 y 4, de tal forma que las mangueras queden sueltas de los extremos que van hacia dichas válvulas, pero conectadas en el intercambiador de calor. La desconexión de las mangueras debe ser realizada con una llave de expansión.

NOTA:

Se recomienda tener dos recipientes para poner en el extremo de las mangueras en caso de que quede aceite dentro de las mangueras.



*Figura 12. Intercambiador en preparación para descarga de agua.*

9. Si la configuración del intercambiador es de un paso por los tubos, se debe colocar de forma vertical el intercambiador de tal forma que la brida 3 quede como base, *Figura 13*, para que de esta forma el aceite baje y salga por la maguera que debe ser colocada en un recipiente de capacidad mínima de 4 litros para recibir la descarga de aceite.
10. Se debe dejar descargando el aceite al menos un día para asegurar que la mayor cantidad el aceite se ha descargado.



*Figura 13. Posicionamiento del intercambiador de forma vertical.*

11. Si la configuración del intercambiador se encuentra de dos pasos por los tubos, es decir, con la brida 3 y 2, la manguera que conecta a la entrada de aceite al intercambiador, es decir, la manguera que se encuentra en la parte inferior de la brida 2 debe ser colocada en un recipiente que recibirá el aceite, así debe dejarse el intercambiador unas cuantas horas. *Figura 14 a.*
12. Pasadas unas horas debe girarse el intercambiador de tal forma que la denominada salida de aceite o parte superior de la brida 2 quede boca abajo para descargar el aceite contenido de ese lado. *Figura 14 b,* quedara posicionado de esta forma unas cuantas horas.
13. Finalmente el intercambiador se debe colocar de forma vertical para posteriormente desmontar la brida.

A continuación se explica el montaje de las bridas para cada una de las configuraciones del intercambiador.



a)



b)

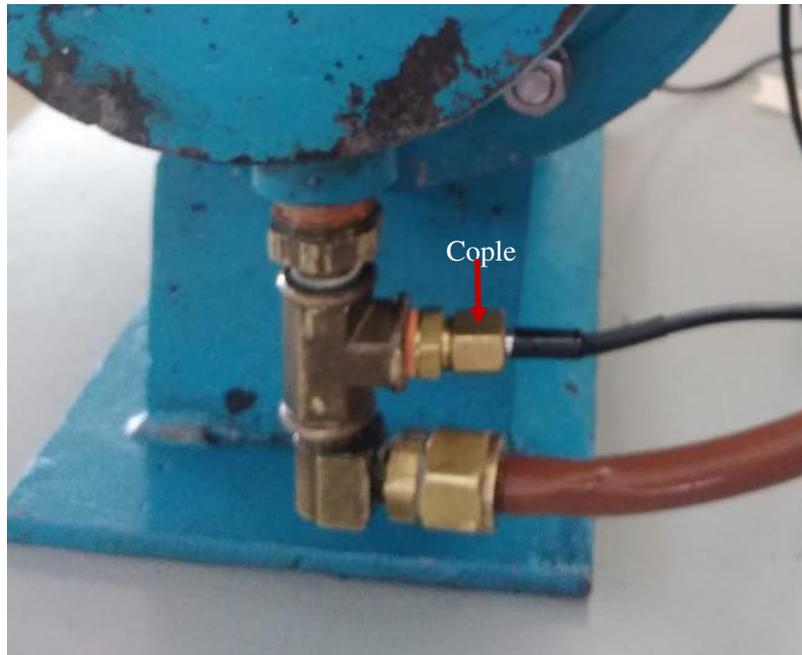
*Figura 14. Descargue de aceite 2 pasos por los tubos.*

### **Configuración de un paso por los tubos.**

Una vez que se realizó el descargue de agua y aceite dentro del intercambiador es necesario desmontar la brida 2 para posteriormente montar la brida 1, el intercambiador debe estar posicionado de forma vertical y se deben seguir los siguientes pasos.

1. Se debe retirar la tuerca que contienen a los sensores de temperatura de la entrada y salida de aceite, *Figura 15*. Para retirar las tuercas es necesario utilizar una llave 14 mm.
2. Posteriormente se deben retirar las conexiones tipo T de  $\frac{1}{4}$  in, *Figura 16*, solamente de la entrada y salida de aceite.
3. Finalmente se retira el cople de  $\frac{1}{2}$  in macho a  $\frac{1}{4}$  in hembra, *Figura 16*. El cople debe ser retirado con una matraca mecánica, utilizando una copa de 13 mm o 14 mm, con mucho cuidado debe ser realizada esta acción, para evitar que el cople se fracture.

4. Una vez que la conexión tipo T y el cople han sido retirados, se procede a retirar los tornillos de la brida. *Figura 17.*
5. Se retira la brida y el empaque que se encuentra en medio del haz de tubos.
6. Se coloca la brida correspondiente a un paso por los tubos, brida 1. Verificando que la entrada de aceite coincida de forma paralela con la entrada y/o salida de agua, como se muestra en la *Figura 13.*



*Figura 15. Tuerca que contiene al sensor de temperatura.*

7. Se colocan los tornillos, tuerca y arandelas de presión en la brida de forma manual, hasta que ya no sea posible girar más las tuercas.
8. Posteriormente se deben apretar los tornillos con un torquímetro.
9. Es importante apretar los tornillos en forma de cruz, es decir, se aprieta un tornillo y posteriormente su tornillo contrario, posteriormente el tornillo de al lado en dirección a las manecillas del reloj y nuevamente el contrario y así sucesivamente hasta terminar de ajustar todos los tornillos.
10. Una vez instalada la brida, es necesario colocar el cople de 1/2 in macho a 1/4 in hembra. Este cople debe ser colocado con un torquímetro.
11. Cuando el cople este posicionado, se debe conectar nuevamente la conexión tipo T como se muestra en la *Figura 16*, de tal forma que los sensores de temperatura estén dirigidos hacia

la estructura de la unidad Hilton. La conexión tipo T, debe ser ajustada hasta el tope y verificando siempre que aún le queden hilos de cuerda libre.

12. Finalmente se instala el sensor de temperatura.

NOTA:

Todas conexiones de coples deben tener teflón antes de ser instaladas.

Al instalar nuevamente los sensores de temperatura asegurarse de que su ubicación coincide con la etiqueta que indica la temperatura que registran.

13. Se conectan las mangueras a la entrada y salida del intercambiador.

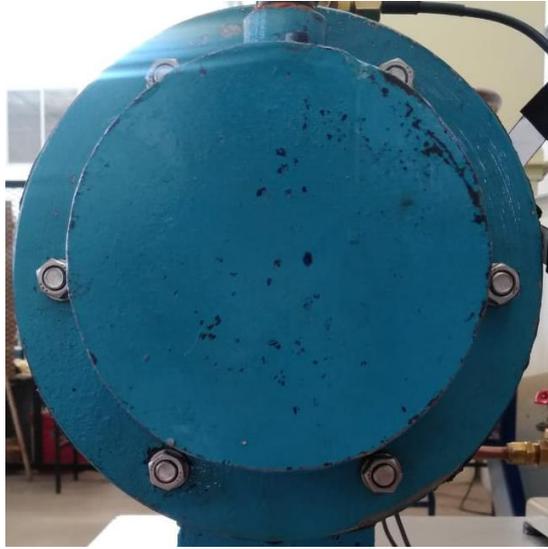
14. Se conecta la manguera del lado izquierdo del intercambiador a la válvula 2, y la manguera del lado derecho del intercambiador a la válvula 4.

15. Se abren la válvula 2 y 4.

16. Se enciende la bomba y se verifica que no existen fugas, en caso de existir fugas, identificar de que entrada o salida y ajustar ligeramente hasta comprobar que ya no existe fuga.



*Figura 16. Conexión tipo T.*



*Figura 17. Tornillos de las bridas 7/16 in.*

### **Configuración de dos pasos por los tubos.**

Una vez que se realizó el descargue de agua y aceite dentro del intercambiador es necesario desmontar la brida 1 para posteriormente montar la brida 2, el intercambiador debe estar posicionado de forma vertical y se deben seguir los siguientes pasos.

Los pasos 1 al 5 de la configuración para un paso por los tubos son los mismos para la configuración de dos pasos por los tubos.

6. Se coloca la brida correspondiente a un paso por los tubos, brida 2. Verificando que la entrada de aceite coincida de forma paralela con la entrada y/o salida de agua, como se muestra en la *Figura 14*. Los pasos 7 hasta el 13, de la configuración de un paso por los tubos son los mismo para una configuración de dos pasos por los tubos.

14. se conecta la manguera de la parte de arriba a la válvula 4 y la maguera de la parte de abajo a la válvula 2.

Pasos 15 y 16 de la configuración de un paso por los tubos son los mismos para la configuración de dos pasos por los tubos.

### **Conexiones eléctricas.**

Las conexiones eléctricas del banco de pruebas se podrían dividir en dos tipos. Puesto que están las conexiones que pertenecen a la función de las bombas, la resistencia del reservorio y las conexiones que pertenecen a los sensores instalados en el equipo.

## Conexiones eléctricas.

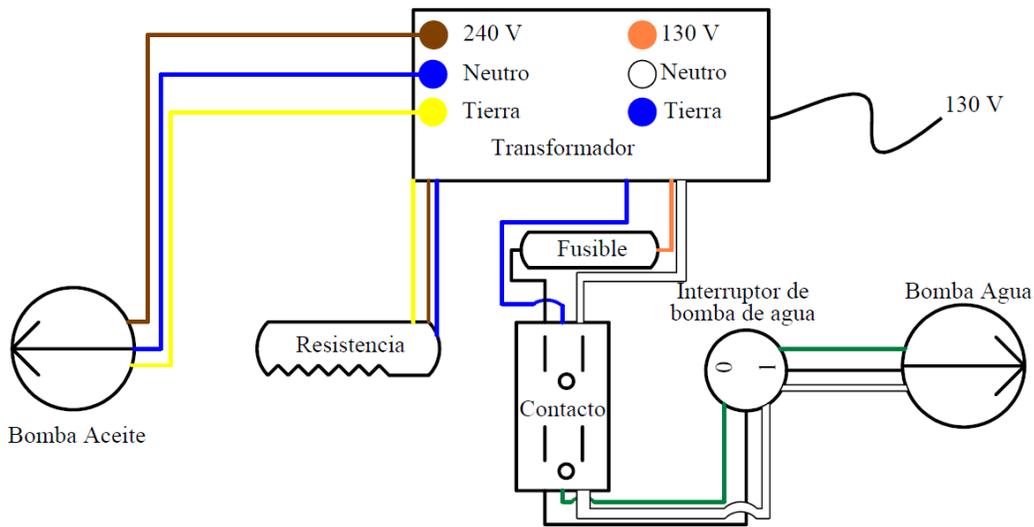


Figura 18. Diagrama de conexiones eléctricas.

En la *Figura 18*, se observa en una primera instancia un transformador que tiene una bobina primaria de 110, 115, 120 y 130 V, para finalmente entregar 240 V. Este transformador es empleado para poder conectarlo a la línea eléctrica del laboratorio y con el voltaje de 240 V entregado por el transformador funcione la bomba de aceite y la resistencia que calienta el fluido caliente. El contacto, la bomba de agua fueron conectadas a la línea de 130 V dentro del transformador, por lo que todos los dispositivos que se ilustran en la *Figura 18*, funcionan una vez que el transformador es conectado a la línea eléctrica del laboratorio.

### Encendido de la bomba de aceite y resistencia.

Para encender la bomba de aceite se debe prender el interruptor que se muestra en la *Figura 1*, una vez encendida la bomba se puede modular el caudal de la bomba con la perilla que se encuentra en la parte superior de la bomba.

Una vez encendido el interruptor también la resistencia puede comenzar a funcionar sin embargo puede permanecer apagada si la perilla de la *Figura 19*, permanece por debajo del número 1, a partir del número 1 la resistencia comienza a funcionar con el calentamiento mínimo.



*Figura 19. Control de resistencia.*

#### **Encendido de la bomba de agua.**

Para encender la bomba de agua, solo es necesario presionar el interruptor de encendido del lado lateral izquierdo, *Figura 2*.

#### **Contacto.**

El contacto que se encuentra el lado lateral derecho del banco de pruebas, *Figura 2*, funciona siempre una vez que el transformador es conectado a la luz eléctrica del laboratorio.

#### **Conexiones electrónicas.**

La otra parte de las conexiones pertenece a las conexiones electrónicas que involucran a los sensores utilizados para el monitoreo y funcionamiento autónomo del banco de pruebas.

En la *Figura 20*, se muestran las conexiones de los sensores a la placa Arduino. Los sensores de temperatura se encuentran etiquetados como Sensores T. R para sensores de los reservorios de agua y aceite, Sensores T. I. para los sensores de temperatura de las entradas y salidas del intercambiador de calor. El sensor ultrasónico se encuentra señalado como Sensor Ult. y las conexiones señaladas como SDA y SCL son las conexiones análogas para la pantalla LCD.

Los colores amarillo, verde, naranja, azul y morado pertenecen a las entradas digitales de los sensores. El color rojo representa las líneas de voltaje y el color café ilustra las conexiones a tierra. Se puede observar que el servomotor es alimentado con una fuente externa de 5 V, esto es debido a que de esta forma realiza sus funciones correctamente. Cada uno de los sensores se encuentra etiquetado para

evitar confusiones, además el diagrama de conexiones se encuentra pegado en el lado lateral derecho del banco de pruebas para una mayor comodidad.

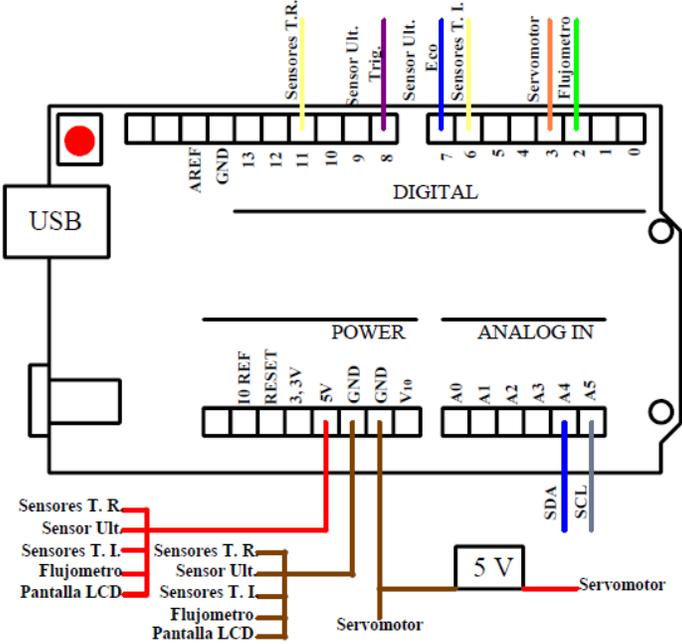


Figura 20. Diagrama de conexiones de la placa Arduino y sensores.

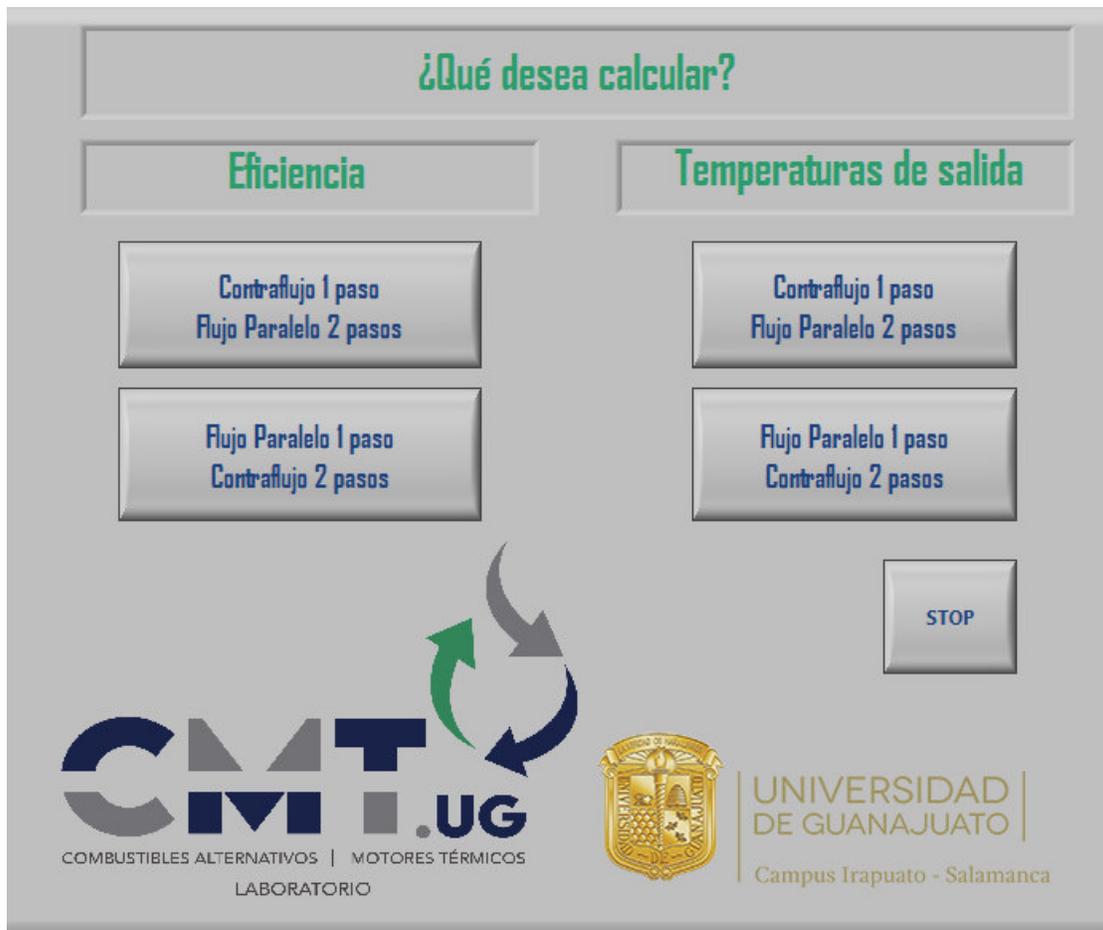
## Interfaz para encargado de práctica.

Existe una interfaz que contendrá toda la información del intercambiador, efectividad y cálculo de temperaturas de salida teóricas y el error que existe entre estas temperaturas y las experimentales.

En la *Figura 21* se observa el menú de inicio de la interfaz.

En la *Figura 22*, se muestra la pantalla de la interfaz que permite calcular la efectividad del intercambiador de acuerdo con las condiciones que este registre, será necesario conocer propiedades de los fluidos y declararlas en los espacios correspondientes y con las unidades de medida solicitadas.

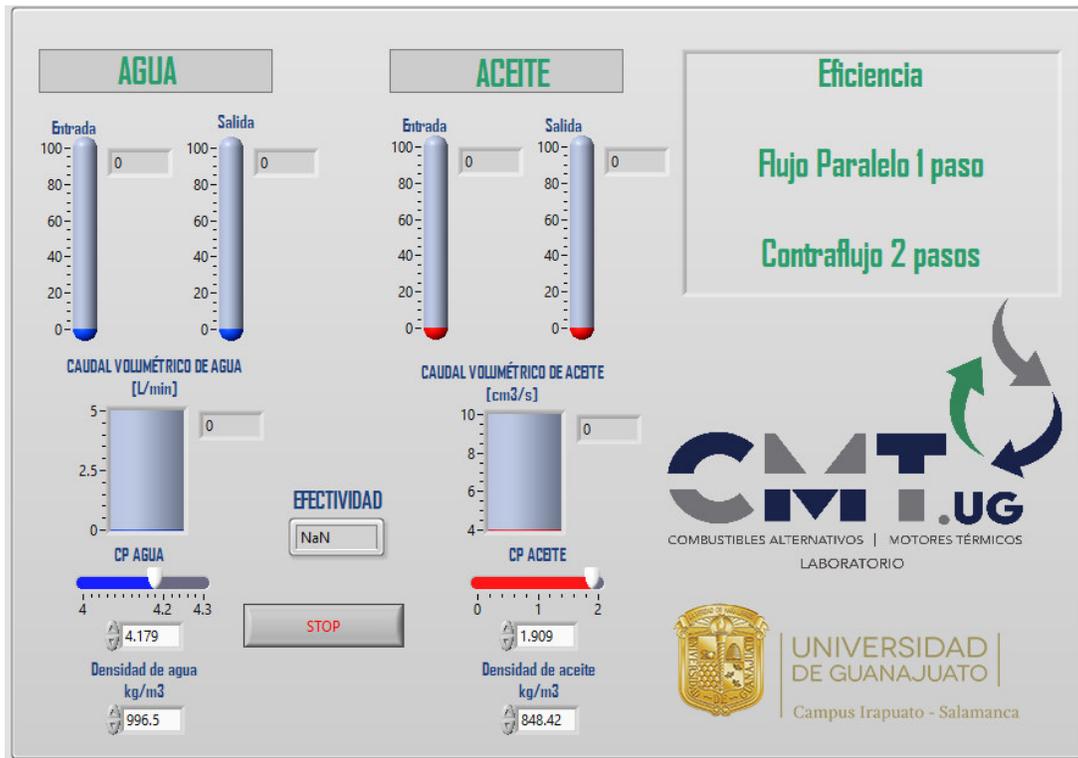
En la *Figura 23*, se ilustra la pantalla que calcula las temperaturas de salida y el error que existe entre la teoría y lo experimental.



*Figura 21. Menú de inicio de interfaz.*

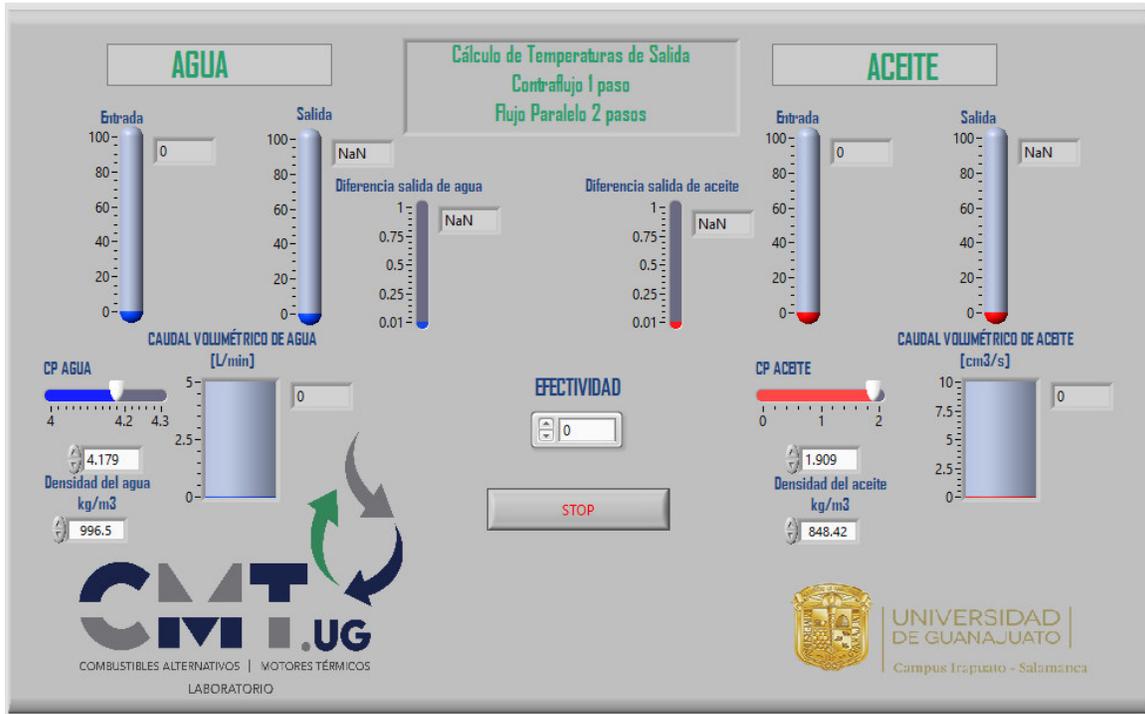


a)

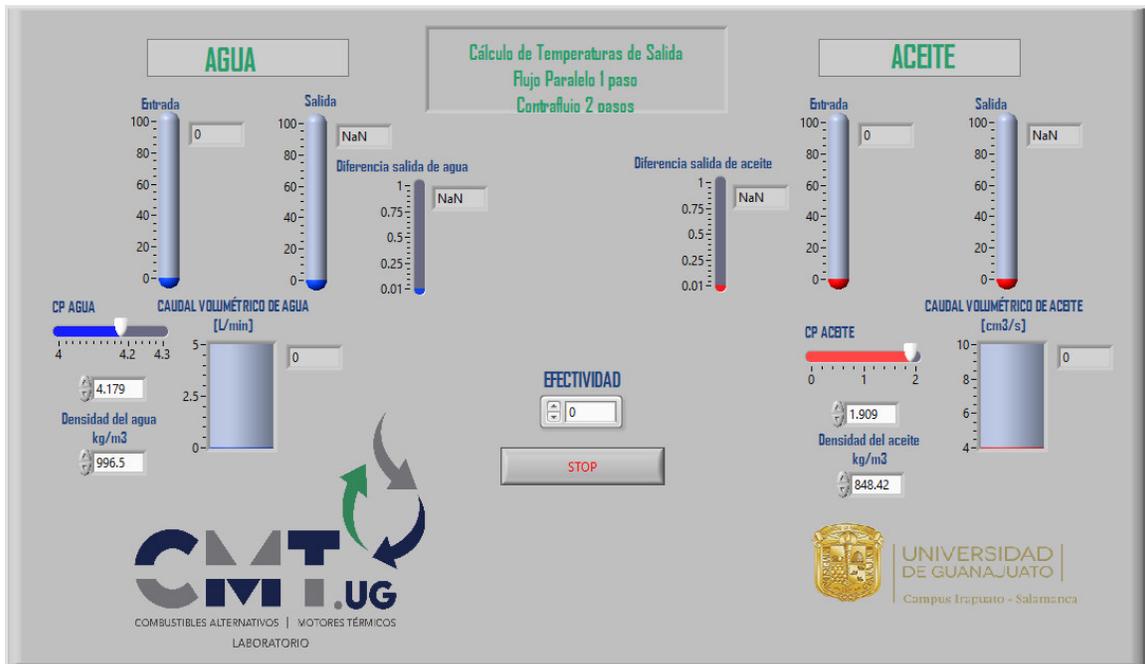


b)

Figura 22. Interfaz de cálculo de efectividad.



a)



b)

Figura 23. interfaz para cálculo de temperaturas de salida.

## Encendido del equipo.

Para encender el equipo en su totalidad es necesario seguir los siguientes pasos.

1. Conectar el transformador a la luz eléctrica del laboratorio.
2. Abrir las válvulas 2 y 4.
3. Abrir la válvula 6.
4. Encender la bomba de aceite y la resistencia
5. Conectar el servomotor a la luz eléctrica en el contacto del banco de pruebas.
6. Encender la bomba de agua.
7. Conectar el cable que sale del puerto USB de la placa Arduino a la laptop.
8. Monitorear el equipo a través de la pantalla LCD y de la interfaz de LabVIEW.

## Propiedades de los fluidos de trabajo.

*Tabla 3 Propiedades de agua. [14]*

Temperatura [K]	Densidad [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	Cp [ $\text{kJ}/\text{kg}^* \text{K}$ ]
275	999.9	4.211
300	996.5	4.179
305	994.6	4.180
325	987.1	4.182

*Tabla 4. Propiedades del aceite SAE 5W-30*

Propiedad	
Gravedad específica	0.8514
Temperatura [K]	Cp [ $\text{kJ}/\text{kg}^* \text{K}$ ]
275	1.805
300	1.909
305	1.930
325	2.014