



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Bomba de calor: Herramienta
Didáctica para el Laboratorio
de Termodinámica**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Mecánica

P R E S E N T A

Zoé Mariana Sánchez Mariano

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Eduardo Bernal Vargas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

DEDICATORIA

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con libertades, pero, al fin y al cabo, me motivaron constantemente para alcanzar mis sueños y metas

A cada una de las personas que han estado conmigo, a las que me han apoyado y me motivan día con día, a todos y cada uno de ustedes les dedico con mucho cariño y esfuerzo mi trabajo de tesis.

“Todos nuestros sueños se pueden hacer realidad si tenemos el coraje de perseguirlos.”

(Walt Disney)

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México le agradezco por darme los mejores años de mi vida, por ser mi segundo hogar y brindarme educación desde el 2013 al permitirme ingresar a bachillerato en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur y posteriormente darme la oportunidad de crecer en mi vida profesional.

A la Facultad de Ingeniería por permitirme estudiar la licenciatura de mis sueños, Ingeniería Mecánica y por darme la oportunidad de realizar el Servicio Social en sus instalaciones.

A cada uno de los docentes que me acompañaron durante el proceso para obtener mi título universitario les agradezco por brindarme educación de calidad, por su tiempo, su dedicación, su apoyo y por el amor, motivación y sabiduría que compartían con los alumnos en cada una de las materias impartidas, principalmente le agradezco al M.C. Osvaldo Ruiz Cervantes, al Dr. Marco A. Reyes Huesca y al Dr. Rubén Ávila Rodríguez.

Agradezco al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) por abrirme las puertas para el desarrollo de este trabajo.

A mi asesor de tesis el M.I. Eduardo Bernal Vargas quien con su dirección, conocimiento, tiempo, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este proyecto.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza PAPIME-103120 de la DGAPA, por el apoyo durante la elaboración de este proyecto.

A toda mi familia por su apoyo incondicional.

Quiero agradecer infinitamente a mis padres que sin su apoyo no hubiera sido posible cumplir este sueño, no hay forma de agradecer su sacrificio, esfuerzo, las noches de desvelo, su ayuda en cada uno de mis proyectos y en la vida, gracias por motivarme, por su cariño, por confiar y creer en mí, por sus consejos, los valores y principios que me han inculcado, este logro también es de ustedes.

A mi madre y hermana que cuando me veían en situaciones estresantes siempre hacían lo posible por ayudarme a distraerme y relajarme.

A mi padre que con su ayuda y conocimiento muchos proyectos fueron un éxito.

A mis hermanos, Laura, Saúl y Alejandro por su cariño, apoyo incondicional, por motivarme a ser mejor día con día, a no darme por vencida y luchar por mis sueños, les agradezco porque

siempre me han demostrado lo orgullosos que están, por llenarme de alegría día tras día, por todos los consejos brindados, por compartir tiempo conmigo, gracias por ser uno de los pilares más importantes en mi vida.

Estoy sumamente agradecida con cada una de las personas que han formado parte de mi vida y de este proceso, por motivarme y alentarme, por todo el apoyo que me han ofrecido, por hacer de mí una mejor persona, por ayudarme a no darme por vencida, por la confianza y el cariño que me han brindado, por demostrarme lo orgullosos que están de mí, gracias por todo.

A quien sin saber de Ingeniería me acompañó en noches de desvelo para terminar esta tesis, a quien en el transcurso de la redacción y conclusión de este documento me dio todo su apoyo y confianza para mostrar cada uno de mis avances, gracias por todo el apoyo y motivación en estos más de dos años R.

A Jessica, Karen y Alejandra por su apoyo incondicional, por su cariño y por siempre motivarme e impulsarme a ser mejor tanto personalmente como académicamente, gracias por confiar en mí y principalmente gracias por estar en todo momento.

A las personas que conocí a lo largo de mi estancia en la universidad, en especial a Lisset, Gabriela, Yesica, Daniela, Lisbeth y Mónica por vivir una de las mejores etapas conmigo, por compartir los momentos de estrés, por la motivación mutua, sin ustedes esta etapa no hubiera sido tan buena.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
OBJETIVOS	8
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS PARTICULARES	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA: EQUIPOS DIDÁCTICOS COMERCIALES TERMIDINÁMICOS	11
a) <i>GUNT HAMBURG ET 101 Circuito de Refrigeración por Compresión de Vapor</i>	11
b) <i>GUNT HAMBURG ET 350 Cambios de Estado en el Circuito de Refrigeración</i>	12
c) <i>GUNT HAMBURG ET 102 Bomba de Calor</i>	14
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 CONCEPTO DE BOMBA DE CALOR	16
1.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA BOMBA DE CALOR	17
1.2.1 <i>Compresor</i>	17
1.2.1.1 <i>Compresor Rotatorio</i>	18
1.2.1.1.1 <i>Compresor de Paletas Deslizantes</i>	18
1.2.1.1.2 <i>Compresor de Tornillo</i>	19
1.2.1.2 <i>Compresor Reciprocante</i>	19
1.2.1.2.1 <i>Compresor de Pistón Cilindro</i>	19
1.2.1.3 <i>Compresor Centrifugo</i>	20
1.2.2 <i>Condensador</i>	20
1.2.2.1 <i>Enfriado por Aire</i>	20
1.2.2.2 <i>Enfriado por Agua</i>	21
1.2.2.2.1 <i>Tubo dentro de Tubo</i>	21
1.2.3 <i>Dispositivo de expansión</i>	22
1.2.3.1 <i>Válvula termostática</i>	22
1.2.4 <i>Deshidratador</i>	23
1.2.5 <i>Evaporador</i>	23
1.2.5.1 <i>Serpentín</i>	24
1.3 ASPECTOS TERMIDINAMICOS	24
1.3.1 <i>Definiciones</i>	24
1.3.1.1 <i>Calor</i>	24

1.3.1.2	Trabajo	25
1.3.1.3	Presión	25
1.3.1.4	Temperatura	26
1.3.1.5	Entalpía	26
1.3.1.6	Entropía	27
1.4	ECUACIONES FUNDAMENTALES	27
1.4.1	Segunda Ley de la Termodinámica	27
1.4.1.1	Maquinas Térmicas	28
1.4.1.2	Eficiencia Térmica	29
1.4.2	Coeficiente de Desempeño en Bombas de Calor	31
1.5	SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	32
1.5.1	Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Vapor	32
1.5.2	Análisis de los Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor	34
1.5.2.1	Cálculo de las Transferencias de Trabajo y Calor	34
1.5.2.1.1	Diagrama T-s	35
1.5.2.1.2	Diagrama P-h	36
1.6	REFRIGERANTES	37
1.6.1	Parámetros de Selección del Refrigerante	37
1.6.1.1	Viscosidad baja	37
1.6.1.2	Conductividad térmica	37
1.6.1.3	Calor latente de vaporización	37
1.6.1.4	Curva de tensión del vapor	37
1.6.1.5	Temperatura crítica	37
1.6.2	Refrigerante R134-a	38
1.6.2.1	Propiedades físicas del Refrigerante 134-a	38
2.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	40
2.1	OBJETIVOS DE DISEÑO	40
2.1.1	Análisis de Necesidades	40
2.2	CONSIDERACIONES PRACTICAS	41
2.2.1	Fácil Instalación y transporte	41
2.2.2	Requerimientos de manufactura e instalación	41
2.3	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO	42

2.3.1 Selección del compresor	42
2.3.2 Selección del control de flujo	42
2.3.3 Selección del evaporador	43
2.3.4 Selección del condensador	44
2.3.5 Instrumentación	45
2.4 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	45
2.4.1 Manufactura de la Estructura	45
2.4.2 Ensamble de tuberías, accesorios y componentes de la bomba de calor	46
3. CÁLCULOS, PRUEBAS Y EXPERIMENTOS	47
3.1 CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LOS SERPENTINES	47
3.1.1 Evaporador	47
3.1.1.1 Longitud del serpentín evaporador	47
3.1.2 Condensador	51
3.1.2.1 Longitud del serpentín condensador	51
3.2 ANÁLISIS ENERGÉTICO EN UN COMPRESOR	54
3.2.1 Balance de energía	55
3.2.2 Balance de entropía	57
4. RESULTADOS	58
4.1 ANÁLISIS ENERGÉTICO EN UN COMPRESOR	58
CONCLUSIONES	60
REFERENCIAS	62
ANEXO I	64
PLANOS DEL EQUIPO	64
ANEXO II	70
PRÁCTICA PROPUESTA	70

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar un equipo didáctico que permita al profesor la impartición de prácticas de laboratorio en el área de Termodinámica de la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Analizar un proceso termodinámico cerrado, dentro del laboratorio de Termodinámica de la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería.
- Desarrollar una bomba de calor como equipo didáctico en el cual el alumno podrá tomar lecturas tanto de presión como de temperatura, con ello podrá realizar el análisis de balance de energía, eficiencia mecánica y eficiencia térmica.

I. INTRODUCCIÓN

La termodinámica es una de las ciencias de la ingeniería más complejas para el estudiante, pero también es una de las ciencias que otorga una mayor cantidad de soluciones a los problemas industriales.

A lo largo del tiempo se han realizado diversos estudios que muestran la dificultad en la comprensión de conceptos teóricos y fenómenos físicos, esta dificultad principalmente es a causa de que la termodinámica es una ciencia empírica por lo que las definiciones teóricas no son suficientes para el entendimiento de los conceptos. Esto provoca una reducción y retraso en el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería en las ciencias básicas, para ello se buscó una solución a este problema la cual es la impartición práctica de los conceptos, la cual se realiza en laboratorios equipados con una variedad de herramientas con las que los estudiantes pueden observar, analizar y comprender con una mayor facilidad la información teórica revisada en aulas.

El objetivo de un ingeniero al estudiar termodinámica es analizar o diseñar sistemas a gran escala, estos sistemas pueden ir desde una máquina de vapor y turbinas, motores, máquinas térmicas, hasta una planta de energía nuclear.

A lo largo de este trabajo se presentará el diseño y desarrollo de un equipo didáctico que permite el análisis de un proceso termodinámico cerrado, de igual manera con este equipo se pretende que los estudiantes de ciencias básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM comprendan y visualicen conceptos y fenómenos termodinámicos. Principalmente se espera que por medio de este equipo el profesor logre la impartición de prácticas de laboratorio en el área termodinámica y con ello los estudiantes encuentren motivación en el estudio de la asignatura al ser ejemplificativo y didáctico.

En el equipo propuesto, el refrigerante es transportado a través de una línea de tubería y en la cual se encuentran cuatro componentes principales, compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador.

Lo relevante del equipo didáctico propuesto es que su manufactura fue realizada en la universidad y las principales ventajas de este sobre los equipos comerciales son el bajo costo y versatilidad para realizar una variedad de prácticas en él.

La presente tesis está compuesta de cuatro capítulos que ayudan a reportar el trabajo realizado. Estos capítulos se abordan de la siguiente manera; en el primer capítulo se plantean aspectos generales de la bomba de calor, esto para comprender los fenómenos físicos que se presentan

en el equipo propuesto, para el análisis del equipo se utilizara la segunda ley de la termodinámica, así como los conceptos básicos de termodinámica que se encuentran descritos en este capítulo.

En el segundo capítulo se abordará el problema que enfrenta el equipo, la identificación de necesidades, los requerimientos de diseño, la descripción detallada del diseño y construcción del equipo, así como los componentes que conforman la bomba de calor y el funcionamiento del prototipo.

El tercer capítulo está dedicado al desarrollo de los experimentos, de igual manera se mencionan las condiciones de operación y las pruebas de los componentes.

Los resultados obtenidos al realizar las pruebas en el prototipo se presentan en el capítulo cuatro.

Por último, se muestran las conclusiones, el trabajo a futuro y los anexos.

Planteamiento del problema

En la Facultad de Ingeniería de la UNAM es indispensable para la formación de los futuros ingenieros complementar los conocimientos teóricos adquiridos en las aulas por medio del estudio práctico de las ciencias para ello se realizan prácticas de laboratorio que permitan observar y experimentar físicamente los fenómenos estudiados. Dichas prácticas se imparten en los laboratorios de ciencias básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y deben tener una constante actualización, principalmente de los equipos de trabajo que deben modernizarse debido a que el avance tecnológico cambia constantemente, de esta forma los estudiantes pueden mantenerse motivados y lograr un gusto por el aprendizaje.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA: EQUIPOS DIDACTICOS COMERCIALES TERMODINÁMICOS

A continuación, se realizó una investigación de equipos termodinámicos comerciales para el aprendizaje de un sistema termodinámico

a) Equipo didáctico: GUNT HAMBURG ET 101 Circuito de refrigeración por compresión de vapor.

La estructura de ET 101 es la de una instalación de refrigeración por compresión sencilla. El evaporador y el condensador están concebidos como serpentín que está sumergido en un depósito lleno de agua, que simula la demanda térmica en el evaporador, y el foco caliente de disipación de calor en el condensador. Tanto la evaporación como la condensación del refrigerante no son visibles en este modelo. Una válvula de expansión termostática sirve de elemento de expansión. Dos manómetros indican las presiones de sistema existentes en el lado de alta y de baja presión. En una escala adicional en el manómetro se indica la temperatura de evaporación del refrigerante. Dos termómetros miden la temperatura del agua en los depósitos. De esta manera se puede calcular qué cantidad de calor es extraída (evaporador, agua fría) y emitida (condensador, agua caliente) al ambiente. Una mirilla muestra el estado de agregación del refrigerante delante de la válvula de expansión.

Este equipo no tiene sistema de adquisición de datos, las medidas de presión se visualizan directamente y las medidas de temperatura se realizan a través de un termómetro portátil adicional.

POTENCIA ABSORBIDA DEL COMPRESOR	104 W
POTENCIA FRIGORÍFICA DEL COMPRESOR	278 W
CILINDRADA DEL COMPRESOR	2.72 cm ³
TEMPERATURA DE EVAPORIZACIÓN	5 °C
TEMPERATURA CONDENSACIÓN	40 °C
MEDIDAS DE LOS DEPOSITOS	4x1700 mL
REFRIGERANTE	R513A
DIMENSIONES	750x360x690 [mm]
PESO	30 kg

Tabla 1.1. Datos técnicos equipo comercial GUNT HAMBURG ET 101. [1]



Figura 1.1. Equipo comercial GUNT HAMBURG ET 101. [1]

b) Equipo didáctico: GUNT ET 350 Cambios de estado en el circuito de refrigeración.

El equipo de ensayo ET 350 representa un típico circuito de refrigeración, compuesto por un compresor de émbolo, condensador, válvula de expansión y evaporador herméticos. El evaporador y el condensador son transparentes, así el proceso de la transición de fase durante la evaporación y condensación se puede observar muy bien. El funcionamiento de la válvula de flotador como válvula de expansión también se puede observar muy bien. Antes de la entrada al evaporador se puede observar el estado de agregación del refrigerante en una mirilla. Un circuito de agua enfría el condensador y/o proporciona la carga de refrigeración para el evaporador. Los caudales del agua de refrigeración y calentamiento y del refrigerante son ajustables. El bajo nivel de presión del refrigerante utilizado posibilita el uso de un evaporador y condensador de vidrio.

Las temperaturas y presiones son registradas e indicadas. Así se pueden leer los datos principales del ciclo e introducir en un diagrama log p-h. Además, se indican la potencia del compresor, así como los caudales de los flujos de agua y del refrigerante.

CAPACIDAD DEL EVAPORADOR	104 W
CAPACIDAD DEL CONDENSADOR	278 W
CILINDRADA DEL COMPRESOR	2.72 cm ³
REFRIGERANTE	R1233zd
DIMENSIONES	1200x500x900 [mm]
PESO	110 kg
TOMA DE AGUA	Mínimo: 48 L/h
TEMPERATURA DEL AGUA	Máximo: 16 °C

Tabla 1.2. Datos técnicos equipo comercial GUNT HAMBURG ET 350. [1]



Figura 1.2. Equipo comercial GUNT HAMBURG ET 350. [1]

c) Equipo didáctico: GUNT ET 102 Bomba de Calor.

El circuito de la bomba de calor consiste en un compresor, un condensador con soplante, una válvula de expansión termostática y un cambiador de calor de espiralado coaxial como condensador.

El vapor comprimido del refrigerante condensa en el tubo exterior del condensador y transfiere calor al agua que se encuentra dentro del tubo interior. El refrigerante líquido se evapora a baja presión en el evaporador de tubos de aletas y absorbe el calor del aire ambiente.

El circuito de agua caliente consiste en un depósito, una bomba y del condensador como calentador. Para un servicio continuo, el calor producido es disipado a través de una conexión de agua de refrigeración externa. El caudal del agua de refrigeración es ajustado y medido a través de una válvula.

Todos los valores de medición relevantes se registran por medio de sensores y se indican. La transmisión simultánea de los valores de medición a un software de adquisición de datos posibilita la evaluación y representación del proceso en el diagrama log p-h. El caudal másico del refrigerante se calcula en el software a partir de los valores de medición registrados. El software también muestra los parámetros más importantes del proceso, tales como la tasa de compresión del compresor y el índice de rendimiento calorífico. [1]

POTENCIA ABSORBIDA DEL COMPRESOR	205 W
POTENCIA FRIGORÍFICA DEL COMPRESOR	372 W
TEMPERATURA DE EVAPORIZACIÓN	7.2 °C
TEMPERATURA CONDENSACIÓN	55 °C
MEDIDAS DE LOS DEPOSITOS	4x 1700 mL
REFRIGERANTE	R513A
DIMENSIONES	1630x800x1900 [mm]
PESO	195 kg

Tabla 1.3. Datos técnicos equipo comercial GUNT HAMBURG ET 102. [3]



Figura 1.3. Equipo comercial GUNT HAMBURG ET 102. [3]

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

La termodinámica es una rama de la ciencia que se ocupa de las propiedades de la materia y sus cambios debido a los efectos del calor y el trabajo. Como ciencia, la termodinámica apunta a la dirección en la que proceden los procesos y proporciona relaciones para los balances de materia y energía. Está basada en la observación y la experimentación. [2]

Dado que la termodinámica es una rama de la física que estudia los sistemas macroscópicos, dispone de un conjunto de leyes que explican de manera detallada transformaciones de energía, dirección de los procesos de transferencia de calor, exergía y entropía. [12]

1.1 CONCEPTO DE BOMBA DE CALOR

Existen diferentes dispositivos que operan en un ciclo y cada uno tiene un objetivo principal, por ejemplo, una máquina térmica tiene como objetivo transferir trabajo, un refrigerador transfiere calor desde un cuerpo, mientras que una bomba de calor transfiere calor a un cuerpo. [13]

Una bomba de calor es un dispositivo cíclico que transporta calor de un nivel de temperatura inferior a un nivel de temperatura superior. La bomba de calor requiere de una potencia de accionamiento, puede ser tanto mecánica como eléctrica o térmica, suele extraer la energía del ambiente. Una bomba de calor puede refrigerar o calentar, como tienen el mismo principio de funcionamiento, una bomba de calor también puede funcionar como una máquina frigorífica al cambiar las funciones del evaporador y el condensador. [3]

La bomba de calor se caracteriza de la siguiente manera y el proceso se puede visualizar en la Figura 1.4:

- El compresor proporciona a los serpentines condensadores gas a alta temperatura y presión.
 - El calor del gas refrigerante es eliminado por aire, lo que ocasiona que el gas se condense, es decir cambia de fase de vapor a líquido manteniendo una alta presión.
-

- El líquido pasa por la válvula de expansión, donde sale una mezcla de gas y líquido a una temperatura menor.
- El serpentín evaporador absorbe calor donde existe un cambio de fase de líquido a vapor.
- Se repite el ciclo. [14]

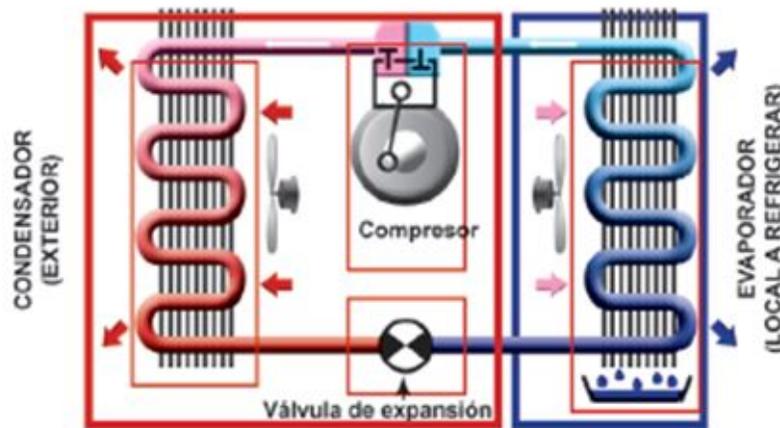


Figura 1.4. Caracterización de una bomba de calor.

El Sistema muestra los cuatro componentes básicos necesarios en cualquier sistema de refrigeración por compresión de vapor los cuales son:

- Compresor
- Condensador
- Evaporador
- Válvula de expansión

Solo una parte de este Sistema se utiliza para lograr el enfriamiento, el resto es necesario para la recuperación del refrigerante, esto quiere decir que se convierte el refrigerante de gas a líquido para volverlo a usar.

1.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA BOMBA DE CALOR

1.2.1 Compresor

El compresor permite aumentar la presión del refrigerante en estado gaseoso y normalmente sobrecalentado, procedente del evaporador, hasta una presión que favorece el paso de estado gas a líquido en el condensador, cediendo calor al entorno. El compresor es el único elemento

de la máquina Bomba de Calor que necesita consumir energía mecánica para su funcionamiento. Lo que realmente hace el compresor es aumentar la presión desde el nivel de la presión de aspiración hasta el nivel de la presión de descarga. [4]

La relación de compresión es la expresión técnica que se utiliza para hacer referencia a la diferencia de presión; es la presión absoluta del lado de alta presión dividida por la presión absoluta del lado de baja presión. Esta relación se expresa en presiones absolutas. [6]

$$\text{Relación de compresión} = \frac{\text{Descarga absoluta}}{\text{Aspiración absoluta}}$$

1.2.1.1 Compresor Rotatorio

Los compresores rotatorios, en lugar de pistón utilizan un rotor excéntrico el cual presiona el gas contra una cámara circular de presión, la cual tiene a su vez válvulas de entrada y salida, y una aleta sostenida contra el rotor por medio de un resorte, estos compresores son conocidos por su larga vida, funcionamiento suave y mínimos problemas.

La acción de compresión se realiza por el entrapamiento del gas entre el rotor excéntrico y las paredes de la cámara. [15]

1.2.1.1.1 Compresor de Paletas Deslizantes

Los compresores de paletas proporcionan presiones de hasta 4 bar. Constan esencialmente de un rotor excéntrico que gira en el interior del cuerpo provisto de la toma del aire y de la tobera de salida. Sobre dicho rotor se aloja una serie de paletas radiales deslizantes, que, por la acción de la fuerza centrífuga, o de resortes, presionan continuamente a las paredes del alojamiento ocasionando así la debida estanqueidad. La característica más importante de este compresor frente a los de émbolo es lo poco ruidoso que resulta y la uniformidad del caudal suministrado, en la Figura 1.5 se muestran los componentes de un compresor de paletas.

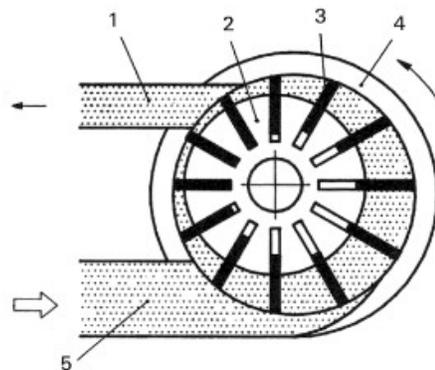


Figura 1.5. Compresor de paletas. 1) Tobera de salida, 2) Rotor excéntrico, 3) Paletas radiales deslizantes, 4) cuerpo, 5) Toma de aire. [8]

1.2.1.1.2 Compresor de Tornillo

Los compresores de tornillo o helicoidales más utilizados son los birotos, estos usan dos tornillos que giran con sus ejes paralelos a modo de engranajes helicoidales que producen compresión del gas refrigerante. Este tipo de compresor es robusto y proporciona una mayor relación de compresión. [4]

Las partes que componen al compresor de tornillo se muestran en la Figura 1.6.

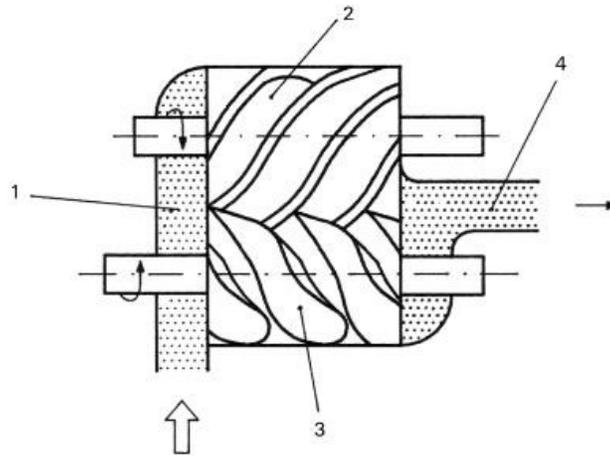


Figura 1.6. Compresor de tornillo. 1) Conducto de aire, 2)- 3) Tornillos helicoidales de dientes cóncavos y convexos, 4) Salida de aire. [8]

1.2.1.2 Compresor Reciprocante

El compresor reciprocante es el más ampliamente usado de todos los tipos de compresores. Este tipo de compresor aumenta la presión del gas debido al movimiento hacia arriba y hacia debajo de un pistón dentro de un cilindro.

Los compresores reciprocantes tienen uno o más cilindros. Cada cilindro consta de las siguientes partes; un cilindro fijo, un pistón con anillos o ranuras aceitadas para dar un sello positivo, un cigüeñal con una biela conectada al pistón, y en la parte alta una placa con válvulas de entrada y salida separadas por una pared. [15]

1.2.1.2.1 Compresor de Pistón Cilindro

Es un compresor de desplazamiento positivo. En el compresor de pistón, el aire es aspirado al interior de un cilindro, por la acción de un pistón accionado por una biela y un cigüeñal. Al realizar el movimiento contrario, el pistón comprime el aire en el interior del cilindro, liberándolo a la siguiente etapa, una vez alcanzada la presión requerida. Este tipo de compresor puede ser lubricado o exento de aceite, en la Figura 1.7 se ejemplifica un compresor reciprocante de pistón. [5]

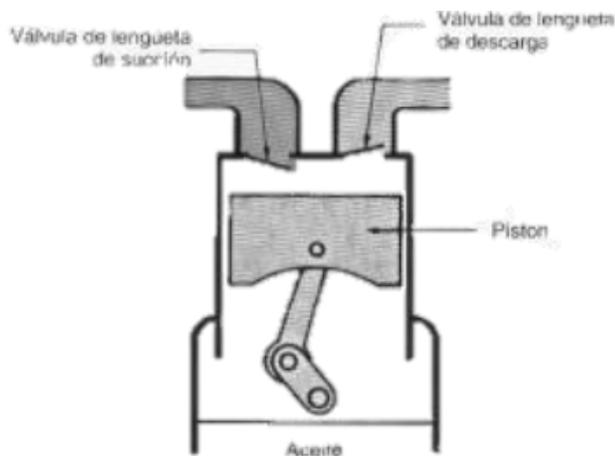


Figura 1.7. Compresor de Pistón Cilindro. [5]

1.2.1.3 Compresor Centrifugo

El compresor centrífugo incrementa la presión del gas no por opresión sino debido al movimiento acelerado producido por la acción de un impelente a alta velocidad. Es apropiado para refrigerantes que operan a baja presión y gran volumen. Algunas veces los compresores centrífugos son de etapas. [15]

1.2.2 Condensador

El condensador es un dispositivo de intercambio de calor en el que el refrigerante que proviene del compresor en estado de vapor sobrecalentado a temperatura elevada cede calor a un medio que puede ser aire o agua. El condensador disipa la energía que recoge el evaporador, y además la componente térmica del trabajo del compresor. [4]

1.2.2.1. Enfriado por Aire

Los condensadores enfriados por aire emplean aire como medio hacia el que rechazar el calor. Este sistema suele ser de tubos de cobre con aletas de aluminio que incrementan la transmisión de calor. Estas baterías disponen de ventiladores que inducen la circulación del aire a calentar entre las aletas del condensador, este tipo de condensadores son de convección forzada. [4]

Una desventaja de estos tipos de condensadores es que la temperatura del aire es muy variable. Para altas temperaturas de aire el compresor debe trabajar con sobrecarga para obtener la presión de condensación y compensar la reducida capacidad de enfriamiento del aire. [15]



Figura 1.8. Batería condensadora de tubos aleteados para convección forzada. [4]

1.2.2.1.1. Enfriado por Agua

Los condensadores enfriados por agua fueron los primeros que surgieron. Los condensadores enfriados por agua tienen buen rendimiento comparados con los condensadores enfriados por aire y funcionan a temperaturas de condensación más bajas.

Para reducir los problemas ocasionados por la fluctuación de temperaturas del aire, se utiliza el agua como medio de enfriamiento, lo que permite mantener baja la presión de condensación, debido a que el agua tiende a permanecer fría y estable.

1.2.2.1.2. Tubo Dentro de Tubo

Los condensadores de tubo dentro de tubo (Figura 1.9) de tipo serpentín se fabrican deslizando un tubo en el interior de otro y sellando luego sus extremos, de tal manera que el tubo exterior sea un recipiente y el tubo interior sea otro. Los dos tubos se enrollan en forma de serpentín para ahorrar espacio. El intercambio de calor tiene lugar entre el fluido que hay en el interior del tubo externo y el fluido que se encuentra en el interior del tubo interno.



Figura 1.9. Condensador de tubo dentro de tubo. [6]

1.2.3 Dispositivo de expansión

El dispositivo de expansión es el elemento que separa el lado de alta presión del lado de baja presión del sistema. Su finalidad es doble, la primera es regular el flujo de refrigerante hacia el evaporador y reducir la presión del líquido refrigerante de forma isoentálpica.

La regulación se realiza por la temperatura de recalentamiento del gas que sale del condensador. Las válvulas pueden ser de regulación interna, teniendo en cuenta la presión del bulbo y la presión a la entrada del evaporador, o externa, mediante la presión del bulbo y la presión a la salida del evaporador. [5]

1.2.3.1 Válvula termostática

La válvula termostática se encarga de dosificar el refrigerante que va al evaporador, utilizando un sensor térmico que controla el sobrecalentamiento. Esta válvula se abre o cierra en respuesta a un elemento térmico. También protege al compresor de la entrada del líquido, debido a que permite mantener constante el grado de recalentamiento de gas a la salida del evaporador. [4]

La válvula de expansión termostática consta del cuerpo de la válvula, un diafragma, una aguja y asiento, un muelle, una porta estopa y un bulbo sensor y un tubo de transmisión. [6]

Las principales partes de la válvula de expansión se muestran en la Figura 1.10.

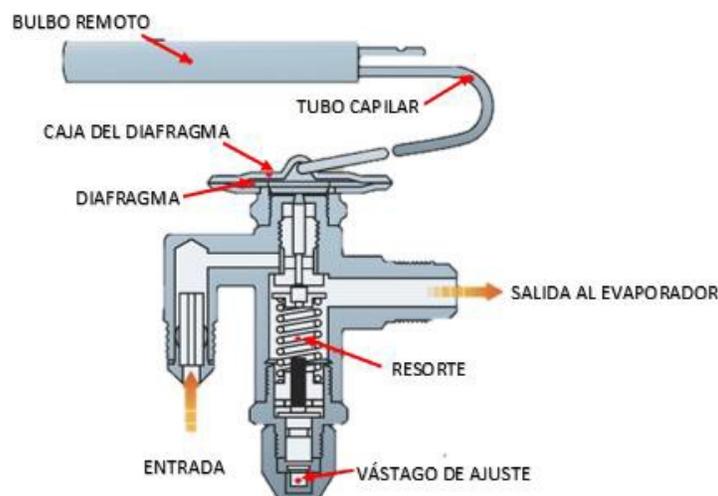


Figura 1.10. Válvula de expansión termostática. [4]

1.2.4 Deshidratador

El deshidratador (Figura 1.11) sirve para eliminar la posible humedad existente en el sistema de refrigeración, esta humedad está relacionada con una falta de estanqueidad, a la utilización de aceites mal deshidratados o a una utilización de componentes mal almacenados, además sirve para filtrar las impurezas que estén presentes en el circuito debido a algún producto de la fabricación de los propios componentes o escorias debidas a soldaduras aplicadas en las tuberías.



Figura 1.11. Filtro deshidratador de una bomba de calor [4]

1.2.5 Evaporador

El evaporador de los sistemas de refrigeración es el que se encarga de absorber el calor hacia el sistema desde cualquier entorno que se vaya a enfriar. Este proceso de absorción de calor se consigue manteniendo el serpentín del evaporador a una temperatura inferior a la del entorno que se va a enfriar. [6]

Se trata de un intercambiador de calor en donde el refrigerante que después de la expansión se encuentra como vapor húmedo, absorbe calor del medio, ya sea aire, agua o cualquier otra sustancia, para cambiar de estado hasta que todo él se encuentre como gas. Cuanto mayor sea la fracción líquida del vapor húmedo, mayor será el efecto frigorífico. [4]



Figura 1.12. Evaporador de tubo dentro de tubo. [6]

1.2.5.1 Serpentín

El evaporador de serpentín (Figura 1.13), es uno de los más simples, consiste únicamente de un circuito de tubos, por lo general circuito múltiple equipado con aletas.

Si el serpentín del evaporador tiene abanico, se clasifica como de aire inducido o de circulación inducida. Se diferencia del de convección natural el cual no usa abanico para la circulación de aire.



Figura 1.13. Evaporador Serpentín. [15]

1.3 ASPECTOS TERMODINAMICOS

1.3.1 Definiciones

1.3.1.1 Calor

El calor es un proceso de transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debida a una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores. También se le conoce como la cantidad de energía Q transferida mediante este proceso. [17]

El calor es la energía en tránsito a través de un sistema termodinámico debido a la diferencia de temperatura que existe entre un sistema y el medio que lo rodea o sus alrededores. La transferencia de calor se puede dar por tres diferentes mecanismos: el primero es por conducción, el cual se da entre sólidos, el segundo es la convección en el que se necesita la intervención de un fluido y el ultimo mecanismo es la radiación, este mecanismo se da por

medio de ondas electromagnéticas en las que la energía se puede transmitir incluso en el vacío. En estos mecanismos es necesario un gradiente de temperatura entre el sistema y sus alrededores, de igual manera se necesita una superficie de transferencia para que exista el flujo de calor.

El calor es una forma de energía, por lo tanto, sus unidades corresponden en el SI es el joule (J).

Cuando en un proceso no existe transferencia de calor entre el sistema y sus alrededores, se le conoce como proceso adiabático. Por otra parte, si la temperatura del proceso permanece constante, se conoce como proceso isotérmico. [16]

1.3.1.2 Trabajo

Trabajo se refiere a un intercambio de energía entre un sistema y su medio exterior. El trabajo puede ser mecánico, eléctrico, magnético, entre otros.

El trabajo mecánico es el efecto de una fuerza F que actúa a lo largo de un desplazamiento. La fuerza y el desplazamiento se consideran cantidades vectoriales, pero, el trabajo es una cantidad escalar.

El trabajo es la interacción de energía a través de las fronteras de un sistema y sus alrededores, y es equivalente al efecto de una fuerza que actúa a lo largo de una distancia. Al trabajo se le asigna la letra W como símbolo, y por ser una forma de energía; al igual que el calor, sus unidades de energía, joule (J). [18]

1.3.1.3 Presión

La definición de presión se asemeja a la de los esfuerzos la cual indica que es el efecto de una fuerza aplicada en dirección normal a un sólido, pero para la presión se aplica en líquidos y gases.

Los líquidos son prácticamente incompresibles, esto quiere decir que su volumen casi no puede cambiar debido a la presión.

La presión no depende de la cantidad de líquido, pero actúa perpendicular a los lados del recipiente y aumenta al aumentar la profundidad.

La presión en un fluido en reposo en cualquier punto es la misma en todas direcciones y a esto se le conoce como la componente normal de la fuerza por unidad de área. Las unidades

correspondientes en el SI son el Pascal (Pa).

En la mayor parte de las relaciones termodinámicas debe usarse presión absoluta. La presión absoluta es la presión manométrica más la presión atmosférica local. Una presión manométrica negativa suele denominarse vacío. La presión atmosférica es una presión absoluta, y se tomara como 100 kPa (al nivel del mar). [13]

1.3.1.4 Temperatura

La temperatura es una propiedad termodinámica que se asocia con el movimiento de las moléculas que conforman el sistema. Mientras la temperatura aumenta, la actividad molecular también incrementa, esto quiere decir que la velocidad promedio de las moléculas del sistema aumenta.

Se sabe que una definición de temperatura que utiliza mediciones moleculares no es del todo correcto y para entender mejor el concepto se puede hablar de igualdad de temperaturas o equilibrio térmico, el cual se describe en la ley cero de termodinámica la cual establece que si dos sistemas están a la misma temperatura que un tercero, están a la misma temperatura entre sí. [13]

El número 0 se asigna a la mínima temperatura posible, el cero absoluto, en la cual una sustancia no tiene energía cinética para dar o compartir. El cero absoluto corresponde a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la escala Celsius.

Al ser una propiedad termodinámica, la temperatura puede medirse. Una forma muy teórica de medirla es utilizando la ley cero de la termodinámica, otra forma es por medio de termómetros de bulbo, termistores, termopares, etc.

Para la temperatura existen diferentes unidades de acuerdo con el sistema de unidades que se maneje, algunas de ellas son Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Kelvin (K) y Rankine del sistema inglés. [17]

1.3.1.5 Entalpía

La entalpía es la suma de la energía interna U , el producto de la presión P y el volumen V , por lo que se representa como $U + PV$, y a la entalpía se le asigna H como símbolo.

Es definida como el flujo de energía térmica en los procesos químicos efectuados a presión constante cuando el único trabajo es de presión-volumen, esto quiere decir que la entalpía es la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

La entalpía es una función de estado de la termodinámica en la cual la variación permite expresar la cantidad de calor durante una transformación isobárica (presión constante en un sistema termodinámico).

Como U, P y V son propiedades termodinámicas, esta combinación es también una propiedad termodinámica. La entalpía tiene las mismas unidades que la energía interna [J]. [18]

1.3.1.6 Entropía

La entropía es la medida de la energía que se dispersa en un proceso. La entropía permite determinar si se puede pasar de un estado a otro por medio de un cambio espontáneo. La segunda ley de la termodinámica utiliza a la entropía para identificar los cambios espontáneos entre aquellos cambios permitidos.

Para sistemas termodinámicos, la entropía se emplea para representar el nivel de incertidumbre, elección y probabilidad en el sistema. [16]

La segunda ley de la termodinámica puede expresarse en términos de la entropía:

La entropía de un sistema aislado nunca disminuye, sólo puede aumentar o permanecer constante. La entropía de un sistema aislado aumenta en el curso de un proceso espontáneo $\Delta S_{tot} > 0$ donde ΔS_{tot} es la entropía de un sistema y de su entorno. Los procesos termodinámicamente irreversibles son procesos espontáneos y deben estar acompañados de un incremento de la entropía total.

El concepto de entropía puede relacionarse con los de orden y desorden, la entropía puede referirse como una medida del desorden del sistema, por lo que la segunda ley puede expresarse como: los sistemas naturales tienden siempre a un mayor desorden. [14]

1.4 ECUACIONES FUNDAMENTALES

1.4.1 Segunda Ley de la Termodinámica

La segunda ley de la termodinámica establece que el calor jamás fluye espontáneamente de un objeto frío a un objeto caliente. La dirección del flujo espontáneo de calor es de lo caliente a lo frío, se puede hacer que tenga la dirección contraria, pero solo si se realiza trabajo sobre el sistema o si se agrega energía de otra fuente, esto sucede en las bombas térmicas y en los acondicionadores de aire. [17]

La segunda ley de la termodinámica establece que la energía organizada se degenera y forma energía desorganizada.

Se puede enunciar a la segunda ley de la termodinámica en términos de la entropía: No se producirán transformaciones en las cuales la entropía de un sistema aislado disminuya, o lo que es igual, en cualquier transformación que se produzca en un sistema aislado, la entropía del sistema aumenta o permanece constante.

La segunda ley de la termodinámica se expresa en varias formulaciones equivalentes, a continuación, se enuncian las dos más relevantes:

Enunciado de Kelvin – Planck: No es posible ningún proceso cíclico cuyo único resultado sea la extracción de calor de una única fuente y la producción de una cantidad equivalente de trabajo.

Enunciado de Clausius: No es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la extracción de calor de una fuente a cierta temperatura y la absorción de una cantidad igual de calor por una fuente a temperatura más elevada. [18]

1.4.1.1 Máquinas Térmicas

Las máquinas térmicas se caracterizan de la siguiente manera:

- Reciben calor de una fuente a temperatura alta (energía solar, horno de petróleo, reactor nuclear).
- Convierten parte de este calor en trabajo (por lo general en la forma de una flecha rotatoria).
- Rechazan el calor de desecho hacia un sumidero de calor de baja temperatura (la atmósfera, los ríos).
- Operan en un ciclo.

Este proceso se ejemplifica en la Figura 1.14.

El dispositivo productor de trabajo que mejor se ajusta a la definición de una máquina térmica es la central eléctrica de vapor, la cual es una máquina de combustión externa (la combustión se lleva a cabo fuera de la máquina) y la energía térmica liberada durante este proceso se transfiere al vapor como calor.



Figura 1.14. Diagrama de una máquina térmica. [7]

Una máquina térmica transforma energía térmica en trabajo realizando un ciclo de manera continuada. En ellas no hay variación de energía interna. Las máquinas térmicas se componen de manera general por un elemento a alta temperatura, llamado fuente y otro de baja temperatura llamado sumidero transformándose parcialmente en trabajo como se muestra en la Figura 1.15.

Dado que $T_1 > T_2$, el calor fluye de manera espontánea desde la fuente al sumidero. La máquina transforma parte de este calor en trabajo, y el resto fluye al sumidero. No existe variación en la energía interna de la máquina resultando:

$$\Delta U = 0 \rightarrow |Q_1| = |W| + |Q_2| \quad (1.1)$$

En condiciones óptimas

$$|W| = |Q_1| - |Q_2| \rightarrow |W| < |Q_1| \quad (1.2)$$

Es decir, no todo el calor que absorbe la máquina se transforma en trabajo.

1.4.1.2 Eficiencia Térmica

La eficiencia térmica es la fracción de la entrada de calor que se convierte en salida de trabajo neto es una medida del desempeño de una máquina térmica. Para las máquinas térmicas, la salida deseada es la de trabajo neto, mientras que la entrada que requieren es la cantidad de calor suministrado al fluido de trabajo. La eficiencia térmica de una máquina térmica se puede expresar como:

$$Eficiencia\ térmica = \frac{Salida\ de\ trabajo\ neto}{Entrada\ de\ calor\ total} \quad (1.3)$$

O bien,

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto,salida}}{Q_{entrada}} \quad (1.4)$$

Dado que

$$W_{neto,salida} = Q_{entrada} - Q_{salida} \quad (1.5)$$

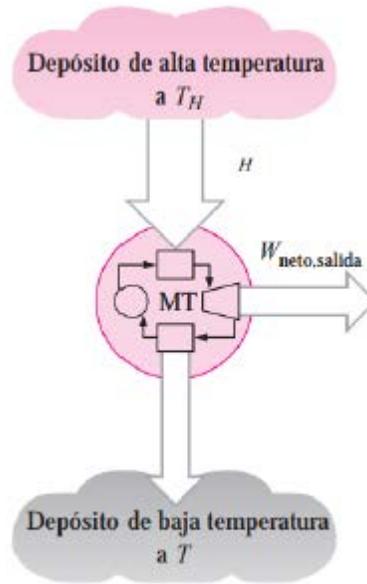


Figura 1.15. Esquema de una máquina térmica. [7]

Donde

$$T_H = Alta\ temperatura \quad (1.6)$$

$$T_L = Baja\ temperatura \quad (1.7)$$

Los dispositivos cíclicos de interés práctico como las máquinas térmicas, los refrigeradores y las bombas de calor operan entre un medio de alta temperatura (o depósito) a temperatura T_H y otro de baja temperatura (o depósito) a temperatura T_L . Para uniformar el tratamiento de máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor, se definen estas dos cantidades:

Q_H Magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de alta temperatura a Temperatura T_H

Q_L Magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de baja temperatura a Temperatura T_L

Para estas relaciones, las ecuaciones son:

$$W_{neto,salida} = Q_H - Q_L \quad (1.8)$$

Y

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto,salida}}{Q_H} \quad (1.9)$$

O bien,

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (1.10)$$

1.4.2 Coeficiente de Desempeño en Bombas de Calor

La eficiencia de un refrigerador o bomba de calor se expresa en términos del coeficiente de desempeño (COP, siglas de coefficient of performance).

Los refrigeradores y la bomba de calor operan en el mismo ciclo, pero difieren en sus objetivos. El propósito de un refrigerador es mantener el espacio refrigerado a una temperatura baja eliminando calor de éste. El objetivo de una bomba de calor, sin embargo, es mantener un espacio calentado a una temperatura alta.

La medida de desempeño de una bomba de calor también se expresa en términos del coeficiente de desempeño COP_{HP} , definido como

$$COP_{HP} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{neto,salida}} \quad (1.11)$$

Que también se puede expresar como

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (1.12)$$

En el peor de los casos, una bomba funcionará como un calentador de resistencia al suministrar tanta energía como se requiera. [7]

1.5 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Si no se tienen en cuenta las irreversibilidades dentro de evaporador y condensador, no hay caída de presión por rozamiento y el refrigerante fluye a presión constante en los dos intercambiadores de calor. Si la compresión se produce sin irreversibilidades, y si también se desprecia la transferencia de calor al ambiente, la compresión es isoentrópica. El ciclo consta de la siguiente serie de procesos (Figura 1.16):

- Proceso 1-2: Compresión isoentrópica del refrigerante desde el estado 1 hasta la presión del condensador en el estado 2.
- Proceso 2-3: Transferencia de calor desde el refrigerante que fluye a presión constante en el condensador. El refrigerante sale como líquido en el estado 3.
- Proceso 3-4: Proceso de estrangulación desde el estado 3 hasta la mezcla bifásica líquido-vapor en 4.
- Proceso 4-1: Transferencia de calor hacia el refrigerante que fluye a presión constante a través del evaporador hasta completar el ciclo. [9]

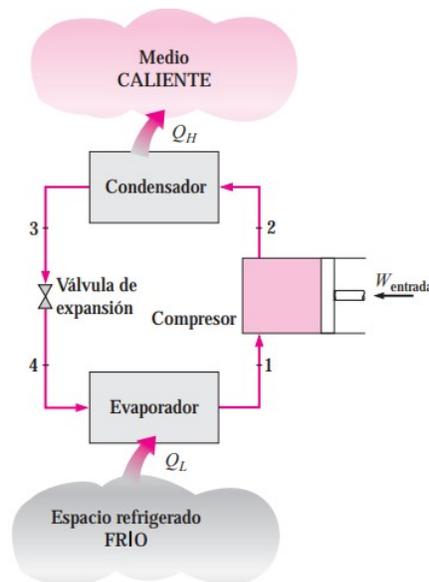


Figura 1.16. Esquema del ciclo de refrigeración por vapor. [7]

1.5.1 Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Vapor

El ciclo por compresión de vapor es el método más común para realizar un acondicionamiento de aire o un enfriamiento, así como un efecto de calentamiento (mediante las bombas de calor).

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el que más se utiliza en refrigeradores, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor. Se compone de cuatro procesos (Figura 1.17):

- 1-2 Compresión isentrópica en un compresor
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

En un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra al compresor en el estado 1 como vapor saturado y se comprime isoentrópicamente hasta la presión del condensador. La temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isentrópica, hasta un valor bastante superior al de la temperatura del medio circundante.

Después el refrigerante entra en el condensador como vapor sobrecalentado en el estado 2 y sale como líquido saturado en el estado 3, como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores. La temperatura del refrigerante en este estado se mantendrá por encima de la temperatura de los alrededores.

El refrigerante líquido saturado en el estado 3 se estrangula hasta la presión del evaporador al pasarlo por una válvula de expansión o por un tubo capilar. La temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante este proceso.

El refrigerante entra al evaporador en el estado 4 como un vapor húmedo de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado. El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor, completando el ciclo.

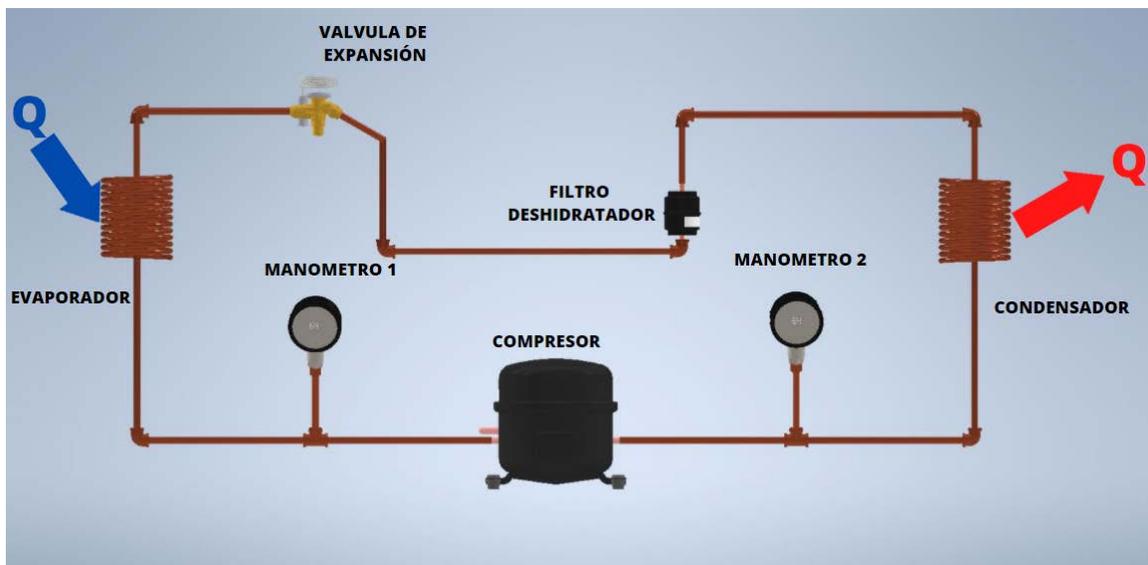


Figura 1.17. Esquema para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

[Fuente de elaboración propia]

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor no es un ciclo internamente reversible puesto que incluye un proceso irreversible (estrangulamiento). Este proceso se mantiene en el ciclo para hacerlo un modelo más realista para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor.

1.5.2 Análisis de los Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor

1.5.2.1 Cálculo de las Transferencias de Trabajo y Calor

El sistema con compresión de vapor representado en la Fig. 1.17 opera en situación estacionaria.

Para el evaporador, donde se produce el efecto frigorífico deseado:

El calor transferido desde el espacio refrigerado al refrigerante, a su paso por el evaporador, produce su vaporización. Para el volumen de control que incluye el evaporador, los balances de masa y energía dan el calor transferido por unidad de masa de refrigerante

$$\frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (1.13)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico de refrigerante. El calor transferido \dot{Q}_c se define como capacidad de refrigeración. En el Sistema Internacional de unidades (SI), la capacidad de refrigeración se expresa normalmente en kW.

El refrigerante deja el evaporador y es comprimido a una presión relativamente alta por el compresor. Suponiendo que éste opera adiabáticamente, los balances de masa y energía, para el volumen de control que incluye al compresor, se expande de la siguiente manera:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad (1.14)$$

Donde $\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}$ es el trabajo que entra por unidad de masa refrigerante.

El refrigerante pasa a través del condensador, donde condensa y hay una transferencia de calor desde el refrigerante al medio que lo enfría. Para el volumen de control que incluye la parte del refrigerante en el condensador, el calor transferido desde el refrigerante por unidad de masa de refrigerante es

$$\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad (1.15)$$

Finalmente, el refrigerante en el estado 3 entra en la válvula de expansión y se expande hasta la presión del evaporador. Este proceso se modela normalmente como un proceso de estrangulación por lo que

$$h_4 = h_3 \quad (1.16)$$

La presión del refrigerante disminuye en la expansión adiabática irreversible, y va acompañada de un aumento de la entropía específica. El refrigerante sale de la válvula en el estado 4 como una mezcla bifásica líquido-vapor. En el sistema por compresión de vapor, la potencia de entrada es igual a la potencia del compresor, ya que la válvula de expansión no supone potencia de entrada o salida. Utilizando las cantidades y expresiones introducidas anteriormente, el coeficiente de operación del sistema de refrigeración por compresión de vapor es

$$\beta = \frac{\dot{Q}_c/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1.17)$$

1.5.2.1.1 Diagrama T-s

El área bajo la curva del proceso en un diagrama T-s (Figura 1.18) representa la transferencia de calor en caso de procesos internamente reversibles. El área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor absorbido por el refrigerante en el evaporador, y el área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor rechazado en el condensador.

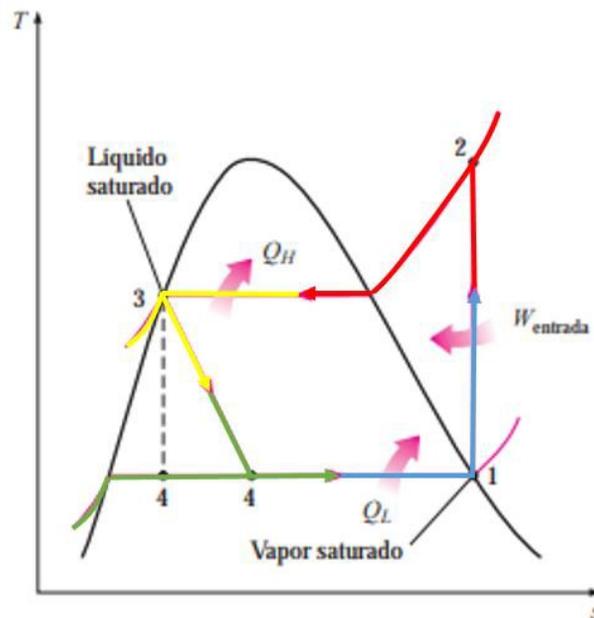


Figura 1.18. Diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

[Fuente de elaboración propia]

1.5.2.1.2 Diagrama P-h

En el diagrama P-h (Figura 1.19) tres de los cuatro procesos aparecen como líneas rectas, y la transferencia de calor en el condensador y el evaporador es proporcional a la longitud de la curva del proceso correspondiente

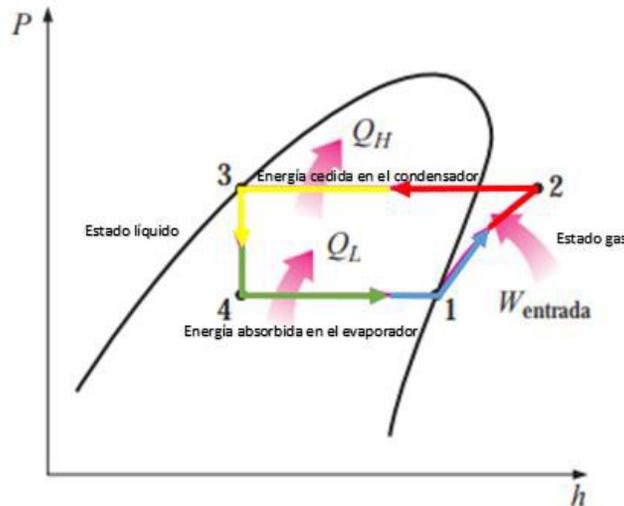


Figura 1.19. Diagrama P-h para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

[Fuente de elaboración propia]

Los cuatro componentes asociados con el ciclo de refrigeración por compresión de vapor son dispositivos de flujo estacionario, por lo que los cuatro procesos que integran el ciclo pueden analizarse como procesos de flujo estacionario. Los cambios en la energía cinética y potencial del refrigerante suelen ser pequeños en relación con los términos de trabajo y transferencia de calor, y, por lo tanto, pueden ignorarse. Entonces la ecuación de energía de flujo estacionario por unidad de masa se reduce a

$$(q_{\text{entrada}} - q_{\text{salida}}) + (w_{\text{entrada}} - w_{\text{salida}}) = h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}} \quad (1.18)$$

El condensador y el evaporador no implican ningún trabajo y el compresor puede calcularse como adiabático. Entonces los COP de refrigeradores y bombas de calor que operan en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor pueden expresarse como

$$COP_{HP} = \frac{q_H}{w_{\text{neto,salida}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (1.19)$$

Donde $h_1 = h_{g a P1}$ y $h_3 = h_{f a P3}$, para el caso ideal. [7]

1.6 REFRIGERANTES

1.6.1 Parámetros de Selección del Refrigerante

1.6.1.1 Viscosidad baja

El refrigerante debe poseer baja viscosidad, de lo contrario puede ocasionar grandes pérdidas de cargas y de rendimiento.

1.6.1.2 Conductividad térmica

Tener una conductividad térmica alta ayuda a mejorar las condiciones de la transmisión de calor. La conductividad térmica debe ser lo más alta posible para lograr una transferencia de calor más rápida, ahorrar espacio y material en el evaporador y el condensador.

1.6.1.3 Calor latente de vaporización

Cuando existe un rango elevado de calor latente, hay reducción en el caudal másico del fluido refrigerante, el diámetro, tamaños de los componentes y costos de los aparatos, al igual que existe un ahorro de energía.

1.6.1.4 Curva de tensión del vapor

La curva de tensión de vapor debe estar adaptada a las condiciones del evaporador y del condensador, por ejemplo, se debe cuidar que, en el evaporador, el refrigerante este a una presión inferior a la presión atmosférica para poder evitar la entrada del aire debido a que esto puede afectar el funcionamiento y disminuir el rendimiento, en el condensador debe existir una presión alta para el uso de una tubería con menor espesor y disminuir costos.

1.6.1.5 Temperatura crítica

Para que la eficiencia del ciclo no disminuya en gran medida, la temperatura crítica debe ser superior a la del medio a calentar, debido a que al estar muy cercanas las temperaturas, la eficiencia disminuye. [10]

1.6.2 Refrigerante R134-a

El refrigerante R134-a ha sido desarrollado para sustituir a largo plazo al refrigerante R-12 que es utilizado en el campo de aire acondicionado para automoción y en la refrigeración comercial e industrial.

Su nombre químico es Tetrafluoroetano, su fórmula es CF_3CH_2F . No es miscible con aceites tradicionales de R-12 pero si lo es con aceites poliésteres (POE) por lo que siempre se debe utilizar con este tipo de aceites.

La molécula no contiene ningún átomo de cloro, responsable de la descomposición del ozono. Tiene una gran estabilidad térmica y química, baja toxicidad y no es inflamable, es compatible con la mayoría de los materiales.

Este refrigerante es utilizado en el aire acondicionado de los automóviles y en refrigeradores domésticos, otros de sus usos son en chillers del sector industrial y comercial, en el transporte frigorífico en temperaturas positivas. [11]

Es clasificado según la MI-IF-002 como refrigerante del grupo 1° y de Alta Seguridad, y teniendo en cuenta que:

- A altas concentraciones produce efectos soporíferos
- Con altas concentraciones provoca una disminución de la capacidad de oxígeno, originando sofoco y peligro de asfixia.

Es un gas puro y azeotrópico lo cual quiere decir que tiene deslizamiento de temperatura de evaporación cero por lo que se puede utilizar en fase líquida y en fase gaseosa.

Una de las ventajas comparado con el R-12 es que tiene una temperatura final de compresión más baja.

1.6.2.1 Propiedades físicas del Refrigerante 134-a

Algunas propiedades físicas y térmicas que tiene el 1,1,1,2-Tetrafluoroetano o mejor conocido como R-134a se muestran en la Tabla 1.4.

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	R-134a
Peso molecular	(g/mol)	102
Punto de ebullición (a 1,013 bar)	(°C)	-26.1
Punto de congelación	(°C)	-103
Temperatura crítica	(°C)	101.1
Presión crítica	(bar abs)	40.67
Densidad crítica	(kg/m ³)	508
Densidad del líquido (25 °C)	(kg/m ³)	1,206
Densidad del líquido (0 °C)	(kg/m ³)	1,293
Densidad del vapor saturado (a punto ebull).	(kg/m ³)	528
Presión de vapor (25 °C)	(bar abs)	6.657
Presión de vapor (0 °C)	(bar abs)	2.92
Calor de vaporización a punto de ebullición	(kJ/kg)	217.2
Calor específico del líquido (25 °C) (1,013 bar)	(kJ/kg*K)	1.44
Calor específico del vapor (25 °C) (1,013 bar)	(kJ/kg*K)	0.85
Viscosidad del líquido (25 °C)	(cP)	0.202
Presión superficial (25 °C)	(mN/m)	8.09
Solubilidad del R134 a en agua (25 °C a 1,013 bar)	(wt%)	0.15
Capacidad volumétrica refrig (-25 °C)	(kg/m ³)	1192.11
Inflamabilidad		No
ODP	-	0
PCA (GWP)	-	1430*

*De acuerdo con IPPCC-AR4/CIE (Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático)-2007

Tabla 1.4. Propiedades físicas y térmicas del refrigerante R-134 a. [11]

Capítulo 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

2.1 OBJETIVOS DE DISEÑO

Para el diseño de la bomba de calor, equipo que será instalado en los laboratorios de ciencias básicas, específicamente en el laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se establecieron los siguientes objetivos:

- Diseñar un equipo didáctico que permita al profesor la impartición de prácticas de laboratorio en el área de Termodinámica de la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería.
- Diseñar un equipo que permita el análisis de un proceso termodinámico cerrado, en el laboratorio de Termodinámica.
- Diseñar una bomba de calor como equipo didáctico en el cual el alumno podrá tomar lecturas tanto de presión como de temperatura, con ello podrá realizar el análisis de balance de energía, eficiencia mecánica y eficiencia térmica.

2.1.1 Análisis de necesidades

En el laboratorio de termodinámica se requiere un equipo que permita mostrar el principio de funcionamiento de un sistema termodinámico cerrado que muestre cada uno de los componentes que forman a la bomba de calor y su funcionamiento, de esta manera el alumno podrá visualizar los principios de refrigeración por compresión de vapor.

Dado que la bomba de calor que se desarrollo es para efectos didácticos, uno de los principales objetivos está enfocado a mostrar de la manera más precisa los intercambios térmicos que se provocan en el refrigerante al pasar por los distintos componentes del equipo y de esta manera poder tomar datos cuantitativos y cualitativos de los incrementos y decrementos de temperatura y presión en los componentes del equipo, principalmente en el evaporador y en el condensador.

Para poder lograr lo propuesto, el equipo se debe diseñar en forma de banco de pruebas el cual va a contener la instrumentación necesaria para poder tomar lecturas de presiones y temperaturas en los puntos que sean más convenientes, la instrumentación y la tubería de

conexión estarán a la vista, de esta manera el alumno podrá visualizar y describir el ciclo termodinámico.

2.2 CONSIDERACIONES PRACTICAS

Este refrigerante tiene las características de compresión, condensación, evaporación y expansión, por lo que se asegura el correcto funcionamiento del equipo debido a que el refrigerante cumple con las propiedades físicas y térmicas necesarias.

2.2.1 Fácil Instalación y transporte

Debido a que el equipo Bomba de Calor se resguardara dentro del laboratorio de termodinámica y esta cuenta con una amplia variedad de equipos almacenados, es necesario que el equipo sea de fácil instalación y manejo dentro del laboratorio.

Para cumplir con dicho requerimiento se propone que el diseño del equipo contemple las características del laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, de esta manera, se considera un tiempo promedio de transporte del equipo a la mesa de trabajo. En el tiempo de instalación se considera el tiempo necesario para que el equipo se estabilice, de esta manera se evitaría la toma de lecturas erróneas por parte de los alumnos.

Para cumplir con el requerimiento de fácil transporte dentro del laboratorio de termodinámica, se propone que el equipo tenga una estructura que permita un fácil desplazamiento y de igual manera, la estructura no exceda las medidas de los pasillos entre las mesas de trabajo.

2.2.2 Requerimientos de manufactura e instalación

Para lograr un correcto funcionamiento del equipo es necesario cumplir con los siguientes puntos:

- Simetría perfecta en la tubería por las que circulará el refrigerante.
 - Cumplir con la longitud y diámetro para la construcción de los serpentines evaporador y condensador.
 - Correcto ensamble de la tubería y accesorios para evitar fugas de refrigerante.
 - Tener identificados los puntos en donde se llevarán a cabo la toma de datos tanto de presión y temperatura.
-

- Correcta ubicación de los componentes para una buena visualización.
- La soldadura en la tubería debe estar correcta para evitar fugas, se debe realizar correcciones estéticas por el exterior de la tubería.

2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO

2.3.1 Selección del compresor

Como ya se mencionó anteriormente, el compresor permite aumentar la presión del refrigerante en estado gaseoso y normalmente sobrecalentado, procedente del evaporador, hasta una presión que favorece el paso de estado gas a líquido en el condensador, cediendo calor al entorno. Este componente tiene mucha importancia debido a que permite que se lleve a cabo la secuencia del ciclo.

El compresor para el funcionamiento de la bomba de calor se seleccionó con ayuda del personal del laboratorio de termodinámica. Para cumplir los requerimientos, principalmente el bajo costo de fabricación, se utilizó un compresor con las siguientes características:

- Modelo: QD75H
- Potencia: $\frac{1}{4}$ HP (0.186 kW)
- Alimentación: 110-120V / 60Hz
- Desplazamiento: 7.5 cm^3
- Capacidad de refrigeración: 218 W
- COP: 1.31

2.3.2 Selección del control de flujo

En el equipo se requiere la instalación del control de flujo que permita que el refrigerante se expanda para ser evaporado, esto es debido a la alta presión del refrigerante que sale del condensador.

El principal objetivo del control de flujo es mantener una diferencia de presión entre la entrada y la salida del compresor, el control de flujo actúa como regulador del líquido que va al evaporador y provoca que el refrigerante salga a una baja presión.

El modelo del control de flujo que se seleccionó fue un tubo capilar, debido a la capacidad del compresor, este tubo capilar tiene las siguientes características:

- Longitud: 3 [m] de Capilar
- Diámetro: 0.917 [mm]

2.3.3 Selección del evaporador

En el capítulo 1: Marco teórico se mencionó, que la función del evaporador en un sistema de refrigeración o para este caso, en una bomba de calor es la de permitir que el refrigerante se evapore debido a la baja presión que se genera entre la salida del control de flujo y la entrada del compresor, absorbiendo calor del medio con el cual se encuentra en contacto el serpentín que contiene al gas refrigerante.

El tipo de evaporador que será de utilidad para el equipo es del tipo serpentín, esto se debe a la sencillez de su construcción y es altamente recomendado cuando se usan depósitos de líquidos.

La función principal que va a tener el serpentín evaporador, en la bomba de calor que se desarrolló, será generar calorías en forma de calor, para este caso, el fluido que se utilizará será agua.

Algunos requerimientos especiales que necesita cumplir el serpentín evaporador que se va a construir para la bomba de calor son los siguientes:

- Ser fabricado con un material que cuente con resistencia térmica mínima, esto con el propósito de maximizar la transferencia de calor.
- Cubrir en su totalidad el serpentín con el fluido con el cual se va a disminuir la temperatura

Debido a las características del compresor, el diseño del serpentín evaporador debe ser de tubo de cobre de 0.25 mm ($\frac{1}{4}$ " de pulgada) y considerando ese diámetro, se debe realizar el cálculo de la longitud de tubería de cobre del serpentín. El cálculo se encuentra en el punto 3.1.1.1.

Para la construcción del serpentín evaporador se usará un método conocido como enrollamiento, mediante este método, el tubo de cobre sufre una deformación ligera, para este caso, la deformación es despreciable y no afecta el funcionamiento del equipo.



Figura 2.1. Serpentín de tubo de cobre.

2.3.4 Selección del condensador

El condensador al igual que el evaporador se diseñará de tipo serpentín, su función principal en el equipo será la disipación del calor que el refrigerante ha ganado durante la evaporación.

El serpentín condensador, tiene como función, conseguir que el agua eleve su temperatura. Uno de los requisitos que debe seguir dicho serpentín es que debe contar con una longitud suficiente para lograr que el refrigerante sobrecalentado disipe la mayor cantidad de calor, dando como resultado que el agua en el recipiente aumente su temperatura.

Para la condensación del refrigerante en estado gaseoso se realizan tres fases:

- El refrigerante en forma de vapor sobrecalentado cede calor sensible de sobrecalentamiento a presión constante hasta que el refrigerante cambia su estado de vapor a líquido.
- El vapor cede calor del proceso de condensación a presión constante hasta alcanzar la temperatura de agua de refrigeración.
- El vapor cede calor de condensación a temperatura constante.

Debido a las características del compresor, el diseño del serpentín evaporador seleccionado es de tubo de cobre de 0.1875 mm (3/16" de pulgada) y considerando ese diámetro, se debe realizar el cálculo de la longitud de tubería de cobre del serpentín. El cálculo se encuentra en el punto 3.1.2.1.

Para la construcción del serpentín condensador, de igual manera que en el evaporador se usó el método de enrollamiento, mediante este método, el tubo de cobre sufre una deformación ligera, para este caso, la deformación es despreciable y no afecta el funcionamiento del equipo.

2.3.5 Instrumentación

Con el fin de que el alumno comprenda el ciclo de refrigeración, se colocaron cuatro tomas de presión y cuatro tomas de temperatura, las cuales se ubican a la entrada y salida de cada uno de los serpentines. Están instalados de manera que se observe el cambio de presión y temperatura en cada una de las etapas del ciclo.

El equipo está instrumentado con manómetros para registrar el valor de la presión.

Características de los manómetros.

- Tipo de manómetro: seco
- Rango de presión: 0-100 [psi], 0-7 $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$
- Diámetro de conexión: ¼" NPT
- Tipo de lectura: analógica.

Características de los termómetros.

- Tipo de termómetro: "J"
- Rango de temperatura: 0 a 800 [°C]
- Tipo de lectura: Digital

2.4 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

2.4.1 Manufactura de la Estructura

Se propone el uso de una estructura de madera forrada de formaica, así como perfiles metálicos, de manera que brinde estabilidad, soporte, movilidad al equipo y principalmente una mejor distribución en la tubería y conexiones a cada uno de los accesorios necesarios.

La fabricación de la estructura se realizó en el taller del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) con la máquina de corte de chorro de agua.

La selección del proceso de corte por chorro de agua se escogió debido a que al ser corte en frío no existe transferencia de calor que afecte la zona de corte esto implica que no existirá un proceso secundario, no existen modificaciones en las propiedades del material y se tiene una alta precisión de corte.

2.4.2 Ensamble de tuberías, accesorios y componentes de la bomba de calor

En la Figura 2.2, se muestra el ensamble final del equipo que cuenta con cuatro tomas de presión y cuatro tomas de temperatura, dos serpentines, cada uno de ellos con un depósito de agua, el primer serpentín se va a encargar de condensar el refrigerante que pase a través de la tubería y el segundo se encargara de evaporarlo, un tubo capilar, un deshidratador y finalmente un compresor que impulsa el flujo del refrigerante por cada uno de los componentes que integran el sistema, cada uno de estos componentes se encuentran conectados por medio de tubería de cobre.



Figura 2.2. Ensamble bomba de calor. [Fuente de elaboración propia].

Capítulo 3

CÁLCULOS Y PRUEBAS

3.1 CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LOS SERPENTINES

El principal objetivo es determinar la longitud adecuada a la que trabajarán los serpentines evaporador y condensador con un compresor de capacidad de ¼ hp.

Se utilizó el equipo bomba de calor del Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería para tomar lecturas de temperatura para la entrada y salida del evaporador y condensador, se utilizó el compresor de ¼ hp para que los datos fueran lo más real posible.

3.1.1 Evaporador

3.1.1.1 Longitud del serpentín evaporador

Datos para el cálculo de la longitud del serpentín evaporador:

Capacidad específica de calor:

$$C_p = 4.184 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] \quad (3.1)$$

Potencia del compresor:

$$W = 186.42 [W] \quad (3.2)$$

El diámetro del tubo que se utilizará para la construcción del serpentín será de 6.35 [mm] (¼ [in]) utilizando como material para su construcción, cobre.

Diámetro:

$$d = 0.00635 [m] \quad (3.3)$$

Datos obtenidos de manera experimental con la Bomba de Calor diseñada y fabricada para el laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Flujo másico del refrigerante:

$$\dot{m} = 2.6804 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (3.4)$$

Temperatura de entrada:

$$T_{ent} = -10.2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.5)$$

Temperatura de salida:

$$T_{sal} = 5.3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.6)$$

Temperatura promedio:

$$T_{prom} = \frac{-10.2 + 5.3}{2} = -2.45 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.7)$$

Datos obtenidos de tablas para el Refrigerante R-134a:

Viscosidad cinemática:

$$V = 1.6390 \times 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (3.8)$$

Viscosidad dinámica:

$$\mu = 0.202 \text{ [cP]} = 0.000202 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (3.9)$$

Conductividad térmica:

$$k = 0.08113 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (3.10)$$

Densidad:

$$\rho = 1293 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.11)$$

Prandt:

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{k} \quad (3.12)$$

$$Pr = \frac{0.000202 [Pa*s] * 4184 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]}{0.08113 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 10.41745 [1]$$

Procedimiento del Cálculo de la longitud del serpentín evaporador.

Cálculo del flujo volumétrico:

$$\dot{Q}_v = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3.13)$$

$$\dot{Q}_v = \frac{2.6804 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right]}{1293 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 2.073 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Área transversal del tubo:

$$A1 = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (3.14)$$

$$A1 = \frac{\pi * (0.00635)^2}{4} = 3.167 \times 10^{-5} [m^2]$$

Cálculo de la velocidad del gas a través del serpentín:

$$\dot{Q}_v = v * A1 \rightarrow v = \frac{\dot{Q}_v}{A1} \quad (3.15)$$

$$v = \frac{2.073 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{3.167 \times 10^{-5} [m^2]} = 0.06546 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} = \frac{v * d}{\nu} \quad (3.16)$$

$$Re = \frac{0.06546 \left[\frac{m}{s} \right] * 0.00635 [m]}{1.6390 \times 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]} = 2535.99 [1]$$

Para flujo de calor uniforme:

Número de Nusselt

$$Nu = 1.268 * (Re)^{0.26} (Pr)^{\frac{1}{6}} \quad (3.17)$$

$$Nu = 1.268 * (2535.99)^{0.26} (10.41745)^{\frac{1}{6}} = 14.38217 [1]$$

h convectiva para el refrigerante R-134a:

$$Nu = \frac{h * d}{k} \rightarrow h = \frac{Nu * k}{d} \quad (3.18)$$

$$h = \frac{14.38217 [1] * 0.08113 \left[\frac{W}{mK} \right]}{0.00635 [m]} = 183.75 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Calor extraído por convección del refrigerante al agua:

$$W = h * A * (\Delta T) \quad (3.19)$$

Despejando el área de transferencia:

$$A = \frac{W}{h * (\Delta T)} \quad (3.20)$$

$$A = \frac{186.42 [W]}{183.75 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * (278.45 - 262.95)[K]} = 0.06405 [m^2]$$

Por lo que la longitud del serpentín evaporador queda como:

$$A = \pi * d * L \rightarrow L = \frac{A}{\pi * d} \quad (3.21)$$

$$L = \frac{0.06405 [m^2]}{\pi * (0.00635)[m]}$$

$L = 3.21062 [m]$

3.1.2 Condensador

3.1.2.1 Longitud del serpentín condensador

Datos para el cálculo de la longitud del serpentín evaporador:

Capacidad específica de calor:

$$Cp = 4.184 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] \quad (3.1)$$

Potencia del compresor:

$$W = 186.42 [W] \quad (3.2)$$

El diámetro del tubo que se utilizará para la construcción del serpentín será de 4.7625 [mm] (3/16 [in]) utilizando como material para su construcción, cobre.

Diámetro:

$$d = 0.0047625 [m] \quad (3.22)$$

Datos obtenidos de manera experimental con la Bomba de Calor diseñada y fabricada para el laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Flujo másico del refrigerante:

$$\dot{m} = 2.6804 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (3.4)$$

Temperatura de entrada:

$$T_{ent} = 90 [^{\circ}C] \quad (3.23)$$

Temperatura de salida:

$$T_{sal} = 71 [^{\circ}C] \quad (3.24)$$

Temperatura promedio:

$$T_{prom} = \frac{90+71}{2} = 80.5 [^{\circ}C] \quad (3.25)$$

Datos obtenidos de tablas para el Refrigerante R-134a:

Viscosidad cinemática:

$$V = 1.6390 \times 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (3.8)$$

Viscosidad dinámica:

$$\mu = 0.202 \text{ [cP]} = 0.000202 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (3.9)$$

Conductividad térmica:

$$k = 0.08113 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (3.10)$$

Densidad:

$$\rho = 1206 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.26)$$

Prandt:

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (3.12)$$

$$Pr = \frac{0.000202 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \cdot 4184 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]}{0.08113 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 10.41745 \text{ [1]}$$

Procedimiento del Cálculo de la longitud del serpentín evaporador.

Cálculo del flujo volumétrico:

$$\dot{Q}_v = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3.13)$$

$$\dot{Q}_v = \frac{2.6804 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right]}{1206 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 2.2226 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Área transversal del tubo:

$$A1 = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (3.14)$$

$$A1 = \frac{\pi * (0.0047625)^2}{4} = 1.7814 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$$

Cálculo de la velocidad del gas a través del serpentín:

$$\dot{Q}_v = v * A1 \rightarrow v = \frac{\dot{Q}_v}{A1} \quad (3.15)$$

$$v = \frac{2.2226 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{1.7814 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}} = 0.1248 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} = \frac{v * d}{\nu} \quad (3.16)$$

$$Re = \frac{0.1248 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * 0.0047625 \text{ [m]}}{1.6390 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]} = 3625.33 \text{ [1]}$$

Para flujo de calor uniforme:

Número de Nusselt

$$Nu = 1.268 * (Re)^{0.26} (Pr)^{\frac{1}{6}} \quad (3.17)$$

$$Nu = 1.268 * (3625.33)^{0.26} (10.41745)^{\frac{1}{6}} = 15.7825 \text{ [1]}$$

h convectiva para el refrigerante R-134a:

$$Nu = \frac{h * d}{k} \rightarrow h = \frac{Nu * k}{d} \quad (3.18)$$

$$Nu = \frac{15.7825 [1] * 0.08113 \left[\frac{W}{mK} \right]}{0.0047625 [m]} = 268.858 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Calor extraído por convección del refrigerante al agua:

$$W = h * A * (\Delta T) \quad (3.19)$$

Despejando el área de transferencia:

$$A = \frac{W}{h * (\Delta T)} \quad (3.20)$$

$$A = \frac{186.42 [W]}{268.858 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * (363.15 - 344.15) [K]} = 0.0365 [m^2]$$

Por lo que la longitud del serpentín evaporador queda como:

$$A = \pi * d * L \rightarrow L = \frac{A}{\pi * d} \quad (3.21)$$

$$L = \frac{0.0365 [m^2]}{\pi * (0.0047625) [m]}$$

$$L = 2.439 [m]$$

3.2 ANÁLISIS ENERGÉTICO EN UN COMPRESOR

Con el equipo propuesto se realizó un balance de energía y entropía para calcular el trabajo que requiere el compresor durante su funcionamiento. Para ello se realizaron tomas de presión y temperatura, las cuales se pueden visualizar en la tabla 3.1 y la tabla 3.2.

Equipo	T1 (agua) [°C] (salida)	T2 (agua) [°C] (entrada)	Q = mc(T2 – T1) [J]
Evaporador	5.3	-10.2	-64883
Condensador	71	90	79534

Tabla 3.1. Registro de las temperaturas del agua en el evaporador y en el condensador.

3.2.1 Balance de energía

Datos para el cálculo del calor

Masa:

$$m = 1 \text{ [kg]} \quad (3.25)$$

Capacidad específica de calor:

$$Cp = 4.184 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] \quad (3.1)$$

Cálculo de calor

$$Q = mCp(T_2 - T_1) \quad (3.26)$$

$$Q_{\text{evaporador}} = (1 \text{ [kg]}) \left(4.186 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right] \right) (-10.2 \text{ [}^\circ\text{C]} - 5.3 \text{ [}^\circ\text{C]})$$

$$Q_{\text{evaporador}} = -64883 \text{ [J]}$$

$$Q_{\text{condensador}} = (1 \text{ [kg]}) \left(4.186 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right] \right) (90 \text{ [}^\circ\text{C]} - 71 \text{ [}^\circ\text{C]})$$

$$Q_{\text{condensador}} = 79534 \text{ [J]}$$

Equipo	P[Pa]	T[°C]
Evaporador	49033.3	-1.5
Condensador	2059000	63.8

Tabla 3.2. Registro de presiones y temperaturas del refrigerante en el evaporador y en el condensador.

Balance de energía y entropía

$$W_{\text{comp}} = Q_{\text{alta}} - Q_{\text{baja}} \quad (3.26)$$

$$W_{\text{comp}} = [mCp_{\text{agua}}(T_2 - T_1)]_{\text{condensador}} - [mCp_{\text{agua}}(T_2 - T_1)]_{\text{evaporador}} \quad (3.27)$$

$$W_{comp} = (1 [kg]) \left(4.186 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \right) (90 [^\circ C] - 71 [^\circ C]) - (1 [kg]) \left(4.186 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \right) (-10.2 [^\circ C] - 5.3 [^\circ C])$$

$$W_{comp} = 144417 [J]$$

Potencia del motor

$$W = \frac{W_{comp}}{\Delta t} \quad (3.28)$$

$$W = \frac{144417 [J]}{15 [min] (60 [seg])}$$

$$W = 160.463 [watts]$$

Flujo másico

$$\dot{m} = \frac{W}{h_2 - h_1} \quad (3.29)$$

Datos de entalpía del refrigerante 134a de acuerdo con la tabla A-11, Apéndice 1 en el evaporador y condensador, tomando en cuenta las condiciones de temperatura y presión, [7]

$$h_{condensador} = h_2 = 422.59 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.30)$$

$$h_{evaporador} = h_1 = 260.5 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.31)$$

$$\dot{m} = \frac{160.463 [watts]}{422.59 \left[\frac{kJ}{kg} \right] - 260.5 \left[\frac{kJ}{kg} \right]}$$

$$\dot{m} = \frac{160.463 \left[\frac{J}{s} \right]}{162.09 \left[\frac{J}{g} \right]}$$

$$\dot{m} = 0.9899 \left[\frac{g}{s} \right] = 0.9899 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

3.2.2 Balance de entropía

Cambio de entropía en el compresor

$$\Delta S_{comp} = (S_{cond} - S_{evap}) = m (S_{cond} - S_{evap}) \quad (3.32)$$

Datos de entropía del refrigerante 134a de acuerdo con la tabla A-11, Apéndice 1 en el evaporador y condensador, tomando en cuenta las condiciones de temperatura y presión, [7]

$$S_{condensador} = S_{cond} = 1.4066 \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \quad (3.33)$$

$$S_{evaporador} = S_{evap} = 1.088 \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \quad (3.34)$$

$$\Delta S_{comp} = 0.9899 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right] (60 [seg]) (15) \left(1.4066 \left[\frac{kJ}{kg K} \right] - 1.088 \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \right)$$

$$\Delta S_{comp} = 0.2839 \left[\frac{kJ}{K} \right]$$

$$\Delta S_{amb} = \frac{Q_{cond}}{T_{amb}} + \frac{Q_{evap}}{T_{amb}} \quad (3.35)$$

$$\Delta S_{amb} = \frac{79534 [J]}{(20 + 273.15)[^{\circ}C]} + \frac{-64883 [J]}{(20 + 273.15)[^{\circ}C]}$$

$$\Delta S_{amb} = 49.978 \left[\frac{J}{K} \right] = 0.049978 \left[\frac{kJ}{K} \right]$$

$$\Delta S_{sist} = \Delta S_{comp} + \Delta S_{amb} \quad (3.36)$$

$$\Delta S_{sist} = 0.2839 \left[\frac{kJ}{K} \right] + 0.04998 \left[\frac{kJ}{K} \right]$$

$$\Delta S_{sist} = 0.3339 \left[\frac{kJ}{K} \right]$$

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS ENERGÉTICO EN UN COMPRESOR

En el capítulo tres, sección dos, se realizó el análisis energético del compresor, así como de entropía, esto con la intención de calcular el trabajo que requiere el compresor durante su funcionamiento, en dicho calculo se obtuvo como resultado del experimento una potencia de 160.463 [watts], considerando que la potencia teórica es de 186 [watts] se obtiene una eficiencia de 86.27% de acuerdo con la formula (4.1).

$$E = \left(1 - \left(\frac{W_{teorica} - W_{experimental}}{W_{teorica}} \right) \right) * 100 \quad (4.1)$$

$$E = \left(1 - \left(\frac{186 [watts] - 160.463 [watts]}{186 [watts]} \right) \right) * 100 = 86.2705\%$$

Este análisis permite al alumno tener un panorama más amplio sobre el funcionamiento de un sistema termodinámico cerrado y le permitirá tener los conocimientos suficientes de los procesos que se llevan a cabo en una máquina térmica.

Con este análisis se comprobó que el compresor tiene un funcionamiento considerablemente bueno debido a que solo tiene un 13.7295% de error que puede ser causado por las condiciones ambientales a las que está trabajando el ciclo, algunas impurezas en el refrigerante R134a o por una variación en el voltaje que requiere el compresor para operar.

De acuerdo con una práctica realizada por alumnos de la Facultad de Ingeniería en 2022 con el equipo austero que se encuentra en el Laboratorio de Termodinámica, se obtuvo una potencia de 76.27822 [W] con los siguientes datos de entrada y salida:

Equipo	T1 (agua) [°C] (salida)	T2 (agua) [°C] (entrada)	Q = mc(T2 – T1) [J]
Evaporador	23.8	9.8	-234,416
Condensador	24	42.1	303,066.4

Tabla 4.1. Registro de las temperaturas del agua en el evaporador y en el condensador. [Tomado de practica de laboratorio de termodinámica, 2022]

Considerando que la potencia teórica es de 186 [watts] se obtiene una eficiencia de 41.01% de acuerdo con la formula (4.1).

$$E = \left(1 - \left(\frac{W_{teorica} - W_{experimental}}{W_{teorica}} \right) \right) * 100 \quad (4.1)$$

$$E = \left(1 - \left(\frac{186 \text{ [watts]} - 76.27822 \text{ [watts]}}{186 \text{ [watts]}} \right) \right) * 100 = 41.01\%$$

Por lo que el error obtenido con el equipo que se encuentra en el laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería es de 58.99%, este error tan grande es debido al tiempo que lleva de funcionamiento el equipo y a que su vida útil ya termino, a las impurezas del refrigerante, al desgaste interno de los serpentines evaporador y condensador.

Debido a que un sistema de refrigeración por compresión mecánica debe enfocarse en ahorrar energía, se realizó un balance de entropía.

La entropía se genera por la transmisión de calor entre el refrigerante y el medio ambiente, por la fricción debido a la circulación del refrigerante y la fricción mecánica, el uso del cálculo de la entropía y el análisis energético permite realizar una evaluación de energía al sistema de refrigeración es por ello que se realiza dicho calculo, con este análisis se conoce la situación en su realidad del equipo, como la cantidad de energía que se debe ahorrar, así como la transferencia de calor que existe entre el refrigerante y el medio ambiente, al realizar el balance de entropía se obtiene la cantidad de energía que se requiere para pasar de un estado a otro.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se llevó a cabo el diseño, fabricación y pruebas de un equipo didáctico “Bomba de calor” que permite la visualización, compresión y estudio de fenómenos físicos de la Termodinámica a estudiantes de licenciatura de Ingeniería Mecánica en la división de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería.

Todo el proceso de diseño está vinculado con las pruebas en el equipo, debido a que en este momento se debe analizar las diferentes dificultades que se pueden presentar en un futuro al realizar los experimentos, si no se contemplan esas dificultades se visualizaría de manera negativa el tiempo invertido y el costo de fabricación.

Es importante destacar que con ayuda de nuevas tecnologías se pueden desarrollar equipos didácticos a bajo costo, y en consecuencia puede reproducirse para diferentes escuelas y puede ser empleado tanto a nivel licenciatura como en bachillerato.

Con los resultados obtenidos se llega a la conclusión:

- Es posible llevar a cabo análisis de balance de energía y entropía para calcular el trabajo de un compresor en un sistema termodinámico cerrado, aplicando la segunda ley de la termodinámica.
- Se permite al alumno comparar los resultados teóricos con los experimentales y de esta manera el profesor cuenta con una herramienta que le permite comprobar diferentes fenómenos físicos en el área de la termodinámica.
- El alumno podrá interactuar con el equipo ya que podrá realizar mediciones de presión y temperatura en diferentes puntos del sistema, por otro lado, el profesor tendrá la oportunidad de realizar prácticas adicionales como la obtención de la eficiencia térmica y dar una explicación más detallada del funcionamiento de una máquina térmica.
- Es posible trabajar a condiciones semejantes a los equipos usados en el laboratorio de termodinámica.

En el capítulo 4 “Resultados” se comprobó que el equipo diseñado para sustituir el actual que se encuentra en el laboratorio de Termodinámica en la Facultad de Ingeniería, tiene una mayor eficiencia, teniendo únicamente un error del 13.7295%, contra un error del -221.07% del equipo actual, por lo que se concluye que si es necesario realizar la actualización del equipo didáctico bomba de calor para que los resultados de las prácticas de laboratorio sean cercanos a la realidad, con eficiencias dentro del rango válido, dentro del 100%.

Por las razones anteriormente mencionadas, el equipo satisface las necesidades indicadas en el capítulo dos; fácil transporte e instalación, diseño ergonómico, sencillo y funcional para una

experimentación efectiva y didáctica a los estudiantes y docentes, el cumplimiento con al menos dos prácticas “análisis energético de un compresor” y “análisis termodinámico de una bomba de calor”.

REFERENCIAS

- [1] Gunt Hamburg. Equipment for Engineering Education: Productos de Refrigeración. Sitio web: <https://www.gunt.de/es/>
- [2] Arthur Shavit, Chaim Gutfinger. (2009). Thermodynamics: From Concepts to Applications. United States: CRC Press.
- [3] Gunt Hamburg. Bomba de Calor y Acumulador de Hielo. Sitio web: https://www.gunt.de/images/download/heat-pumps_spanish.pdf. Recuperado el 10/04/2021.
- [4] Francisco Javier Rey Martínez, Eloy Velasco Gómez. (2005). Bomba de Calor y Energías Renovables en Edificios. Paraninfo SA.
- [5] William C. Whitman, William M. Johnson. (2000). Tecnología de la Refrigeración y Aire Acondicionado I: Fundamentos. Paraninfo SA.
- [6] William C. Whitman, William M. Johnson. (2000). Tecnología de la Refrigeración y Aire Acondicionado II: Refrigeración Comercial. Paraninfo SA.
- [7] Yunes A Cengel, Michael A. Boles. (2011). Termodinámica. McGraw-Hill.
- [8] A. Serrano Nicolás. (2015). Neumática Práctica. Paraninfo SA.
- [9] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. (2004). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Reverte SA.
- [10] Carlos U. Rodríguez. (2018). Metodología de Selección de Refrigerantes: Alternativas Ecológicas y Eficientes Energéticamente. Sitio Web: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/180>. Recuperado el 10/10/2021.
- [11] GASSERVEI. Ficha Técnica Refrigerante R-134a. Sitio Web: <https://gas-servei.com/shop/docs/ficha-tecnica-r-134a-gas-servei.pdf>. Recuperado el 15/10/2021.
- [12] Juan G. Barbosa, Claudia C. Gutiérrez, José A. Jiménez. (2015). Termodinámica para ingenieros. Patria.
- [13] Merle C. Potter, Elaine P. Scott. (2004). Termodinámica. Thomson.
- [14] José L. Pérez S., Fernando Gamboa R. (2009). Física. Oxford
- [15] Antonio Castruita V. (1986). Taller sobre fundamentos del mantenimiento de sistemas
-

de refrigeración. Centro de Instrumentos, UNAM.

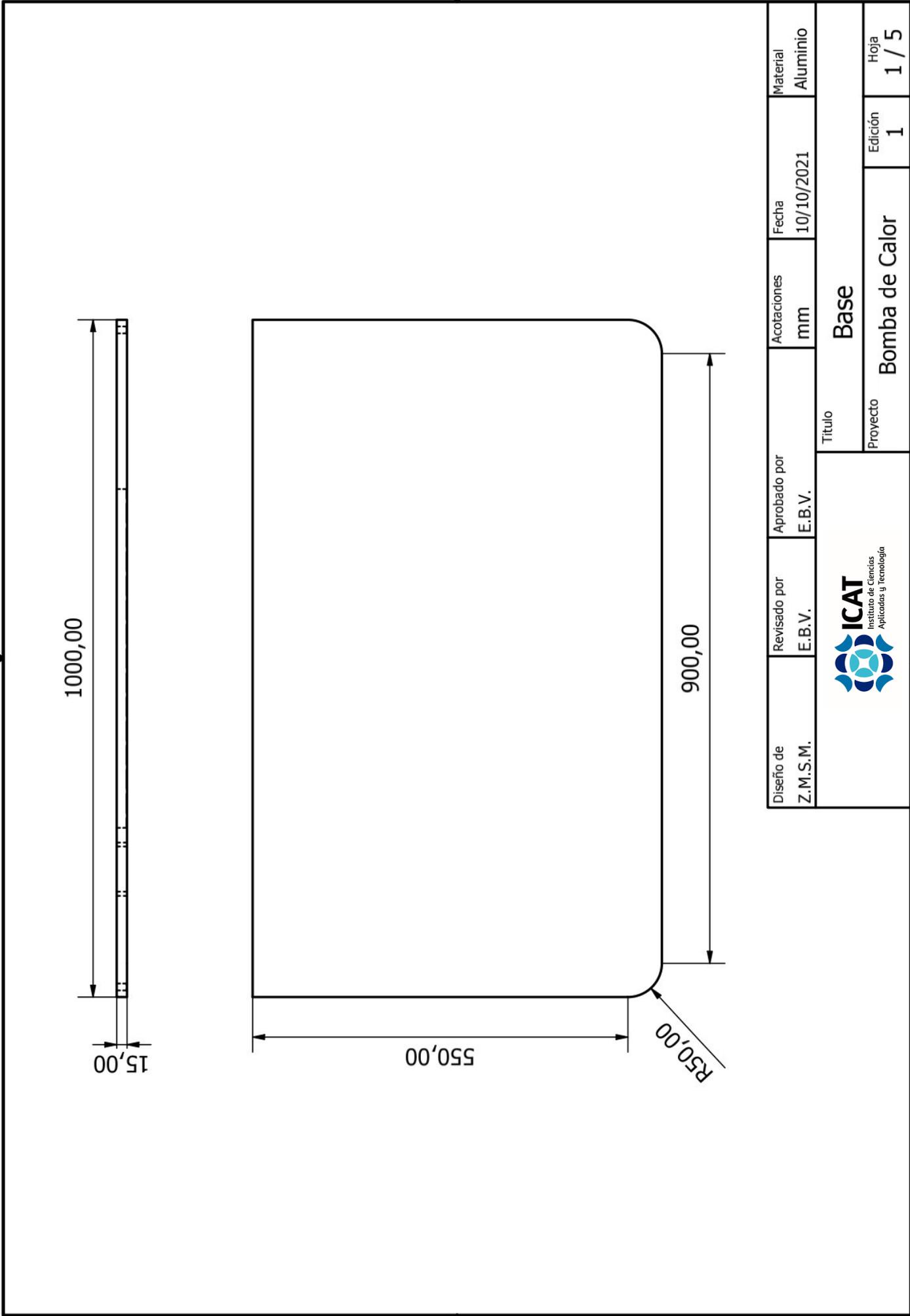
[16] Raymond. A. Serway, John W. Jewett, Jr. (2019). Física para ciencias e ingeniería. CENGAGE.

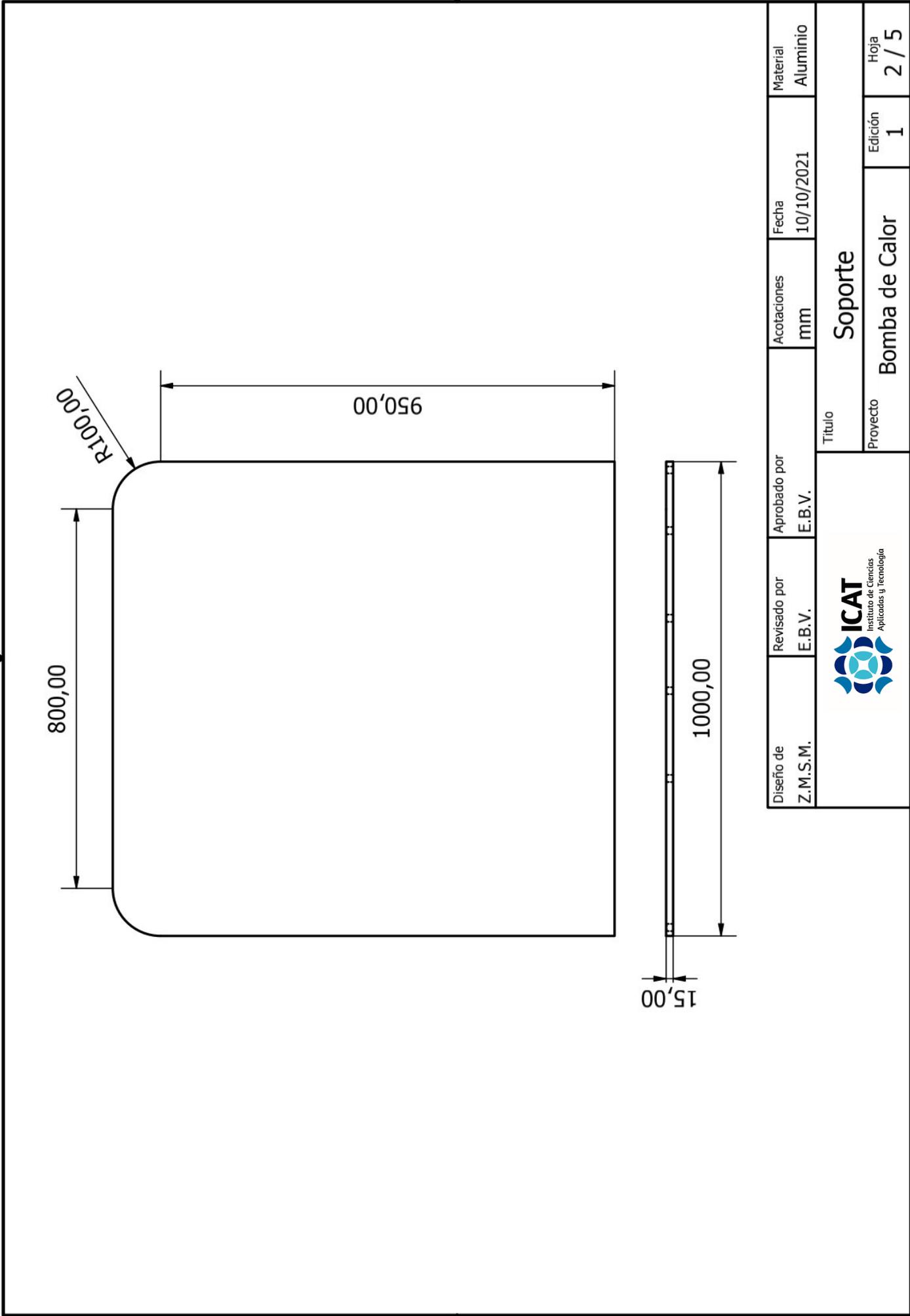
[17] Paul G. Hewitt. (2002). Física conceptual. PEARSON.

[18] Francis Weston S. (1978). Termodinámica. REVERTÉ, S.A.

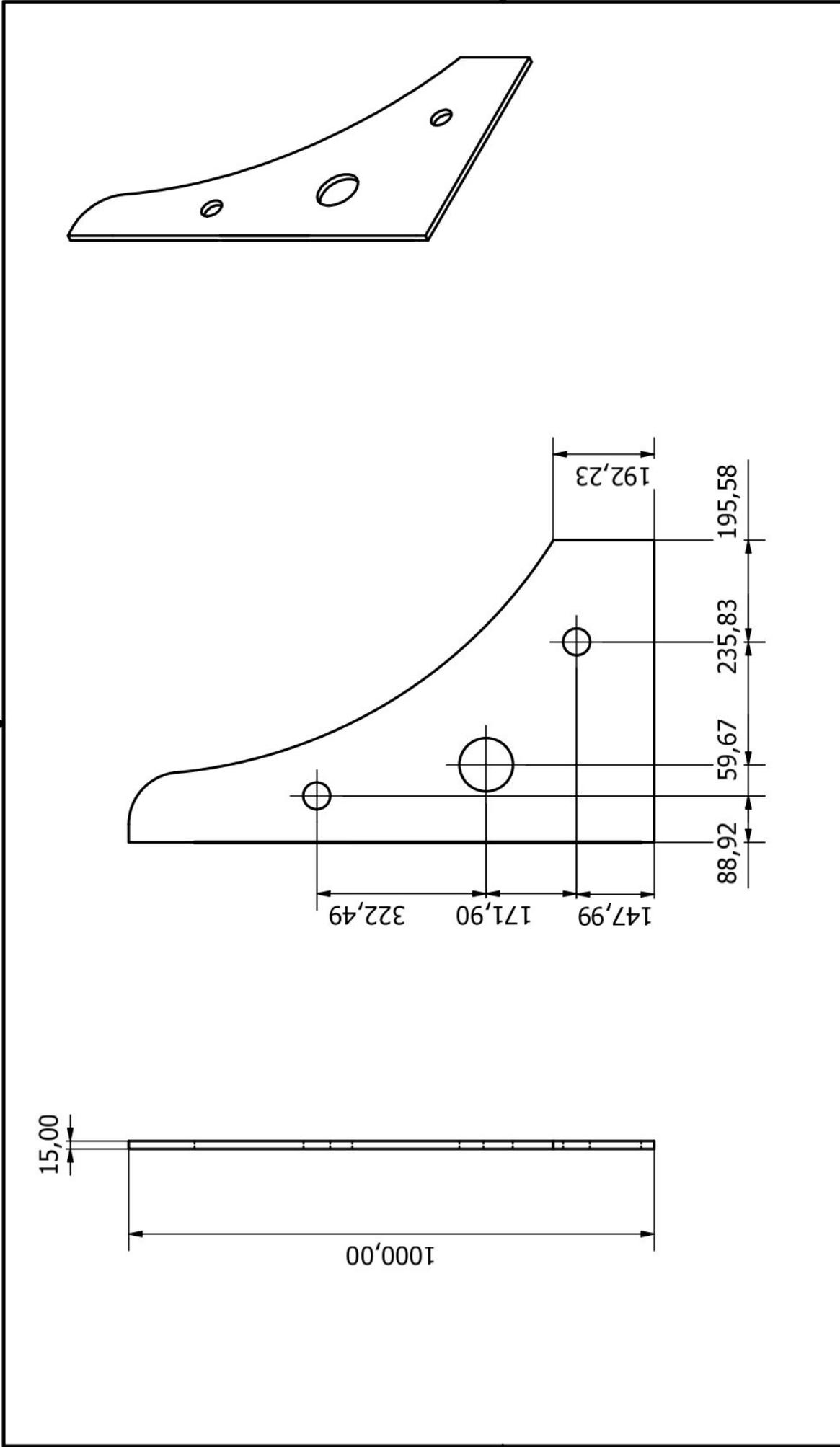
ANEXO I

PLANOS DEL EQUIPO

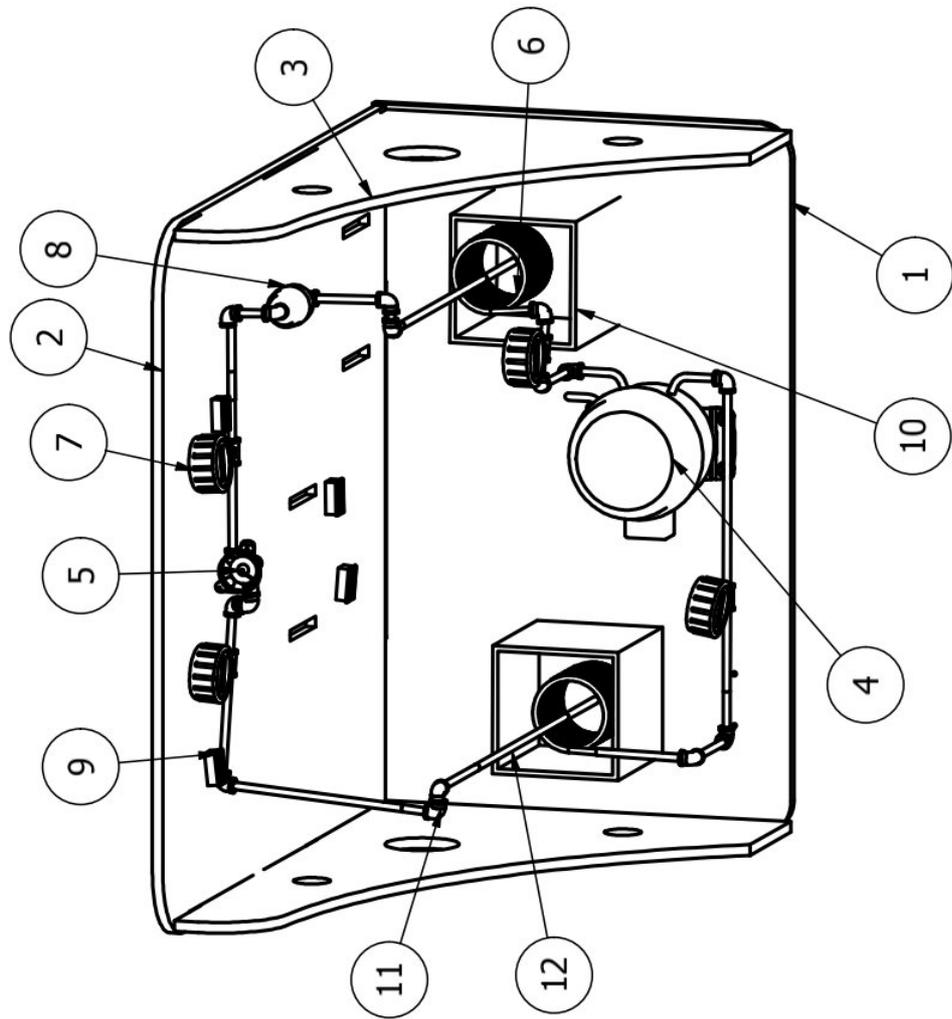




Diseño de Z.M.S.M.	Revisado por E.B.V.	Aprobado por E.B.V.	Acotaciones mm	Fecha 10/10/2021	Material Aluminio
 ICAT Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología			Título Soporte Proyecto Bomba de Calor		

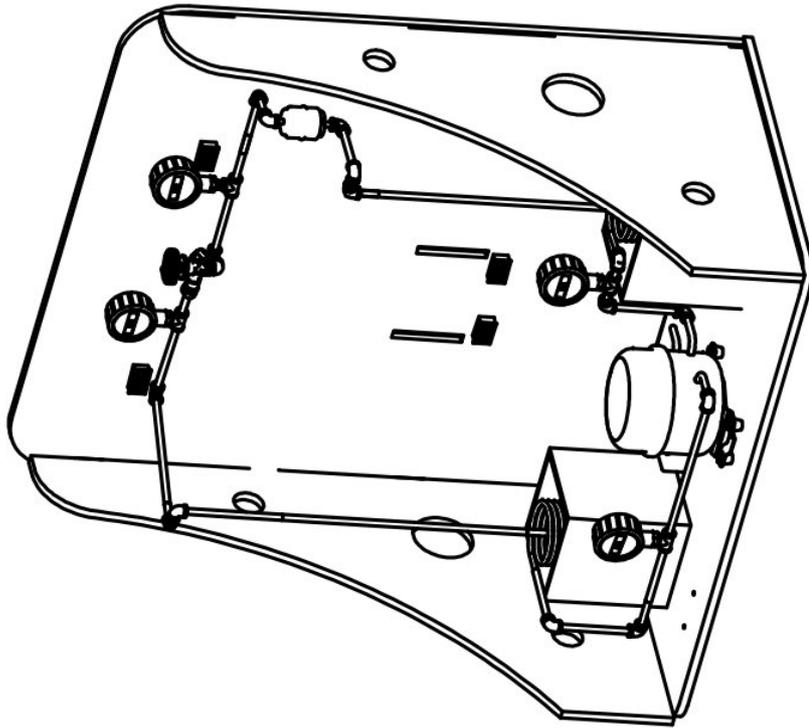


Diseño de Z.M.S.M.	Revisado por E.B.V.	Aprobado por E.B.V.	Acotaciones mm	Fecha 10/10/2021	Material Aluminio
			Laterales Bomba de Calor		



LISTA DE PIEZAS	
ELEMENTO	Nº DE PIEZA
1	Base
2	Soporte
3	Lateral
4	Compresor
5	Valvula expansion
6	Serpentines
7	Manometro digital
8	Deshumidificador
9	Termometro
10	Recipiente
11	Uniones
12	Tuberia

Diseño de Z.M.S.M.	Revisado por E.B.V.	Aprobado por E.B.V.	Acotaciones mm	Fecha 10/10/2021	Material
 ICAT Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología			Titulo Equipo con referencia numerica		Hoja 4 / 5
			Proyecto Bomba de Calor		Edición 1



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base	Aluminio
2	1	SopORTE	Aluminio
3	2	Lateral	Aluminio
4	1	Compresor	1/4 hp
5	1	Valvula expansion	Tubo capilar
6	2	Serpentines	Cobre: Evaporador 1/4 y Condensador de 3/16
7	4	Manometro digital	
8	1	Deshumidificador	
9	4	Termometro	
10	2	Recipiente	Acrilico
11	18	Uniones	
12	15	Tuberia	

Diseño de Z.M.S.M.	Revisado por E.B.V.	Aprobado por E.B.V.	Acotaciones mm	Fecha 10/10/2021	Material
			Titulo Equipo Bomba de Calor		
			Proyecto Bomba de Calor		Edición 1

ANEXO II

PRÁCTICA PROPUESTA

Práctica 1

**Análisis energético en un
compresor.**

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Manejar con cuidado la bomba de calor PT, sólo puede trabajar máximo 15 minutos.	Si excede el tiempo de operación, se apagará automáticamente y puede dañarse.
2	Compresor (accionado con motor eléctrico).	Evite derramar agua sobre el equipo, ya que puede provocar un corto circuito y dañarlo.

2. Objetivos

- Identificar los componentes de una unidad de refrigeración (bomba de calor PT) propuesta para la práctica.
- Realizar un balance de energía y entropía para calcular el trabajo que requiere el compresor durante su funcionamiento.

3. Bases teóricas

El compresor es un componente indispensable en los sistemas de refrigeración y en las plantas de turbinas de gas.



Figura 1. Diferentes tipos de compresores

Existen dos tipos generales de compresores: de movimiento alternativo (rectilíneo) y de movimiento rotatorio. En el caso de altas presiones y flujo volumétricos bajos, se prefiere el compresor de movimiento alternativo; cuando se trata de presiones bajas y flujos de gran intensidad, se utiliza por lo común el compresor de tipo rotatorio. Pero no existe una presión distintiva que sirva para separar estos dos tipos de máquinas, puesto que los compresores rotatorios pueden desarrollar también presiones elevadas.

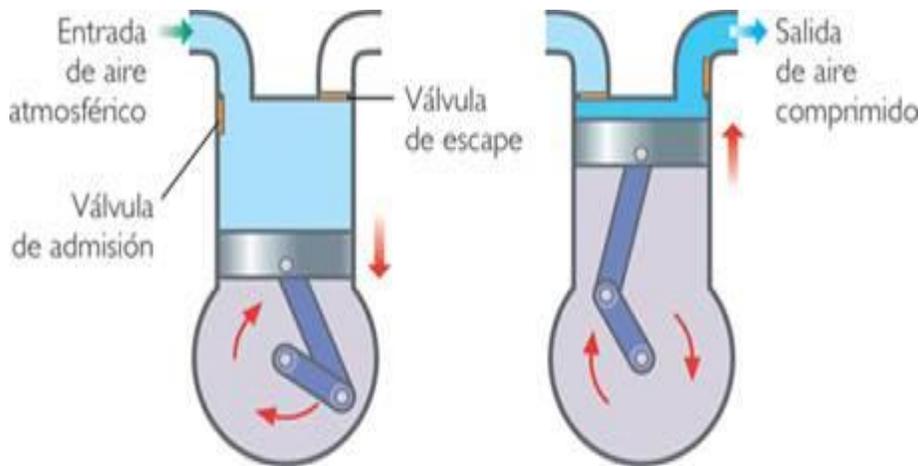


Figura 2. Compresor de pistón cilindro (este tipo de compresor es el que se utilizará en la práctica)

Una de las principales áreas de aplicación de la termodinámica es la refrigeración, que es la transferencia de calor de una región de temperatura inferior hacia una temperatura superior. Los dispositivos que producen la refrigeración se llaman refrigeradores. Los refrigeradores son dispositivos cíclicos y los fluidos de trabajo empleados en los ciclos de refrigeración, se llaman refrigerantes. En la figura 3, se muestra de manera esquemática un refrigerador.

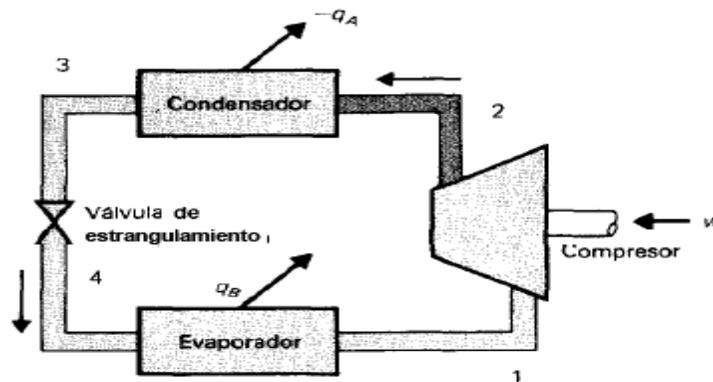


Figura 3. Sistema de refrigeración y sus componentes.

Procesos termodinámicos durante la refrigeración:

- 1-2 Compresión adiabática ($Q = 0$, $s = \text{cte}$)
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante ($P = \text{cte}$)
- 3-4 **Expansionamiento** del fluido ($h = \text{cte}$)
- 4-1 Suministro de calor a presión constante ($P = \text{cte}$)

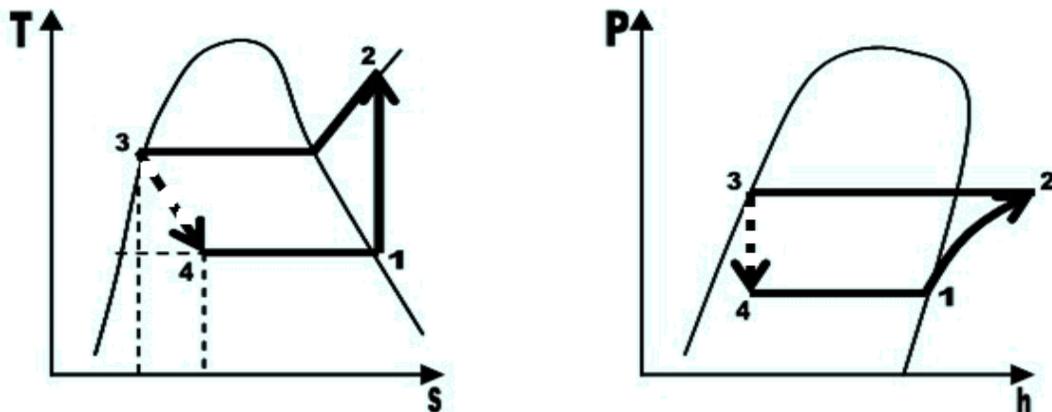


Figura 4. Diagramas termodinámicos que representan el proceso de refrigeración.

4. Equipo y material

1	Unidad de refrigeración denominada “ Bomba de calor PT ”
2	Termómetros de inmersión
1	Termopar
1	Agitador de plástico de 30 [cm] de longitud
1	Cronómetro
8	Litros de agua
	Tablas de propiedades termodinámicas computarizadas (CATT3) del refrigerante R-134a

5. Desarrollo

- a. Identificar las partes que componen la unidad de refrigeración.
- b. Identificar el fluido de trabajo y algunas de las características del mismo.
- c. Llenar las cubetas con agua hasta cubrir la tubería de cobre en el condensador y evaporador (4 litros por cubeta).

Figura 5. Sistema de refrigeración denominado “**Bomba de Calor PT**”.

- d. Registrar las temperaturas del agua antes de poner en operación la unidad de refrigeración.
- e. Poner en funcionamiento la unidad de refrigeración durante 15 minutos.
- f. Registrar nuevamente las temperaturas del agua tanto del evaporador como del condensador (no olvide agitar el agua constantemente antes del registro de la temperatura).

- g. Registrar las presiones del refrigerante en el evaporador y en el condensador, así como las temperaturas correspondientes, con ayuda de los instrumentos instalados en la unidad de refrigeración.
- h. Calcular los flujos de calor en el evaporador y en el condensador.
- i. Registrar los datos en las tablas 1 y 2.
- j. Con base a la 1ª ley de la Termodinámica, aplicada a un ciclo, calcular el trabajo y la potencia del compresor.

Tabla 1. Registro de las temperaturas del agua en el evaporador y en el condensador.

Equipo	T ₁ (agua) [°C]	T ₂ (agua) [°C]	Q = mc(T ₂ - T ₁) [J]
Evaporador			
Condensador			

Tabla 2. Registro de presiones y temperaturas del refrigerante en el evaporador y en el condensador.

Equipo	P[Pa]	T[°C]
Evaporador		
Condensador		

Balances de energía y entropía:

Trabajo del compresor.

$$W_{comp} = Q_{alta} - Q_{baja}$$

$$W_{comp} = [mc_{agua}(T_2 - T_1)]_{cond} - [mc_{agua}(T_2 - T_1)]_{evap}$$

Potencia del compresor.

$$\dot{W} = \frac{W}{\Delta t}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{h_2 - h_1}$$

Cambio de entropía en el compresor.

$$\Delta S_{comp} = (S_2 - S_1) = m(s_2 - s_1)$$

$$\Delta S_{amb} = \frac{Q_{cond}}{T_{amb}} - \frac{Q_{evap}}{T_{amb}}$$

$$\Delta S_{sist} = \Delta S_{comp} + \Delta S_{amb}$$

$$\Delta S_{sist} = m(s_2 - s_1) + \left[\frac{Q_{cond}}{T_{amb}} - \frac{Q_{evap}}{T_{amb}} \right]$$

6. Bibliografía

- Wark, Kenneth, Termodinámica. Sexta edición, 2001 España. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Kurt C. Rolle, Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice Hall.
- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología, Quinta edición, 2001 España. Reverté.

7. Anexo

Cuestionario previo. Análisis energético en un compresor.

1. ¿Qué es una máquina térmica y una bomba de calor?
2. Dibuje un esquema de una máquina térmica y de una bomba de calor, indicando los flujos energéticos involucrados.
3. ¿Qué es un compresor y qué tipos de compresores se utilizan industrialmente?
4. Investigue las características del refrigerante R-134a.
5. Escriba la ecuación de la primera ley de la termodinámica aplicada a un ciclo y explique cada uno de sus términos.
6. Con base en la primera ley de la Termodinámica escriba la ecuación que permita calcular el trabajo que requiere el compresor adiabático para su funcionamiento.

7. Escriba la ecuación del balance de entropía en un compresor y explique cada uno de sus términos.
8. Investigue y explique qué es la eficiencia, la eficiencia mecánica, la eficiencia térmica y la eficiencia adiabática.
9. Investigue y escriba la ecuación que se aplica para calcular la eficiencia adiabática en un compresor.
10. Dibuje los diagramas termodinámicos (s, T), (h, P) y (v, P) para una máquina de refrigeración.

8. Índice de temas de estudio

PRÁCTICA: “ANÁLISIS ENERGÉTICO EN UN COMPRESOR.

Definir los siguientes conceptos:

- Compresor
- Tipos de compresores industriales
- Máquina térmica
- Bomba de calor
- Balance de energía para sistemas abiertos
- Segunda ley de la Termodinámica
- Balance de entropía
- Eficiencia de una máquina
- Diagramas termodinámicos (s,T), (h,P) y (v,P)
- Proceso isobárico
- Proceso adiabático
- Proceso isentrópico

Práctica 2

Análisis termodinámico de una bomba de calor

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Manipule con cuidado la bomba de calor, sólo puede funcionar como máximo 15 minutos continuos.	Si excede el lapso indicado, la bomba se apagará automáticamente.
2	Evite derramar agua sobre el compresor.	Es un equipo eléctrico y puede provocarse un circuito corto.

2. Objetivos de aprendizaje

- Identificar las partes esenciales que componen el ciclo básico de refrigeración por la compresión de un vapor.
- Identificar y cuantificar los flujos energéticos en el ciclo mencionado en el punto anterior.
- Determinar el coeficiente de operación de la bomba de calor operando como refrigerador.
- Conocer, a partir del análisis de un ciclo de refrigeración, algunas limitantes que establece la segunda ley de la Termodinámica.
- Construir el diagrama termodinámico (v, P), que describen los procesos termodinámicos que se llevan a cabo en el ciclo.

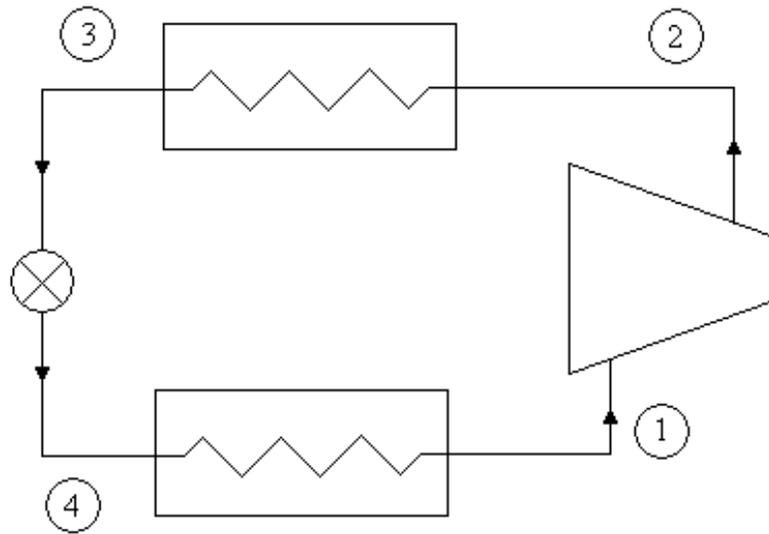
3. Material y equipo

termómetro digital con dos puntas sensores
bomba de calor PT (refrigerador)
ocho litros de agua
cronómetro digital
dos agitadores de plástico

4. Desarrollo

Actividad 1

En el siguiente diagrama, identifique las partes esenciales que componen un ciclo de refrigeración por la compresión de un vapor. Señale también los flujos energéticos asociados a cada aparato.



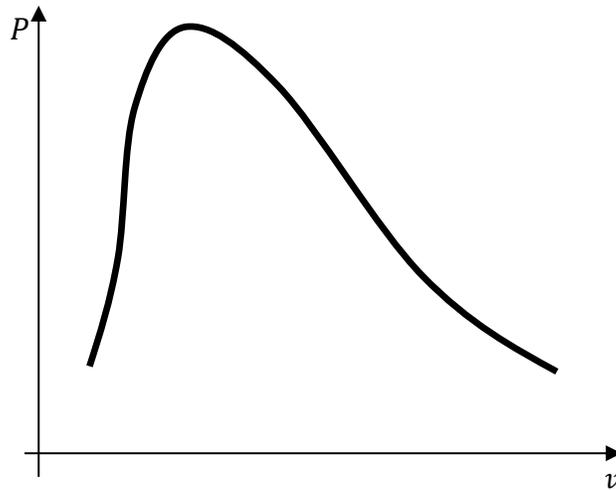
Actividad 2

Dibuje una representación física de la bomba de calor PT que se le proporcionó, indicando las partes básicas del ciclo de acuerdo con la actividad anterior. Identifique la sustancia activa (refrigerante) que emplea el equipo.

Sustancia activa: _____

Actividad 3

En la siguiente figura, que representa una gráfica de la presión (P) en función del volumen específico (v) para una sustancia, dibuje cómo se representarían los procesos asociados al ciclo de la actividad anterior. No olvide indicar los cuatro estados que se muestran en la figura de la actividad 1.



Actividad 4

Establezca las características estáticas de los medidores instalados en el dispositivo. Observe con detenimiento las dos escalas que presenta el instrumento y no olvide anotar las unidades correspondientes.

Medidor de carátula de la izquierda

	Presión	Temperatura
Rango		
Resolución		
Legibilidad		

Medidor de carátula de la derecha

	Presión	Temperatura
Rango		
Resolución		
Legibilidad		

Actividad 5

En cada recipiente del equipo proporcionado coloque 4 litros de agua. Mida la temperatura de cada cantidad de agua. Éstas serán las temperaturas iniciales.

i) *En el evaporador:*

$$T_{inicial} = \text{_____} [^{\circ}C] = \text{_____} [K]$$

ii) *En el condensador:*

$$T_{inicial} = \underline{\hspace{2cm}} [^{\circ}C] = \underline{\hspace{2cm}} [K]$$

Actividad 6

Ponga a funcionar el dispositivo durante 10 minutos. Mida las temperaturas finales del agua en los recipientes, no olvide homogeneizar el agua con el agitador antes de tomar las lecturas. Por otra parte, mida las presiones (alta y baja) del refrigerante, así como las temperaturas de saturación correspondientes, con ayuda de los medidores instalados en el dispositivo.

Para el agua:

i) *En el evaporador:*

$$T_{final} = \underline{\hspace{2cm}} [^{\circ}C] = \underline{\hspace{2cm}} [K]$$

ii) *En el condensador:*

$$T_{final} = \underline{\hspace{2cm}} [^{\circ}C] = \underline{\hspace{2cm}} [K]$$

Para el refrigerante:

i) $P_{baja} = \underline{\hspace{2cm}} [bar] = \underline{\hspace{2cm}} [Pa];$

$$T_{sat} = \underline{\hspace{2cm}} [^{\circ}C]$$

ii) $P_{alta} = \underline{\hspace{2cm}} [bar] = \underline{\hspace{2cm}} [Pa];$

$$T_{sat} = \underline{\hspace{2cm}} [^{\circ}C]$$

Actividad 7

Con base en los resultados obtenidos, cuantifique los flujos energéticos asociados al agua del evaporador y al agua del condensador. Considere que para el agua en su fase líquida $c_p = 4186 [J/(kg \Delta K)]$ y $Q = m c_p \Delta T$.

A partir del resultado anterior, determine los flujos energéticos para el refrigerante en el evaporador y en el condensador.

En el agua:

$$Q_{evaporador} = \underline{\hspace{2cm}} [\quad]$$

$$Q_{\text{condensador}} = \underline{\hspace{2cm}} [\quad]$$

En el refrigerante:

$$Q_{\text{evaporador}} = \underline{\hspace{2cm}} [\quad]$$

$$Q_{\text{condensador}} = \underline{\hspace{2cm}} [\quad]$$

Actividad 8

De acuerdo con la primera ley de la Termodinámica para un ciclo, determine el trabajo en el compresor.

$$W_{\text{compresor}} = \underline{\hspace{2cm}} [\quad]$$

Calcule la potencia en el compresor, considerando el tiempo de operación.

$$\dot{W}_{\text{compresor}} = \underline{\hspace{2cm}} [\quad]$$

Actividad 9

Determine el coeficiente de operación del dispositivo. Recuerde que:

$$\beta = \frac{\text{lo que se desea}}{\text{lo que hay que aportar}}. \text{ No olvide anotar sus unidades.}$$

$$\text{coeficiente de operación} = \beta = \underline{\hspace{2cm}} [\quad]$$

5. Cuestionario

1. Investigue las propiedades físicas y químicas principales de la sustancia de trabajo (refrigerante) del dispositivo.
2. ¿En qué condición física la presión del sistema determina el valor de la temperatura?
3. ¿Por qué razón en el dispositivo, las escalas de presión y temperatura de los medidores no se presentan en forma independiente?
4. Elabore una gráfica como la de la actividad 3, indicando el mayor número de propiedades que determinó en esta práctica para los cuatro estados principales del ciclo de refrigeración.

5. Identifique los depósitos térmicos asociados al ciclo en el dispositivo empleado.
6. Haga un esquema de un refrigerador doméstico identificando los depósitos térmicos del punto anterior.
7. Con base en las actividades realizadas en la práctica, ¿cómo podría verificarse el postulado de Clausius?

6. Conclusiones

7. Bibliografía recomendada

- Young H.D. y Freedman R.A.; “Sears y Zemansky FÍSICA UNIVERSITARIA CON FÍSICA MODERNA” Vol. 1; Editorial Pearson; 13ª edición; México, 2014.