

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DESARROLLO DE ACOPLE TECNOLÓGICO DE BOMBA DE CALOR A BANCO DE MEDICIÓN DE NIVEL DEL LABORATORIO DE FLUIDOS DEL ITM

Biviana María Agudelo Vélez

Luis Alejandro Rivera Yepes

Ingeniería Electromecánica

Carlos Alberto Acevedo Álvarez, IM

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
MEDELLÍN-COLOMBIA
2017**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El trabajo para optar al título de Ingeniería Electromecánica que a continuación se presenta, parte de la necesidad de brindar un mejor uso a los diferentes equipos que se encuentran en las instalaciones del ITM - INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA, propiamente en el laboratorio de fluidos con sede en Robledo. Desde dicho proyecto se pretende dar una visión desde la parte experimental y didáctica el funcionamiento y las ventajas que presenta la bomba de calor tanto en la industria como en el sector residencial como energía limpia, económica y sobre todo que aprovecha recursos que se consideran como calores residuales (sector industrial) y comunes como el aire circundante (sector residencial).

De esta manera se tiene como objetivo general acoplar tecnológicamente la bomba de calor que se encuentra en el laboratorio de fluidos del ITM al módulo didáctico de control de fluidos, y mediante la implementación de instrumentos de medición y control a dicha bomba se busca ampliar las herramientas de aprendizaje para mejorar los conocimientos de la termodinámica y la transferencia de calor para beneficio de la comunidad académica.

Dado lo anterior se requiere implementar en el laboratorio de fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano con sede en Robledo, una herramienta tecnológica que permitirá conocer a profundidad el funcionamiento y la aplicabilidad de las bombas de calor en el mundo actual que demanda energías limpias que aprovechen cantidades de calor que se consideran como desecho o como en este caso puntual que se pretende desarrollar una transferencia de calor desde el aire circundante al agua con la bomba de calor que se tiene de 20 gal en el laboratorio de fluidos y de esta manera evidenciar las características tanto técnicas como de desempeño de la bomba de calor.

Palabras clave: Bomba de calor, guía de trabajo, calentamiento de fluido, temperatura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Es de gran alegría y satisfacción culminar una etapa más de nuestras vidas, que no sería posible sin el apoyo conjunto de cada una de las personas que nos ayudaron durante toda nuestra formación académica y así ver el fruto de un gran esfuerzo.

Agradecemos a ti, Dios, por ser ese guía espiritual, gracias por darnos la fuerza, el coraje y sabiduría para afrontar cada uno de los obstáculos que se cruzan en nuestras vidas, gracias por nuestras familias y amigos.

También agradecemos de manera especial y sincera, a nuestro director de tesis Carlos Alberto Acevedo, que, con su paciencia, conocimiento, dedicación, disponibilidad y sobre todo su sabiduría, nos guio no solo para formar profesionales, sino personas de bien. Gracias a los docentes y a las personas encargadas de los laboratorios, quienes compartieron sus conocimientos académicos, con los cuales se pudo llevar a cabo este proyecto. De igual manera agradecer a nuestros compañeros de estudio que batallaron junto a nosotros en este duro camino, agradecerles por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en esos momentos donde recaíamos pero que nos impulsaban a seguir adelante. Hoy ya muchos partieron, pero siempre estarán en nuestros corazones.

Gracias a todas esas personas que formaron parte de esta etapa de nuestras vidas y por todas sus bendiciones.

Finalmente, agradecer a nuestras familias por ese apoyo incondicional, por la formación como personas inculcando en nuestras vidas, valores y principios dentro de la moral y humildad.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

Símbolo	Término	Unidad en SI
E	Energía	J
U	Energía interna	J
m	Masa	kg
V	Volumen	m^3
v	Velocidad	$\frac{m}{s}$
g	Aceleración gravitacional	$\frac{m}{s^2}$
z	Altura	m
Q	Calor	J
W	Trabajo	J
F	Fuerza	N
dx	Variación de la distancia	m
P	Presión	Pa
dV	Variación en el volumen	m^3
n	Eficiencia térmica	Adimensional
s	Entropía	$\frac{J}{kg \cdot K}$
h	Entalpía	$\frac{J}{kg}$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
c	Calor específico	$\frac{J}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$
Cc	Capacidad calorífica volumétrica	$\frac{J}{\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}}$
\dot{m}	Flujo másico	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
\dot{Q}	Flujo de calor	W
\dot{W}	Potencia por trabajo	W
\mathcal{V}	Diferencia de potencial o voltaje	v
I	Corriente eléctrica o flujo eléctrico	A
R	Resistencia eléctrica	Ω
ν	Viscosidad cinemática	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Símbolos con letras griegas

Δu	Cambio de la energía interna durante un proceso	$\frac{J}{\text{kg}}$
ΔE	Cambio en la energía durante un proceso	J
μ	Viscosidad dinámica	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ϵ	Rugosidad	m

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Símbolos con subíndices

E_k	Energía cinética	J
E_p	Energía potencial gravitacional	J
Δe_k	Cambio de la energía cinética durante un proceso	$\frac{J}{kg}$
Δe_p	Cambio de la energía potencial durante un proceso	$\frac{J}{kg}$
Q_H	Calor suministrado por el depósito de alta temperatura	J
Q_C	Calor rechazado hacia el depósito de baja temperatura	J
W_{cycle}	Trabajo útil realizado por ciclo de ejecución	J
COP_R	Coeficiente de desempeño en sistemas de refrigeración	Adimensional
COP_{HP}	Coeficiente de desempeño en bombas de calor	Adimensional
T_H	Temperatura del foco de alta temperatura	$^{\circ}C$
T_C	Temperatura del foco de baja temperatura	$^{\circ}C$
\dot{W}_{elec}	Potencia eléctrica	W
N_R	Número de Reynolds	Adimensional

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Abreviatura

Término

ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares (<i>American National Standards Institute</i>)
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>)
ODP	Potencial Reductor de Ozono (<i>Ozone Deplation Potencial</i>)
GWP	Potencial de Calentamiento Global (<i>Global Warming Potencial</i>)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	15
1.1	GENERALIDADES	15
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.3	ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	18
2	MARCO TEÓRICO.....	21
2.1	PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.....	21
2.1.1	<i>Formas de energía</i>	21
2.1.1.1	Energía cinética.....	21
2.1.1.2	Energía potencial	22
2.1.2	<i>Transferencias de energía</i>	22
2.1.2.1	Calor.....	22
2.1.2.2	Trabajo.....	23
2.1.3	<i>Balance de energía</i>	23
2.2	SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA.....	25
2.2.1	<i>Máquinas térmicas</i>	25
2.2.1.1	Eficiencia térmica	27
2.2.1.2	Ciclo de Carnot	27
2.2.2	<i>Sistemas de refrigeración y bombas de calor</i>	29
2.2.2.1	Coeficiente de desempeño.....	30
2.2.2.2	Ciclo inverso de Carnot.....	30
2.3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN Y BOMBAS DE CALOR	31
2.3.1	<i>Sistema de refrigeración por compresión de vapor</i>	31
2.3.1.1	Componentes de un ciclo de refrigeración	33

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.1.1.1	Compresor	33
2.3.1.1.2	Condensador.....	34
2.3.1.1.3	Dispositivo de expansión	34
2.3.1.1.4	Evaporador	35
2.4	REFRIGERANTES.....	35
2.4.1	<i>Refrigerante ideal</i>	35
2.4.2	<i>Clasificación</i>	37
2.4.3	<i>Seguridad</i>	39
2.5	FUENTES DE BOMBA DE CALOR.....	40
2.5.1	<i>Aire</i>	41
2.5.2	<i>Agua</i>	42
2.5.3	<i>Suelo</i>	43
2.6	INTERCAMBIADORES DE CALOR	43
2.6.1	<i>Intercambiadores de calor de tubo doble</i>	44
2.6.2	<i>Intercambiadores de calor compactos</i>	45
2.6.3	<i>Intercambiador de calor de coraza y tubos</i>	46
2.7	CÁLCULOS DE UNA BOMBA DE CALOR	47
2.7.1	<i>Cálculos en sistema de compresión de vapor</i>	47
2.7.1.1	Proceso del compresor	48
2.7.1.2	Proceso del condensador	49
2.7.1.3	Proceso del dispositivo de expansión.....	50
2.7.1.4	Proceso del evaporador.....	50
2.7.2	<i>Cálculos de un intercambiador de calor</i>	51
2.7.3	<i>Cálculos de energía requerida</i>	52
2.7.4	<i>Cálculos de una resistencia eléctrica</i>	54
2.8	MECÁNICA DE FLUIDOS	55
2.8.1	<i>Ecuación general de la energía</i>	55
2.8.2	<i>Pérdidas de energía</i>	56

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.8.2.1	Número de Reynolds	56
2.8.2.2	Pérdidas de energía por fricción.....	57
2.8.2.3	Pérdidas menores.....	59
3	METODOLOGÍA	62
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
4.1	ANÁLISIS DE LA BOMBA DE CALOR.....	65
4.1.1	<i>Estado físico.....</i>	65
4.1.2	<i>Características de la bomba de calor</i>	66
4.2	CÁLCULOS Y DISEÑO DEL SISTEMA.....	68
4.2.1	<i>Cálculos.....</i>	68
4.2.1.1	Cálculos termodinámicos	68
4.2.1.2	Cálculos eléctricos	72
4.2.2	<i>Diseño</i>	74
4.2.2.1	Diseño de instrumentación	74
4.2.2.1.1	Instrumentos de temperatura.....	76
4.2.2.1.2	Instrumentos de presión	80
4.2.2.1.3	Instrumento de flujo.....	81
4.2.2.2	Diseño mecánico de tubería.....	82
4.2.2.2.1	Cálculos de pérdidas en tubería	83
4.2.2.3	Diseño eléctrico	94
4.3	MONTAJE PRÁCTICO DEL SISTEMA	95
4.3.1	<i>Calibración del sensor de flujo.....</i>	95
4.3.2	<i>Montaje de tubería.....</i>	102
4.3.3	<i>Adquisición de instrumentos</i>	105
4.4	ELABORACIÓN DE GUÍAS PRÁCTICO EXPERIMENTALES.....	106
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	108
5.1	CONCLUSIONES	108

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.2 TRABAJO FUTURO	110
REFERENCIAS	111
APÉNDICE	114
APENDICE A. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE COMPRESORES QUE TRABAJAN CON R22	114
APENDICE B. TABLAS DE SATURACIÓN DEL REFRIGERANTE 22	115
APENDICE C. DIAGRAMA DE MOODY PARA ESTABLECER EL FACTOR DE FRICCIÓN EN UN DUCTO.....	121
APENDICE D. PROGRAMACIÓN DEL ARDUINO UNO PARA LA MEDICIÓN DEL SENSOR DE FLUJO.....	122
APÉNDICE E. ESQUEMAS DE TUBERÍA	123
<i>Presentación 3D isométrica del montaje mecánico</i>	<i>123</i>
<i>Plano isométrico de la línea de succión</i>	<i>124</i>
<i>Plano isométrico de la línea de descarga</i>	<i>125</i>
<i>Plano isométrico de la línea de salida del intercambiador de calor</i>	<i>126</i>
<i>Listado de insumos</i>	<i>127</i>
APENDICE F. DIAGRAMA DE CONEXIÓN ELÉCTRICA	128
<i>Diagrama de Control</i>	<i>128</i>
<i>Diagrama de Potencia</i>	<i>129</i>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INDICES DE FIGURAS Y TABLAS

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de energías de una máquina térmica.	26
Figura 2. Diagrama de flujo de energías de un sistema de refrigeración.	29
Figura 3. Diagramas T-s (izquierda) y P-h (derecha) de un sistema ideal de refrigeración por compresión de vapor.	31
Figura 4. Componentes de un ciclo de refrigeración de tipo compresión de vapor.	33
Figura 5. Intercambiador de calor de flujo paralelo (izquierda) y de contraflujo (derecha).	44
Figura 6. Comportamiento de temperaturas de los fluidos en un intercambiador de calor en flujo paralelo (izquierda) y en contraflujo (derecha).	45
Figura 7. Intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado (izquierda) y flujo cruzado mezclado (derecha).	46
Figura 8. Intercambiador de calor de coraza y tubos.	47
Figura 9. Diagrama T vs s de un ciclo de refrigeración o bomba de calor.	48
Figura 10. Ejemplo de un intercambiador de calor.	51
Figura 11. Circulo de relación entre la ley de Ohm y la ley de Watt.	55
Figura 12. Coeficientes de resistencia para distintos tipos de entradas.	59
Figura 13. Bomba de calor del laboratorio de fluidos del ITM.	65
Figura 14. Evaporador de la bomba de calor.	66
Figura 15. Placa del compresor de la bomba de calor.	67
Figura 16. Diagrama P&ID del montaje de tubería de agua.	75
Figura 17. Diagrama P&ID de la bomba de calor.	76
Figura 18. Termopar tipo k.	77
Figura 19. Indicador digital de temperatura.	78

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 20. Dispositivo indicador y controlador de temperatura.....	79
Figura 21. Dispositivo indicador de temperatura multizona.....	79
Figura 22. Manómetros de alta y baja presión para refrigerantes.	80
Figura 23. Sensor de flujo de turbina.	81
Figura 24. Esquema de conexión electrónica para el instrumento medidor de flujo.....	82
Figura 25. Esquema reducido del trayecto del agua.	84
Figura 26. Montaje electrónico para la indicación de flujo.....	96
Figura 27. Gráfica de tendencia lineal entre los datos obtenidos de la prueba 1.	101
Figura 28. Gráfica de tendencia lineal entre los datos obtenidos de la prueba 2.	102
Figura 29. Conexiones de la bomba.	103
Figura 30. Conexiones de la válvula de compuerta y el sensor de flujo.	103
Figura 31. Conexiones de tubería a la bomba de calor.	104
Figura 32. Vista de la instalación de tubería entre el tanque y la bomba de calor.....	104
Figura 33. Termopares tipo k obtenidos.	105
Figura 34. Termopares tipo k con rosca macho de 1/2".	106

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algunas características de clasificación del Standard 34 ASHARE.....	38
Tabla 2. Clasificación de las características de seguridad de los refrigerantes según la (ISO 817:2014).....	40
Tabla 3. Fuentes de calor comúnmente usadas.	41
Tabla 4. Valores de rugosidad en distintos materiales.	58
Tabla 5. Valores de k para distintas relaciones r/D.....	60
Tabla 6. Valores de relación Le/D para distintos accesorios.....	61
Tabla 7. Datos técnicos del compresor usado en la bomba de calor.....	66
Tabla 8. Datos del tiempo en función del cambio de temperatura.	69
Tabla 9. Datos del flujo másico en función del cambio de temperatura.	70
Tabla 10. Datos del flujo volumétrico obtenidos a partir del flujo másico.	71
Tabla 11. Cálculos de resistencia eléctrica a 110 y 220 V.	73
Tabla 12. Variables a utilizar en la ecuación de Darcy.	89
Tabla 13. Tabla de valores de k para reducciones súbitas.	90
Tabla 14. Valores de k a utilizar.....	92
Tabla 15. Valores de Le/D a utilizar.	92
Tabla 16. Cálculos de k para los accesorios a utilizar.	92
Tabla 17. Cálculos de pérdidas menores.....	93
Tabla 18. Toma de datos de la prueba 1 de calibración del sensor de flujo.....	97
Tabla 19. Toma de datos de la prueba 2 de calibración del sensor de flujo.....	99
Tabla 20. Cálculo de error en los datos de la prueba 1.	100
Tabla 21. Cálculo de error en los datos de la prueba 2.....	100

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Entre los diferentes procesos industriales que existen, el enfriamiento y/o calentamiento de sustancias son uno de los más utilizados en varios sectores industriales, y para realizar dichos procesos, se requieren sistemas especiales de transferencia de calor. Para los procesos de enfriamiento se usan sistemas de refrigeración mientras que para el calentamiento se usan las bombas de calor, aunque ambos sistemas se basan en el mismo principio de funcionamiento. Las bombas de calor en la actualidad son conocidas en la industria por los grandes beneficios que brindan por aprovechar calores residuales que se derivan de los diferentes procesos industriales ofreciendo numerosas oportunidades para las bombas de calor.

En el ámbito académico, se requiere la aprobación de los profesionales en ciencias térmicas sobre la bomba de calor, no solo en el aprovechamiento de calor residual en el sector industrial, si no también, en sistemas residenciales; puesto que entre las necesidades actuales, está la de generar confort en los hogares, pero que sea a costos económicos bajos, cuidar del medio ambiente y además que sean dispositivos que de ser necesario ocupen el menor espacio posible, y esta es una de las múltiples bondades que ofrece la bomba de calor, puesto que puede ser instalada tanto en interiores como en exteriores.

Los estudios de estos sistemas son realizados por las personas que centran su estudio en la gestión energética con énfasis en la producción de calor y frío. En el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), las carreras que estudian estos sistemas son principalmente: en el pregrado están la Tecnología e Ingeniería Electromecánica, mientras que, en el postgrado lo estudia la Maestría en Gestión Energética Industrial. Para realizar un estudio adecuado de los sistemas de refrigeración y bomba de calor, es necesario además de conocer la teoría,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la realización de prácticas demostrativas y experimentales de los sistemas para conocer más a fondo tanto su funcionamiento como su comportamiento.

En la actualidad, hay una bomba de calor de 20 gal en el laboratorio de fluidos del ITM sede Robledo, no obstante, este sistema se está desaprovechando ya que el equipo no se encuentra en operación, y esto hace que se limiten los potenciales académicos y experimentales hacia el estudio de las bombas de calor como fuente de aprovechamiento de energías térmicas residuales y alternativas, además, al no estar la bomba de calor instrumentada, no se tienen en cuenta la medición de variables en tiempo real (temperatura, presión y flujo másico). Esto es un factor que incide negativamente en la formación académica de los estudiantes, debido a que se está dejando de aprovechar un equipo en el cual se pueda aprender de una manera más didáctica sobre la transferencia de calor que se puede realizar entre dos espacios.

Por las razones anteriormente mencionadas, en este proyecto se pretende intervenir la bomba de calor realizando un acople entre la misma y uno de los tanques del módulo didáctico de control de fluidos con el fin de tener un suministro constante de agua, así de este modo, se puede demostrar de forma práctica el calentamiento del agua a través de la bomba de calor. Para observar el comportamiento de la transferencia de calor, se realizará la implementación de instrumentos que midan las variables más relevantes del proceso, entre las cuales están la temperatura, la presión y el flujo. Además, para tener un análisis más completo y detallado del ciclo termodinámico que realiza una bomba de calor, se implementará un suministro de calor externo a la bomba de calor que sea regulable; este suministro es importante instalarlo, ya que con el calor del medio circundante no se puede apreciar un cambio notable en el calentamiento del agua.

El proyecto se realiza con la finalidad de generar un apoyo didáctico y experimental para los estudiantes de tecnología e ingeniería Electromecánica y estudiante de postgrado en

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Gestión Energética Industrial, encaminado a brindar mayores fortalezas técnicas y experimentales que son ejemplos claros del aprovechamiento que se puede brindar a los desechos de energía térmica que se generan a diario en los procesos industriales y posibles aplicaciones a sistemas residenciales. Por lo anterior es factible identificar que los estudiantes puedan brindar en el campo productivo mejores ideas que sean beneficiosas tanto para la industria como para el medio ambiente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Acoplar tecnológicamente la bomba de calor que se encuentra en el laboratorio de fluidos del ITM al módulo didáctico de control de fluidos, y mediante la implementación de instrumentos de medición y control a dicha bomba se pretende ampliar las herramientas de aprendizaje para mejorar los conocimientos de la termodinámica y la transferencia de calor.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir en qué condiciones se encuentra actualmente cada componente de la bomba de calor.
- Diseñar un sistema para instrumentar la bomba de calor que permita tomar datos de variables térmicos en tiempo real, incluyendo el cambio de fuente energética del sumidero.
- Implementar la bomba de calor que se encuentra en el laboratorio de fluidos del ITM al módulo didáctico de control de fluidos.
- Diseñar una guía de laboratorio que comprenda el sistema a diseñar en este proyecto.

1.3 Organización de la tesis

En el primer capítulo del trabajo se encuentra la introducción, donde se hace una descripción detallada del proyecto a realizar, explicando la problemática de una bomba de calor funcional pero fuera de servicio en el laboratorio de fluidos del ITM sede Robledo, y que puede ser de gran utilidad para fines académicos por medio de demostraciones prácticas. Con lo mencionado, se hace la propuesta de colocar en operación la bomba de calor acoplándola a uno de los tanques pertenecientes al módulo de control de fluidos ubicada en el laboratorio de fluidos, y además instrumentar el equipo para hacer toma de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

datos, con el fin de realizar prácticas experimentales que demuestren la utilidad de una bomba de calor tanto en el sector industrial como residencial. Para lograr dicha propuesta, en este capítulo también se menciona el objetivo general del proyecto y los objetivos específicos, donde la finalidad del proyecto es tener una bomba de calor funcional y didáctica para fines académicos.

En el segundo capítulo se habla del marco teórico, en el cual se mencionan todos los fundamentos teóricos que conlleva el diseño de una bomba de calor, entre los cuales están los análisis termodinámicos, las características de los fluidos refrigerantes, los principios de los intercambiadores de calor entre otros. En el marco teórico se explica de forma detallada los fundamentos de las ecuaciones necesarias para realizar los cálculos requeridos en el proyecto. También, en el marco teórico se explica el comportamiento de cada uno de los procesos que realiza el ciclo termodinámico en la bomba de calor, basándose en su análisis de funcionamiento ideal, y estableciendo las condiciones ideales de cada uno de los estados entre procesos.

El tercer capítulo es la metodología, en la cual se describen las actividades a realizar para llevar a cabo el proyecto propuesto en este trabajo; entre dichas actividades se destaca el análisis de la bomba de calor previo al proyecto, además del diseño del ensamble tecnológico a realizar, tanto en la conducción del agua, como en la instalación de los componentes eléctricos y la instrumentación del sistema en general; para así llegar al montaje final que permita la operación de la bomba de calor en un medio práctico-experimental.

En el capítulo 4, análisis de resultados, se hace una descripción del trabajo realizado, comenzando con el estudio del estado de la bomba de calor antes de ser intervenida en este proyecto. Basándose en el análisis preliminar y en las características técnicas del compresor de equipo, se hacen los cálculos teóricos de las condiciones termodinámicas a

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

las que puede estar sometido, se realizan también los cálculos mecánicos de las pérdidas de energía para definir las condiciones mínimas que debe llevar la bomba encargada de impulsar el agua durante todo el trayecto; aparte se construyen los distintos diseños necesarios para llevar a cabo el acople de la bomba de calor al tanque del módulo didáctico de control de fluidos; los diseños incluyen los planos mecánicos para la instalación de la tubería para la conducción del agua hacia la bomba de calor, también está el diseño de la instrumentación a utilizar en el proyecto, que va acompañado de los diagramas eléctricos y electrónicos necesarios para el funcionamiento y control del sistema en general.

En la implementación, se pone en práctica los diseños realizados, entre los cuales está la instalación de la tubería y la adquisición de los instrumentos que realizan las mediciones de las variables más relevante que describan el funcionamiento de la bomba de calor. Y se concluye con la elaboración de 2 guías de laboratorio que tiene como finalidad la ejecución de prácticas que demuestren el funcionamiento y el coeficiente de desempeño u operación (COP) de la bomba de calor con base en la adquisición de datos.

Por último, en el capítulo 5, conclusiones, se definen los logros que se adquirieron durante la elaboración de este proyecto; también, con base en el proyecto actual, se hacen sugerencias para la ejecución de trabajos futuros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Primera ley de la termodinámica

Esta ley expresa el principio de conservación de la energía, el cual dice en forma resumida que la energía no se crea ni se destruye, sino que solo se transforma de un tipo de energía a otro. La energía se puede manifestar de varias maneras, como, por ejemplo, energía cinética, térmica, mecánica, potencial gravitacional, química, entre otras, y la suma de las energías en un sistema se denomina “energía total” y se denota con la letra ***E*** (o ***e*** cuando se expresa la energía por unidad de masa). En el sistema internacional (SI), la energía se expresa en Joule (***J***) que equivale a Newton por metro (***N.m***); mientras que, en el sistema inglés, energía se expresa en british thermal unit (***Btu***).

2.1.1 Formas de energía

En termodinámica, las formas de energía se pueden expresar en dos grupos: Las formas de energía *macroscópicas* son aquellas que tienen su marco de referencia externa, o sea, que son influenciados por factores externos, como por ejemplo energía cinética y potencial, mientras que las formas de energía *microscópicas* se basan en la estructura molecular del sistema (Yunus & Michael, 2009); y la suma de todas las energías microscópicas se denomina *energía interna* (esta energía se representa con la letra ***U***).

2.1.1.1 Energía cinética

Es una forma de energía macroscópica, que resulta del movimiento del sistema con respecto a una referencia. La ecuación que representa la energía cinética a una velocidad constantes es:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde:

m : masa del sistema

v : velocidad del sistema

2.1.1.2 Energía potencial

Es una forma de energía macroscópica, que resulta de la posición de elevación en un campo gravitacional con respecto a una referencia. La ecuación que representa la energía potencial se define como:

$$E_p = m \cdot g \cdot z \quad (2)$$

Donde:

m : masa del sistema

g : aceleración gravitacional

z : altura con respecto un marco de referencia

2.1.2 Transferencias de energía

Se puede transferir energía entre el sistema y sus alrededores para afectar el sistema, ya sea añadiendo energía o removiéndola.

2.1.2.1 Calor

Se define como la forma de transferir energía entre sistemas debido a una diferencia de temperaturas (Yunus & Michael, 2009). En termodinámica, el calor se expresa con la letra Q , y al ser un intercambio de energía, sus unidades son Joule para el SI y Btu para el sistema inglés. Si en un proceso no hay transferencia de calor de ningún tipo, dicho proceso se denomina “proceso adiabático” y matemáticamente se expresa como $Q = 0$.

El calor al ser una cantidad vectorial, no solo se debe especificar la magnitud, sino que también se debe definir la dirección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.1.2.2 Trabajo

El trabajo es la transferencia de energía que está relacionada a una fuerza que actúa en un sistema a cierta distancia. El trabajo se expresa con la letra W y se expresa en unidades de energía. Matemáticamente, en trabajo se expresa:

$$W = \int_a^b F dx \quad (3)$$

Donde:

F : fuerza ejercida

dx : variación en la distancia

No obstante, cuando en el sistema se trabaja con fluidos, el trabajo se expresa más fácilmente con la ecuación (4):

$$W = \int_a^b P dV \quad (4)$$

Donde:

P : presión del sistema

dV : variación en el volumen

Al igual que en el calor, el trabajo también es una cantidad vectorial, por lo que también se debe definir la dirección.

2.1.3 Balance de energía

Según el principio de conservación de la energía, el balance se define como el cambio neto en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre las energías entrantes y las energías salientes en el sistema durante el proceso (Yunus & Michael, 2009). Matemáticamente, lo anterior se expresa de la siguiente manera:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (5)$$

La energía total es la suma total de formas de energía que actúan en un sistema, y termodinámicamente se trabaja principalmente con las energías cinética, potencial e

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

interna, siempre y cuando en el sistema no haya efectos eléctricos, magnéticos o de clase similar. Así la energía se expresa como:

$$E = U + E_k + E_p \quad (6)$$

Como el término $\Delta E_{sistema}$ hace referencia a la energía en el estado final del proceso menos la energía en el estado inicial del proceso. Se expresa de las siguientes maneras:

$$\Delta E_{sistema} = E_{final} - E_{inicial} \quad (7)$$

$$\Delta E_{sistema} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (8)$$

Si las energías están expresadas en función de la masa, el resultado del cambio de energías se define en la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{sistema} = m (\Delta u + \Delta e_k + \Delta e_p) \quad (9)$$

Al hablar de las energías entrantes y salientes, se hace referencia a los medios de transferencia de energía, que, como se mencionó anteriormente, son calor y trabajo, no obstante, se puede incluir la transferencia de energía por flujo de masa o flujo másico; de modo que la expresión matemática sería:

$$E_{entrada} - E_{salida} = (Q_{entrada} - Q_{salida}) + (W_{entrada} - W_{salida}) + (E_{m_{entrada}} - E_{m_{salida}}) \quad (10)$$

El término de balance de energía se expresa con una ecuación característica, la cual es formulada con todo lo anteriormente mencionado. La ecuación es:

$$Q - W = m (\Delta u + \Delta e_k + \Delta e_p) \quad (11)$$

Donde:

Q : calor neto en el proceso

W : trabajo neto en el proceso

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

m : masa del sistema

Δu : cambio de la energía interna durante un proceso

Δe_k : cambio de la energía cinética durante un proceso

Δe_p : cambio de la energía potencial durante un proceso

2.2 Segunda ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica habla acerca del principio de conservación de la energía y la transferencia de energía, por lo que se habla principalmente de magnitudes o cantidades. Pero la segunda ley de la termodinámica habla de dos fundamentos principales: el primer fundamento dice que los procesos tienen una dirección específica, y que no puede ir de forma inversa, o al menos de manera natural. El segundo fundamento afirma que la energía además de tener cantidad, también tiene calidad; lo que significa que la energía tiende a degradarse.

La segunda ley de la termodinámica se usa principalmente para definir los límites teóricos en sistemas como máquinas térmicas, sistemas de refrigeración y bombas de calor. Dichos límites se denominan “depósitos de energía térmica”, y son cuerpos hipotéticos que poseen una gran capacidad de energía térmica (Yunus & Michael, 2009) y permiten entregar o absorber cantidades de calor sin variar su temperatura.

2.2.1 Máquinas térmicas

En la naturaleza, transformar el trabajo en una forma de energía como es el calor es sencillo, pero convertir calor en trabajo no es tan simple de manera natural. Por eso, para realizar dicho proceso se usan unos sistemas llamados “máquinas térmicas”, que su funcionalidad es precisamente convertir calor en trabajo útil mediante una serie de procesos que son ejecutados de manera cíclica.

Existen diferentes tipos de máquinas térmicas, pero la funcionalidad básica es la misma: En la Figura 1 se muestra un esquema general de flujo de energías que realiza una máquina térmica. Al observar la Figura 1, se muestra que, el sistema, que es la máquina térmica

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

recibe calor de un depósito de alta fuente de temperatura; el sistema se encarga de procesar la energía para entregar un trabajo útil, que generalmente es en forma de flecha (a través de un eje de rotación) y la energía no aprovechada en la transformación la expulsa a un sumidero, que resulta ser un depósito de baja temperatura.

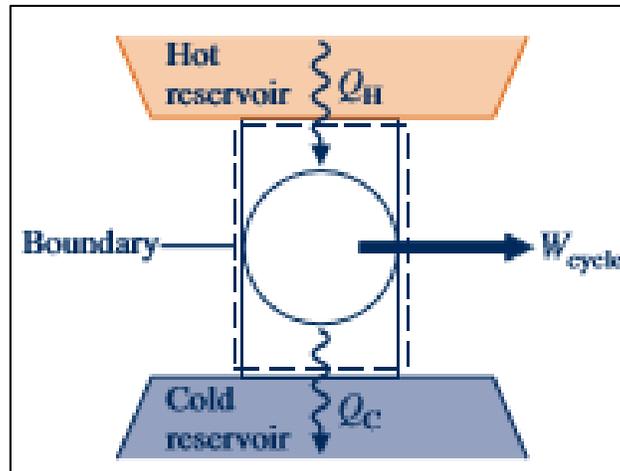


Figura 1. Diagrama de flujo de energías de una máquina térmica. Fuente: (Moran *et al.*, 2014)

Si se realiza un balance de energías sobre el sistema que muestra la Figura 1, se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_H = W_{cycle} + Q_C \quad (12)$$

Donde:

Q_H : calor suministrado por el depósito de alta temperatura

Q_C : calor rechazado hacia el depósito de baja temperatura

W_{cycle} : trabajo útil realizado por la máquina térmica

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.1.1 Eficiencia térmica

Lo ideal en un sistema es que la salida de calor, o calor desechado sea cero, pero en la realidad eso nunca sucederá, lo que significa que no todo el calor entrante se transforma en trabajo útil, por eso se realiza una medida que indica el desempeño de una máquina térmica, el cual es una relación entre el trabajo útil realizado por la máquina térmica y el calor suministrado a la máquina térmica. En otras palabras, la eficiencia térmica indica la utilidad de la máquina térmica para producir trabajo útil. Dicho valor se denomina “eficiencia térmica” y matemáticamente se expresa como:

$$n = \frac{W_{cycle}}{Q_H} \quad (13)$$

Dicho valor es un valor adimensional, pero que generalmente se expresa en porcentaje, al ser multiplicado por 100.

Aunque, si se usa la ecuación (12) en la ecuación (13), se puede expresar la eficiencia térmica en términos de los dos flujos de calor, de la siguiente manera:

$$n = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \quad (14)$$

Para un caso ideal, si Q_C llega a valer cero, entonces la eficiencia de la máquina térmica sería del 100%, lo cual significaría que toda la energía térmica entrante se transformaría en trabajo útil; no obstante, el valor de Q_C nunca llegará a valer cero debido a que, sin un proceso de rechazo de calor, el ciclo termodinámico estaría incompleto y las máquinas térmicas no trabajarían de forma continua (Yunus & Michael, 2009).

2.2.1.2 Ciclo de Carnot

Para hablar de ciclo de Carnot, primero se debe entender los términos de procesos irreversibles y reversibles.

Los *procesos reversibles* son procesos que se pueden invertir sin dejar ningún rastro en los alrededores (Yunus & Michael, 2009). O sea que un proceso, una vez sea revertido, el sistema y los alrededores regresan al estado inicial. Pero si al revertir el proceso, el sistema

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

y los alrededores pasan a un estado diferente a la inicial, éste se dice que es un *proceso irreversible*.

Los ciclos de Carnot son ciclos termodinámicos cuyos procesos son de tipo reversible, con ello se asegura que el sistema genera la mayor cantidad de trabajo entre depósitos, haciendo que la eficiencia sea la más alta posible. En la realidad, estos ciclos son considerados como ideales, debido a que en la realidad ningún proceso es realmente reversible, ya que, durante la ejecución de un proceso, siempre habrá irreversibilidades de algún tipo.

La eficiencia de un ciclo de Carnot se calcula cuando las transferencias de calor alcanzan las temperaturas de ambos depósitos, por lo que matemáticamente se expresa:

$$n_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (15)$$

Donde:

T_C : Temperatura del foco frío

T_H : Temperatura del foco caliente

Para realizar el cálculo de la eficiencia de Carnot, se debe tener en cuenta que tanto T_C como T_H debe ser temperaturas absolutas, de modo que, en el sistema internacional la temperatura debe estar en unidades Kelvin (K), mientras que, en el sistema inglés la unidad absoluta de temperatura es el Rankine (R).

Generalmente, las temperaturas que se trabajan son grados Celsius ($^{\circ}C$) y grados Fahrenheit ($^{\circ}F$), por lo que se debe hacer las conversiones con las ecuaciones (16) y (17), para el sistema internacional y el sistema inglés, respectivamente:

$$T[K] = T[^{\circ}C] + 273.15 \quad (16)$$

$$T[R] = T[^{\circ}F] + 459.67 \quad (17)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.2 Sistemas de refrigeración y bombas de calor

En la naturaleza, la dirección del flujo de calor va desde la temperatura más caliente a la más fría, pero para hacer que la dirección de flujo de calor vaya de manera inversa, se debe hacer con sistemas especiales que son denominados “sistemas de refrigeración” o “refrigeradores”. Como se ve en la Figura 2, el flujo de calor entra al sistema a través del foco de baja temperatura y sale del sistema a través del foco de alta temperatura, que sería en este caso el sumidero; pero a diferencia de las máquinas térmicas que generan trabajo, a los sistemas de refrigeración hay que ingresarle trabajo para que funcionen.

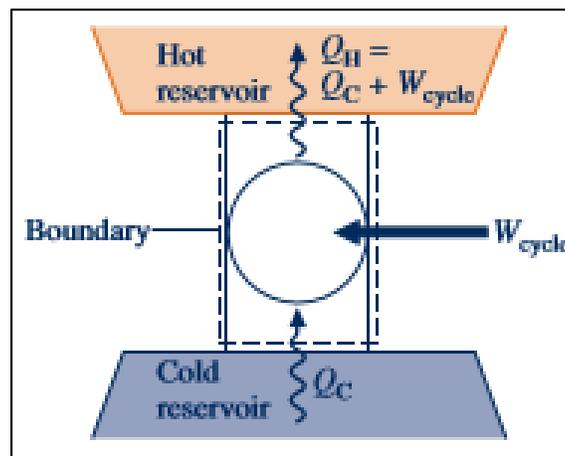


Figura 2. Diagrama de flujo de energías de un sistema de refrigeración. Fuente: (Moran *et al.*, 2014)

Si realizamos el balance de energías en la Figura 2, se tiene:

$$W_{cycle} + Q_C = Q_H \quad (18)$$

Se observa que las ecuaciones (12) y (18) muestran el mismo balance de energía, pero con la variación de la dirección de flujo; mientras que en la máquina térmica Q_H es un flujo de entrada, en el sistema de refrigeración Q_H va en dirección saliente.

Las bombas de calor son dispositivos que funcionan bajo el mismo principio que los sistemas de refrigeración, no obstante, la diferencia radica en que los refrigeradores aprovechan el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

uso del depósito de baja temperatura para enfriar espacios, mientras que las bombas de calor aprovechan el depósito de alta temperatura para calentar espacios.

2.2.2.1 Coeficiente de desempeño

En los sistemas de refrigeración y bombas de calor, la eficiencia del sistema se determina con un término denominado “coeficiente de desempeño”. El coeficiente de desempeño se simboliza con las siglas *COP* (coefficient of performance) y un subíndice **R** para refrigeradores y **HP** para bombas de calor; mientras que en otros casos se representa con las letras β y γ para coeficientes de desempeño para refrigeradores y bombas de calor, respectivamente (Moran et al., 2014).

Matemáticamente, el COP es la relación entre la salida deseada y la entrada de trabajo requerida para realizar el proceso de flujo de calor inverso. Para sistemas de refrigeración, el COP se calcula así:

$$COP_R = \frac{Q_C}{W_{\text{neto entrada}}} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} \quad (19)$$

Mientras que, en bombas de calor el COP se calcula de la siguiente manera:

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto entrada}}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \quad (20)$$

Los coeficientes de desempeño tienen la característica que su valor tiene un valor mayor a 1.

2.2.2.2 Ciclo inverso de Carnot

Al igual que en el ciclo de Carnot, el ciclo inverso de Carnot en un ciclo de refrigeración cuyos procesos son reversibles. Este ciclo es una idealización, y por ello, indica cual sería el coeficiente de rendimiento más alto que se puede realizar entre depósitos definidos.

Para hallar el COP en un ciclo inverso de Carnot, los flujos de calor alcanzan la temperatura de los depósitos, obteniendo así:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

COP máximo para sistemas de refrigeración:

$$COP_{R_{Carnot}} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (21)$$

COP máximo para bombas de calor:

$$COP_{HP_{Carnot}} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (22)$$

2.3 Principio de funcionamiento de sistemas de refrigeración y bombas de calor

Para realizar el ciclo de refrigeración, existen varios sistemas que permiten la realización, dando como ejemplo los sistemas de compresión de vapor, ciclo por absorción o ciclos por adsorción. No obstante, este trabajo se centrará en el sistema de compresión de vapor, ya que es el sistema más común tanto a nivel residencial como industrial.

2.3.1 Sistema de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor se compone principalmente de 4 procesos, como se muestra en los diagramas de la Figura 3.

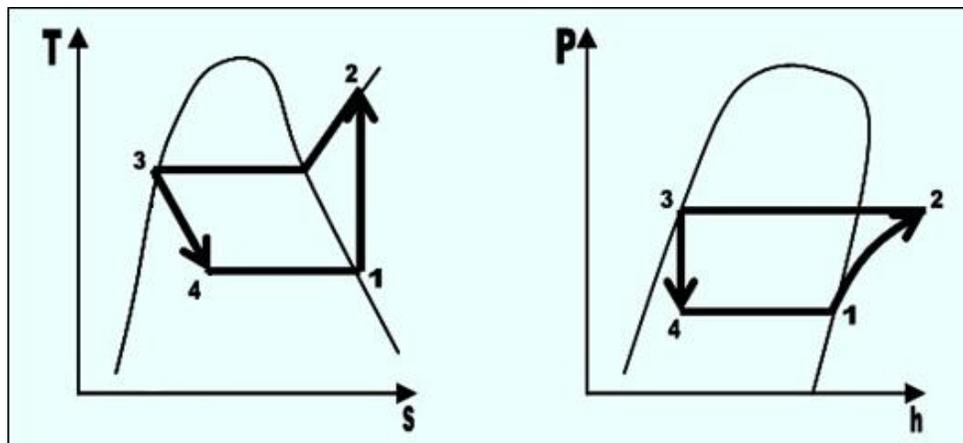


Figura 3. Diagramas T-s (izquierda) y P-h (derecha) de un sistema ideal de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: (UNET, n.d.)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La Figura 3 muestra el ciclo ideal de refrigeración en dos diagramas distintos, el primer diagrama tiene como ejes coordenados la entropía (**s**) y la temperatura (**T**), mientras que el segundo diagrama tiene como ejes coordenados la entalpía (**h**) y la presión (**P**).

Si se observa el diagrama a la izquierda de la **Figura 3**, se tiene que el proceso que va del estado 1 al estado 2, muestra un comportamiento vertical, lo que significa que, durante ese proceso, la sustancia mantiene una entropía constante, por lo que ese proceso es llamado isentrópico; además de que el estado 1 está ubicado en la zona del vapor saturado, lo cual indica termodinámicamente que tiene una calidad de 1. Y si se observa la gráfica de la derecha, se nota que el estado 1 tiene una presión menor que la del estado 2, y por dirección de flujo del proceso, se concluye que en ese proceso hay un incremento en la presión.

Al observar el diagrama de la derecha de la Figura 3, la presión en el punto 2 es la misma que en punto 3, por lo que el proceso desde el punto 2 al 3 es un proceso denominado isobárico. El punto 2 se encuentra ubicado en la zona de vapor sobrecalentado, mientras que el punto 3 está en la zona de líquido saturado, o sea que presenta una calidad de 0.

También en el diagrama de la derecha, se observa que el proceso que va desde el punto 3 al punto 4 tiene un comportamiento vertical descendente, lo cual significa dos cosas: la primera es que pasa de una presión mayor a una presión menor, y lo otro es que la entalpía en los puntos 3 y 4 es la misma, por lo que su comportamiento es de tipo isoentálpico. El punto 4 está ubicado en la zona de mezcla entre líquido y vapor.

El último proceso, el cual va desde el punto 4 al punto 1, es un proceso isobárico, ya que tanto la presión en el punto 4 es la misma que el punto 1.

Estos ciclos tienen solo dos presiones diferentes, las cuales son denominadas *presión de alta* y *presión de baja*.

2.3.1.1 Componentes de un ciclo de refrigeración

Cuatro procesos componen el ciclo de refrigeración, cada proceso es realizado por un elemento diferente, los cuales son unidos de modo que formen un ciclo cerrado para que el proceso se realice de forma cíclica, como se muestra en la Figura 4.

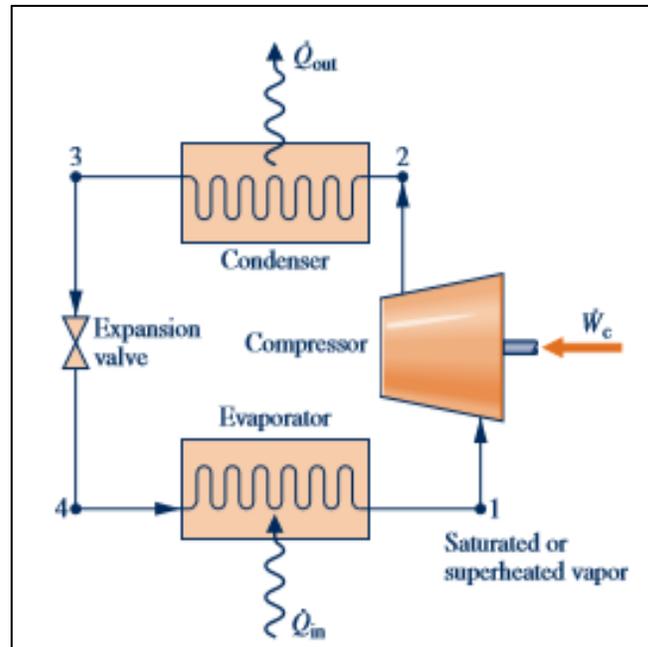


Figura 4. Componentes de un ciclo de refrigeración de tipo compresión de vapor. Fuente: (Moran *et al.*, 2014)

2.3.1.1.1 Compresor

El compresor es un dispositivo cuya función es la de incrementar la presión de un fluido, generalmente de tipo compresible como son los gases. En el ciclo de refrigeración, este dispositivo es el encargado de llevar el proceso que va desde el punto 1 al punto 2 de la **Figura 4**, y para realizar este proceso, es necesario un suministro de trabajo al sistema. También, al incrementar la presión, hace un incremento de temperatura, además de colocar el estado final en la zona de vapor sobrecalentado.

Entre las características del compresor están: este dispositivo es el único que necesita trabajo externo para funcionar, que, por lo general, es trabajo producido por electricidad a un motor interno; además este equipo se podría considerar como el corazón del sistema de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

refrigeración, ya que éste hace que el fluido circule por todo el circuito. En los compresores se debe asegurar que el fluido a comprimir sea completamente gaseoso, ya que, si tiene contacto con un fluido líquido, éste tiende a dañar el compresor.

2.3.1.1.2 Condensador

El condensador es un intercambiador de calor cuya funcionalidad es condensar el fluido del sistema de refrigeración por medio de rechazo de calor. Este proceso que va del estado 2 al 3 de la **Figura 4**, y busca que a la salida del condensador el fluido sea completamente líquido, pero manteniendo la alta presión realizada por el compresor.

Para realizar la pérdida de calor, éste debe ceder el calor a una fuente con temperatura menor, que puede ser aire, agua, u otros. En una bomba de calor, éste es el dispositivo de trabajo térmico útil, ya que el condensador es el encargado de calentar la sustancia deseada suministrando el calor que está cediendo del fluido refrigerante.

2.3.1.1.3 Dispositivo de expansión

Entre los dispositivos de expansión se pueden usar una válvula de expansión o un tubo capilar, los cuales, por medio de una reducción de sección transversal, buscan disminuir la presión, pasándola de una presión de alta a una presión de baja.

Estos dispositivos realizan el proceso termodinámico que va desde el estado 3 al estado 4 de la **Figura 4**, e idealmente, al no tener interacción con transferencia de calor o trabajo, realiza un proceso isoentálpico. También, se observa durante la caída de presión, parte del fluido refrigerante que estaba totalmente líquido pasa a un estado gaseoso, haciendo que en la salida del dispositivo haya una mezcla entre líquido y gas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.1.1.4 Evaporador

Al igual que en el condensador, el evaporador es un intercambiador de calor con la diferencia que el evaporador busca pasar el refrigerante al estado gaseoso por medio de la adición de calor al sistema. En el ciclo de refrigeración, el evaporador realiza el proceso que va del estado 4 al estado 1 de la **Figura 4**, y este dispositivo debe asegurar que en la salida el fluido esté completamente gaseoso para ingresar al compresor, ya que, en este proceso el fluido permanece a una baja presión.

En los refrigeradores, el evaporador es el dispositivo de trabajo térmico útil, ya que éste debe ganar calor para evaporar el fluido, y dicho calor se transfiere desde cualquier elemento a su alrededor que tenga una temperatura más alta que el fluido refrigerante, y así, los elementos que van perdiendo calor, también van disminuyendo su temperatura.

2.4 Refrigerantes

Un refrigerante se puede definir como cualquier cuerpo o sustancia que actúe como agente de enfriamiento, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia (Indubel, n.d.). En los sistemas de refrigeración, los fluidos refrigerantes pueden ser cualquier sustancia que cambie de líquido a vapor y viceversa, y según el rango de presiones y temperaturas a la que se realicen estos cambios, puede tener una aplicación útil comercialmente.

2.4.1 Refrigerante ideal

Un refrigerante ideal requiere de unas propiedades físicas y térmicas que puedan proveer la máxima capacidad de refrigeración con la mínima demanda de potencia, es decir, el refrigerante ideal, sería aquél que fuera capaz de descargar en el condensador todo el calor que absorba del evaporador, la línea de succión y el compresor; sin embargo, los refrigerantes regresan al evaporador con una cierta porción de calor, reduciendo la capacidad del refrigerante para absorber calor en el lado de baja (Indubel, n.d.). La temperatura de descarga deberá ser la más baja posible para alargar la vida útil del compresor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Aunque no existe ningún tipo de refrigerante ideal, a continuación, se nombran las principales características, tanto físicas como químicas y termodinámicas que se requieren para que dicho refrigerante alcance su estado ideal:

- **Calor latente de vaporización:** Debe ser lo más alto posible para que una pequeña cantidad de líquido absorba una gran cantidad de calor.
- **Presión de condensación:** deben ser elevada, para evitar fugas y reducir la temperatura de condensación.
- **Temperatura crítica:** Debe ser elevada, ya que, si la temperatura crítica es baja, se incrementa la presión de condensación y esto conlleva a la necesidad de utilizar grandes superficies de intercambio en el condensador.
- **Volumen específico:** El volumen específico del vapor a la presión de evaporación debe ser lo más bajo posible para evitar grandes tamaños, tanto en las líneas de aspiración y compresión como en el tamaño preciso del compresor.
- **Temperatura de congelación.** Debe ser lo suficiente baja como para que el refrigerante no pueda solidificarse durante el trabajo normal.
- **Conductividad térmica.** Debe ser elevada, para que las superficies de intercambio no sean grandes.
- **Inactividad y estabilidad.** El refrigerante debe ser inerte frente a los materiales que constituyen el sistema y el aceite de lubricación del compresor y debe ser estable en su constitución química.

Además, no deben ser inflamables, corrosivos, ni tóxicos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4.2 Clasificación

Según la distribución de frío, los refrigerantes se pueden dividir en *refrigerantes primarios* o *refrigerantes secundarios* (Rey & Velasco, 2005). Los refrigerantes primarios tienen la característica de trabajar en la zona de calor latente, o sea que realizan un cambio de fase de líquido a vapor o viceversa según la ganancia o pérdida de calor; mientras que los refrigerantes secundarios trabajan en la zona de calor sensible, por lo que el fluido no experimenta cambio de fase durante la transferencia de calor.

Los refrigerantes reciben una nomenclatura, la cual, se define dependiendo de su composición química:

De derecha a izquierda, el primer dígito es el número de átomos de flúor (F) que tiene el compuesto, el segundo dígito es el número de átomos de hidrógeno (H) más 1, el tercero es el número de átomos de carbono (C) menos 1 y el cuarto equivale al número de enlaces carbono-carbono no saturados en el compuesto (ASHRAE, 2013).

Con respecto a las letras que llevan algunos refrigerantes, si la nomenclatura lleva una letra minúscula, denota una asimetría en los pesos atómicos; en el caso de mayor simetría, ésta no lleva letra minúscula y al aumentar la asimetría se colocan las letras a, b, c, etc. Un ejemplo es el refrigerante 134a. Pero una letra mayúscula denota una mezcla zeotrópica¹ como por ejemplo el refrigerante 401A; y el uso de las letras A, B, C a la derecha del número se utilizan para diferenciar mezclas con los mismos componentes, pero con diferente proporción. Ejemplos: R-401A, R-401B, R-407C (Yañes, 2017).

La ANSI/ASHRAE Standard 34 se encarga de realizar la clasificación de los refrigerantes y la división la realiza en series, como se muestra en la Tabla 1.

La serie 400 que contiene mezclas zeotrópicas, se caracterizan porque es una mezcla de varios compuestos químicos, y cada compuesto cambia de fase a su correspondiente

¹ Una mezcla zeotrópica es una mezcla donde cada componente cambia de fase a la temperatura que le corresponde (Rey & Velasco, 2005).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

temperatura, mientras que las mezclas azeotrópicas como las de la serie 500, aunque también son una mezcla de compuestos químicos, todos los compuestos cambian de fase a una temperatura constante.

Tabla 1. Algunas características de clasificación del Standard 34 ASHARE. Fuente: (Yañes, 2017).

Serie	Nombre	Gas
000	Metanos	R-12
100	Etanos	R-134a
200	Propano	R-290
400	Zeotropos	R-410A
500	Azeotropos	R-502
600	Orgánicos	R-600a
700	Inorgánicos	R-717
1000	Orgánicos No Saturados	R-1234yf

También, los refrigerantes se pueden clasificar en refrigerantes sintéticos o naturales. Entre los refrigerantes naturales más conocidos están:

- **Amoniaco o R-717 (NH₃):** es uno de los fluidos de trabajo naturales más empleado en grandes instalaciones industriales, plantas alimenticias y farmacéuticas. Tiene unas favorables propiedades termodinámicas que lo hacen parecerse mucho al refrigerante ideal. Como desventaja, su gran toxicidad, lo que hace obligatorio en este tipo de instalaciones, estrictas normas de seguridad, cuidado y operación.
- **Agua o R-718 (H₂O):** el agua es un excelente fluido de trabajo para las bombas de calor industriales de alta temperatura debido a sus propiedades termodinámicas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

favorables y al hecho de que no es ni inflamable ni tóxico. La mayor desventaja del agua es que se requieren compresores grandes y caros, especialmente a bajas temperaturas, debido a que el volumen de barrido de un compresor de vapor de agua debe ser 500 veces mayor que el de un refrigerante convencional (R718, 2012).

- **Dióxido de carbono o R-744 (CO₂):** Tiene gran ventaja con respecto a los demás refrigerantes naturales ya que no es tóxico ni inflamable, y es compatible con los lubricantes convencionales.
- **Hidrocarburos:** presentan grandes propiedades termodinámicas, lo que los hace bastante llamativos para las aplicaciones en sistemas de refrigeración y calefacción. Hacen parte de este grupo el propano, propileno, butano, isobutano, etano y mezcla de los mismos; se destacan debido a sus grandes propiedades termodinámicas, pero el más importante de todos es el propano por su mayor eficiencia con respecto al R-22, debido a que tiene un mayor calor latente de vaporización.

2.4.3 Seguridad

Como se muestra en la Tabla 2, los refrigerantes se clasifican según su toxicidad y su inflamabilidad.

La letra define el riesgo por toxicidad, clasificando con la letra **A** los refrigerantes de baja toxicidad, mientras que los de alta toxicidad se clasifican con la letra **B**; mientras que el número cataloga el riesgo a la inflamabilidad, siendo 1 el nivel de más bajo riesgo.

Tabla 2. Clasificación de las características de seguridad de los refrigerantes según la (ISO 817:2014). Fuente: (PNUMA, 2015)

	Baja toxicidad	Alta toxicidad	
Sin propagación de llama (considerados no inflamables)	A1	B1	Riesgo creciente: inflamabilidad ↓
Baja inflamabilidad	A2L	B2L	
Inflamador	A2	B2	
Alta inflamabilidad	A3	B3	
	Riesgo creciente: toxicidad →		

En los refrigerante también hay dos factores muy importantes que se tienen en cuenta en la clasificación y comercialización, y estos factores son el Potencial Reductor de Ozono (ODP) por sus siglas en Ingles *Ozone Deplation Potencial*, y el Potencial de Calentamiento Global (GWP) por sus siglas en inglés *Global Warming Potencial* (Quintero & García, 2011). Estos factores definen el riesgo ambiental que traen cada refrigerante, por lo que si uno de estos compuestos presenta un riesgo muy alto, se debe buscar alternativas que resulten menos contaminantes; como por ejemplo está el refrigerante 22 (o R-22), el cual es un refrigerante altamente conocido por los profesionales en el tema, es un compuesto perteneciente a los halogenados (o sea que mantiene un átomo de cloro en su composición) y por ello tiene un significativo GPW, por lo que es un refrigerante altamente contaminante, y se busca ser reemplazado por otras opciones menos contaminantes.

2.5 Fuentes de bomba de calor

Son las fuentes de calor que obtiene la bomba de calor para que pueda realizar las funciones de calentamiento. En los sistemas de compresión de vapor, la fuente de calor está en contacto con el evaporador, cuyo refrigerante debe estar a una temperatura inferior a la de la fuente para que ésta pueda ceder el calor y pasarlo al refrigerante, y así, expulsar el calor en el condensador.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En una bomba de calor es importante según su aplicación, determinar cuál sería su fuente de calor, ya que, según las características de la fuente, se define la bomba de calor más apropiada, tanto en funcionalidad como en costos de montaje y operación.

En la Tabla 3 se muestran algunas de las fuentes de calor más utilizadas con su respectivo rango de temperatura, sin embargo, en el sector industrial se busca mejorar los procesos energéticos, aprovechando el calor residual que producen ciertos procesos y termina siendo una energía desaprovechada. Una fuente de calor ideal debe ser estable en su temperatura, abundante y disponible y que su utilización requiera baja inversión y costos de operación (Quintero & García, 2011).

Tabla 3. Fuentes de calor comúnmente usadas. Fuente: (Quintero & García, 2011)

Fuente de Calor	Rango de Temperatura (°C)
Aire Ambiente	-10...15
Aire de Escape	15...25
Agua Subterránea	4...10
Agua de Lagos	0...10
Agua de Ríos	0...10
Agua de Mar	3...8
Suelos	0...5
Subsuelo	0...10
Aguas residuales y de procesos	>10

2.5.1 Aire

Esta fuente de calor tiene la ventaja que es una fuente gratuita e inagotable, además que es un sistema muy utilizado por su fácil instalación y bajo costo, sin embargo, el aire no es una fuente de temperatura constante, debido a que ésta varía según las condiciones climatológicas tales como el sol, y esto hace que su rendimiento sea oscilante.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Según su aplicación, estas bombas de pueden ser del tipo aire-aire o del tipo aire-agua.

Las bombas de calor de tipo aire-aire son muy utilizadas en sistemas que puedan funcionar como sistema de aire acondicionado como bomba de calor para aclimatar interiores, por ejemplo en países que tengan estaciones, en invierno puede ser utilizado como bomba de calor tomando el calor del exterior y transportándola al interior, pero en verano, puede ser usado como aire acondicionado haciendo que el calor del interior sea expulsado hacia el exterior (Rey & Velasco, 2005).

Mientras que las bombas de calor de tipo aire-agua son muy usadas en sistemas de agua caliente sanitaria (ACS) y sistemas de calentamiento de agua para aclimatar piscinas.

2.5.2 Agua

Los sistemas de bomba de calor que usan el aire como fuente tienen un gran inconveniente y es que cuando la superficie del evaporador tiene una temperatura inferior a los 0°C (temperatura inferior a la de rocío del aire), se hace una formación de escarcha, haciendo que se reduzca el valor del COP (Quintero & García, 2011).

Pero las bombas de calor que usan el agua como fuente de calor no tienen el inconveniente del escarchado, debido a que el agua realiza pocas variaciones de temperatura debido a su alto valor de calor específico. Además, una de las ventajas de usar bombas de calor con agua como fuente de calor es que sus equipos son más pequeños que los equipos que utilizan el aire como fuente al trabajar a una igualdad de potencia calorífica (Rey & Velasco, 2005). Entre los suministros de agua se pueden encontrar ríos, lagos, pozos, entre otros, y en eso radica su desventaja, ya que para realizar una instalación hay que adicionar el montaje del transporte del agua, tales como tubería, bomba impulsora, accesorios, entre otros; además de la dificultad que se puede tener para encontrar una fuente de agua y la distancia entre la fuente y la bomba de calor. Además, en lugares que tienen estaciones, este sistema presenta problemas en invierno, ya que el agua tiende a congelarse o descender mucho en su temperatura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Entre las bombas de calor que usan el agua como fuente de calor están las bombas de tipo agua-aire y las de tipo agua-agua, cuyas aplicaciones se podría decir que son las mismas que las que tienen las bombas de calor que usan el aire como fuente.

2.5.3 Suelo

El suelo como fuente de calor tiene la ventaja de que es una fuente de calor constante y uniforme todos los días del año. Pero para aprovechar el suelo como fuente de calor, es necesario una gran cantidad de terreno en la que se entierra un intercambiador de calor por el que recorre un flujo de agua o agua glicolada si existe el riesgo de congelación, esto se realiza con la finalidad de captar la energía térmica que hay en el subsuelo; dichos fluidos son transportado por tubo de polipropileno y estos fluidos alcanzan rango de temperatura entre 6 y 10 °C (Rey & Velasco, 2005).

Este sistema es usado en lugares aislados y se usa principalmente para la calefacción de agua (bombas de calor de tipo suelo-agua); además de su el costo de su instalación es bastante elevada.

2.6 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son estructuras metálicas que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí (Yunus & Afshin, 2011). En un intercambiador de calor por lo general entran dos fluidos, uno de ellos con más temperatura que el otro; y por la segunda ley de la termodinámica, el calor se transfiere del fluido caliente al fluido frío, en otras palabras, el fluido caliente pierde calor, y dicho calor lo gana el fluido frío.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.6.1 Intercambiadores de calor de tubo doble

Entre los intercambiadores de calor, los más utilizados son los *intercambiadores de calor de tubo doble*, los cuales tienen la característica de que los fluidos son transportados en dirección paralela. Estos intercambiadores constan básicamente de un tubo de mayor diámetro en el cual tiene dentro otro tubo de menor diámetro por el cual en el interior se transporta uno de los fluidos; mientras que el segundo fluido fluye de forma anular entre el tubo grande y el tubo pequeño.

En este tipo de intercambiadores pueden ser usados de dos maneras, en *flujo paralelo* y en *contraflujo*. Como se observa en la imagen izquierda de la Figura 5, la característica de un intercambiador de calor en flujo paralelo es que los fluidos entran por el mismo extremo, haciendo que ambos flujos recorran la misma dirección, mientras que el intercambiador de contraflujo, las entradas de los fluidos están en extremos opuestos, haciendo que ambos fluidos vayan en direcciones opuestas, como se ve en la imagen derecha de la Figura 5.

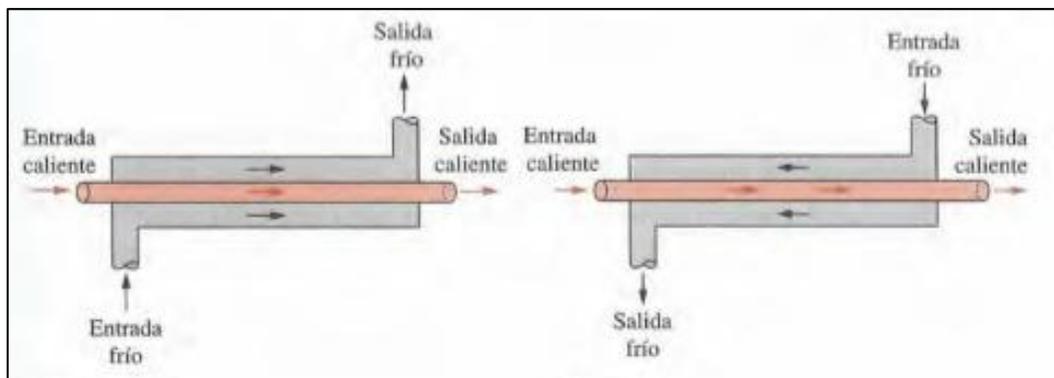


Figura 5. Intercambiador de calor de flujo paralelo (izquierda) y de contraflujo (derecha). Fuente: (Yunus & Afshin, 2011)

La diferencia de comportamiento en cuanto a la transferencia de calor entre ambos intercambiadores se puede observar en la **Figura 6**. El comportamiento del intercambiador de calor en paralelo, como se ve en la imagen de la izquierda, se observa la diferencia de temperaturas cuando entra, y conforme avanzan en el intercambiador, dicha diferencia se va acortando, pero el fluido caliente siempre estará a temperaturas por encima de la del

fluido frío. Caso que no se ve en el intercambiador de calor en contraflujo, ya que, como se ve en la imagen de la derecha de la **Figura 6**, ambos entran con una gran diferencia de temperatura, pero su transferencia de calor tiende a ser más constante, y a la salida, el fluido frío puede alcanzar mayor temperatura que el fluido caliente.

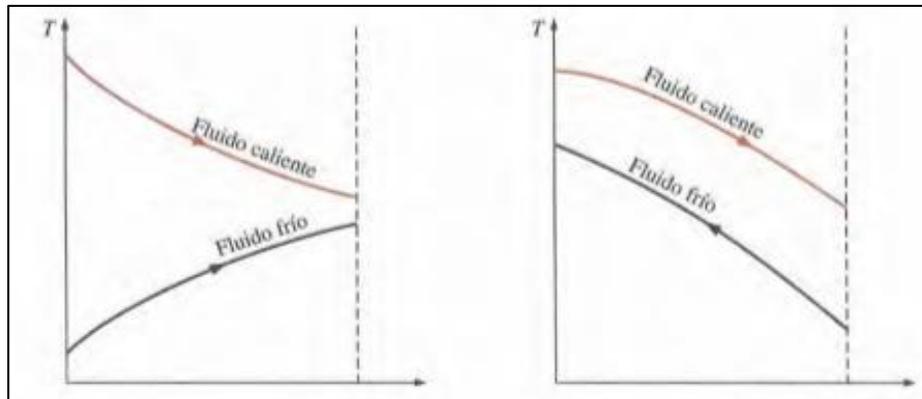


Figura 6. Comportamiento de temperaturas de los fluidos en un intercambiador de calor en flujo paralelo (izquierda) y en contraflujo (derecha). Fuente: (Yunus & Afshin, 2011)

Esto indica que el intercambiador de calor en contraflujo es más eficiente en transferir calor que el intercambiador de calor de flujo paralelo.

2.6.2 Intercambiadores de calor compactos

Son considerados intercambiadores de calor compactos aquellos que tienen una densidad de área que sea mayor a $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ o $200 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ (Yunus & Afshin, 2011). Estos intercambiadores se caracterizan por realizar altas transferencias de calor en volúmenes pequeños y se usan en aplicaciones que se requieran limitado espacio de trabajo, como ejemplo están los convectores de los carros.

En los intercambiadores de calor compactos ambos flujos se mueven de manera perpendicular, lo cual, dicha configuración de flujo es denominado *flujo cruzado*. Los intercambiadores de flujo cruzado se catalogan en dos tipos: los de flujo *no mezclado* y los de flujo *mezclado*. Los intercambiadores de calor de flujo cruzado no mezclado, como se muestra en la imagen izquierda de la **Figura 7**, se caracteriza por tener placas o aletas que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

limitan el esparcimiento del fluido en dirección paralela a la tubería; mientras que los intercambiadores de calor de flujo cruzado mezclado no tienen la limitante anteriormente mencionada, por lo que el fluido tiene más libertad de movimiento tanto transversal como perpendicular a la tubería, como se observa en la imagen derecha de la **Figura 7**.

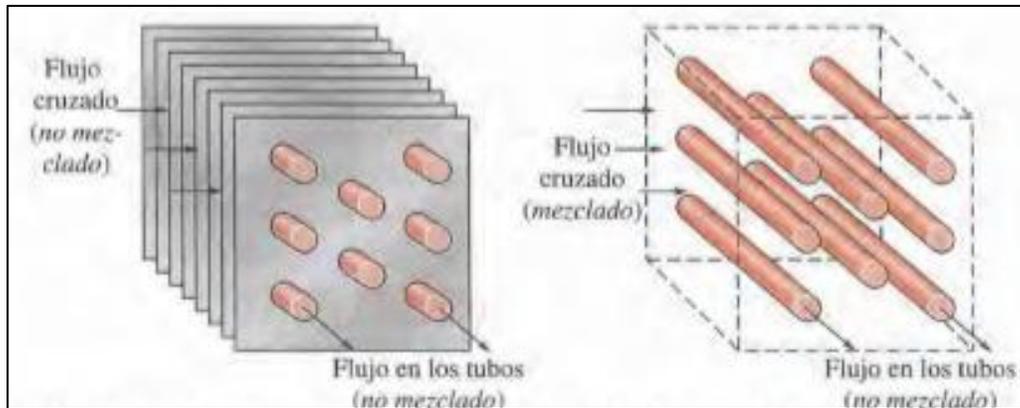


Figura 7. Intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado (izquierda) y flujo cruzado mezclado (derecha). Fuente: (Yunus & Afshin, 2011)

2.6.3 Intercambiador de calor de coraza y tubos

Los intercambiadores de calor más utilizados en la industria son los de coraza y tubos, los cuales tienen una similitud a los intercambiadores de calor de doble tubo; estos intercambiadores constan de un tubo grande, el cual es denominado *coraza*, por el cual en su interior se colocan en forma paralela muchos tubos pequeños. En los tubos pequeños se mueve uno de los fluidos, mientras que otro fluido se transporta en el interior de la coraza haciendo contacto con la parte externa de los tubos.

Como se observa en la **Figura 8**, dentro de la coraza hay unas paredes llamadas *desviadores* o *baffles*, los cuales se usan para direccionar el fluido que va por la coraza para que el fluido se mueva de forma transversal a los tubos y así mejorar la eficiencia en la transferencia de calor; aun así, también existe las configuraciones de flujo en paralelo y contraflujo, según donde estén ubicados la entradas y salidas de ambos fluidos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

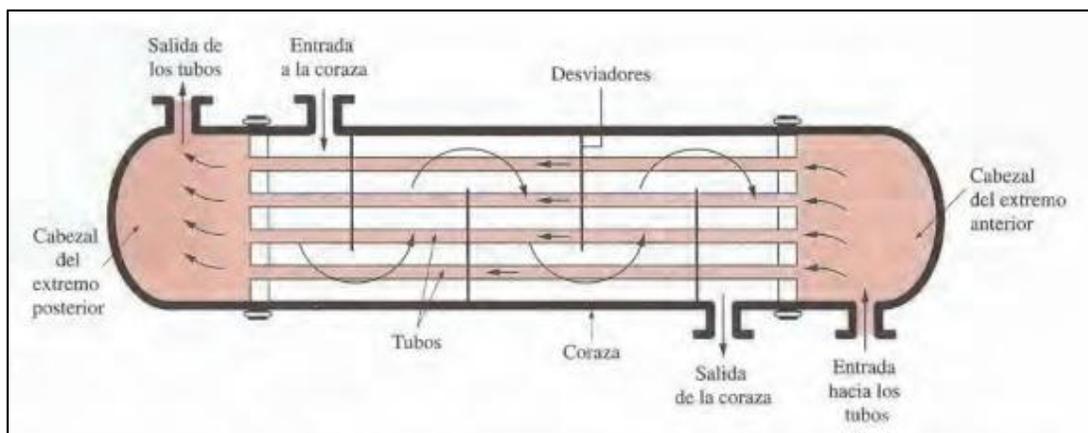


Figura 8. Intercambiador de calor de coraza y tubos. Fuente: (Yunus & Afshin, 2011)

2.7 Cálculos de una bomba de calor

2.7.1 Cálculos en sistema de compresión de vapor

En los procesos termodinámicos, cuando el fluido de trabajo es un refrigerante, por lo general, se trabaja como una *sustancia pura*²; de modo que, para trabajar con las propiedades de una sustancia pura, se debe conocer al menos 2 propiedades intensivas³ independientes de cada uno de los estados (Yunus & Michael, 2009).

Considerando el ciclo termodinámico descrito en el numeral 2.3.1, tenemos que el ciclo consta de 4 procesos, como se muestra en la **Figura 9**:

Proceso 1-2: Proceso de compresión del compresor.

Proceso 2-3: Proceso de rechazo de calor del condensador.

Proceso 3-4: Proceso de expansión con la válvula de expansión.

Proceso 4-1: Proceso de adición de calor en el evaporador.

² Una sustancia pura es aquella cuya composición química no cambia independientemente del estado en el cual se encuentre (Yunus & Michael, 2009).

³ Una propiedad intensiva es una propiedad que no depende de la masa de un sistema.

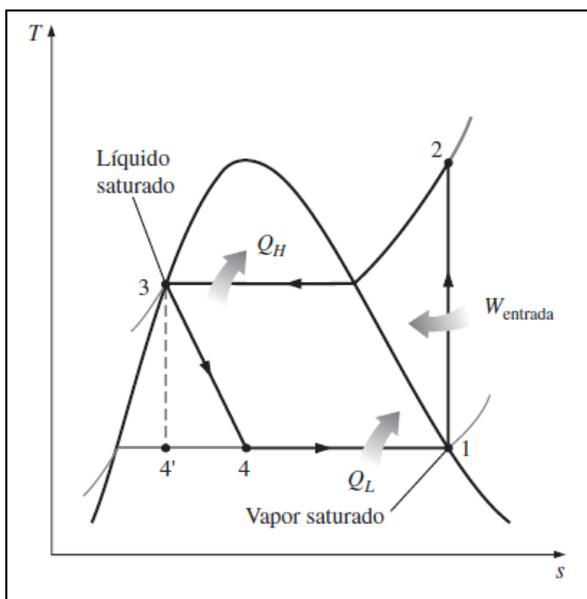


Figura 9. Diagrama T vs s de un ciclo de refrigeración o bomba de calor. Fuente: (Yunus & Michael, 2009)

Al aplicar la primera ley de la termodinámica, considerando que cada proceso es un sistema abierto y no tienen cambios en la energía cinética ni en la energía potencial, tenemos los siguientes cálculos:

2.7.1.1 Proceso del compresor

Lo primero que hay que considerar en este proceso, es que el compresor es tratado idealmente como un dispositivo isentrópico (o sea, que no hay variación en la entropía), por lo cual, no hay ni ganancia ni pérdida de calor. También, se tiene que el punto de entrada del compresor tiene la característica de que trabaja en la zona de baja presión y está en la zona de vapor saturado, lo cual indica que la calidad⁴ es de 1 (o, en otras palabras, la masa del fluido es totalmente gaseoso); mientras que el estado 2 está en la zona de alta presión. Por lo tanto, la ecuación que caracteriza el proceso del estado 1 al 2, es la siguiente:

⁴ La calidad (x) es una propiedad intensiva que se usa dentro de la zona de saturación, y se define como la relación entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla (Yunus & Michael, 2009).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (23)$$

Donde:

\dot{W} : trabajo realizado por el compresor

\dot{m} : flujo másico de refrigerante

h_1 : entalpia específica del estado 1 o la entrada del compresor

h_2 : entalpia específica del estado 2 o la salida del compresor

Este es el único proceso del ciclo termodinámico que requiere de un trabajo externo para llevar la sustancia de baja hacia alta presión.

2.7.1.2 Proceso del condensador

El condensador es un intercambiador de calor, el cual es usado para condensar el refrigerante por medio del rechazo de calor. Este proceso considerado idealmente es isobárico e isotérmico, que en este caso es la presión de alta. En el caso ideal, el estado 3, el cual equivale a la salida del condensador, el refrigerante debe salir en el estado de líquido saturado (o sea, que la calidad del refrigerante es 0).

Entonces, la ecuación que caracteriza el proceso del estado 2 al 3, es el siguiente:

$$-\dot{Q}_H = \dot{m} (h_3 - h_2) \quad (24)$$

Donde:

\dot{Q}_H : calor removido por el condensador

\dot{m} : flujo másico de refrigerante

h_2 : entalpia específica del estado a la entrada del condensador

h_3 : entalpia específica del estado a la salida del condensador

En la ecuación (24), \dot{Q}_H tiene un signo negativo debido a que el calor está siendo removido del sistema.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.7.1.3 Proceso del dispositivo de expansión

El proceso de expansión es el único proceso en el que idealmente no hay transferencias de calor ni trabajos externos. El objetivo de este proceso es el de realizar una caída de presión, pasando de la presión de alta a la presión de baja. Así, la ecuación de este proceso es la siguiente:

$$\dot{m} (h_4 - h_3) = 0 \quad (25)$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico de refrigerante

h_3 : entalpía específica del estado a la entrada de la válvula de expansión

h_4 : entalpía específica del estado a la salida de la válvula de expansión

En la ecuación (25), se tiene que el valor de la entalpía en el estado 4 es la misma que en el estado 3, como se muestra en la ecuación 26.

$$h_4 = h_3 \quad (26)$$

2.7.1.4 Proceso del evaporador

Al igual que el condensador, el evaporador es un intercambiador de calor cuyo objetivo es el de evaporar el refrigerante en su totalidad. Este proceso va del estado 4 al estado 1, y para lograr la evaporación, debe recibir calor de una fuente. Así, la ecuación característica de este proceso, es la siguiente:

$$\dot{Q}_L = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (27)$$

Donde:

\dot{Q}_L : calor recibido en el evaporador

\dot{m} : flujo másico de refrigerante

h_1 : entalpía específica del estado a la salida del evaporador

h_4 : entalpía específica del estado a la entrada del evaporador

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A diferencia del proceso del condensador, el valor de \dot{Q}_L va con signo positivo, debido a que es una adición de calor al sistema.

2.7.2 Cálculos de un intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo que se usa para transferir el calor de un fluido caliente a otro frío.

Cuando se realiza el análisis termodinámico en un intercambiador de calor, se debe considerar que son al menos dos fluidos los que interactúan en el sistema, además de que para realizar la transferencia de calor no se requiere de un trabajo externo, y no hay cambios significativos en la energía cinética y potencial (Yunus & Michael, 2009).

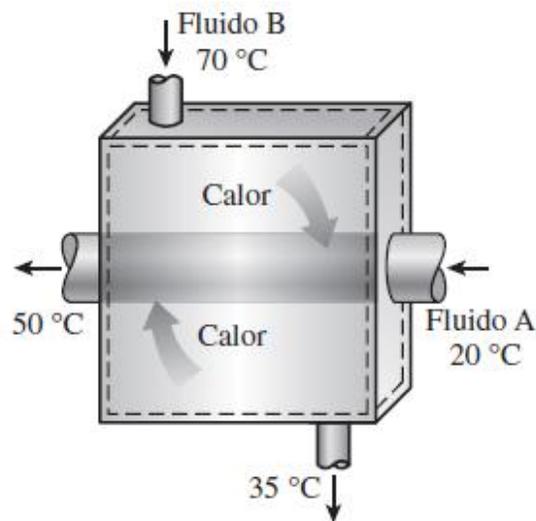


Figura 10. Ejemplo de un intercambiador de calor. Fuente: (Yunus & Michael, 2009)

Al realizar el balance de energía de un intercambiador de calor como el de la **Figura 10**, tenemos que las energías que entran en el dispositivo deben ser iguales a las energías que salen del mismo, como se puede observar en la ecuación 28.

$$\dot{m}_{A,in} h_{A,in} + \dot{m}_{B,in} h_{B,in} = \dot{m}_{A,out} h_{A,out} + \dot{m}_{B,out} h_{B,out} \quad (28)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde:

$\dot{m}_{A,in}$:	flujo másico entrante del fluido frio
$\dot{m}_{A,out}$:	flujo másico saliente del fluido frio
$h_{A,in}$:	entalpia entrante del fluido frio
$h_{A,out}$:	entalpia saliente de fluido frio
$\dot{m}_{B,in}$:	flujo másico entrante del fluido caliente
$\dot{m}_{B,out}$:	flujo másico saliente del fluido caliente
$h_{B,in}$:	entalpia entrante del fluido caliente
$h_{B,out}$:	entalpia saliente de fluido caliente

Si se hace un despeje de los flujos másicos de ambos fluidos, la ecuación 28 se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_B (h_{B,in} - h_{B,out}) = \dot{m}_A (h_{A,out} - h_{A,in}) \quad (29)$$

La ecuación 29 es válida siempre y cuando para ambos fluidos, la tasa másica que entra sea igual a la tasa másica de salida.

2.7.3 Cálculos de energía requerida

Cuando se usa una bomba de calor para calentar cierto volumen de fluido, es necesario determinar la cantidad de energía requerida para realizar el calentamiento, y según la cantidad de energía, se hace la selección de la bomba de calor adecuada para el trabajo.

Para calcular la energía necesaria, es necesaria la siguiente ecuación:

$$Q = m c \Delta T \quad (30)$$

Donde:

Q :	energía requerida para realizar el cambio de temperatura
m :	masa del fluido

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

c : calor específico del fluido

ΔT : cambio de temperatura

No obstante, en contenedores de fluido, como tanques o piscinas, es más factible trabajar con el volumen que con la masa. Por lo que se usa más fácil la ecuación (31):

$$Q = Cc V \Delta T \quad (31)$$

Donde:

Q : energía requerida para realizar el cambio de temperatura

Cc : capacidad calorífica volumétrica del fluido

V : volumen del fluido

ΔT : cambio de temperatura

La capacidad calorífica volumétrica se define como la capacidad de un volumen para almacenar calor para realizar un cambio de temperatura, y es equivalente al producto entre el calor específico y la densidad, tal como se muestra en la ecuación (32):

$$Cc = c * \rho \quad (32)$$

Para el caso del agua, su capacidad calorífica volumétrica es de $1000 \frac{kcal}{m^3 \cdot ^\circ C}$.

Sin embargo, para definir la potencia que se requiere para realizar dicho calentamiento, es necesario definir un tiempo de calentamiento, el cual puede ser ilustrado en la ecuación (33).

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (33)$$

En la ecuación (33), se deduce que la potencia es inversamente proporcional al tiempo, o sea que, entre menor tiempo, mayor potencia es necesaria, y viceversa.

Así, se puede concluir que la ecuación (34) permite calcular cual es la potencia ideal para calentar un depósito de fluido (Conoce_tu_piscina, 2016):

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q} = \frac{C_c V \Delta T}{t} \quad (34)$$

Pero hay que tener en cuenta las posibles pérdidas que se presentan durante el proceso, por lo cual, para seleccionar la bomba de calor adecuada, hay que realizar una corrección en el cálculo para compensar las pérdidas del sistema.

2.7.4 Cálculos de una resistencia eléctrica

Para realizar un cálculo de potencia eléctrica, hay que considerar el uso de las leyes de Ohm y Watt.

La ley de Ohm indica que la corriente que circula por un circuito eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial (o voltaje), y es inversamente proporcional a la resistencia del circuito” (Pardell, 2017).

Matemáticamente se expresa en la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\mathcal{U}}{R} \quad (35)$$

Donde:

\mathcal{U} : voltaje

I : corriente o flujo eléctrico

R : resistencia eléctrica

Mientras que la ley de Watt dice que el valor de la potencia eléctrica es igual al producto entre el voltaje y la corriente, y se expresa en la ecuación (36):

$$\dot{W}_{elec} = \mathcal{U} * I \quad (36)$$

Para facilidades de cálculos, se pueden realizar combinaciones entre la ley de Ohm y la ley de Watt como se muestra en la **Figura 11**.

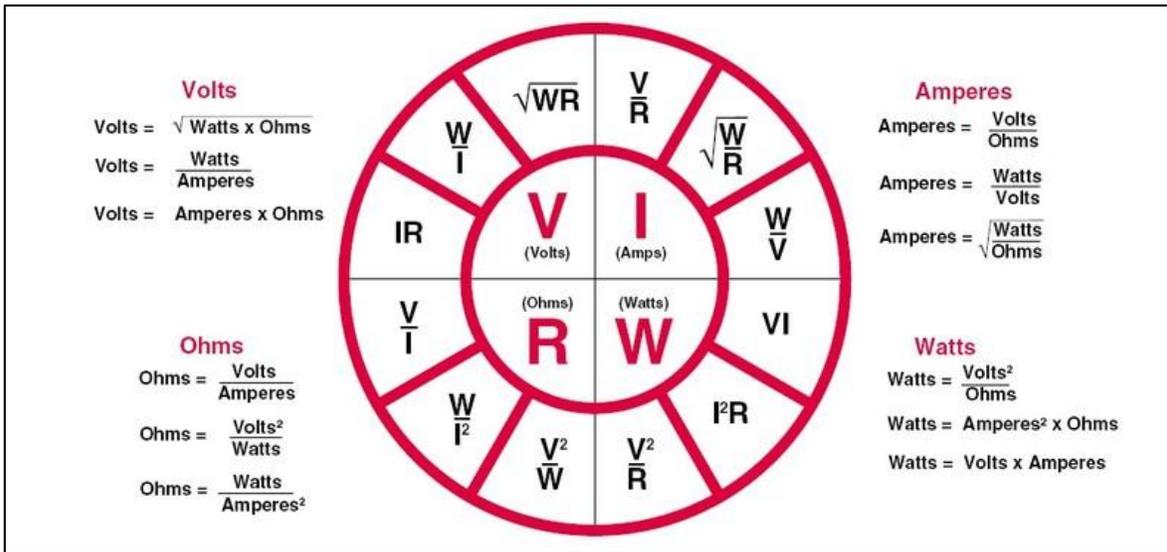


Figura 11. Circulo de relación entre la ley de Ohm y la ley de Watt. Fuente: (Pardell, 2017)

2.8 Mecánica de fluidos

2.8.1 Ecuación general de la energía

La ecuación de la energía es una extensión de la ecuación de Bernoulli, la cual es un balance de energías entre dos puntos de un trayecto por el que fluye un fluido. La ecuación de Bernoulli usa la energía cinética, potencial y de flujo de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (37)$$

Donde:

- P : presión del fluido en un punto específico
- v : velocidad del fluido en un punto específico
- z : altura del fluido con respecto a una referencia
- γ : peso específico del fluido
- g : aceleración gravitacional

La ecuación general de la energía añade tres variables más:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- h_L : pérdidas de energía que ocurren en el trayecto, ya sea por fricción, o por accesorios.
- h_A : energía que se adiciona al fluido por un dispositivo mecánico como una bomba.
- h_R : energía que se pierde del fluido debido a un dispositivo mecánico como una turbina.

Así, añadiendo las tres variables anteriormente mencionadas a la ecuación (37), se forma la ecuación general de la energía, la cual se muestra en la ecuación (38) (Mott, 2006):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (38)$$

2.8.2 Pérdidas de energía

2.8.2.1 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un valor adimensional que se usa para clasificar un fluido si es de tipo laminar, en transición o turbulento. El flujo laminar es cuando el fluido es transportado de una manera ordenada, y es como si se moviera en capas o láminas; mientras que el flujo turbulento es cuando el fluido se transporta sin orden alguno.

Para el agua, el flujo se considera laminar si el número de Reynolds tiene un valor inferior a 2000, y es de tipo turbulento si el valor da un valor mayor a 4000, por ende, si el número de Reynolds está en un valor entre 2000 y 4000, el fluido está en la fase de transición (Mott, 2006).

Para ductos de transporte de fluido donde su sección transversal es de tipo circular, el número de Reynolds se calcula con las ecuaciones (39) y (40), extraídas de Mott, (2006):

$$N_R = \frac{v D \rho}{\mu} \quad (39)$$

$$N_R = \frac{v D}{\nu} \quad (40)$$

Donde:

- v : velocidad promedio del fluido
- D : diámetro del ducto

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- ρ : densidad del fluido
 μ : viscosidad dinámica del fluido
 ν : viscosidad cinemática del fluido

2.8.2.2 Pérdidas de energía por fricción

La forma más utilizada para calcular las pérdidas de energía por fricción es la ecuación de Darcy, la cual se usa en tramos rectilíneos y largos de ductos circulares (Mott, 2006). La ecuación de Darcy se muestra a continuación:

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (41)$$

Donde:

- f : factor de fricción
 L : longitud del ducto
 D : diámetro del tubo
 v : velocidad del fluido
 g : aceleración gravitacional

El factor de fricción depende del número de Reynolds y su forma de calcular depende del flujo sea laminar o turbulento.

Si el flujo es de tipo laminar, el factor de fricción se calcula con la ecuación (42) como lo establece Mott, (2006):

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (42)$$

Si el flujo es turbulento, se usa la ecuación (43), según Mott, (2006):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (43)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde:

D : diámetro del ducto

ϵ : rugosidad del ducto

N_R : número de Reynolds

Para el flujo turbulento, Se tiene en cuenta la variable de rugosidad (ϵ), la cual depende del material del ducto; se pueden ver unos ejemplos de rugosidad de algunos materiales en la

Tabla 4.

Tabla 4. Valores de rugosidad en distintos materiales. Fuente: (Mott, 2006).

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (pie)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	$3,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$
Tubo extruido; cobre, latón y acero	$1,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado	$4,6 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Hierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil, recubierto	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil, no recubierto	$2,4 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$
Concreto, bien fabricado	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1,8 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-3}$

No obstante, hay otra forma de definir un factor de fricción, y es con un diagrama de Moody, el cual se puede apreciar en el Apéndice C.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.8.2.3 Pérdidas menores

Las pérdidas mayores son las pérdidas de energía ocasionadas por la fricción entre el fluido y el ducto, sin embargo, pérdidas menores son las pérdidas de energía que realizan los accesorios que haya durante el trayecto; entre los accesorios más comunes se encuentran los codos, las derivaciones, las reducciones, las válvulas entre otros.

La ecuación que se usa para calcular las pérdidas causadas por un accesorio se muestra en la ecuación (44), como lo establece Mott, (2006):

$$h_L = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (44)$$

La variable k se denomina como el coeficiente de resistencia, y se halla según el caso, ya sea en un cambio brusco de sección o en un accesorio.

Si se trata de hallar las pérdidas de energía por un cambio brusco de sección, como la conexión entre un ducto y un tanque; según la forma en la que se conecta el ducto con el tanque hay distintos tipos de k , como se muestra en la **Figura 12**.

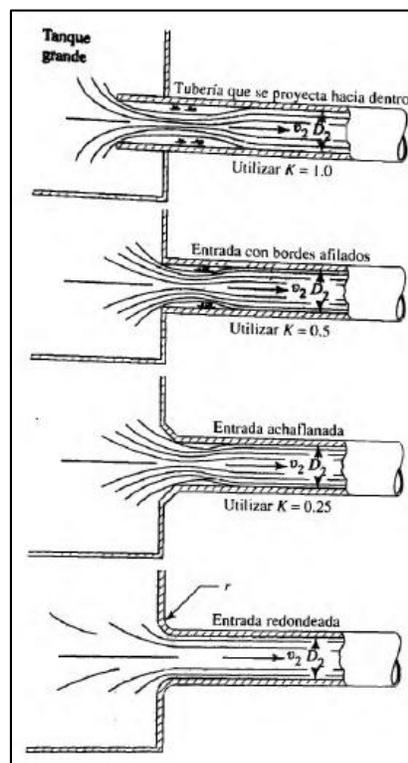


Figura 12. Coeficientes de resistencia para distintos tipos de entradas. Fuente: (Mott, 2006).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La cuarta imagen (inferior) de **Figura 12**, también tiene una tabla en la que el coeficiente depende de una relación entre el radio de redondeo y el diámetro del ducto, dicha tabla se observa en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Valores de k para distintas relaciones r/D . Fuente: (Mott, 2006).

r/D_2	K
0	0,5
0,02	0,28
0,04	0,24
0,06	0,15
0,1	0,09
>0,15	0,04

Pero, si el coeficiente de resistencia es por un accesorio, cada uno tiene un valor de k distinto. Para realizar el cálculo, se usa la ecuación (45), tomada del libro de Mott, (2006):

$$k = \frac{L_e}{D} \cdot f_T \quad (45)$$

Donde:

L_e : longitud equivalente del accesorio

D : diámetro del accesorio

f_T : factor de fricción

En la **Tabla 6**, se muestra una tabla donde hay varios valores de relación $\frac{L_e}{D}$ para algunos de los accesorios más comunes que se usan en la instalación de una tubería.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 6. Valores de relación L_e/D para distintos accesorios. Fuente: (Mott, 2006).

Tipo		Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo	- abierta por completo	340
Válvula de ángulo	- abierta por completo	150
Válvula de compuerta	- abierta por completo	8
	- 3/4 abierta	35
	- 1/2 abierta	160
	- 1/4 abierta	900
Válvula de verificación	- tipo giratorio	100
Válvula de verificación	- tipo bola	150
Válvula de mariposa	- abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
	- 10 a 14 pulg	35
	- 16 a 24 pulg	25
Válvula de pie	- tipo disco de vástago	420
Válvula de pie	- tipo disco de bisagra	75
Codo estandar a 90°		30
Codo a 90° de radio largo		20
Codo roscado a 90°		50
Codo estandar a 45°		16
Codo roscado a 45°		26
Vuelta cerrada en retorno		50
Te estándar	- con flujo directo	20
	- con flujo en el ramal	60

El valor de h_L total en una instalación es la sumatoria de todas las pérdidas calculadas, tanto por fricción como por cada uno de los accesorios que compone el trayecto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3 METODOLOGÍA

En primera instancia se realizó un diagnóstico de los componentes de la bomba de calor situada en el laboratorio de fluidos del ITM para evidenciar el estado y funcionamiento en el que se encuentra actualmente la bomba de calor, después se procedió a realizar las respectivas correcciones y reemplazos en caso de ser necesario, también se realizó una evaluación de la tubería de conexión existente en la bomba de calor y se evaluaron los posibles puntos de conexión para una nueva instalación en la tubería y los posibles inconvenientes que se puedan presentar al inicio y durante el proceso del proyecto.

Considerando las características de la bomba de calor obtenidas del análisis realizado, se procedió a la realización de los cálculos pertinentes para determinar las condiciones más aptas para el funcionamiento en circunstancias normales. Los cálculos realizados definen factores de trabajo del sistema para realizar una transferencia de calor que sea notable en la práctica. Los cálculos a trabajar son de tipo termodinámico, hidráulico y eléctrico. Entre los cálculos está el flujo de agua que debe pasar por la bomba de calor, la transferencia de calor del aire cuando está en contacto con el evaporador, las condiciones más aptas de la bomba de calor según los datos del compresor, entre otros.

Como se ha enfatizado con anterioridad, se pretende implementar en la bomba de calor de 20 gal existente en el laboratorio de fluidos del ITM INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA, un sistema de instrumentación que permita medir variables como presión, temperatura y control de flujo con el cual se pretende variar el desempeño de la bomba de calor que se conoce como COP (Coeficiente de desempeño u operación). Para ello, se realizan varios planos y esquemas que permitan definir la instalación eléctrica, electrónica, mecánica e hidráulica del sistema; para realizar tanto la instrumentación y control, como los elementos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

actuadores del sistema en general (esto incluye la bomba de calor y la bomba impulsora de agua).

Para implementar la bomba de calor, se realizaron los montajes pertinentes para su funcionamiento, entre ellos está el montaje de la tubería por la cual se transporta el agua del tanque a la bomba impulsora, y después a la bomba de calor; también, está el montaje eléctrico y electrónico de la bomba de calor, por el cual se incluyen las instalaciones de los sensores de temperatura y flujo en la tubería y en la bomba de calor; igualmente, se incluyen los montajes eléctricos de la bomba de calor y la bomba impulsora, con sus respectivos controles de operación. En el último montaje, el cual es el de los instrumentos de presión en la bomba de calor, se debe realizar con la ayuda de un experto, ya que se deben manipular sustancias refrigerantes y para este proceso se debe contar con equipos y procedimientos especializados para evitar posibles accidentes y/o contaminación en el ambiente.

Al utilizar el aire como fuente de calor se pretende elevar la temperatura del fluido (agua) con tendencia a la de la fuente de calor (temperatura ambiente) donde se podrá medir y controlar los cambios generados en determinado tiempo en el fluido. No obstante, para tener variación en la práctica, se pretende adecuar una resistencia eléctrica que caliente el aire que esté en contacto con el evaporador de la bomba de calor, para así no depender del calor de la temperatura ambiente, sino que se puede controlar la generación de calor y poder observar el comportamiento del calentamiento del agua a distintos valores de suministro de calor.

Con la bomba de calor en operación se debe comprobar su funcionamiento, de modo que, las variables que van a ser medidas e identificadas por la comunidad académica a la cual va dirigido el proyecto, puedan ser más comprensibles para demostrar el funcionamiento y las bondades que ofrece una bomba de calor respecto a la eficiencia traducida en COP, y de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

esta manera, asociar y comprender las múltiples aplicaciones que la bomba de calor puede presentar en el ámbito industrial y residencial.

Lo anterior se soportará con la elaboración de una guía de laboratorio como estrategia didáctica, de modo que, la comunidad académica pueda realizar prácticas experimentales de manera sencilla y clara con la bomba de calor; entendiendo su funcionalidad a partir de los datos obtenidos y comparando los resultados prácticos con los valores teóricos; además, se familiaricen con el manejo de instrumentos y aparatos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de la bomba de calor

4.1.1 Estado físico

La bomba de calor ubicada en el laboratorio de fluidos del ITM sede Robledo, fue diseñada para el calentamiento de 20 galones de agua en estado estático. La bomba de calor que se observa en la **Figura 13** consta de dos partes, la primera es un cilindro con un diámetro de 430 mm y una altura de 1250 mm, el cual internamente tiene un tanque donde se almacena el agua, y dentro del tanque se ubica el condensador, formando un intercambiador de calor entre el agua y el refrigerante; adicional a esto, entre el tanque y la superficie metálica hay un recubrimiento de espuma aislante para evitar pérdidas de calor con el ambiente. La segunda parte está conformada por el compresor, el evaporador y el dispositivo de expansión, que en este caso es un tubo capilar, y dichos dispositivos están ubicados sobre el cilindro.



Figura 13. Bomba de calor del laboratorio de fluidos del ITM. Fuente: Autor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

No es posible identificar la forma del condensador, ya que como se mencionó anteriormente, éste se encuentra dentro del tanque. Por el contrario, el evaporador está a la vista de las personas, y se puede observar que está compuesto por un serpentín doble con unas aletas que facilitan el intercambio de calor entre el evaporador y el medio; además, como se ve en la **Figura 14**, para facilitar la transferencia de calor, hay instalado un ventilador posicionado en el centro del evaporador.



Figura 14. Evaporador de la bomba de calor. Fuente: Autor.

4.1.2 Características de la bomba de calor

El compresor que tiene la bomba de calor es de la referencia QA075CDA como se muestra en la placa que se ve en la **Figura 15**. En el Apéndice A se muestran los datos técnicos de los compresores de la serie QA, los cuales son usados para compresores que trabajan con el refrigerante 22. Si se observan los datos del modelo QA075C, mostrados a continuación en la **Tabla 7**, se tienen las características con las cuales se realizarán los cálculos pertinentes a la bomba de calor.

Tabla 7. Datos técnicos del compresor usado en la bomba de calor. Fuente: Apéndice A.

Model	Cooling capacity		Input	EER	COP	Test
	Btu/hr	W	W	W/W	W/W	Condition
QA075C	5250	1538	477	11.01	3.23	ASHRAE

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 15. Placa del compresor de la bomba de calor. Fuente: Autor.

Los datos más relevantes son:

La capacidad de enfriamiento (o *cooling capacity*) es la cantidad de calor máxima que puede absorber el evaporador. En la tabla, este dato se encuentra en dos unidades, la primera unidad es Btu/h y la otra es en W; de modo que, para finalidad de cálculos, en el trabajo se usará las unidades de W para la potencia y el flujo de calor.

La entrada (o input) es el trabajo que realiza el compresor en el ciclo termodinámico. en los datos técnicos, el trabajo de entrada se encuentra en W. El COP o coeficiente de rendimiento que registra el equipo equivale al COP de refrigeración, no obstante, con los datos mencionados se puede calcular el COP para bomba de calor.

Cabe aclarar que el uso y diseño original de este compresor fue para sistemas de aire acondicionado (enfriamiento); pero como el uso que se le dio al compresor en este dispositivo fue como bomba de calor (calentamiento), se deben usar otros datos adicionales, los cuales se definirán en los cálculos que se verán más adelante.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2 Cálculos y diseño del sistema

4.2.1 Cálculos

4.2.1.1 Cálculos termodinámicos

Conociendo los datos que entrega el compresor, se tienen los siguientes datos:

$$\dot{Q}_L = 1538 \text{ W}$$

$$\dot{W}_{cycle} = 477 \text{ W}$$

$$COP_R = 3.23 \frac{\text{W}}{\text{W}}$$

No obstante, para calcular en una bomba de calor, se debe conocer el \dot{Q}_H es el calor que rechaza el condensador. Para ello, se usa la ecuación (18), dando el siguiente resultado:

$$\dot{Q}_H = 1538 \text{ W} + 477 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_H = 2015 \text{ W}$$

Y con el dato del calor rechazado por el condensador y el trabajo realizado por el compresor, se usa la ecuación (20) para definir el COP del sistema como bomba de calor:

$$COP_{HP} = \frac{2015 \text{ W}}{477 \text{ W}}$$

$$COP_{HP} = 4.23 \frac{\text{W}}{\text{W}}$$

Como el calor entregado por evaporador se lo cede al agua, se procede a realizar los cálculos de transferencia de calor al agua, tanto en estado estático como en estado dinámico.

Para el estado estático, se conoce que el tanque de almacenamiento de agua es de 20 gal, o haciendo la conversión:

$$V = 20 \text{ gal} * \frac{1 \text{ m}^3}{264.172 \text{ gal}}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$V = 0.07571 \text{ m}^3$$

Para usar la ecuación (34), se tiene:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_H = 2015 \text{ W}$$

$$C_c = 1000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} = 4.184 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Si se toma el tiempo en función del cambio de temperatura, al despejar la variable tiempo de la ecuación (34), se tiene:

$$t = \frac{C_c V \Delta T}{\dot{Q}} \quad (46)$$

En la **Tabla 8** se muestra los tiempos teóricos requeridos para realizar los respectivos cambios de temperatura, a un valor de suministro de calor constante.

Tabla 8. Datos del tiempo en función del cambio de temperatura. Fuente: Autor.

ΔT [°C]	t	
	[s]	[min]
0	0	0
1	157,206	2,620
2	314,413	5,240
3	471,619	7,860
4	628,825	10,480
5	786,031	13,101
6	943,238	15,721
7	1100,444	18,341
8	1257,650	20,961
9	1414,856	23,581
10	1572,063	26,201

Mientras que, para uso de la bomba de calor en estado dinámico, se pone a fluir el agua con una bomba. Para ello, se hace uso de la ecuación (30) usando los siguientes datos:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q} = \dot{Q}_H = 2015 \text{ W}$$

$$c = 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Se aplica la ecuación (30) para calcular el flujo másico en función del cambio de temperatura:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c \Delta T} \quad (47)$$

En la **Tabla 9** se muestra los flujos másicos teóricos requeridos para realizar los respectivos cambios de temperatura, a un valor de suministro de calor constante.

Tabla 9. Datos del flujo másico en función del cambio de temperatura. Fuente: Autor.

ΔT [°C]	\dot{m} [kg/s]
1	0,4821
2	0,2410
3	0,1607
4	0,1205
5	0,0964
6	0,0803
7	0,0689
8	0,0603
9	0,0536
10	0,0482

No obstante, no hay manera de comparar el flujo másico teóricamente con un método práctico que sea directo; para ello, se procede a calcular el flujo volumétrico o caudal a partir de la ecuación (48):

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (48)$$

Aplicando la ecuación (48) a los datos de flujo másico definidos en la Tabla 9, se obtiene los resultados que se muestran en la Tabla 10.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 10. Datos del flujo volumétrico obtenidos a partir del flujo másico. Fuente: Autor.

\dot{m} [kg/s]	\dot{V}	
	[m ³ /s]	[L/min]
0,4821	0,0004821	28,923
0,2410	0,0002410	14,462
0,1607	0,0001607	9,641
0,1205	0,0001205	7,231
0,0964	0,0000964	5,785
0,0803	0,0000803	4,821
0,0689	0,0000689	4,132
0,0603	0,0000603	3,615
0,0536	0,0000536	3,214
0,0482	0,0000482	2,892

De la Tabla 10 se concluye que, para tener un mayor cambio de temperatura, el caudal de agua que debe pasar por el intercambiador de calor entre el agua y el condensador de la bomba de calor debe ser menor.

A partir de los cambios de temperatura usados en los cálculos anteriores, se establece que el cambio de temperatura que va a realizar el agua estará entre los 25°C y los 35°C. Por ello, se calcula el promedio de temperatura entre la entrada y la salida del sistema, con el fin de definir la temperatura del refrigerante que deberá tener cuando pase por el condensador.

$$T_{prom} = \frac{25^{\circ}C + 35^{\circ}C}{2} = 30^{\circ}C$$

Para calentar el agua, el refrigerante debe tener más temperatura que el agua para que haya una transferencia de calor. Según la norma de la ASHRAE, la diferencia de temperaturas debe ser de 10 °C, por lo que, para este caso, la temperatura del refrigerante en el condensador debe ser de aproximadamente $T_{cond} = 40^{\circ}C$.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Según el Apéndice B cuyos datos fueron sacados de (ICER, n.d.), se tiene que en el refrigerante 22 en una temperatura de saturación de 40°C debe tener una presión de 1533.6 kPa, o haciendo la conversión a psia:

$$P_{sat@40^{\circ}C} = 1533.6 \text{ kPa} * \frac{1 \text{ psia}}{6.89476 \text{ kPa}}$$

$$P_{sat@40^{\circ}C} = 222.430 \text{ psia}$$

Los datos de presión que entregan las tablas son en valor absoluto, por lo que si se desea conocer el valor de la presión relativa (o manométrica), se usa la siguiente ecuación:

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm} \quad (49)$$

Donde:

- P_{abs} : Presión absoluta
 P_{rel} : Presión relativa o manométrica
 P_{atm} : Presión atmosférica

La presión atmosférica de Medellín tiene un valor aproximado de 640 mmHg (milímetros de mercurio) o haciendo la conversión a psi, se tiene que vale 12.376 psi (Puerto, n.d.). Así, el valor de la presión relativa máxima teórica que tiene en el refrigerante cuando pasa por el compresor es de:

$$P_{rel} = P_{abs} - P_{atm}$$

$$P_{rel_{cond}} = 222.430 \text{ psi} - 12.376 \text{ psi}$$

$$P_{rel_{cond}} = 210.054 \text{ psig}^5$$

4.2.1.2 Cálculos eléctricos

Para que el condensador de la bomba de calor pueda suministrar la cantidad de rechazo de calor (\dot{Q}_H) descrita en los cálculos anteriores, el evaporador debe recibir la cantidad de calor

⁵ [psig] equivale al valor de psi manométrico.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

que especifica la **Tabla 7**, el cual es $\dot{Q}_L = 1538 \text{ W}$, para ello, se pretende implementar una resistencia eléctrica que suministre el calor necesario al evaporador.

Cuando a la resistencia eléctrica se le suministra un voltaje, éste hace un trabajo eléctrico, y si se hace la consideración de que todo el trabajo eléctrico se transforma en calor, la potencia eléctrica que debe suministrar calor al evaporador debe ser:

$$\dot{W}_{elec} = \dot{Q}_L = 1538 \text{ W}$$

Si se hace uso de las fórmulas matemáticas mostradas en la **Figura 11**, se puede calcular el valor de la resistencia a utilizar y la corriente que pasaría por ella, usando los voltajes que son habituales en Colombia, los cuales son 110 v y 220 v.

Para calcular la resistencia y la corriente eléctrica, tanto a 110 v como en 220 v, se hace uso de las ecuaciones (50) y (51):

$$R = \frac{V^2}{\dot{W}_{elec}} \quad (50)$$

$$I = \frac{\dot{W}_{elec}}{V} \quad (51)$$

Así, los resultados de los datos eléctricos, tanto a 110 v como a 220 v se muestran en la **Tabla 11**:

Tabla 11. Cálculos de resistencia eléctrica a 110 v y a 220 v. Fuente: Autor.

Voltaje [v]	Potencia [W]	Resistencia [Ω]	Corriente [A]
110	1538	7.867	13.98
220	1538	31.469	6.99

Se debe tener en cuenta que para proteger el equipo en general, hay que utilizar una protección (o breaker) que soporte la corriente total del sistema. En los cálculos de la resistencia que funcionará como suministro externo de calor para el equipo, se establece que la corriente máxima de trabajo es de 13.98 A, sin embargo, hay que considerar también

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la corriente que consume la bomba de calor; como el dispositivo indica en placa que trabaja a 115 v, y tiene una potencia de 477 W mostrada en su ficha técnica, se deduce que el compresor trabaja a una corriente aproximada de 4.15 A, que sumados a la corriente de la resistencia, da un valor total de corriente de 18.13 A.

Comercialmente, la protección eléctrica más cercana al valor de corriente calculado es de 20 A, sin embargo, hay que considerar los otros componentes eléctricos de bajo consumo, que también suman al valor de corriente, por lo que, para mayor seguridad, se recomienda utilizar una protección comercial de 30 A.

4.2.2 Diseño

4.2.2.1 Diseño de instrumentación

Para realizar una adquisición de datos de las variables más importantes en la bomba de calor, se diseña la implementación de instrumentos de medición de las variables de temperatura, presión y flujo.

Para observar la ubicación de cada instrumento, se realiza un diagrama P&ID tanto en la bomba de calor como en el montaje de tubería de agua.

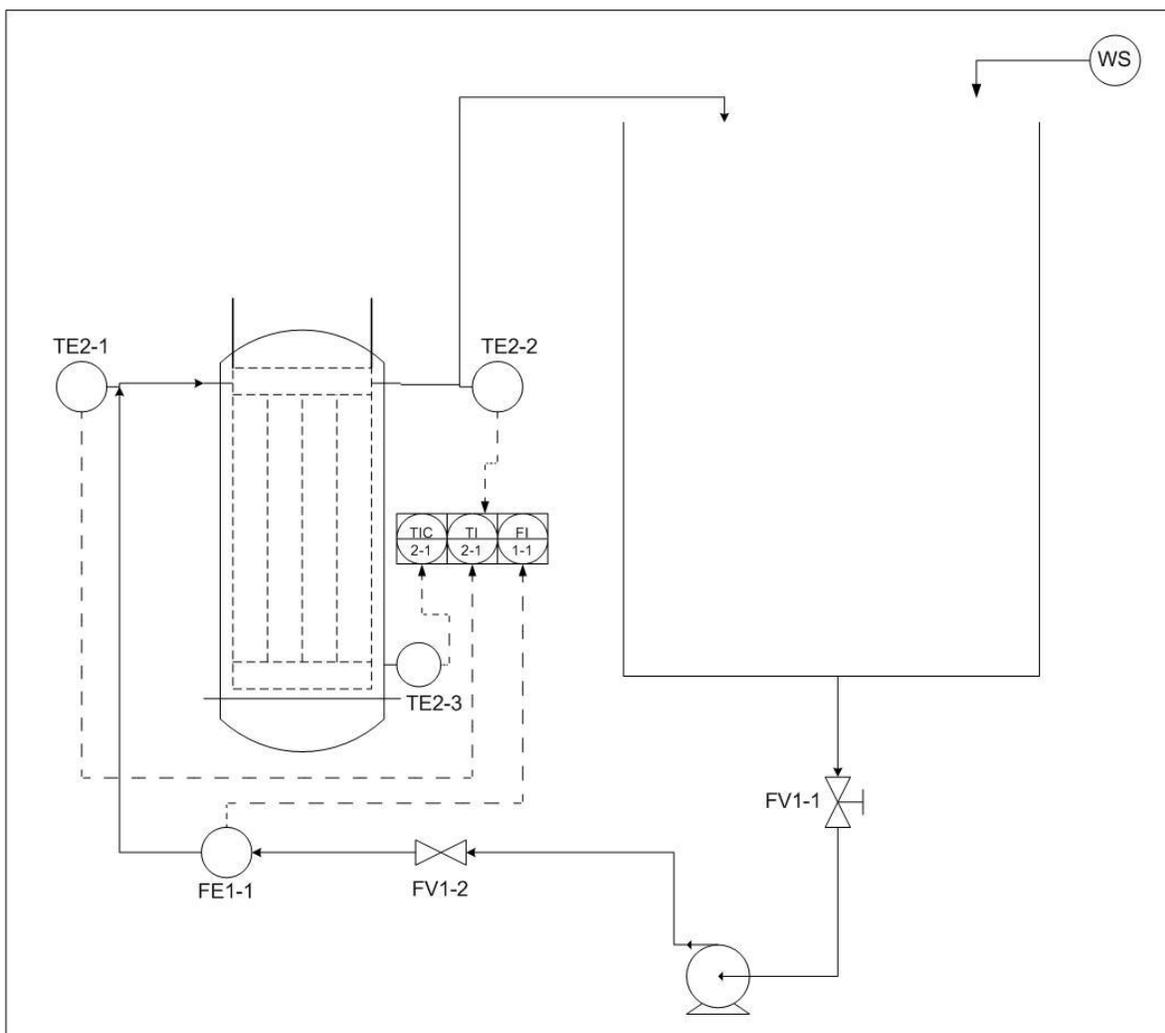


Figura 16. Diagrama P&ID del montaje de tubería de agua. Fuente: Autor.

En la **Figura 16**, se observa el P&ID que se realizará en la tubería por donde se conducirá el agua; en el cual se muestra la instrumentación de tres procesos: El primer proceso es la medición del flujo de agua, el segundo proceso es la medición de la temperatura del agua, tanto en la entrada como en la salida de tanque donde se realiza el calentamiento del agua, y el tercer proceso es la medición y control de la temperatura en el tanque de almacenamiento de agua.

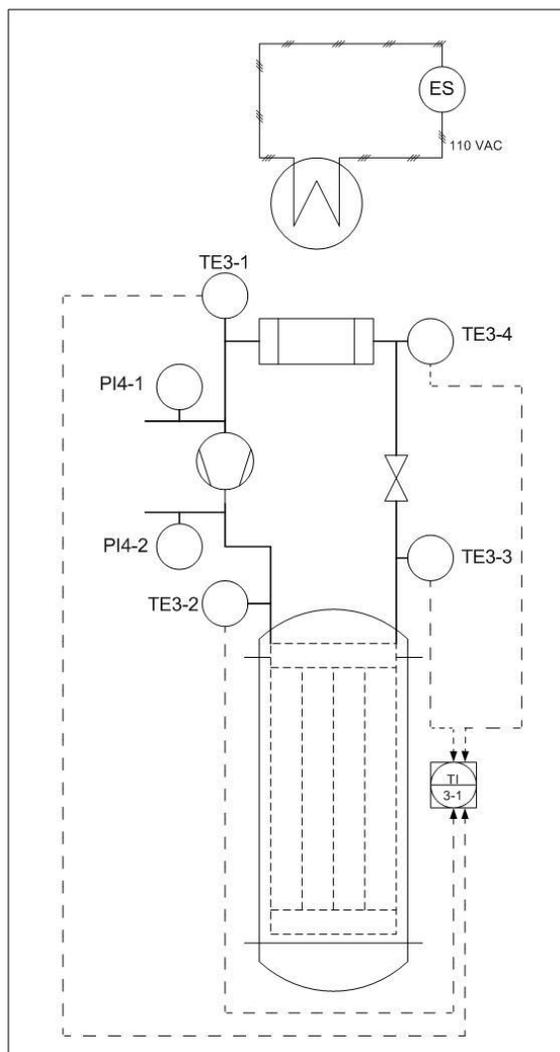


Figura 17. Diagrama P&ID de la bomba de calor. Fuente: Autor.

Y en la **Figura 17** se muestra el diagrama P&ID de la bomba de calor, en la cual se muestran dos procesos: uno es la medición de la temperatura en los 4 puntos que indican los estados del ciclo termodinámico que realiza la bomba de calor, y el segundo proceso es la medición de presión tanto en la entrada como en la salida del compresor.

4.2.2.1.1 Instrumentos de temperatura

Para la medición de temperatura, se usará unos sensores conocidos como termopares, los cuales constan de dos alambres de distintos materiales y están unidos en una punta. Según

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

los materiales utilizados en los alambres, se define el tipo de termopar a utilizar, que en este caso se usará el tipo k, el cual es el más común.

En la **Figura 18** se observa que estos termopares tienen una característica, la cual es el conector de color amarillo, para identificar de manera más sencilla el tipo de sensor que se está usando.



Figura 18. Termopar tipo k. Fuente: Autor.

La señal que transmite los termopares es un valor en milivoltios, y tienen la característica de que dichos sensores tienen polaridad, o sea, un conector es positivo y el otro es negativo, y dicha polaridad depende de los materiales utilizados. En el caso del termopar tipo k, para el conector positivo se usa como material el cromel (aleación compuesta principalmente de níquel y cromo), mientras que en el conector negativo se usa el alumel (aleación compuesta principalmente de níquel y aluminio); y este tipo de termopar tiene un rango de medición entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Omega, n.d.). Basados en los cálculos de temperatura realizados, la temperatura máxima que alcanzará el agua está en un valor de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, y el sistema de refrigeración tiene valores aproximados a los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el condensador, se concluye que los termopares tipo k cumplen con los requisitos de trabajo para medir la temperatura tanto en el agua como en los puntos importantes de la bomba de calor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Sin embargo, los termopares son solo sensores, por lo que se requiere de un dispositivo que reciban la señal y pueda indicar en forma numérica el valor de temperatura. Para facilidad del proyecto, se pretende usar indicadores de temperatura que sean de tipo digital para una mejor apreciación del valor de temperatura.

En la **Figura 19**, se puede observar un indicador de temperatura, el cual, al conectar el sensor, el dispositivo está configurado para acondicionar la señal y convertirla en el valor correspondiente de temperatura, y así, mostrar el valor en la pantalla, que está conformada por displays. Algunos dispositivos aceptan varios tipos de sensores de temperatura, y se permite configurar el sensor utilizado, mientras que otros, solo permite un solo tipo de sensor.



Figura 19. Indicador digital de temperatura. Fuente: (Sistemaseléctricos, n.d.)

Pero hay otros tipos de dispositivos que además de indicar el valor, tienen la opción de control, como el que se ve en la **Figura 20**. Estos equipos se pueden configurar para que, no solo muestre el valor de temperatura, sino que se puede establecer un set point (o punto de referencia), con el cual permite la activación de un relé interno que se usa para controlar el prendido o apagado de un equipo eléctrico. Este equipo puede ser usado para controlar el proceso 2 descrito en el diagrama P&ID mostrado en la **Figura 16**.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 20. Dispositivo indicador y controlador de temperatura. Fuente: (Sistemaseléctricos, n.d.)

Sin embargo, como se vio en los diagramas P&ID, hay un total de 7 sensores de temperatura y si cada uno de ellos requiere de un dispositivo indicador, se tendría un total de 7 indicadores de temperatura, lo cual sería un gasto excesivo de recursos y espacio para colocar todos los dispositivos; no obstante, hay un equipo indicador que se denomina multizona (o multicanal), así como el que se observa en la **Figura 21**; este aparato permite en un solo equipo la conexión de hasta 5 sensores de temperatura, y se puede ir intercalando el valor cambiando la zona, que se indica con unos led enumerados.

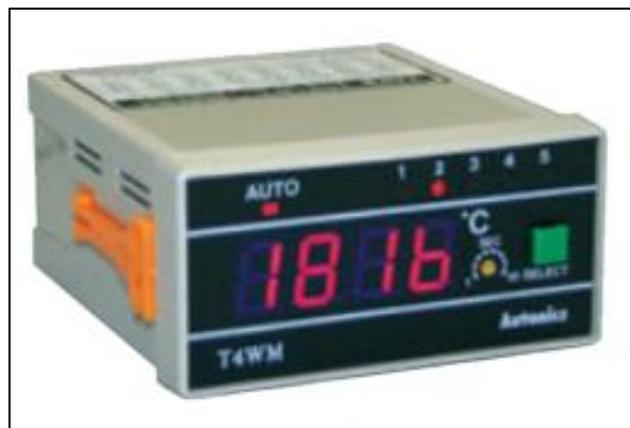


Figura 21. Dispositivo indicador de temperatura multizona. Fuente: (Sistemaseléctricos, n.d.)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.2.1.2 Instrumentos de presión

La medición de presión se realiza en la bomba de calor; en la entrada del compresor, el cual está a una baja presión y en la salida del mismo que está a una alta presión. Los instrumentos que se usarían para medir la presión son unos manómetros, que tienen una característica muy particular en la caratula, que como se ve en la **Figura 22**, aparte de indicar la presión, también tienen varias escalas en las que se pueden indicar la temperatura de saturación de varios refrigerantes.



Figura 22. Manómetros de alta y baja presión para refrigerantes. Fuente: (Aliexpress, 2015)

También, en la **Figura 22** se muestran dos manómetros, uno rojo que se usa para indicar la presión de alta y su rango de medición está entre los 0 y los 500 psi, mientras que el manómetro azul se usa en la presión de baja, ya que su rango de medición está entre los 0 y 120 psi (aunque también puede medir vacío hasta -76 cm Hg). En los cálculos de presión, se define que la presión manométrica a la que estará sometido el condensador tiene un valor de 210.054 psig, el cual es equivalente a la presión de alta; con lo que, se establece que el manómetro de alta presión (manómetro rojo) que mide hasta 500 psi, cumple con las condiciones para medir la presión a la que estará soportada el condensador de la bomba de calor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.2.1.3 Instrumento de flujo

Para realizar la medición de flujo, se usa un sensor de flujo de turbina, como el que se ve en la **Figura 23**. Al fluir el agua, éste mueve la turbina del sensor y va generando unos pulsos que son transmitidos a un microcontrolador que se encarga de recibir y acumular los pulsos para traducir esta información en el flujo que recorre el agua.



Figura 23. Sensor de flujo de turbina. Fuente: (Dualtronica, n.d.)

Para este caso, el microcontrolador utilizado es un Arduino Uno, y la indicación del flujo es vista en una pantalla LCD. En la **Figura 24** se observa el diseño de la conexión electrónica del sensor al Arduino, y del Arduino a la pantalla LCD, indicando cada uno de los pines de conexión exactos. Aparte, en el esquema también hay un potenciómetro que se conecta a la pantalla LCD y se usa para el control del contraste de la pantalla, además, hay un led que, aunque en el esquema está conectado de manera externa, físicamente el diodo LED está integrado en la pantalla.

En el Apéndice D se muestra la programación que se realizó en el microcontrolador para recibir y acumular los pulsos del sensor y realizar las operaciones necesarias para calcular el flujo y mostrarlo en la pantalla; los cálculos que se realizan son para definir el flujo en unidades de litros por minuto, y el intervalo de medición es cada segundo.

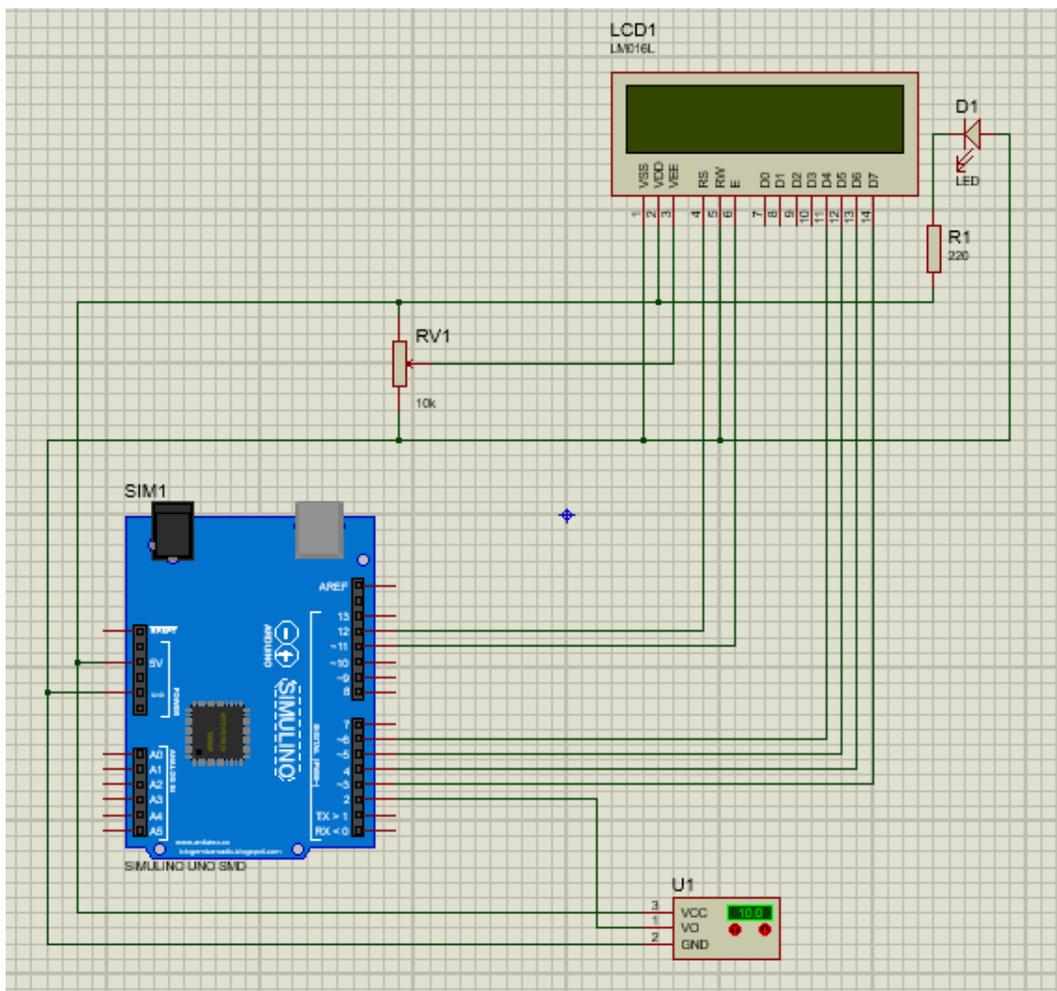


Figura 24. Esquema de conexión electrónica para el instrumento medidor de flujo. Fuente: Autor.

4.2.2.2 Diseño mecánico de tubería

El diseño de la tubería consta principalmente en realizar el trayecto de conducción del agua y la selección teórica de la bomba; para ello, se hacen los cálculos de pérdidas de energía que tiene el agua durante el trayecto, desde la base del tanque hasta el punto terminal de la tubería.

Al trabajar con bombas para la impulsión de agua, se habla de dos trayectos, el primero es la línea de succión, la cual es el tramo de tubería que suministra el agua a la bomba, y el segundo trayecto es la línea de descarga, que es el tramo conectado a la salida de la bomba;

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

por lo general, el diámetro de la tubería de la línea de succión es mayor al de la línea de descarga. Se hace la aclaración de que, al trabajar con caudales tan bajos, para la línea de descarga se usa la tubería comercial más pequeña, la cual es la tubería de 1/2" sch 40, y por costo, se usa como material PVC; y para la línea de succión se usa la tubería de diámetro mayor inmediato a la de la línea de descarga, la cual es la tubería de 3/4" sch 40 y el material también es PVC.

En el Apéndice E se muestra el esquema del montaje de tubería y los planos isométricos divididos en tres partes: El montaje de la línea de succión, el montaje de la línea de descarga hasta la entrada del intercambiador de calor y la salida de dicho intercambiador hasta la salida final del agua hacia el tanque. Aparte, hay un listado de insumos a utilizar en el montaje y en este mismo se incluyó los accesorios de acero galvanizado que ya tenía instalado la bomba de calor, estos accesorios se mencionan, ya que hay que tenerlos en cuenta para los cálculos de pérdidas de energía.

4.2.2.2.1 Cálculos de pérdidas en tubería

Se calculan las pérdidas en la tubería para determinar la carga mínima que debe llevar la bomba. Se usa la ecuación (38), que es la ecuación general de la energía, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

Como se observa en la **Figura 25**, los puntos a analizar son los marcados como puntos 1 y 2, los cuales ambos están expuestos a la presión atmosférica, indicando que en la ecuación **Figura 1** de la energía, se anulan las presiones; también, al no haber un dispositivo mecánico que realice pérdida de energía, se anula la variable h_R , y en el punto 1, se considera nula la variable de velocidad debido a que el cambio en la altura del agua es mínimo.

Así, la ecuación con la que se trabajará para definir el valor de la carga que debe llevar la bomba se expresará con la ecuación (52).

$$h_A = \frac{v_2^2}{2g} + h_L + (z_2 - z_1) \quad (52)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

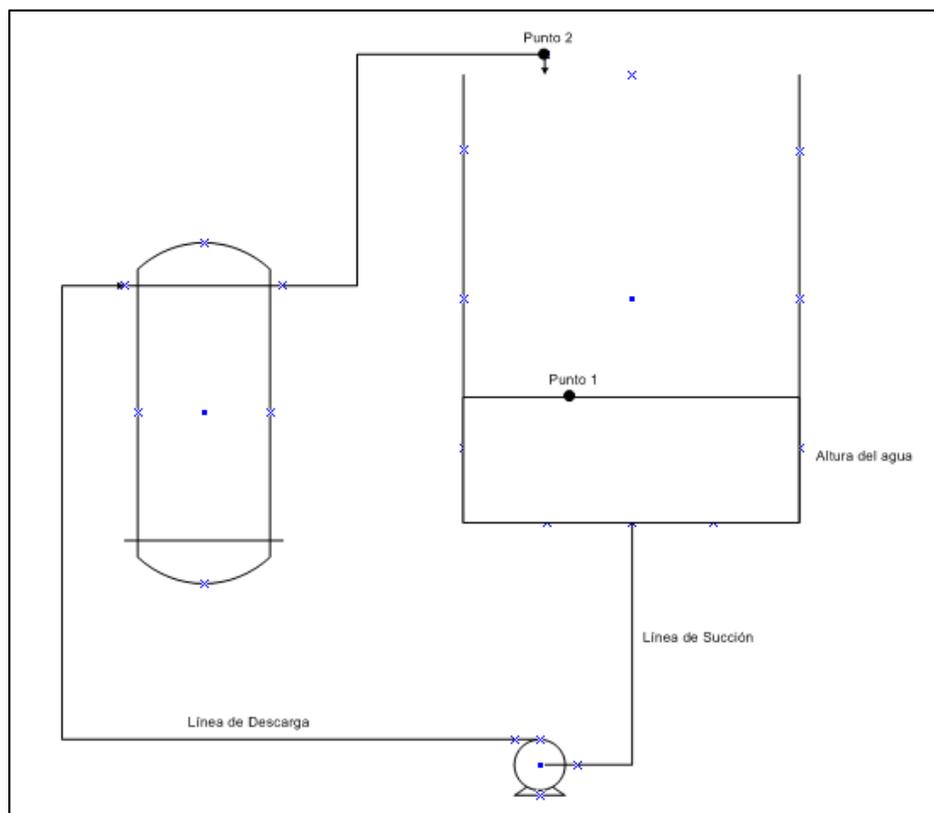


Figura 25. Esquema reducido del trayecto del agua. Fuente: Autor.

Para hallar el valor de carga de la bomba, se debe hallar el valor de la velocidad en el punto 2, la diferencia de altura y el valor de las pérdidas ocurridas durante el trayecto del agua.

Para hallar el valor de la diferencia de altura entre los puntos 1 y 2 ($z_2 - z_1$), se debe definir el valor de la altura de almacenamiento de agua en el tanque, teniendo en cuenta que la altura del tanque es de 98 cm y la capacidad de la bomba de calor es de 20 galones, se usará ese volumen para determinar el valor de la altura que se necesita. Ya que el tanque es de forma cilíndrica y tiene un diámetro interno de 79.5 cm, se calcula la altura de la siguiente manera:

$$V = 0.07571 \text{ m}^3$$

$$D = 79.5 \text{ cm} = 0.795 \text{ m}$$

$$h = \frac{4V}{\pi D^2}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$h = \frac{4 (0.07571 \text{ m}^3)}{\pi (0.795 \text{ m})^2}$$

$$h = 0.153 \text{ m} = 15.3 \text{ cm}$$

Así, el valor de la diferencia de altura es:

$$z_2 - z_1 = 0.98 \text{ m} - 0.153 \text{ m}$$

$$z_2 - z_1 = 0.827 \text{ m}$$

Para el cálculo de la velocidad en el punto 2, se hace uso de la ecuación de continuidad, mostrada en la ecuación (53):

$$Q = v * A \tag{53}$$

Donde:

Q : flujo volumétrico o caudal

v : velocidad del fluido

A : sección transversal o área

Si se consideran los flujos calculados en la Tabla 10, tomando como caudal máximo de trabajo $Q = 5,785 \text{ l/min}$ (el cual es para realizar un cambio de temperatura de 5°C), y usando el área circular con un diámetro de $1/2''$ sch 40, ya que el punto 2 está en la línea de descarga, se tiene los siguientes cálculos:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

El diámetro interno del tubo de $1/2''$ sch 40 es de 15.5 mm (Iploma, 2005).

$$A = \frac{\pi * (0.0155 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 0.1887 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Así, el valor de la velocidad en el punto 2 es:

$$v = \frac{0.0000964 \frac{m^3}{s}}{0.1887 \times 10^{-3} m^2}$$

$$v = 0.511 \frac{m}{s}$$

Así, la energía cinética en el punto 2 es:

$$\frac{v_2^2}{2g} = \frac{\left(0.511 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)}$$

$$\frac{v_2^2}{2g} = 0.0133 m$$

Para hallar el valor de las pérdidas (h_L) se debe calcular tanto las pérdidas por fricción como las pérdidas por accesorios.

Para calcular las pérdidas por fricción, tanto en la línea de succión como en la de descarga, se debe usar la ecuación de Darcy, descrita en la ecuación (41). Para usar dicha ecuación, hay que definir la longitud, el diámetro, la velocidad y el factor de fricción de ambas líneas. La longitud se puede definir con la sumatoria de los tramos de tubería de su respectiva línea, que se pueden observar en los planos isométricos del Apéndice E. Como se mencionó antes, los tipos de tubos usados de las líneas de descarga y succión son 1/2" sch 40 y 3/4" sch 40 respectivamente, por lo que los diámetros internos de cada uno de los tubos son los siguientes:

$$D_{L.succión} = 20.6 mm$$

$$D_{L.descarga} = 15.5 mm$$

Para definir las velocidades de cada una de las líneas, se usa la ecuación (53), por lo que se debe hallar las áreas de ambas tuberías, no obstante, en el cálculo de la energía cinética del

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

punto 2 se definió la velocidad de la línea de descarga. De modo que el valor de la velocidad de la línea de succión se calcula de la siguiente manera:

$$A = \frac{\pi * (0.0206 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 0.333 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.0000964 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.333 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$v = 0.289 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Y para definir el factor de fricción, primero hay que conocer el estado del flujo si éste se encuentra en la zona de flujo laminar o turbulento, por lo que se requiere de la realización del cálculo del número de Reynolds descrita en la ecuación (40).

Para calcular el número de Reynolds se usará el valor de la viscosidad cinemática de agua de $8.94 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, el cual se tomó de la tabla A.1 de Mott, (2006), usando como temperatura de referencia 25°C.

Así, los valores del número de Reynolds son:

$$N_{RLS} = \frac{\left(0.289 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0.0206 \text{ m})}{8.94 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$N_{RLS} = 6659.28$$

$$N_{RLD} = \frac{\left(0.511 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0.0155 \text{ m})}{8.94 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$N_{RLD} = 8859.62$$

Como ambos valores están por encima de 4000, quiere decir que ambos flujos están en la zona de flujo turbulento, por lo que, para hallar el valor del factor de fricción, se debe usar la ecuación (43).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Sin embargo, dicha ecuación requiere del valor de la rugosidad del ducto, que se determina de los valores de la **Tabla 4**. El material del ducto es PVC, por lo que su rugosidad es:

$$\epsilon = 3.0 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Pero hay un tramo de tubería en la línea de descarga que es de acero galvanizado, y su rugosidad es de:

$$\epsilon = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Por ende, los valores de factor de fricción son los siguientes:

$$f_{LS} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{0.0206 \text{ m}}{3.0 \times 10^{-7} \text{ m}} \right)} + \frac{5.74}{(6659.28)^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f_{LS} = 0.0348$$

$$f_{LD_{PVC}} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{0.0155 \text{ m}}{3.0 \times 10^{-7} \text{ m}} \right)} + \frac{5.74}{(8859.62)^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f_{LD_{PVC}} = 0.0321$$

$$f_{LD_{acero}} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{0.0155 \text{ m}}{1.5 \times 10^{-4} \text{ m}} \right)} + \frac{5.74}{(8859.62)^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f_{LD_{acero}} = 0.0443$$

Los valores necesarios para aplicar la ecuación de Darcy se exhiben en la Tabla 12.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 12. Variables a utilizar en la ecuación de Darcy. Fuente: Autor.

	Línea de succión	Línea de descarga PVC	Línea de descarga acero
Longitud	460 mm	2612 mm	443.6 mm
Diámetro	20.6 mm	15.5 mm	15.5 mm
Velocidad	0.289 m/s	0.511 m/s	0.511 m/s
Factor de fricción	0.0348	0.0321	0.0443

Así, los cálculos de las pérdidas de energía por fricción se muestran a continuación:

$$h_{LS} = (0.0348) \cdot \frac{(0.46 \text{ m})}{(0.0206 \text{ m})} \cdot \frac{\left(0.289 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}$$

$$h_{LS} = 0.00331 \text{ m}$$

$$h_{LD(PVC)} = (0.0321) \cdot \frac{(2.612 \text{ m})}{(0.0155 \text{ m})} \cdot \frac{\left(0.511 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}$$

$$h_{LS} = 0.072 \text{ m}$$

$$h_{LD(PVC)} = (0.0443) \cdot \frac{(0.4436 \text{ m})}{(0.0155 \text{ m})} \cdot \frac{\left(0.511 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}$$

$$h_{LS} = 0.0169 \text{ m}$$

$$\sum h_L = 0.00331 \text{ m} + 0.072 \text{ m} + 0.0169 \text{ m}$$

$$\sum h_L = 0.0922 \text{ m}$$

Y para las pérdidas menores, se hace uso de la ecuación (44), teniendo en cuenta los accesorios descritos en la tabla de insumos del Apéndice E y los cambios de sección, tanto en el tanque y en el intercambiador de calor, como en las reducciones que se encuentran en el trayecto.

Empezando con los cambios de sección, se tiene el paso del fluido del tanque a la línea de succión, y al ser un cambio súbito de sección de un área muy amplia como lo es el tanque,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

el valor de k en dicha reducción, según la segunda imagen de la **Figura 12** es de $k = 0.5$; pero además, en la línea de succión hay un accesorio de ampliación de $3/4''$ a $1''$ para acoplar a la bomba impulsora, por lo que para hallar el valor de k se usa la ecuación (54) (Mott, 2006).

$$k = \left[1 - \frac{A_1}{A_2} \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (54)$$

Considerando el subíndice 1 como la entrada del flujo al accesorio y el subíndice 2 como la salida.

Aplicando a la anterior ecuación a la ampliación, se tiene que el valor de k es:

$$k = \left[1 - \left(\frac{0.75''}{1''} \right)^2 \right]^2$$

$$k = 0.191$$

En la línea de descarga hay una reducción de la bomba a la línea mencionada, dicha reducción es de $1''$ a $1/2''$, por lo que en este caso se hace uso de los datos mostrados en la La relación de diámetros es equivalente a:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{1''}{0.5''} = 2$$

Tomando la relación de 2 y la velocidad de descarga de 0.511 m/s, que se puede aproximar a 6 m/s (el cual es el dato mínimo de tabla), se tiene que el valor de k es de 0.38 .

Los otros dos cambios de sección que se encuentran en la línea de descarga son en la entrada y salida del tanque en el intercambiador de calor. En la entrada, al ser una ampliación súbita a un área mucho mayor, se tiene que el valor de k es de 1 , mientras que en la salida, se encuentra un valor de k de 0.5 (Mott, 2006).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 13, la cual requiere de la relación de diámetros y la velocidad del flujo.

La relación de diámetros es equivalente a:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{1''}{0.5''} = 2$$

Tomando la relación de 2 y la velocidad de descarga de 0.511 m/s, que se puede aproximar a 6 m/s (el cual es el dato mínimo de tabla), se tiene que el valor de k es de 0.38.

Los otros dos cambios de sección que se encuentran en la línea de descarga son en la entrada y salida del tanque en el intercambiador de calor. En la entrada, al ser una ampliación súbita a un área mucho mayor, se tiene que el valor de k es de 1, mientras que en la salida, se encuentra un valor de k de 0.5 (Mott, 2006).

Tabla 13. Tabla de valores de k para reducciones súbitas. Fuente: (Mott, 2006).

D1/D2	Velocidad r2								
	0,6 m/s 2 pies/s	1,2 m/s 4 pies/s	1,8 m/s 6 pies/s	2,4 m/s 8 pies/s	3,0 m/s 10 pies/s	4,5 m/s 15 pies/s	6,0 m/s 20 pies/s	9,0 m/s 30 pies/s	12,0 m/s 40 pies/s
1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
1,2	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11
1,4	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,20
1,6	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24
1,8	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32	0,31	0,29	0,27
2,0	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,34	0,33	0,31	0,29
2,2	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,37	0,35	0,33	0,30
2,5	0,42	0,42	0,41	0,40	0,40	0,38	0,37	0,34	0,31
3,0	0,44	0,44	0,43	0,42	0,42	0,40	0,39	0,36	0,33
4,0	0,47	0,46	0,45	0,45	0,44	0,42	0,41	0,37	0,34
5,0	0,48	0,47	0,47	0,46	0,45	0,44	0,42	0,38	0,35
10,0	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,43	0,40	0,36
∞	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,45	0,44	0,41	0,38

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Aunque en el diseño de la salida del agua de la bomba de calor, se encuentra una reducción de 3/4" a 1/2", por lo que usando los datos de la La relación de diámetros es equivalente a:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{1''}{0.5''} = 2$$

Tomando la relación de 2 y la velocidad de descarga de 0.511 m/s, que se puede aproximar a 6 m/s (el cual es el dato mínimo de tabla), se tiene que el valor de k es de 0.38.

Los otros dos cambios de sección que se encuentran en la línea de descarga son en la entrada y salida del tanque en el intercambiador de calor. En la entrada, al ser una ampliación súbita a un área mucho mayor, se tiene que el valor de k es de 1, mientras que en la salida, se encuentra un valor de k de 0.5 (Mott, 2006).

Tabla 13, se tiene que:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{0.75''}{0.5''} = 1.5$$

Al no ser un valor establecido en tabla, se hace la interpolación entre las relaciones de 1.4 y 1.6, por lo que da un coeficiente de resistencia de 0.22.

Los valores del coeficiente de resistencia definidos por el cambio de sección transversal se muestran en la **Tabla 14**.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 14. Valores de k a utilizar. Fuente: Autor.

DESCRIPCIÓN	k	Línea
Reducción del tanque a línea de succión	0.5	Succión
Ampliación de 3/4" a 1"	0.191	Succión
Reducción de 1" a 1/2"	0.38	Descarga
Entrada al tanque del intercambiador de calor	1	Descarga
Salida del tanque del intercambiador de calor	0.5	Descarga
Reducción de 3/4" a 1/2"	0.22	Descarga

Ahora, los accesorios a utilizar en los cálculos son: Codos de 90°, Conectores tipo Tee, y válvulas. Para ello, se usa los datos registrados en la **Tabla 6** para calcular el coeficiente a través de la ecuación (45), y se muestran los valores a utilizar en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Valores de L_e/D a utilizar. Fuente: Autor.

Accesorio	L_e/D
Codo 90°	30
Conector Tee flujo directo	20
Conector Tee flujo alterno	60
Válvula bola	150
Válvula compuerta ¼ apertura	900

Para hallar los coeficientes de resistencia de cada accesorio, hay que tener en cuenta la línea en la que se encuentran y el material del cual están hechos. Los coeficientes de cada accesorio se muestran en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Cálculos de k para los accesorios a utilizar. Fuente: Autor.

Accesorio	L_e/D	Diámetro	Material	f	k
Codo 90°	30	Succión	PVC	0,0348	1,044
Codo 90°	30	Descarga	PVC	0,0321	0,963
Codo 90°	30	Descarga	Acero galv.	0,0443	1,329

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tee directo	20	Descarga	PVC	0,0321	0,642
Tee ramal	60	Descarga	Acero galv.	0,0443	2,658
Válvula compuerta	900	Descarga	Bronce	0,0443	39,87
Válvula bola	150	Succión	Acero	0,0437	6,555

Teniendo los coeficientes de los accesorios a utilizar, se procede a realizar los cálculos de las pérdidas de energía y definir el valor total de pérdidas menores. Dichos datos se muestran en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Cálculos de pérdidas menores. Fuente: Autor.

Descripción	Cantidad	k	Línea	velocidad	hL	hL total
Reducción del tanque a línea de succión	1	0,500	Succión	0,289	0,002128	0,002128
Ampliación de 3/4" a 1"	1	0,191	Succión	0,289	0,000813	0,000813
Codo 90° 3/4" PVC	1	1,044	Succión	0,289	0,004444	0,004444
Válvula bola	1	6,555	Succión	0,289	0,027904	0,027904
Reducción de 1" a 1/2"	1	0,380	Descarga	0,511	0,005057	0,001922
Entrada al tanque del intercambiador de calor	1	1,000	Descarga	0,511	0,013309	0,013309
Salida del tanque del intercambiador de calor	1	0,500	Descarga	0,511	0,006654	0,003327
Reducción de 3/4" a 1/2"	1	0,220	Descarga	0,511	0,002928	0,000644
Codo 90° 1/2" PVC	8	0,963	Descarga	0,511	0,012816	0,012342
Codo 90° 1/2" acero galv.	1	1,329	Descarga	0,511	0,017688	0,023507
Tee 1/2" línea directa PVC	2	0,642	Descarga	0,511	0,008544	0,005485
Tee 3/4" línea ramal acero galv.	1	2,658	Descarga	0,511	0,035375	0,094027
Válvula compuerta 1/4 apertura	1	39,870	Descarga	0,511	0,530627	21,156083
Total						21,345937

Así, el valor total de pérdidas menores equivale a:

$$\sum h_L = 21.346 \text{ m}$$

Realizando la sumatoria de las pérdidas por fricción y las pérdidas menores se tiene:

$$h_{L_{Total}} = 0.0922 \text{ m} + 21.346 \text{ m}$$

$$h_{L_{Total}} = 21.4382 \text{ m}$$

Ahora se puede determinar el valor de carga que debe realizar la bomba:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$h_A = (0.0133 \text{ m}) + (21.4382 \text{ m}) + (0.827 \text{ m})$$

$$h_A = 22.2785 \text{ m}$$

Para definir la potencia mecánica teórica que debe tener la bomba, se usa la ecuación (55), sacada del libro de Mott, 2006:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot h_A \quad (55)$$

Donde:

γ : peso específico del fluido

Q : caudal que lleva el fluido

h_A : carga de la bomba

Tomando el peso específico del agua a 25°C de la tabla A.1 del libro de Mott, 2006 que muestra un valor de $9.78 \frac{kN}{m^3}$ y usando los valores ya calculados de caudal y de carga, se tiene que la potencia teórica de la bomba debe ser:

$$P = \left(9.78 \frac{kN}{m^3}\right) \left(0.0000964 \frac{m^3}{s}\right) (22.2785 \text{ m})$$

$$P = 0.021 \text{ kW} = 0.028 \text{ hp}$$

4.2.2.3 Diseño eléctrico

El diseño eléctrico se realiza para la conexión de tres elementos: la bomba impulsora de agua, la bomba de calor y la resistencia que suministrará el calor al evaporador. En el Apéndice F, se encuentra tanto el diagrama de control del sistema como el diagrama de potencia de los elementos anteriormente mencionados.

En el diagrama de potencia se observa que cada elemento se activa por medio de su respectivo contactor, los cuales se denominaron de la siguiente manera: El contactor KP es

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

el encargado de activar la bomba impulsora, el contactor KC se encarga de activar el compresor de la bomba de calor y el contactor KR activa la resistencia eléctrica.

Mientras que, en el diagrama de control se observa los esquemas para la activación de las bobinas de los contactores mencionados en el diagrama de potencia. En el caso de la bomba de calor y la resistencia eléctrica, la activación de los contactores se realizará por medio de interruptores que se denominaron S2 y S3, pero para la bomba impulsora, hay un switch conmutable denominado SW y se usa para definir el modo de activación de la bomba; hay un modo manual, el cual permitirá la activación del contactor de la bomba a través del interruptor S1, y hay un modo automático, el cual está vinculado a un sistema de termóstato que activará y desactivará la bomba según la temperatura del agua dentro del tanque, este modo se usará con el fin de que active la bomba cuando el agua en el tanque alcance una temperatura fija que se definirá en el termóstato, y para fines de sencillez, el termóstato consistirá de un dispositivo digital indicador y controlador de temperatura como el que se muestra en la **Figura 20**.

4.3 Montaje práctico del sistema

4.3.1 Calibración del sensor de flujo

A diferencia de los instrumentos de presión y de temperatura que ya vienen con rango establecido, el instrumento indicador de flujo debe ser calibrado para asegurar que la medición sea correcta, y en caso contrario hacer los respectivos ajustes en la programación del microcontrolador. No obstante, al no poseer un instrumento patrón de flujo, se usa como referencia la definición de flujo por el método de aforo volumétrico.

En la **Figura 26** se observa el montaje preliminar para indicar el valor de flujo que pasa por la tubería, basado en el esquema mostrado en la **Figura 24**. En el montaje se observa la tarjeta Arduino Uno, la pantalla LCD, que tiene una matriz de indicación 2x16, y una

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

protoboard en la que se realiza las conexiones adicionales, como el potenciómetro para controlar el contraste de la pantalla y el circuito para el encendido de la luz led que tiene la pantalla; adicionalmente, del Arduino, salen tres cables que son las conexiones hacia el sensor de flujo, dos de los cables son la alimentación (positivo y negativo) y un tercer cable para la transmisión de pulsos.

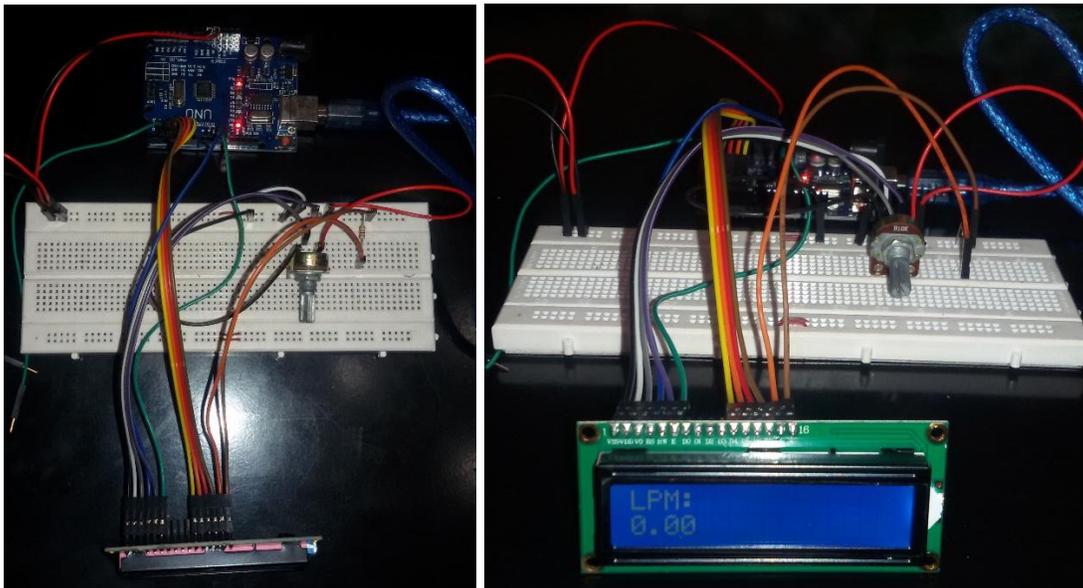


Figura 26. Montaje electrónico para la indicación de flujo. Fuente: Autor.

Las pruebas del aforo para la calibración se hicieron en un montaje que contenía una bomba para la impulsión de agua, en el trayecto de la tubería había una válvula de compuerta que fue utilizada para la regulación del paso del agua y después de la válvula se ubicó el sensor de flujo, y al final el agua evacuaba en un balde que tenía marcación de volumen cada dos litros. El proceso del aforo consistió en: primero regular la válvula para restringir el flujo de agua, luego se prendía la bomba para hacer fluir el agua del tanque de suministro hasta el balde, pasando por la válvula y después por el sensor, y en el momento que empezaba a caer el agua al balde se medía el tiempo con un cronómetro para definir el tiempo de llenado; para este aforo, ya que el caudal se puede definir como $(Q = \frac{V}{t})$, hay que

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

establecer el volumen o el tiempo como constante; para este caso se determinó que el volumen sería el factor constante con un valor de 4 litros.

Las tomas de datos se realizaron con la regulación de la válvula cada $\frac{1}{4}$ de vuelta, y para tener mayor confiabilidad en los resultados, se hicieron dos pruebas cuyos datos obtenidos se muestran en la **Tabla 18** y **Tabla 19**.

Tabla 18. Toma de datos de la prueba 1 de calibración del sensor de flujo. Fuente: Autor.

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
6,15	4	38,108	6,2979
6,15	4	37,422	6,4133
6,15	4	37,675	6,3703
6,15	4	37,611	6,3811
6,15	4	38,645	6,2104
Promedio			6,33

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
8,10	4	27,910	8,5991
8,10	4	29,216	8,2147
8,10	4	28,761	8,3446
8,10	4	27,976	8,5788
8,10	4	27,550	8,7114
Promedio			8,49

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
8,70	4	27,229	8,8141
8,70	4	26,115	9,1901
8,70	4	25,539	9,3974
8,70	4	26,592	9,0253
8,70	4	26,235	9,1481
Promedio			9,12

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
9,00	4	26,021	9,2233
9,00	4	25,360	9,4637
9,00	4	26,023	9,2226
9,00	4	24,511	9,7915
9,00	4	25,830	9,2915
Promedio			9,40

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
9,15	4	24,910	9,6347
9,15	4	25,279	9,4940
9,15	4	24,518	9,7887
9,15	4	23,903	10,0406
9,15	4	24,526	9,7855
Promedio			9,75

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
9,15	4	25,160	9,5390
9,15	4	25,269	9,4978
9,15	4	25,037	9,5858
9,15	4	26,376	9,0992
9,15	4	25,521	9,4040
Promedio			9,43

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
9,15	4	26,233	9,1488
9,15	4	25,629	9,3644
9,15	4	26,129	9,1852
9,15	4	25,631	9,3637
9,15	4	27,137	8,8440
Promedio			9,18

Tabla 19. Toma de datos de la prueba 2 de calibración del sensor de flujo. Fuente: Autor.

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
5,85	4	40,450	5,9333
5,85	4	41,195	5,8259
5,85	4	41,121	5,8364
5,85	4	41,666	5,7601
5,85	4	41,354	5,8035
Promedio			5,83

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
8,25	4	29,223	8,2127
8,25	4	28,019	8,5656
8,25	4	29,092	8,2497
8,25	4	28,353	8,4647
8,25	4	28,961	8,2870
Promedio			8,36

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
9,00	4	27,137	8,8440
9,00	4	27,036	8,8771
9,00	4	26,886	8,9266
9,00	4	27,196	8,8248
9,00	4	26,602	9,0219
Promedio			8,90

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
9,30	4	25,868	9,2779
9,15	4	26,389	9,0947
9,30	4	25,969	9,2418
9,30	4	29,017	8,2710
9,15	4	26,318	9,1192
Promedio			9,00

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Flujo [L/min]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Aforo [L/min]
9,15	4	25,965	9,2432
9,15	4	26,240	9,1463
9,15	4	26,829	8,9455
9,15	4	26,265	9,1376
9,45	4	25,796	9,3038
Promedio			9,16

Al analizar la información de ambas pruebas se tienen los siguientes resultados:

Tabla 20. Cálculo de error en los datos de la prueba 1. Fuente: Autor.

Flujo [L/min]	Aforo [L/min]	Error [L/min]
6,15	6,33	0,18
8,10	8,49	0,39
8,70	9,12	0,42
9,00	9,40	0,40
9,15	9,75	0,60
9,15	9,43	0,28
9,15	9,18	0,03

Tabla 21. Cálculo de error en los datos de la prueba 2. Fuente: Autor.

Flujo [L/min]	Aforo [L/min]	Error [L/min]
5,85	5,83	-0,02
8,25	8,36	0,11
9,00	8,90	-0,10
9,24	9,00	-0,24
9,21	9,16	-0,05

En las Tabla 20 y Tabla 21 se hace una recopilación de los valores promedios de cada toma de datos de las Tabla 18 y Tabla 19. La casilla “Flujo” indica los valores dados por el sensor de flujo, mientras que la casilla “Aforo” denota las medidas de caudal realizadas por medio del método de aforo volumétrico. Para definir la precisión que hay entre las medidas

tomadas por el sensor y para comparar con el patrón, que en este caso son los valores del aforo, se calcula la diferencia entre las medidas, y se registra en la casilla “Error”.

El error define el desfase de la medida dada por el sensor con respecto a la medida del patrón, por ejemplo, el primer dato de la Tabla 20 muestra un flujo de 6,15 L/min y el valor de aforo de 6,33 L/min, si se resta el aforo al valor del flujo, se tiene un error de 0,18 L/min, lo que significa que el valor dado por el sensor de flujo está 0,18 L/min por debajo del valor real o patrón; si el error da un valor negativo, indica que el valor del sensor de flujo está por encima del valor patrón.

El caso ideal es que el error sea de cero, por lo que la prueba busca establecer los valores entre ambas medidas para definir si los valores de error son tolerables con respecto a lo requerido en el proyecto.

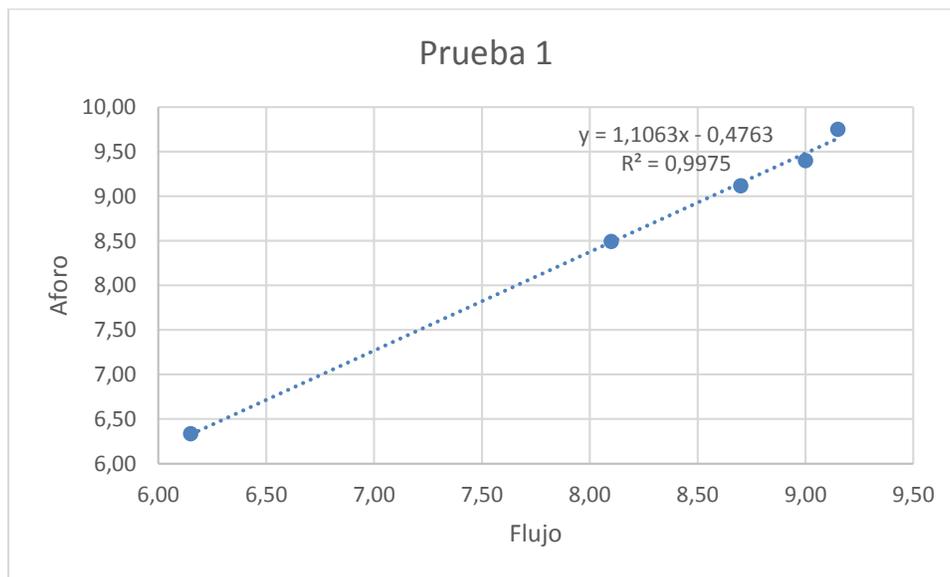


Figura 27. Gráfica de tendencia lineal entre los datos obtenidos de la prueba 1. Fuente: Autor.

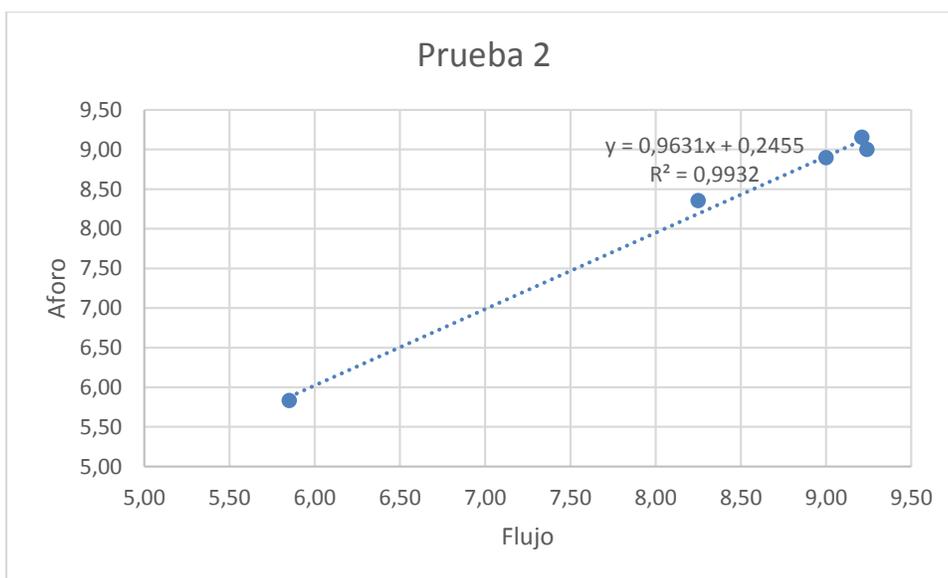


Figura 28. Gráfica de tendencia lineal entre los datos obtenidos de la prueba 2. Fuente: Autor.

Analizando los resultados mostrados, se tiene las siguientes conclusiones: Como se muestra en la **Tabla 20** y **Tabla 21**, el error más grande obtenido durante las pruebas es de 0.6 lpm, lo que indica que el sensor tiene un buen margen de aceptación para la necesidad del proyecto, debido a que no se requiere una gran precisión en la indicación del caudal. Además, en **Figura 27** y **Figura 28**, las líneas de tendencia muestran un valor de R^2 por encima de 0.99, lo que indica que los valores que muestra el sensor de flujo tienden a aproximarse a los valores reales definidos por el aforo realizado.

4.3.2 Montaje de tubería

El montaje de tubería que conecta con el tanque de agua, se realizó según el diseño de tubería indicado en los planos del Apéndice E. El trabajo de tubería que se realizó con tubos de PVC fue ensamblado con una sustancia química conocida como “soldadura para PVC” en donde las uniones eran por embone liso.

De la **Figura 29** a la **Figura 32** se observa como quedó la instalación de la tubería entre el tanque de agua y la bomba de calor.



Figura 29. Conexiones de la bomba. Fuente: Autor.



Figura 30. Conexiones de la válvula de compuerta y el sensor de flujo. Fuente: Autor.



Figura 31. Conexiones de tubería a la bomba de calor. Fuente: Autor.



Figura 32. Vista de la instalación de tubería entre el tanque y la bomba de calor. Fuente: Autor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3.3 Adquisición de instrumentos

Entre los elementos que se necesitan para la instrumentación del equipo, se consiguieron los sensores de temperatura, los cuales son termopares tipo k, que se muestran en la **Figura 33**; estos sensores serán utilizados para medir la temperatura tanto en la entrada como en la salida del condensador y se colocarán en la superficie de la tubería de cobre que conduce el refrigerante.



Figura 33. Termopares tipo k obtenidos. Fuente: Autor.

Pero para censar la temperatura del agua en la entrada y la salida del intercambiador de calor, se requiere de un diseño que permita un fácil acople a la tubería, por lo que, aparte del termopar, se especificó que el diseño del sensor debe llevar una rosca macho de 1/2" para acoplarlo a los ramales de las conexiones tipo Tee instaladas en la bomba de calor. Así, los termopares obtenidos para la medición del agua se muestran en la **Figura 34**.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 34. Termopares tipo k con rosca macho de 1/2". Fuente: Autor.

4.4 Elaboración de guías práctico experimentales

Se realizan dos guías práctico-experimentales las cuales tienen como finalidad extender los conocimientos por medio de habilidades analíticas y experimentales mediante la observación y el desarrollo de dichas guías en el área de la termodinámica.

La primera guía de trabajo busca dos finalidades, una de las finalidades es la identificación de los componentes básicos que operan en una bomba de calor para realizar el ciclo termodinámico, además de la identificación de los focos que actúan sobre el mismo; mientras que la segunda finalidad es el análisis de los datos experimentales para establecer el coeficiente de desempeño que tiene la bomba de calor y observar el comportamiento de transferencias de calor que actúa sobre un fluido que está en estado estático.

La segunda guía de trabajo consta principalmente en realizar el análisis del comportamiento que tiene una bomba de calor para realizar la transferencia de calor sobre un fluido que se encuentra en estado dinámico, y, al igual que en la guía anterior, se establece la eficiencia de la bomba de calor a través del coeficiente de desempeño.

Ambas guías de trabajo fueron realizadas en el formato oficial de guía de laboratorio FGL 029, y se encuentran anexadas en dos documentos identificados con los nombres de:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- FGL 029 Guía de Trabajo Practico - Experimental_BC001.docx
- FGL 029 Guía de Trabajo Practico - Experimental_BC002.docx

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Se realizan los diseños pertinentes que se necesitan para llevar a cabo el acople tecnológico entre el módulo didáctico de control de fluidos y la bomba de calor, entre los diseños, se considera la instrumentación y control para hacer de la bomba de calor un equipo didáctico que pueda ser usado con fines académicos, por lo que, se complementa el diseño con la realización de guías de trabajo que muestren de manera experimental el funcionamiento de la bomba de calor.

En la implementación de los diseños, se hace el montaje de la tubería que conecta el tanque del módulo didáctico de control de fluidos con la bomba de calor, se adquieren los sensores de temperatura y se construye el instrumento indicador de flujo. Sin embargo, la implementación del diseño que se tiene previsto para la bomba de calor, no se puede llevar a cabo en su totalidad debido a restricciones ajenas, impuestas por la institución para la que se está realizando este proyecto.

- Se pone en funcionamiento la bomba de calor para verificar el estado en el que se encuentran cada uno de los componentes de dicha bomba, además se asegura que no hay fugas de la sustancia refrigerante con la que ésta trabaja actualmente. Una vez realizado el análisis de funcionamiento, se concluye que la bomba de calor en general, se encuentra apta para hacer uso de la misma y así poder realizar el montaje que se tiene previsto en este proyecto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Se realizan los diseños que se necesitan para llevar a cabo el montaje que permita usar la bomba de calor como un sistema didáctico de trabajo, entre los diseños realizados están los planos de tubería para suministrar agua a la bomba de calor, también se realizan los diseños eléctricos, electrónicos y de instrumentación para hacer las mediciones de las variables más importantes que muestren el funcionamiento termodinámico que realiza la bomba de calor, además de hacer diseños de controles de operación, tanto manuales como automáticos, para hacer diversas prácticas según lo prefiera el usuario. Los diseños se complementan con cálculos teóricos basados en los datos técnicos del compresor de la bomba de calor y el diseño de la tubería, los cuales definen las características mínimas que deben llevar los dispositivos a utilizar en el proyecto.
- Con base en los diseños, se hace el montaje de la tubería que conecta el tanque del módulo didáctico de control de fluidos con la bomba de calor. Según los cálculos, la bomba a utilizar para el impulso del agua hacia la bomba de calor es de una baja potencia, no obstante, se consulta que las bombas de baja potencia tienen la característica de ser de tipo sumergible, por lo que, por criterio de diseño se usa una bomba de mayor potencia que tiene la característica de ser del tipo no sumergible, y la regulación del flujo se realiza por medio de una válvula, por lo que se requiere de un instrumento indicador de flujo. Con base en lo anterior, se realiza el montaje electrónico que permite la medición de la variable de flujo, y, al ser un instrumento construido y programado en un microcontrolador, se lleva a cabo la respectiva calibración, cuyos resultados muestran que el instrumento tiene un margen de tolerancia que es aceptable para las condiciones del proyecto.
- Se realizan dos guías de trabajo práctico-experimental basados en las características de diseño de la bomba de calor, estas guías permiten demostrar la funcionalidad que tiene la bomba de calor como dispositivo que se usa para el calentamiento de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

un fluido, las prácticas establecidas permiten notar el cambio de temperatura de un fluido cuando está en estado estático o dinámico. Con estas guías, se pretende poner a disposición del usuario una herramienta básica y didáctica que permite complementar los conocimientos teóricos sobre la termodinámica y la transferencia de calor.

5.2 Trabajo futuro

La implementación de los diseños realizados para poner en funcionamiento la bomba de calor, no se pueden completar en este proyecto debido a restricciones que se han presentado para ingresar al laboratorio en el que se está ejecutando el proyecto; se ponen a disposición los diseños para que dicho proyecto pueda ser terminado en su totalidad en un trabajo futuro, además de realizar las pruebas de funcionamiento y así comparar los resultados prácticos con los cálculos teóricos.

La bomba de calor utilizada en este proyecto trabaja con refrigerante 22 (R-22), el cual está siendo sustituido debido a que esta sustancia tiene propiedades que son muy nocivas para el ambiente, por lo que en un futuro, se debe reemplazar dicha sustancia refrigerante por otra que no sea tan contaminante, como lo es el refrigerante 134a (R-134a); de modo que, al realizar el cambio de refrigerante, hay que tener en cuenta que el compresor actual de la bomba de calor también debe ser reemplazado por un compresor que trabaje con el refrigerante a cambiar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

Aliexpress. (2015). No Title. Retrieved from <https://es.aliexpress.com/item/A-C-R134a-R22-R404-Refrigeration-Pressure-Gauge-Auto-Air-Conditioning-Manifold-Gauge-Low-Pressure-Blue/32306010827.html>

ASHRAE. (2013). Designation and Safety Classification of Refrigerants. Retrieved from http://www.personal.psu.edu/users/m/a/mac5738/5th Year/AE 557/34_2013.pdf

Conoce_tu_piscina. (2016). Cálculo de una bomba de calor para piscinas. Retrieved from <https://conocetupiscina.blogspot.com.co/2016/05/calculo-de-una-bomba-de-calor-para.html>

Dualtronica. (n.d.). Sensor de flujo de agua. Retrieved from https://dualtronica.com/sensores/120-sensor-flujo-de-agua-1-30lmin.html?search_query=flujo&results=1

ICER. (n.d.). Tablas de saturación R-22. Retrieved from <http://www.icer.cl/pdf/diagramas/st22.pdf>

Indubel. (n.d.). Refrigerantes. Retrieved from <http://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf>

Iploma. (2005). Tuberia PVC cédula 40. Retrieved from <http://www.iploma.com/07.htm?sessionid=6016066263975215>

LG. (2015). Rotary & scroll compressor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. (Wiley, Ed.) (8th ed.). United States.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. (P. Educación, Ed.) (6th edición). Mexico.

Mundohvacr. (n.d.). Los Refrigerantes y sus Propiedades. Retrieved from <https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2007/02/los-refrigerantes-y-sus-propiedades/>

Omega. (n.d.). Revised Thermocouple Reference Tables. Retrieved from http://es.omega.com/temperature/pdf/Type_K_Thermocouple_Reference_Table.pdf

Pardell, X. (2017). Ley de Ohm. Retrieved from <http://www.pardell.es/ley-ohm.html>

PNUMA. (2015). Normas internacionales de refrigeración y aire acondicionado. Retrieved from http://www.unep.org/ozonaction/Portals/105/documents/Ozone_Day_2015/7739-s-StandardsBooklet2015.pdf

PROPIEDADES DE UN REFRIGERANTE IDEAL. (n.d.). Retrieved from <http://tuaireacondicionado.net/propiedades-de-un-refrigerante-ideal/>

Puerto, E. (n.d.). Presión atmosférica. Retrieved from <https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>

Quintero, J. C., & García, J. C. (2011). Determinación de las condiciones para la validación de la bomba de calor aire agua de 250 L como alternativa energética usando prototipo existente en la sede de Robledo del ITM. Medellín.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

R718. (2012). No Title. Retrieved from
http://www.r718.com/articles/3451/the_basics_of_r718_water_vapour_compression_br

Rey, F. J., & Velasco, E. (2005). Bombas de calor y energías renovables en edificios. (Thomson, Ed.). España.

Sistemaseléctricos. (n.d.). Temperatura. Retrieved from
http://media.wix.com/ugd/925471_a4e93546eeef4c0a9c58b8f03de18b86.pdf

UNET. (n.d.). El ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Retrieved from
http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-152.htm

Yañes, G. (2017). No Title. Retrieved from
<https://www.gildardoyanez.com/refrigerantes/standard-34-ashrae/>

Yunus, C., & Afshin, G. (2011). Transferencia de calor y masa. (McGraw-Hill, Ed.) (4ta edición).

Yunus, C., & Michael, B. (2009). Termodinámica. (McGraw-Hill, Ed.) (6th ed.). México.

APÉNDICE

APENDICE A. Especificaciones técnicas de compresores que trabajan con R22 (LG, 2015)

Specification_ Constant speed (R22, 1Piston)

Refrigerant	Type	Frequency	Voltage	Series	Model	Cooling Capacity		Input Watts	EER Btu/W.hr	COP W/W	Test Condition
						Btu/hr	Watts				
R22	1piston	60Hz	1Φ,115V	QA	QA064C	4,450	1,304	460	9.67	2.83	ASHRAE
					QA075C	5,250	1,538	477	11.01	3.23	ASHRAE
					QA086C	6,070	1,779	590	10.29	3.01	ASHRAE
					QA104C	7,250	2,125	670	10.82	3.17	ASHRAE
					QA110C	7,885	2,311	725	10.88	3.19	ASHRAE
					QA114C	7,950	2,330	736	10.80	3.17	ASHRAE
				QK	QA125C	9,000	2,637	857	10.50	3.08	ASHRAE
					QK125C	8,790	2,576	814	10.80	3.16	ASHRAE
					QK134C	9,400	2,755	854	11.01	3.23	ASHRAE
					QK141C	9,900	2,901	900	11.00	3.22	ASHRAE
					QK145C	10,200	2,989	927	11.00	3.22	ASHRAE
					QK156C	11,150	3,267	1,014	11.00	3.22	ASHRAE
			QA	QK164C	11,650	3,414	1,059	11.00	3.22	ASHRAE	
				QK173C	12,300	3,604	1,153	10.67	3.13	ASHRAE	
				QK182C	12,690	3,719	1,212	10.47	3.07	ASHRAE	
				QK189C	13,250	3,883	1,293	10.25	3.00	ASHRAE	
				QK191C	13,600	3,985	1,259	10.80	3.17	ASHRAE	
				QK208C	15,000	4,396	1,415	10.60	3.11	ASHRAE	
			1Φ, 220V	QA	QA104G	7,150	2,095	662	10.80	3.17	ASHRAE
					QA114G	7,890	2,312	730	10.81	3.17	ASHRAE
			1Φ, 208-230V	QA	QA075K	5,200	1,524	486	10.70	3.14	ASHRAE
					QA092K	6,400	1,875	615	10.41	3.05	ASHRAE
					QA102K	7,150	2,095	662	10.80	3.17	ASHRAE
					QA104K	7,150	2,095	662	10.80	3.17	ASHRAE
QA106K	7,350	2,154			662	11.10	3.25	ASHRAE			
QA110K	7,600	2,227			705	10.78	3.16	ASHRAE			
QA114K	7,890	2,312	730	10.81	3.17	ASHRAE					

Note 1 : Figures in the table are subject to change without prior notice for performance improvement.

Note 2 :	Test condition	Condenser temperature	Evaporation temperature	Suction temperature	Sub cool
	ASHRAE	54.4°C	7.2°C	35°C	8.3°C

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APENDICE B. Tablas de saturación del refrigerante 22 (ICER, n.d.)



Tablas de Saturación R-22

Temp. °C	Presión kPa	Densidad kg/m ³		Volumen m ³ /kg		Entalpia kJ/kg		Entropia kJ/kg K		
		líquido	gas	líquido	gas	líquido	líquido	gas	líquido	gas
-150	0,0019338	1701,8	0,0001633	0,0005876	6123,7	37,558	298,342	335,9	0,14276	2,5653
-149	0,0023683	1699,2	0,0001983	0,0005885	5040,7	38,628	297,702	336,33	0,15141	2,5493
-148	0,0028899	1696,6	0,0002401	0,00058941	4164,1	39,696	297,074	336,77	0,15998	2,5337
-147	0,0035138	1694,0	0,0002896	0,00059031	3452,1	40,764	296,436	337,2	0,16848	2,5184
-146	0,0042576	1691,4	0,0003482	0,00059122	2871,6	41,831	295,809	337,64	0,17691	2,5034
-145	0,0051413	1688,8	0,0004172	0,00059213	2396,8	42,898	295,182	338,08	0,18526	2,4887
-144	0,0061879	1686,2	0,0004982	0,00059305	2006,9	43,964	294,556	338,52	0,19355	2,4743
-143	0,0074233	1683,6	0,0005931	0,00059396	1685,8	45,029	293,931	338,96	0,20177	2,4602
-142	0,0088776	1681,0	0,0007039	0,00059488	1420,5	46,095	293,305	339,4	0,20992	2,4463
-141	0,010584	1678,4	0,0008329	0,00059581	1200,6	47,159	292,681	339,84	0,21801	2,4328
-140	0,012581	1675,8	0,0009826	0,00059673	1017,7	48,223	292,067	340,29	0,22603	2,4195
-139	0,01491	1673,2	0,0011559	0,00059766	865,13	49,287	291,443	340,73	0,23399	2,4065
-138	0,01762	1670,6	0,0013559	0,00059859	737,52	50,351	290,829	341,18	0,24189	2,3938
-137	0,020764	1668,0	0,0015861	0,00059952	630,46	51,414	290,216	341,63	0,24973	2,3813
-136	0,024403	1665,4	0,0018505	0,00060046	540,39	52,477	289,603	342,08	0,25751	2,3691
-135	0,028603	1662,8	0,0021533	0,0006014	464,4	53,54	288,99	342,53	0,26523	2,3571
-134	0,033438	1660,2	0,0024992	0,00060234	400,12	54,603	288,377	342,98	0,2729	2,3453
-133	0,038991	1657,6	0,0028935	0,00060328	345,6	55,666	287,764	343,43	0,28051	2,3338
-132	0,045352	1655,0	0,0033418	0,00060423	299,24	56,728	287,162	343,89	0,28806	2,3225
-131	0,052623	1652,4	0,0038503	0,00060519	259,72	57,79	286,55	344,34	0,29556	2,3114
-130	0,060914	1649,8	0,0044259	0,00060614	225,94	58,853	285,947	344,8	0,30301	2,3005
-129	0,070347	1647,2	0,0050759	0,0006071	197,01	59,915	285,345	345,26	0,3104	2,2899
-128	0,081056	1644,6	0,0058084	0,00060806	172,17	60,977	284,733	345,71	0,31774	2,2794
-127	0,093187	1642,0	0,0066321	0,00060902	150,78	62,039	284,131	346,17	0,32508	2,2692
-126	0,1069	1639,4	0,0075564	0,00060999	132,34	63,101	283,529	346,63	0,33228	2,2591
-125	0,12237	1636,8	0,0085917	0,00061096	116,39	64,163	282,937	347,1	0,33947	2,2492
-124	0,13978	1634,2	0,0097488	0,00061194	102,58	65,225	282,335	347,56	0,34661	2,2396
-123	0,15935	1631,5	0,01104	0,00061292	90,583	66,287	281,733	348,02	0,35371	2,2301
-122	0,18129	1628,9	0,012477	0,0006139	80,148	67,349	281,141	348,49	0,36076	2,2208
-121	0,20585	1626,3	0,014074	0,00061488	71,051	68,411	280,539	348,95	0,36776	2,2116
-120	0,23328	1623,7	0,015847	0,00061587	63,104	69,473	279,947	349,42	0,37472	2,2027
-119	0,26388	1621,1	0,01781	0,00061686	56,15	70,535	279,355	349,89	0,38163	2,1939
-118	0,29794	1618,5	0,01998	0,00061786	50,051	71,597	278,763	350,36	0,38849	2,1852
-117	0,33579	1615,9	0,022375	0,00061886	44,694	72,658	278,172	350,83	0,39532	2,1767
-116	0,37778	1613,3	0,025014	0,00061986	39,978	73,72	277,58	351,3	0,40209	2,1684
-115	0,42428	1610,7	0,027917	0,00062086	35,821	74,782	276,988	351,77	0,40883	2,1603
-114	0,47571	1608,0	0,031105	0,00062187	32,149	75,844	276,406	352,25	0,41552	2,1523
-113	0,53248	1605,4	0,034602	0,00062289	28,9	76,906	275,814	352,72	0,42217	2,1444
-112	0,59505	1602,8	0,038431	0,0006239	26,021	77,967	275,233	353,2	0,42878	2,1367
-111	0,66392	1600,2	0,042617	0,00062492	23,465	79,029	274,641	353,67	0,43535	2,1291
-110	0,7396	1597,6	0,047188	0,00062595	21,192	80,091	274,059	354,15	0,44188	2,1217
-109	0,82265	1595,0	0,052171	0,00062698	19,168	81,152	273,478	354,63	0,44836	2,1144
-108	0,91364	1592,3	0,057595	0,00062801	17,362	82,214	272,896	355,11	0,45481	2,1072
-107	1,0132	1589,7	0,063493	0,00062905	15,75	83,276	272,314	355,59	0,46122	2,1002
-106	1,122	1587,1	0,069897	0,00063008	14,307	84,337	271,733	356,07	0,46759	2,0933
-105	1,2407	1584,5	0,076841	0,00063113	13,014	85,398	271,152	356,55	0,47392	2,0865
-104	1,3701	1581,8	0,084361	0,00063218	11,854	86,46	270,57	357,03	0,48021	2,0798
-103	1,5109	1579,2	0,092495	0,00063323	10,811	87,521	269,989	357,51	0,48647	2,0733



Temp. °C	Presión kPa	Densidad kg/m ³		Volumen m ³ /kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K	
		líquido	gas	líquido	gas	líquido	líquido	gas	líquido	gas
-102	1,6639	1576,6	0,10128	0,00063428	9,8735	88,583	269,417	358	0,49269	2,0668
-101	1,8301	1573,9	0,11076	0,00063534	9,0284	89,644	268,836	358,48	0,49887	2,0605
-100	2,0102	1571,3	0,12098	0,00063641	8,266	90,705	268,265	358,97	0,50502	2,0543
-99	2,2053	1568,7	0,13198	0,00063748	7,5771	91,767	267,683	359,45	0,51113	2,0482
-98	2,4163	1566,0	0,1438	0,00063855	6,954	92,828	267,112	359,94	0,5172	2,0422
-97	2,6443	1563,4	0,1565	0,00063963	6,3897	93,889	266,541	360,43	0,52324	2,0364
-96	2,8903	1560,8	0,17013	0,00064071	5,8779	94,95	265,96	360,91	0,52925	2,0306
-95	3,1556	1558,1	0,18473	0,0006418	5,4132	96,011	265,389	361,4	0,53522	2,0249
-94	3,4412	1555,5	0,20037	0,00064289	4,9908	97,073	264,817	361,89	0,54116	2,0194
-93	3,7484	1552,8	0,21709	0,00064398	4,6064	98,134	264,246	362,38	0,54707	2,0139
-92	4,0786	1550,2	0,23496	0,00064508	4,2561	99,195	263,675	362,87	0,55294	2,0085
-91	4,433	1547,5	0,25403	0,00064619	3,9366	100,26	263,1	363,36	0,55878	2,0032
-90	4,813	1544,9	0,27437	0,0006473	3,6448	101,32	262,53	363,85	0,56459	1,998
-89	5,2202	1542,2	0,29603	0,00064841	3,378	102,38	261,96	364,34	0,57037	1,9929
-88	5,656	1539,6	0,3191	0,00064953	3,1338	103,44	261,39	364,83	0,57612	1,9879
-87	6,1219	1536,9	0,34362	0,00065065	2,9102	104,5	260,83	365,33	0,58183	1,983
-86	6,6197	1534,3	0,36968	0,00065178	2,705	105,56	260,26	365,82	0,58752	1,9781
-85	7,1509	1531,6	0,39734	0,00065292	2,5167	106,63	259,68	366,31	0,59318	1,9734
-84	7,7174	1528,9	0,42669	0,00065406	2,3436	107,69	259,11	366,8	0,5988	1,9687
-83	8,3209	1526,2	0,45778	0,0006552	2,1845	108,75	258,55	367,3	0,6044	1,9641
-82	8,9632	1523,6	0,49071	0,00065635	2,0379	109,81	257,98	367,79	0,60997	1,9596
-81	9,6465	1520,9	0,52555	0,00065751	1,9028	110,87	257,41	368,28	0,61551	1,9551
-80	10,372	1518,2	0,56238	0,00065867	1,7782	111,94	256,83	368,77	0,62102	1,9508
-79	11,143	1515,5	0,60129	0,00065984	1,6631	113	256,27	369,27	0,62651	1,9465
-78	11,961	1512,8	0,64237	0,00066101	1,5567	114,06	255,7	369,76	0,63197	1,9422
-77	12,828	1510,1	0,6857	0,00066219	1,4584	115,13	255,12	370,25	0,6374	1,9381
-76	13,746	1507,4	0,73138	0,00066338	1,3673	116,19	254,56	370,75	0,64281	1,934
-75	14,719	1504,7	0,77949	0,00066457	1,2829	117,25	253,99	371,24	0,64819	1,93
-74	15,747	1502,0	0,83013	0,00066576	1,2046	118,32	253,41	371,73	0,65354	1,926
-73	16,833	1499,3	0,8834	0,00066697	1,132	119,38	252,84	372,22	0,65887	1,9221
-72	17,981	1496,6	0,93939	0,00066818	1,0645	120,45	252,27	372,72	0,66417	1,9183
-71	19,192	1493,9	0,99822	0,00066939	1,0018	121,51	251,7	373,21	0,66945	1,9145
-70	20,469	1491,2	1,06	0,00067061	0,94342	122,58	251,12	373,7	0,67471	1,9108
-69	21,815	1488,4	1,1248	0,00067184	0,88908	123,64	250,55	374,19	0,67994	1,9072
-68	23,233	1485,7	1,1927	0,00067308	0,83844	124,71	249,97	374,68	0,68515	1,9036
-67	24,725	1483,0	1,2639	0,00067432	0,79121	125,78	249,39	375,17	0,69033	1,9001
-66	26,294	1480,2	1,3384	0,00067557	0,74714	126,85	248,81	375,66	0,69549	1,8966
-65	27,944	1477,5	1,4165	0,00067682	0,70599	127,91	248,24	376,15	0,70063	1,8932
-64	29,677	1474,7	1,4981	0,00067809	0,66752	128,98	247,66	376,64	0,70575	1,8899
-63	31,497	1472,0	1,5834	0,00067936	0,63155	130,05	247,08	377,13	0,71084	1,8866
-62	33,405	1469,2	1,6726	0,00068064	0,59788	131,12	246,5	377,62	0,71592	1,8833
-61	35,407	1466,4	1,7657	0,00068192	0,56635	132,19	245,92	378,11	0,72097	1,8801
-60	37,505	1463,7	1,8629	0,00068321	0,5368	133,27	245,32	378,59	0,726	1,877
-59	39,702	1460,9	1,9643	0,00068451	0,50909	134,34	244,74	379,08	0,73101	1,8739
-58	42,002	1458,1	2,07	0,00068582	0,48309	135,41	244,15	379,56	0,73601	1,8708
-57	44,408	1455,3	2,1802	0,00068714	0,45867	136,48	243,57	380,05	0,74098	1,8678
-56	46,924	1452,5	2,295	0,00068846	0,43573	137,56	242,97	380,53	0,74593	1,8649
-55	49,553	1449,7	2,4145	0,00068979	0,41416	138,63	242,39	381,02	0,75086	1,8619



Temp. °C	Presión kPa	Densidad kg/m ³		Volumen m ³ /kg		Entalpia kJ/kg			Entropía kJ/kg K	
		líquido	gas	líquido	gas	líquido	latente	gas	líquido	gas
-54	52,299	1446,9	2,5389	0,00069113	0,39387	139,71	241,79	381,5	0,75578	1,8501
-53	55,167	1444,1	2,6683	0,00069248	0,37478	140,79	241,19	381,98	0,76067	1,8562
-52	58,158	1441,3	2,8028	0,00069383	0,35679	141,87	240,59	382,46	0,76555	1,8535
-51	61,278	1438,4	2,9426	0,0006952	0,33983	142,95	239,99	382,94	0,77041	1,8507
-50	64,53	1435,6	3,0879	0,00069657	0,32385	144,03	239,39	383,42	0,77525	1,848
-49	67,919	1432,8	3,2387	0,00069796	0,30876	145,11	238,78	383,89	0,78007	1,8454
-48	71,448	1429,9	3,3953	0,00069935	0,29453	146,19	238,18	384,37	0,78488	1,8428
-47	75,121	1427,0	3,5578	0,00070075	0,28108	147,27	237,57	384,84	0,78967	1,8402
-46	78,943	1424,2	3,7262	0,00070216	0,26837	148,36	236,96	385,32	0,79444	1,8376
-45	82,917	1421,3	3,9009	0,00070358	0,25635	149,44	236,35	385,79	0,79919	1,8351
-44	87,049	1418,4	4,082	0,00070501	0,24498	150,53	235,73	386,26	0,80393	1,8327
-43	91,341	1415,5	4,2696	0,00070645	0,23422	151,62	235,11	386,73	0,80866	1,8302
-42	95,8	1412,6	4,4638	0,0007079	0,22407	152,7	234,5	387,2	0,81336	1,8278
-41	100,43	1409,7	4,6649	0,00070936	0,21437	153,8	233,86	387,66	0,81806	1,8255
-40	105,23	1406,8	4,873	0,00071083	0,20521	154,89	233,24	388,13	0,82274	1,8231
-39	110,21	1403,9	5,0883	0,00071231	0,19653	155,98	232,61	388,59	0,8274	1,8208
-38	115,38	1401,0	5,3109	0,0007138	0,18829	157,07	231,99	389,06	0,83205	1,8186
-37	120,73	1398,0	5,5411	0,0007153	0,18047	158,17	231,35	389,52	0,83668	1,8163
-36	126,28	1395,1	5,779	0,00071681	0,17304	159,27	230,7	389,97	0,8413	1,8141
-35	132,03	1392,1	6,0247	0,00071834	0,16598	160,37	230,06	390,43	0,84591	1,812
-34	137,97	1389,1	6,2786	0,00071987	0,15927	161,47	229,42	390,89	0,8505	1,8098
-33	144,13	1386,2	6,5407	0,00072142	0,15289	162,57	228,77	391,34	0,85508	1,8077
-32	150,5	1383,2	6,8113	0,00072297	0,14682	163,67	228,12	391,79	0,85964	1,8056
-31	157,08	1380,2	7,0905	0,00072454	0,14103	164,78	227,46	392,24	0,86419	1,8036
-30	163,89	1377,2	7,3785	0,00072612	0,13553	165,88	226,81	392,69	0,86873	1,8015
-29	170,92	1374,2	7,6756	0,00072772	0,13028	166,99	226,15	393,14	0,87326	1,7995
-28	178,19	1371,1	7,9819	0,00072932	0,12528	168,1	225,48	393,58	0,87777	1,7975
-27	185,69	1368,1	8,2976	0,00073094	0,12052	169,21	224,82	394,03	0,88228	1,7956
-26	193,44	1365,0	8,623	0,00073258	0,11597	170,33	224,14	394,47	0,88677	1,7937
-25	201,43	1362,0	8,9582	0,00073422	0,11163	171,44	223,46	394,9	0,89125	1,7918
-24	209,68	1358,9	9,3035	0,00073588	0,10749	172,56	222,78	395,34	0,89571	1,7899
-23	218,19	1355,8	9,6591	0,00073755	0,10353	173,68	222,09	395,77	0,90017	1,788
-22	226,96	1352,7	10,025	0,00073923	0,099749	174,8	221,41	396,21	0,90462	1,7862
-21	236,0	1349,6	10,402	0,00074093	0,096135	175,92	220,72	396,64	0,90905	1,7844
-20	245,31	1346,5	10,79	0,00074265	0,092681	177,04	220,02	397,06	0,91347	1,7826
-19	254,91	1343,4	11,189	0,00074438	0,089376	178,17	219,32	397,49	0,91789	1,7808
-18	264,79	1340,3	11,599	0,00074612	0,086214	179,3	218,61	397,91	0,92229	1,7791
-17	274,96	1337,1	12,021	0,00074788	0,083188	180,43	217,9	398,33	0,92668	1,7774
-16	285,43	1334,0	12,455	0,00074965	0,08029	181,56	217,19	398,75	0,93107	1,7757
-15	296,2	1330,8	12,901	0,00075144	0,077514	182,7	216,46	399,16	0,93544	1,774
-14	307,28	1327,6	13,359	0,00075324	0,074854	183,83	215,74	399,57	0,9398	1,7723
-13	318,67	1324,4	13,83	0,00075506	0,072305	184,97	215,01	399,98	0,94416	1,7706
-12	330,38	1321,2	14,314	0,00075689	0,06986	186,11	214,28	400,39	0,9485	1,769
-11	342,42	1318,0	14,811	0,00075875	0,067515	187,26	213,54	400,8	0,95284	1,7674
-10	354,79	1314,7	15,322	0,00076062	0,065266	188,4	212,8	401,2	0,95717	1,7658
-9	367,49	1311,5	15,846	0,00076251	0,063106	189,55	212,05	401,6	0,96149	1,7642
-8	380,54	1308,2	16,384	0,00076441	0,061033	190,7	211,29	401,99	0,9658	1,7627
-7	393,94	1304,9	16,937	0,00076634	0,059042	191,86	210,52	402,38	0,9701	1,7611



Temp. °C	Presión kPa	Densidad kg/m ³		Volumen m ³ /kg		Entalpia kJ/kg		Entropía kJ/kg K		
		Líquido	gas	Líquido	gas	Líquido	Intento	gas	Líquido	gas
-6	407,69	1301,6	17,504	0,00076828	0,057129	193,01	209,76	402,77	0,97439	1,7596
-5	421,8	1298,3	18,086	0,00077024	0,055291	194,17	208,99	403,16	0,97868	1,7581
-4	436,28	1295,0	18,683	0,00077222	0,053524	195,33	208,22	403,55	0,98296	1,7566
-3	451,13	1291,6	19,296	0,00077421	0,051825	196,49	207,44	403,93	0,98723	1,7551
-2	466,36	1288,3	19,924	0,00077623	0,050191	197,66	206,64	404,3	0,99149	1,7536
-1	481,98	1284,9	20,569	0,00077827	0,048618	198,83	205,85	404,68	0,99575	1,7521
0	497,99	1281,5	21,229	0,00078033	0,047105	200	205,05	405,05	1,00	1,7507
1	514,39	1278,1	21,907	0,0007824	0,045647	201,17	204,25	405,42	1,0042	1,7492
2	531,2	1274,7	22,602	0,0007845	0,044244	202,35	203,43	405,78	1,0085	1,7478
3	548,42	1271,3	23,314	0,00078663	0,042893	203,53	202,61	406,14	1,0127	1,7464
4	566,05	1267,8	24,044	0,00078877	0,04159	204,71	201,79	406,5	1,0169	1,745
5	584,11	1264,3	24,792	0,00079094	0,040335	205,9	200,95	406,85	1,0212	1,7436
6	602,59	1260,8	25,559	0,00079313	0,039125	207,09	200,11	407,2	1,0254	1,7422
7	621,51	1257,3	26,345	0,00079534	0,037958	208,28	199,26	407,54	1,0296	1,7409
8	640,88	1253,8	27,15	0,00079758	0,036833	209,47	198,42	407,89	1,0338	1,7395
9	660,68	1250,3	27,975	0,00079984	0,035747	210,67	197,55	408,22	1,038	1,7381
10	680,95	1246,7	28,82	0,00080213	0,034699	211,87	196,69	408,56	1,0422	1,7368
11	701,67	1243,1	29,685	0,00080444	0,033687	213,07	195,82	408,89	1,0463	1,7355
12	722,86	1239,5	30,572	0,00080678	0,03271	214,28	194,93	409,21	1,0505	1,7341
13	744,53	1235,9	31,48	0,00080914	0,031767	215,49	194,04	409,53	1,0547	1,7328
14	766,68	1232,2	32,41	0,00081154	0,030855	216,7	193,15	409,85	1,0589	1,7315
15	789,31	1228,6	33,362	0,00081396	0,029974	217,92	192,24	410,16	1,063	1,7302
16	812,44	1224,9	34,337	0,00081641	0,029123	219,14	191,33	410,47	1,0672	1,7289
17	836,07	1221,2	35,336	0,00081889	0,0283	220,36	190,42	410,78	1,0714	1,7276
18	860,2	1217,4	36,358	0,0008214	0,027504	221,59	189,48	411,07	1,0755	1,7263
19	884,85	1213,7	37,405	0,00082394	0,026734	222,82	188,55	411,37	1,0797	1,725
20	910,02	1209,9	38,477	0,00082651	0,025989	224,06	187,6	411,66	1,0838	1,7238
21	935,72	1206,1	39,575	0,00082911	0,025269	225,3	186,64	411,94	1,088	1,7225
22	961,95	1202,3	40,698	0,00083175	0,024571	226,54	185,68	412,22	1,0921	1,7212
23	988,72	1198,4	41,849	0,00083442	0,023896	227,78	184,72	412,5	1,0962	1,7199
24	1016,0	1194,6	43,027	0,00083713	0,023241	229,04	183,73	412,77	1,1004	1,7187
25	1043,9	1190,7	44,232	0,00083987	0,022608	230,29	182,74	413,03	1,1045	1,7174
26	1072,4	1186,7	45,467	0,00084265	0,021994	231,55	181,74	413,29	1,1086	1,7162
27	1101,4	1182,8	46,73	0,00084547	0,021399	232,81	180,73	413,54	1,1128	1,7149
28	1130,9	1178,8	48,024	0,00084833	0,020823	234,08	179,71	413,79	1,1169	1,7136
29	1161,1	1174,8	49,349	0,00085123	0,020264	235,35	178,68	414,03	1,121	1,7124
30	1191,9	1170,7	50,705	0,00085416	0,019722	236,62	177,64	414,26	1,1252	1,7111
31	1223,2	1166,7	52,093	0,00085714	0,019196	237,9	176,59	414,49	1,1293	1,7099
32	1255,2	1162,6	53,515	0,00086017	0,018686	239,19	175,52	414,71	1,1334	1,7086
33	1287,8	1158,4	54,971	0,00086324	0,018191	240,48	174,45	414,93	1,1375	1,7074
34	1321,0	1154,3	56,461	0,00086635	0,017711	241,77	173,37	415,14	1,1417	1,7061
35	1354,8	1150,1	57,988	0,00086952	0,017245	243,07	172,27	415,34	1,1458	1,7048
36	1389,2	1145,8	59,551	0,00087273	0,016792	244,38	171,16	415,54	1,1499	1,7036
37	1424,3	1141,6	61,152	0,00087599	0,016353	245,69	170,03	415,72	1,1541	1,7023
38	1460,1	1137,3	62,792	0,00087931	0,015926	247	168,91	415,91	1,1582	1,701
39	1496,5	1132,9	64,472	0,00088268	0,015511	248,32	167,76	416,08	1,1623	1,6998
40	1533,6	1128,5	66,193	0,00088611	0,015107	249,65	166,6	416,25	1,1665	1,6985
41	1571,3	1124,1	67,956	0,00088959	0,014715	250,98	165,42	416,4	1,1706	1,6972



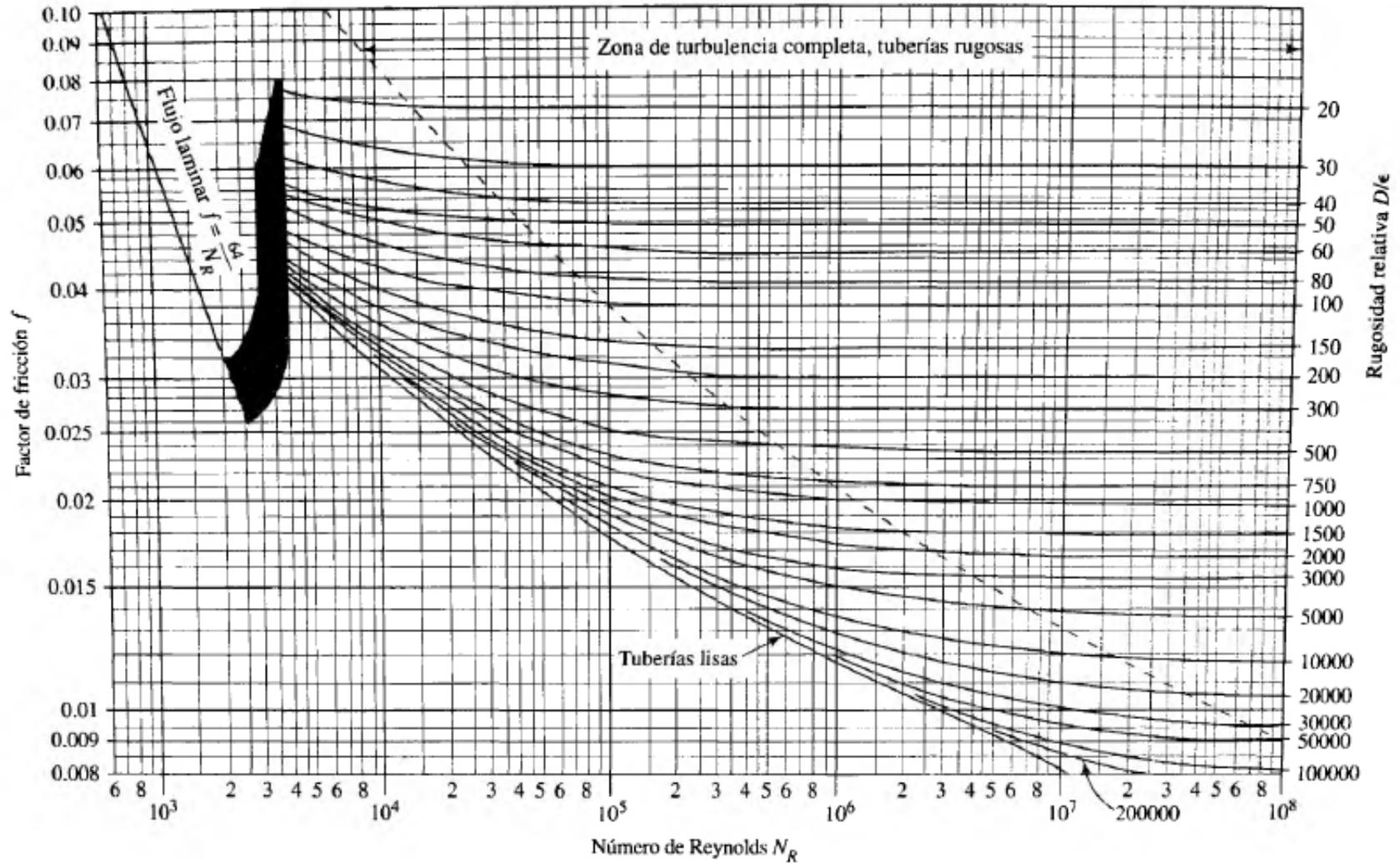
Temp. °C	Presión kPa	Densidad kg/m ³		Volumen m ³ /kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K	
		líquido	gas	líquido	gas	líquido	líquido	gas	líquido	gas
42	1609,8	1119,6	69,762	0,00089314	0,014334	252,32	164,23	416,55	1,1747	1,6959
43	1648,9	1115,1	71,614	0,00089674	0,013964	253,66	163,04	416,7	1,1789	1,6946
44	1688,7	1110,6	73,511	0,00090042	0,013603	255,01	161,82	416,83	1,183	1,6933
45	1729,2	1106,0	75,457	0,00090416	0,013253	256,36	160,59	416,95	1,1872	1,6919
46	1770,4	1101,4	77,451	0,00090797	0,012911	257,73	159,34	417,07	1,1913	1,6906
47	1812,4	1096,7	79,496	0,00091185	0,012579	259,1	158,08	417,18	1,1955	1,6893
48	1855,1	1091,9	81,593	0,0009158	0,012256	260,47	156,8	417,27	1,1997	1,6879
49	1898,5	1087,1	83,745	0,00091984	0,011941	261,85	155,51	417,36	1,2038	1,6866
50	1942,7	1082,3	85,952	0,00092396	0,011634	263,25	154,19	417,44	1,208	1,6852
51	1987,6	1077,4	88,217	0,00092816	0,011336	264,64	152,86	417,5	1,2122	1,6838
52	2033,3	1072,4	90,542	0,00093245	0,011045	266,05	151,51	417,56	1,2164	1,6824
53	2079,8	1067,4	92,929	0,00093683	0,010761	267,46	150,14	417,6	1,2206	1,681
54	2127,0	1062,3	95,381	0,00094131	0,010484	268,89	148,74	417,63	1,2248	1,6795
55	2175,1	1057,2	97,899	0,0009459	0,010215	270,32	147,33	417,65	1,2291	1,6781
56	2223,9	1052,0	100,49	0,00095058	0,0099515	271,76	145,9	417,66	1,2333	1,6766
57	2273,6	1046,7	103,15	0,00095538	0,0096949	273,21	144,44	417,65	1,2376	1,6751
58	2324,0	1041,3	105,88	0,0009603	0,0094444	274,66	142,97	417,63	1,2418	1,6736
59	2375,3	1035,9	108,7	0,00096534	0,0092	276,13	141,47	417,6	1,2461	1,672
60	2427,5	1030,4	111,59	0,00097051	0,0089613	277,61	139,94	417,55	1,2504	1,6705
61	2480,5	1024,8	114,57	0,00097582	0,0087281	279,1	138,39	417,49	1,2547	1,6689
62	2534,3	1019,1	117,64	0,00098127	0,0085004	280,6	136,81	417,41	1,2591	1,6672
63	2589,1	1013,3	120,81	0,00098687	0,0082778	282,12	135,19	417,31	1,2634	1,6656
64	2644,7	1007,4	124,07	0,00099263	0,0080602	283,64	133,56	417,2	1,2678	1,6639
65	2701,2	1001,4	127,43	0,00099857	0,0078475	285,18	131,88	417,06	1,2722	1,6622
66	2758,6	995,3	130,9	0,010047	0,0076393	286,74	130,17	416,91	1,2766	1,6604
67	2816,9	989,1	134,49	0,010111	0,0074357	288,3	128,44	416,74	1,281	1,6586
68	2876,1	982,8	138,19	0,010175	0,0072363	289,88	126,67	416,55	1,2855	1,6568
69	2936,3	976,3	142,02	0,010242	0,007041	291,48	124,85	416,33	1,29	1,6549
70	2997,4	969,7	145,99	0,010312	0,0068497	293,1	122,99	416,09	1,2945	1,6529
71	3059,5	963,0	150,1	0,010384	0,0066622	294,73	121,1	415,83	1,2991	1,651
72	3122,5	956,1	154,36	0,010459	0,0064783	296,38	119,16	415,54	1,3037	1,6489
73	3186,6	949,0	158,78	0,010537	0,0062979	298,05	117,17	415,22	1,3083	1,6468
74	3251,6	941,8	163,38	0,010618	0,0061208	299,74	115,13	414,87	1,313	1,6446
75	3317,7	934,4	168,16	0,010703	0,0059468	301,46	113,03	414,49	1,3177	1,6424
76	3384,8	926,7	173,14	0,010791	0,0057758	303,2	110,88	414,08	1,3225	1,6401
77	3452,9	918,9	178,33	0,010883	0,0056075	304,96	108,66	413,62	1,3273	1,6377
78	3522,2	910,8	183,76	0,01098	0,0054419	306,76	106,37	413,13	1,3322	1,6352
79	3592,4	902,4	189,44	0,011082	0,0052786	308,58	104,02	412,6	1,3372	1,6326
80	3663,8	893,7	195,4	0,011189	0,0051176	310,44	101,57	412,01	1,3423	1,6299
81	3736,3	884,8	201,67	0,011302	0,0049586	312,34	99,04	411,38	1,3474	1,627
82	3809,9	875,4	208,28	0,011423	0,0048013	314,27	96,41	410,68	1,3526	1,6241
83	3884,7	865,7	215,26	0,011551	0,0046455	316,25	93,68	409,93	1,3579	1,621
84	3960,6	855,5	222,67	0,011689	0,004491	318,29	90,81	409,1	1,3634	1,6177
85	4037,8	844,8	230,56	0,011837	0,0043373	320,38	87,81	408,19	1,369	1,6142
86	4116,1	833,6	239,0	0,011997	0,004184	322,54	84,64	407,18	1,3747	1,6104
87	4195,7	821,6	248,09	0,012172	0,0040307	324,77	81,3	406,07	1,3807	1,6064
88	4276,6	808,8	257,94	0,012364	0,0038768	327,09	77,74	404,83	1,3869	1,6021
89	4358,8	795,1	268,72	0,012578	0,0037214	329,52	73,93	403,45	1,3933	1,5974

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Temp. °C	Presión kPa	Densidad kg/m ³		Volumen m ³ /kg		Entalpia kJ/kg			Entropía kJ/kg K	
		líquido	gas	líquido	gas	líquido	latente	gas	líquido	gas
90	4442,3	780,1	280,63	0,0012819	0,0035635	332,09	69,78	401,87	1,4001	1,5922

APENDICE C. Diagrama de Moody para establecer el factor de fricción en un ducto (Mott, 2006)



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

APENDICE D. Programación del Arduino uno para la medición del sensor de flujo

```

#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd (12, 11, 6, 5, 4, 3);           // Pines a utilizar con la pantalla LCD
volatile int pulsos;                             // Variable que lleva el conteo de pulsos
float lpm;                                       // Variable que guarda el flujo en litros por minuto
unsigned char sensorflujo = 2;                  // Define el pin que recibe los pulsos del sensor
float tiempoanterior;
float pulsosacumulados;
float litros;

void flujo(){                                    // Función que realiza el incremento de pulsos
  pulsos++;
}

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  lcd.begin(16, 2);
  pinMode(sensorflujo, INPUT);                  // Se define el pin sensorflujo como entrada
  attachInterrupt(0, flujo, RISING);           // Activar interrupción 0 y ejecuta la función flujo por cada interrupción
  interrupts();
  tiempoanterior= millis();                    // guarda el tiempo inicial en la variable tiempoanterior
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("LPM:");
}

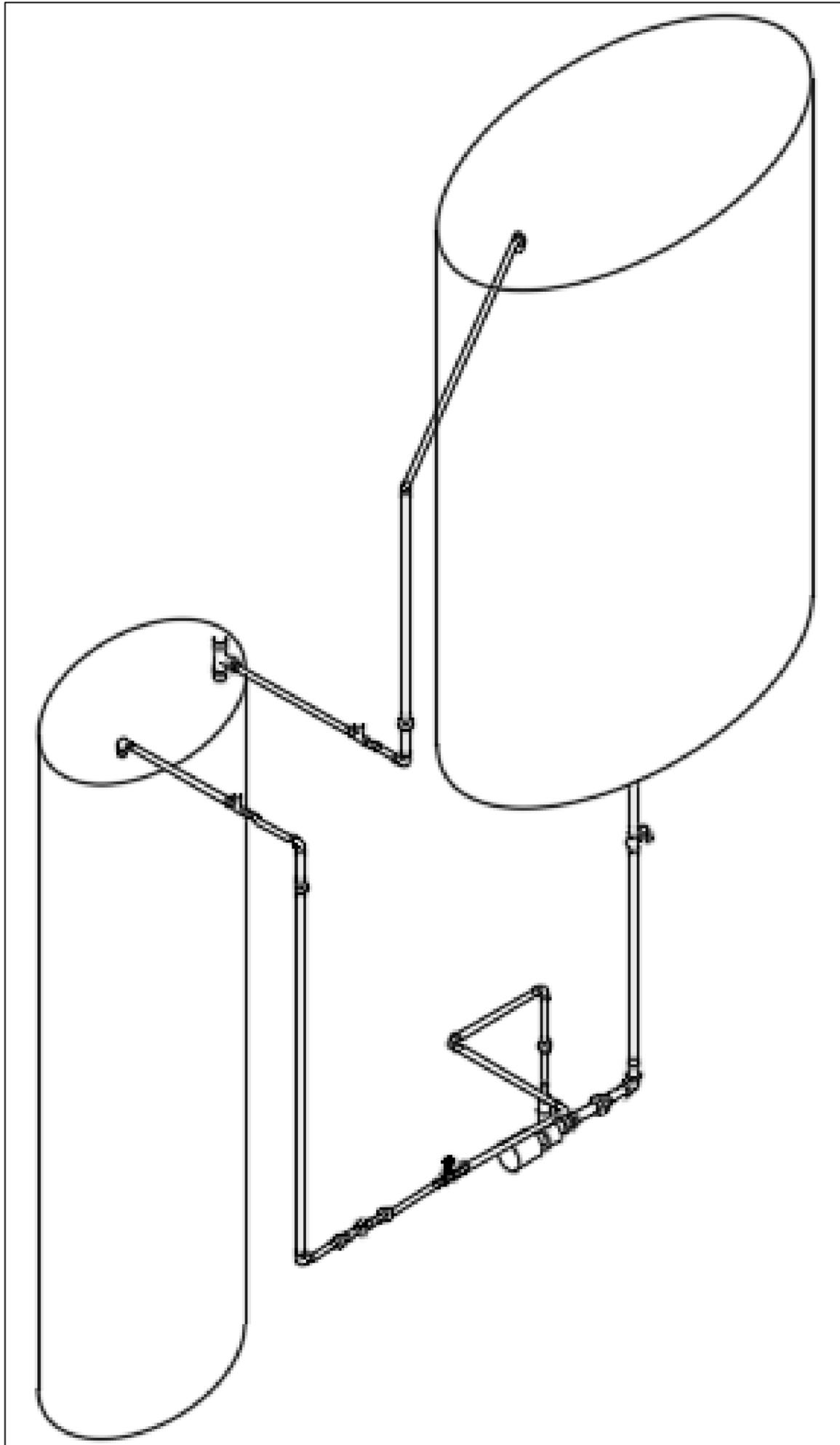
```

```

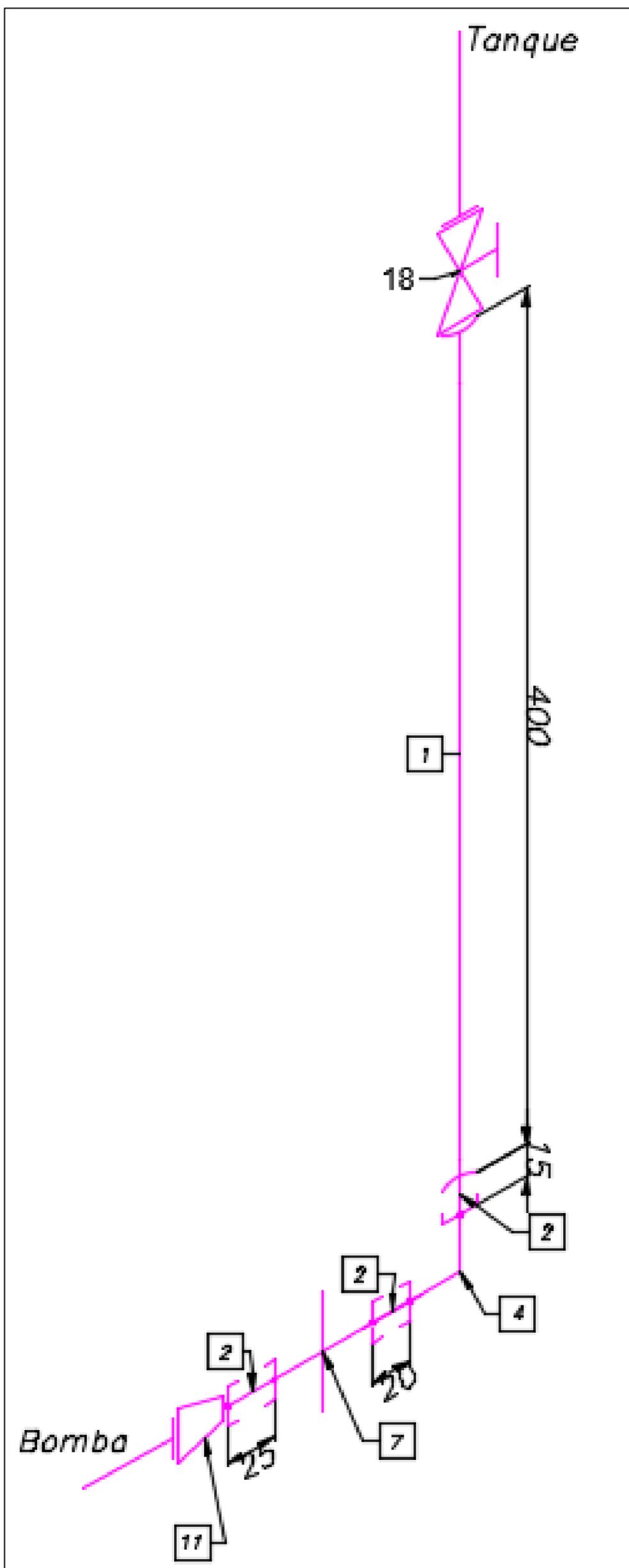
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  if(millis() - tiempoanterior > 1000){        // Condición: si el tiempo actual supera 1s ejecuta las siguientes líneas
    tiempoanterior = millis();
    pulsosacumulados = pulsos;
    lpm = pulsos / 6.67;                       // Calcula el flujo según el número de pulsos
    lcd.clear();                               // Comandos para la pantalla LCD
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("LPM:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(lpm);                            // Comando que muestra el valor del flujo en la pantalla
    pulsos = 0;                               // reinicia el conteo de pulsos
  }
}

```

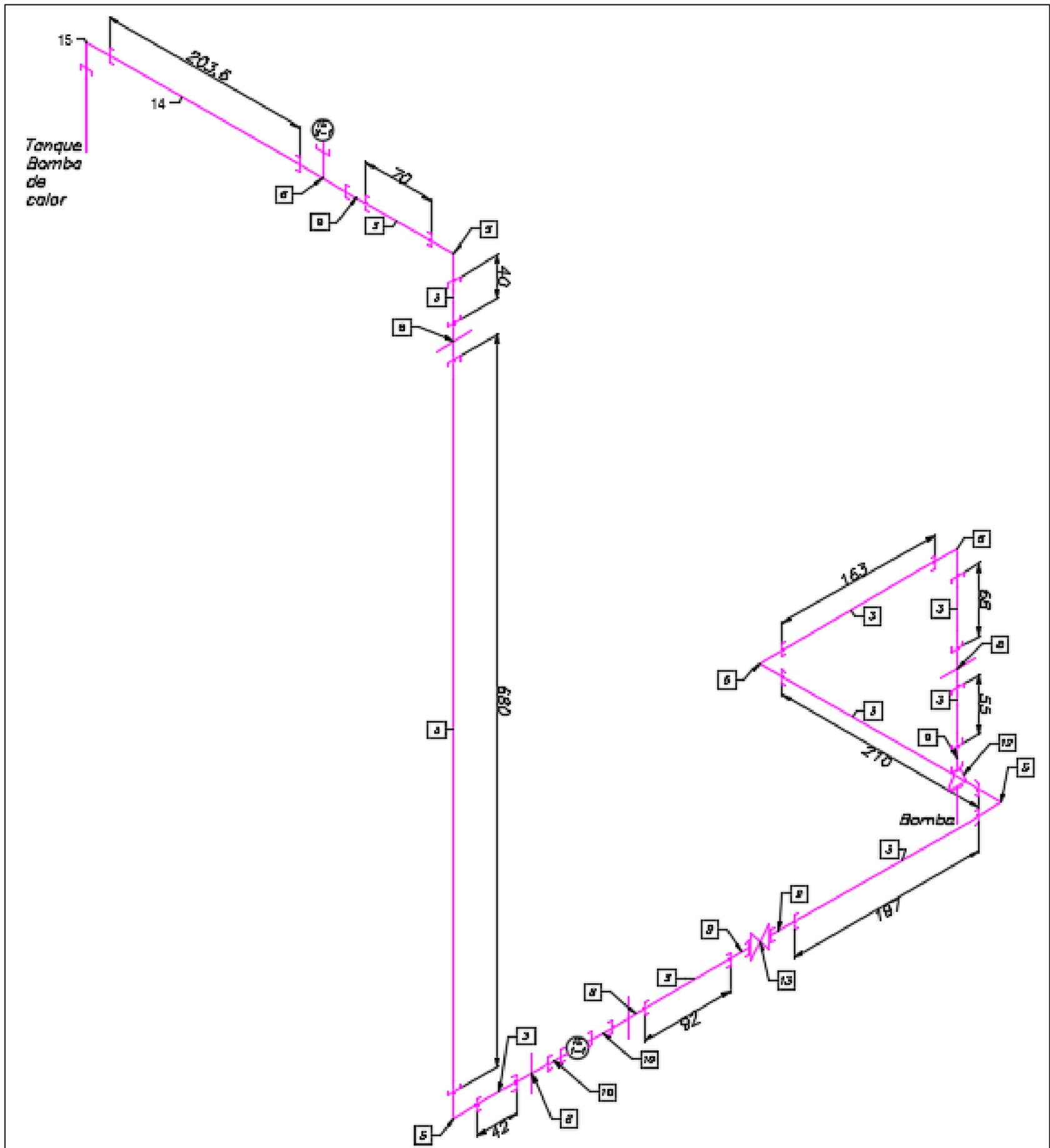
APÉNDICE E. Esquemas de tubería
Presentación 3D isométrica del montaje mecánico



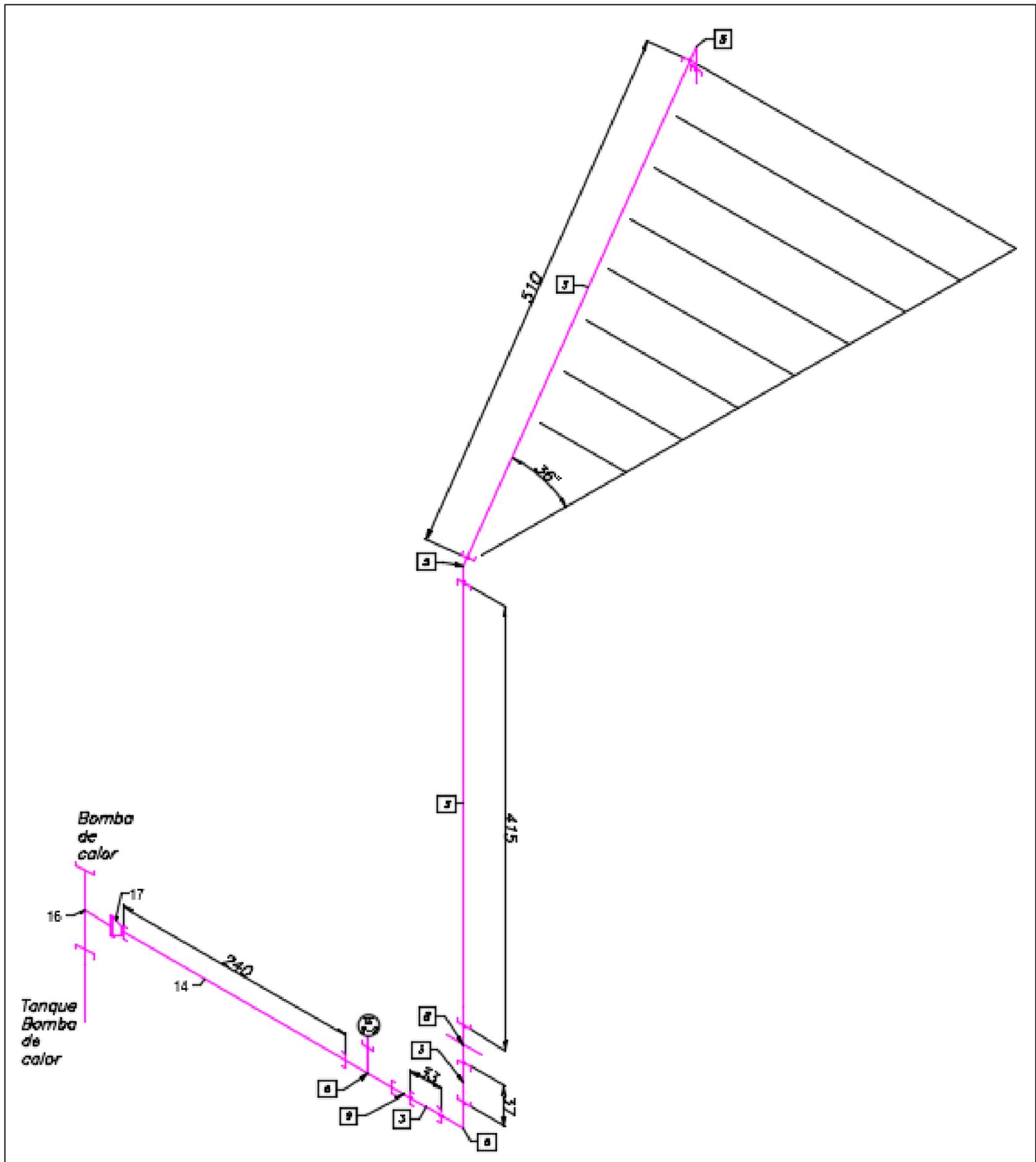
Plano isométrico de la línea de succión



Plano isométrico de la línea de descarga



Plano isométrico de la línea de salida del intercambiador de calor



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Listado de insumos

Item	Cantidad	Diámetro	Descripción
1	400 mm	3/4"	Manguera transparente flexible
2	60 mm	3/4"	Tubo 3/4" sch 40; material PVC
3	2612 mm	1/2"	Tubo 1/2" sch 40; material PVC
4	1	3/4"	Codo 90° corto sch 40, Liso - Liso; material PVC
5	8	1/2"	Codo 90° corto sch 40, Liso - Liso; material PVC
6	2	1/2"	Conector Tee sch 40, R. hembra - R. hembra - R. hembra; material PVC
7	1	3/4"	Unión universal sch 40, Liso - Liso; material PVC
8	5	1/2"	Unión universal sch 40, Liso - Liso; material PVC
9	5	1/2"	Unión Liso - R. macho sch 40; material PVC
10	2	1/2"	Unión Liso - R. hembra sch 40; material PVC
11	1	3/4" x 1"	Ampliación 3/4" - 1" sch 40, Liso - R. macho; material PVC
12	1	1" x 1/2"	Reducción 1" - 1/2" sch 40, R. macho - Liso; material PVC
13	1	1/2"	Válvula de compuerta; R. hembra - R. hembra; material bronce
14	443,6 mm	1/2"	Tubo 1/2"; material acero galvanizado
15	1	1/2"	Codo 90° corto, R. hembra - R. hembra; material acero galvanizado
16	1	3/4"	Conector Tee, R. hembra - R. hembra - R. hembra; material acero galvanizado
17	1	3/4" x 1/2"	Reducción 3/4" - 1/2", R. macho - R. hembra; material acero galvanizado
18	1	3/4"	Válvula de bola; R. hembra - R. hembra; material acero

APENDICE F. Diagrama de conexión eléctrica

Diagrama de Control

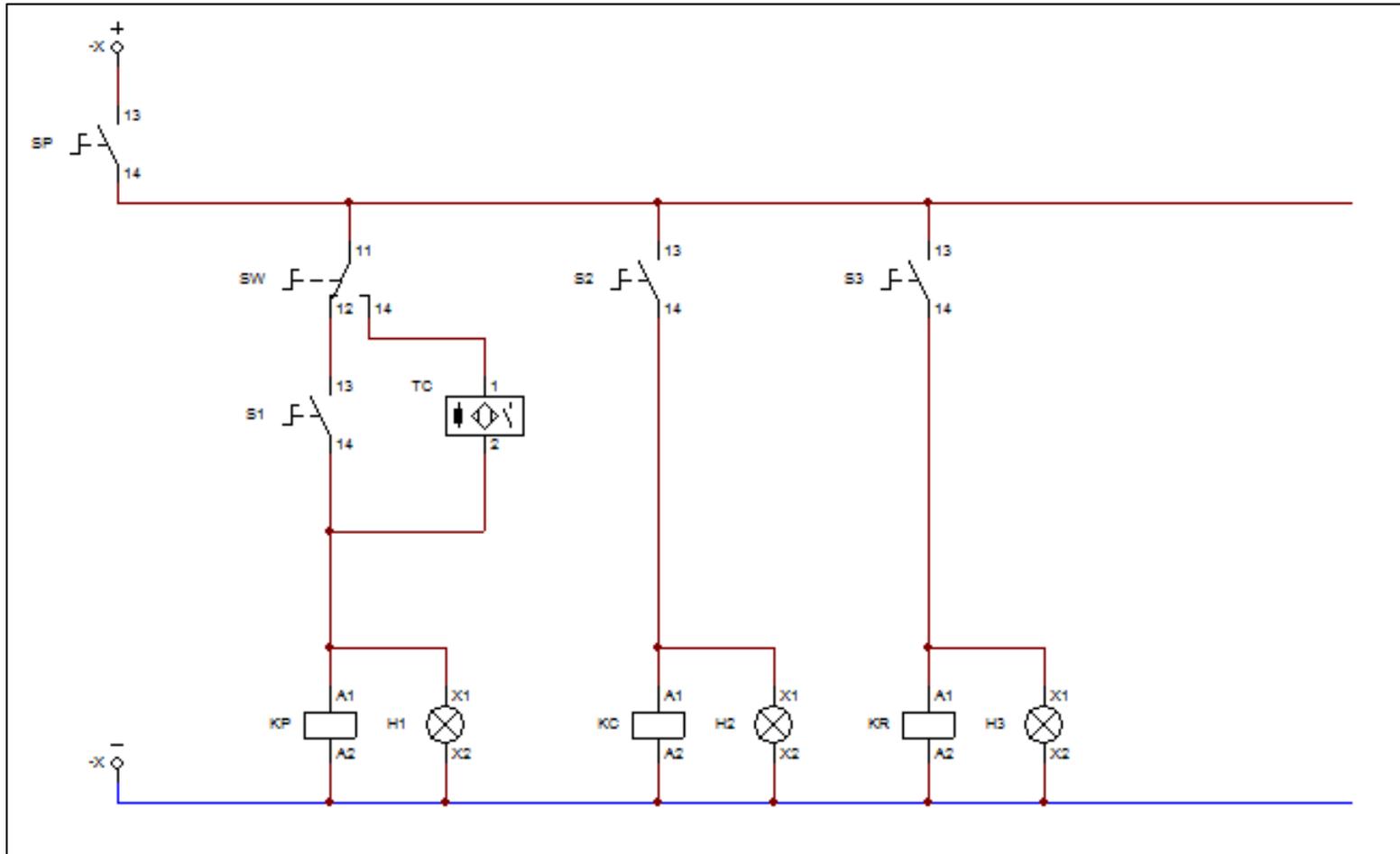
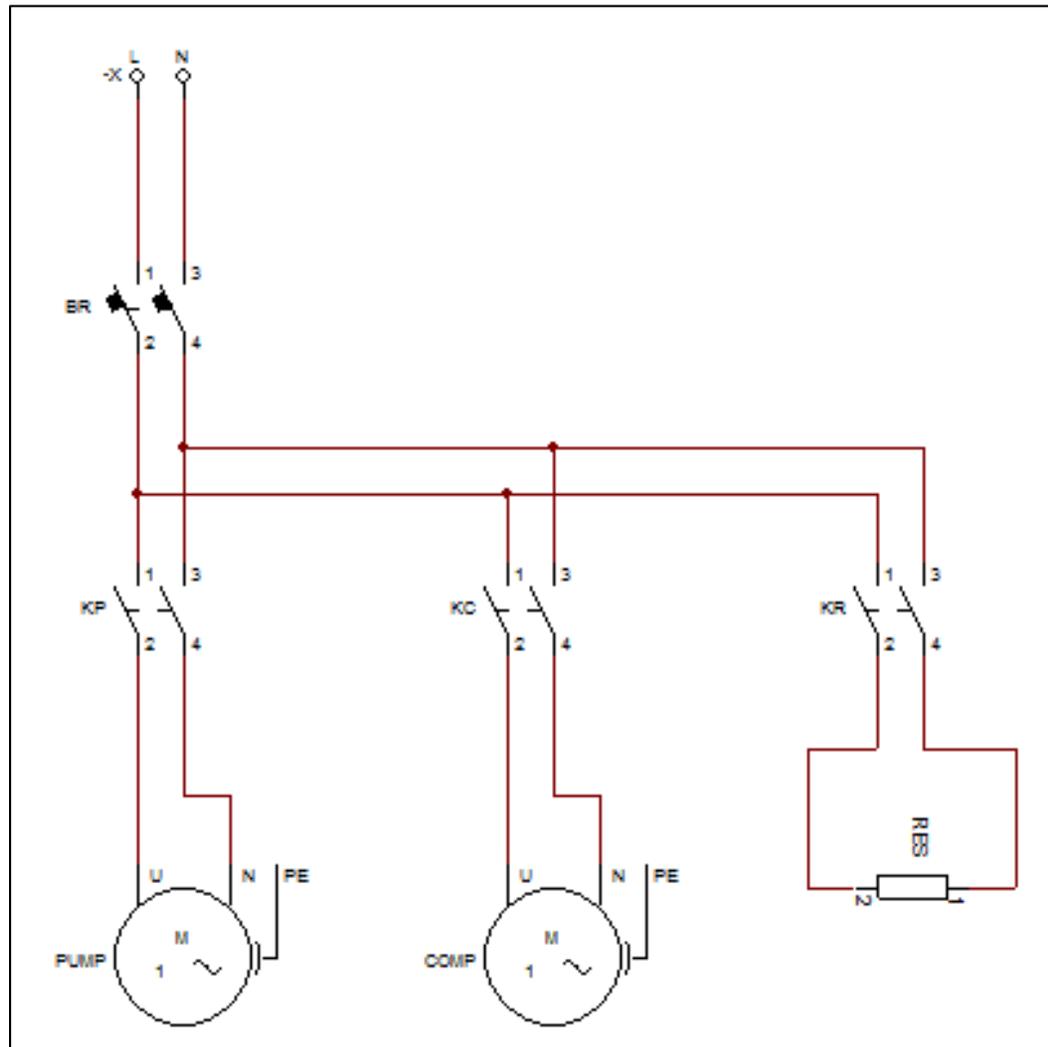


Diagrama de Potencia



FIRMA ESTUDIANTES Biviana M. Agudelo V.

Se entrega proyecto por 1ª vez, para evaluación por jurado

FIRMA ASESOR *[Signature]*

FECHA ENTREGA: Agosto 28 de 2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____