

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PANELES INTERCAMBIABLES PARA EL LABORATORIO DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL DE LA ESFOT

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
TECNÓLOGO SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA**

Anthony Saúl Cárdenas Sillo

anthony.cardenas@epn.edu.ec

Sebastián Alexander Pasaco Vélez

sebastian.pasaco@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. HUGO FRANCISCO ZÚÑIGA PUEBLA, MSc.

hugo.zuniga@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. MIGUEL DARÍO ORTEGA LÓPEZ, MSc.

miguel.ortega@epn.edu.ec

Quito, febrero 2022

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Anthony Saúl Cárdenas Sillo y el Sr. Sebastián Alexander Pasaco Vélez como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA, bajo nuestra supervisión:



Firmado electrónicamente por:
**HUGO FRANCISCO
ZUNIGA PUEBLA**

Ing. Hugo Zúñiga MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Firmado digitalmente por MIGUEL DARIO ORTEGA LOPEZ
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, serialNumber=1709931396, ou=ORTEGA LOPEZ, cn=MIGUEL DARIO ORTEGA LOPEZ, 1.2.840.1.1.27442.1.6.4=1709931396, ou=Certificado de Clase 2 de Persona Física EC (PFRMA), givenName=MIGUEL DARIO, email=migueldarioortega@hotmail.com, 2.5.4.12=Certificado para Persona Natural, st=PICHINCHA, o=QUITO
Fecha: 2022.02.07 17:07:47 -05'00'

**MIGUEL DARIO
ORTEGA
LOPEZ**

Ing. Miguel Ortega MSc.

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros Cárdenas Sillo Anthony Saúl con CI: 1719980466 y Pasaco Vélez Sebastián Alexander con CI: 0104552948 declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



Cárdenas Sillo Anthony Saúl

CI: 1719980466

Teléfono: 0984742654

Correo: anthony.cardenas@epn.edu.ec



Pasaco Vélez Sebastián Alexander

CI: 0104552948

Teléfono: 0978726463

Correo: sebastian.pasaco@epn.edu.ec

DEDICATORIA

El presente proyecto dedico a las personas que me han acompañado en el transcurso de mi carrera y me han sabido guiar, como lo son Stalin Llagua jefe de taller automotriz que inculco este gusto por la resolución de problemas mecánicos, gran influencia para elegir y continuar con mi carrera. A mis compañeros e ingenieros de carrera en especial a mi compañero de tesis Sebastián Pasaco y compañero desde primer semestre Erick Vélez por afrontar y ayudarnos en lo posible cada semestre culminado. Y a las personas que creyeron en mí y brindaron su granito de arena para que nunca me rindiera en lo que me proponga.

Saúl C.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, sin ellos no lo hubiera logrado. Lo primero mi madre Marina Sillo una gran mujer que ha impartido coraje y valor en mi para saber afrontar las situaciones difíciles que presenta la vida, mi padre Saúl Cárdenas León un grato placer llevar su nombre con orgullo pues este triunfo es producto de todo el esfuerzo que me ha brindado para que siga adelante con la cabeza en alto. Mis hermanos mayores Javier y Alexandra, prácticamente como mis segundos padres, gracias hermanos con su ayuda, sus experiencias, sus recomendaciones, me han servido para poder tomar sabias decisiones en mi vida estudiantil. Y en especial a mi hermano pequeño Alex, gracias al cargo de hermano mayor siempre ha sido un aliento dar un buen ejemplo y demostrar que con esfuerzo y dedicación se logra con lo que se propone.

Saúl C.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que me apoyaron y confiaron en mí, en especial a mis padres quienes son una inspiración para mí y que me enseñaron que con esfuerzo y dedicación se logra cualquier objetivo.

Sebastián P.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme todos los de mi vida y por permitirme cumplir este logro.

A mis padres Dany y Ana Lucía por haberme ofrecido la oportunidad de estudiar, por su esfuerzo, por su amor, por su confianza y apoyo incondicional en cada decisión que he tomado.

A mi compañero de tesis Saúl, con quien pasamos tantas cosas para lograr culminar este trabajo, por su constancia y su esfuerzo entregado durante el desarrollo de este proyecto.

A mi tutor de tesis el Ing. Hugo Zúñiga por la enseñanza de nuevos y valiosos conocimientos, por haberme guiado, no solo durante todo el desarrollo de este proyecto, sino a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis hermanos Dennis, Francisco y Damessis por creer en mí y estar incondicionalmente junto a mí en todo momento.

A los docentes de la Escuela Politécnica Nacional que supieron transmitir sus conocimientos preparándome para mi vida profesional.

En fin, agradezco a todos los que de alguna forma colaboraron en la realización de este proyecto.

Sebastián P.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	1
1.1	Objetivo general	2
1.2	Objetivos específicos	2
1.3	Fundamentos	2
2	Metodología.....	5
2.1	Descripción de la metodología usada	5
3	Resultados y Discusión	8
3.1	Dimensionamiento del sistema de refrigeración	8
	Condiciones de diseño	8
	Ciclo de refrigeración	9
	Cálculos relativos al ciclo de refrigeración	11
	Cálculo de carga térmica	13
	Carga por transmisión de calor a través de las paredes.....	13
	Carga del producto.....	15
	Carga por equipos.....	16
	Carga de servicio	17
	Carga total.....	17
3.2	Selección de componentes e instrumentos	18
	Refrigerante.....	18
	Condensador.....	19
	Visor de refrigerante.....	19
	Filtro hércules.....	20
	Válvula de expansión	20
	Evaporador.....	21
	Manómetros de presión	21
	Controlador de temperatura.....	21
3.3	Construcción de la estructura	22

Estructura	23
Cámara de enfriamiento.....	23
Paneles intercambiables	24
Caja de control	25
Sistema eléctrico y de control	26
3.4 Ensamble del sistema de refrigeración	27
Sistema de refrigeración	27
3.5 Pruebas de funcionamiento	29
Procedimiento durante el ensamble: Presurización con nitrógeno.....	29
Procedimiento durante el ensamble: vacío en el sistema.....	31
Procedimiento durante el ensamble: carga de refrigerante	31
Análisis del funcionamiento del sistema	32
Presiones del sistema de refrigeración.....	33
Análisis de la temperatura de condensación y evaporación.....	35
Temperatura de la cámara de enfriamiento	36
Análisis de carga térmica	38
3.6 Manual de usuario y mantenimiento	39
3.7 Hojas guías	40
4 Conclusiones y Recomendaciones.....	41
4.1 Conclusiones.....	41
4.2 Recomendaciones	43
5 Referencias Bibliográficas	44
ANEXOS	46
Anexo 1: Certificado de Funcionamiento	46
Anexo 2: Manual del Controlador de Temperatura MT-512E2HP	46
Anexo 3: Planos y Esquemas	46
Anexo 4: Diagrama PI&D	46
Anexo 5: Manual de uso y Mantenimiento.....	46
Anexo 6: Hoja Guías	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.	3
Figura 1.2	Controlador Full Gauge.....	5
Figura 2.1	Esquema de la metodología del proyecto.	7
Figura 3.1	Ciclo real de refrigeración	9
Figura 3.2	Refrigerante R-134a.....	19
Figura 3.3	Condensador tipo parilla.	19
Figura 3.4	Visor de refrigerante.....	20
Figura 3.5	Filtro hércules.....	20
Figura 3.6	Tubo capilar.....	20
Figura 3.7	Evaporador.....	21
Figura 3.8	Manómetros de baja y alta presión.....	21
Figura 3.9	Controlador de temperatura Full Gauge.....	22
Figura 3.10	Esquema del módulo didáctico.....	22
Figura 3.11	Proceso de soldadura.	23
Figura 3.12	Ensamble de la estructura del módulo didáctico.....	23
Figura 3.13	Construcción de la cámara de enfriamiento.....	24
Figura 3.14	Recubrimiento de paredes.....	24
Figura 3.15	Materiales aislantes para las paredes (madera y poliestireno).....	24
Figura 3.16	Manija.....	25
Figura 3.17	Pared intercambiable.	25
Figura 3.18	Caja de control.....	25
Figura 3.19	Diagrama eléctrico.	26
Figura 3.20	Esquema del sistema de refrigeración.	27
Figura 3.21	Unión de manómetros con condensador y evaporador.	28
Figura 3.22	Unión de visor, filtro y tubo capilar.....	28
Figura 3.23	Unión del compresor a los manómetros.....	28
Figura 3.24	Presurización con nitrógeno.	29
Figura 3.25	Inspección visual para localizar fugas.....	30
Figura 3.26	Comprobación de presiones de baja.....	30
Figura 3.27	Comprobación de presiones de alta.....	31
Figura 3.28	Proceso de vacío en el sistema de refrigeración.	31
Figura 3.29	Carga de refrigerante R-134a.....	32
Figura 3.30	Corriente de trabajo del compresor para la carga del R-134a.....	32

Figura 3.31	Gráfica presión vs tiempo con pared de tol	34
Figura 3.32	Gráfica presión vs tiempo con pared de tol-madera-tol	34
Figura 3.33	Gráfica presión vs tiempo con pared de tol-poliestireno-tol	35
Figura 3.34	Gráfica temperatura vs tiempo con pared de tol	36
Figura 3.35	Gráfica temperatura vs tiempo con pared de tol-madera-tol	37
Figura 3.36	Gráfica temperatura vs tiempo con pared de tol-poliestireno-tol	38
Figura 3.37	Manual de usuario y mantenimiento	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características del controlador.....	5
Tabla 3.1 Características del compresor.....	8
Tabla 3.2 Propiedades termodinámicas.....	11
Tabla 3.3 Características de materiales aislantes.....	14
Tabla 3.4 Coeficiente de convección.....	14
Tabla 3.5 Carga a través de paredes.....	15
Tabla 3.6 Carga de servicio.....	17
Tabla 3.7 Carga total.....	18
Tabla 3.8 Presión y temperatura de evaporación.....	35
Tabla 3.9 Presión y temperatura de condensación.....	36
Tabla 3.10 Tiempo de encendido y apagado del compresor.....	38

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se implementó un módulo didáctico de un sistema de refrigeración con paneles intercambiables en la cámara para analizar la diferencia de la carga térmica con diferentes materiales como: tol, madera y poliestireno en las paredes.

Para el diseño de la cámara y el sistema de refrigeración, se usó un compresor de 1/8 (hp) y analizando el ciclo de refrigeración para hallar el calor del evaporador del sistema que es de 153.5 (W). Además, se calculó la carga térmica, que implica carga por paredes, carga del producto, carga por equipos, carga de servicio y factor de seguridad. Se determinó la carga total de refrigeración con cada uno de los diferentes materiales obteniendo la mayor carga térmica con tol que es de 63.83 (W) con lo que se demuestra que el compresor seleccionado funcionará correctamente con cada uno de los materiales.

Se fabricó una estructura rígida con ángulos de acero para apoyar el sistema de refrigeración e instrumentación. A partir de las características del compresor, se seleccionó el refrigerante, condensador y evaporador, el ensamble del sistema de refrigeración se realizó con soldadura OAW.

Se realizó presurización con nitrógeno para corregir fugas en el sistema, vacío para extraer aire/humedad, ambos previo a la carga de refrigerante. Además, se realizaron pruebas de funcionamiento, analizando las variables de presión, temperatura y el tiempo de encendido/apagado del compresor en una hora, cuando el equipo opera con cada material. Con poliestireno se tuvo el menor tiempo de encendido que es de 20:07 (min-seg).

PALABRAS CLAVE: Refrigeración, carga térmica, termodinámica, transferencia de calor

ABSTRACT

In the present degree project, a didactic module of a cooling system with interchangeable panels in the chamber was implemented to analyze the difference of the thermal load while using different materials like steel sheet, wood and polystyrene in the walls.

For the chamber and cooling system designs, they were based on a 1/8 (hp) compressor and the cooling cycle analysis lead to find the evaporator heat which is 153.5 (W). In addition, the thermal load, which are wall loading, product loading, equipment loading, service loading and safety factor, was calculated. The total cooling load was determined with each of the different materials obtaining the thermal load highest when using the steel sheet, it is 63.83 (W).

A rigid structure with steel angles was manufactured to support the cooling system and instrumentation. From the compressor characteristics, the refrigerant, condenser and evaporator were selected, the cooling system assembly was made with OAW welding.

Nitrogen pressurization was performed to correct leaks in the system, vacuum to extract air/humidity, both previous to the refrigerant filling. In addition, performance tests were carried out, analyzing the pressure, temperature and the compressor on/off time in one-hour variables while the equipment operated with each material. The shortest switched-on time was with polystyrene, it is 20:07 (min-sec).

KEYWORDS: Refrigeration, thermal load, thermodynamics, heat transfer

1 INTRODUCCIÓN

Descripción del problema

Según la Universidad Tecnológica Nacional (Buenos Aires, Argentina), los conceptos básicos de la termodinámica presentan dificultades en los estudiantes, por ejemplo: entalpía, energía interna, energía, trabajo y primer principio de la termodinámica, por lo cual si los estudiantes tienen un aprendizaje únicamente teórico se les complica transferir las clases teóricas a situaciones reales. Se estima que las prácticas de laboratorio permiten que los estudiantes experimenten los conceptos básicos aprendidos en teoría. Desde este punto de vista se busca prácticas de laboratorio inclinadas a estudios de procesos termodinámicos para que los estudiantes tengan un aprendizaje interdisciplinario [1].

La Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) en la actualidad cuenta con equipos didácticos limitados en donde los estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica llevan a cabo las prácticas de Sistemas de Refrigeración. Los equipos que se encuentran de refrigeración son escasos a comparación de la cantidad de estudiantes que se encuentran al realizar las respectivas prácticas, por este motivo hay dificultades en las instrucciones dictadas por los docentes. Por ello, surge la necesidad de obtener un equipo adicional en dicha área mecánica. Con proyectos que se han implementado anteriormente en la Escuela Politécnica Nacional, se han visto resultados favorables con la creación de equipos didácticos a partir de proyectos de titulación para los estudiantes [2].

Para garantizar la enseñanza y aprendizaje se propone diseñar y construir un módulo didáctico de refrigeración con paneles intercambiables, se observa el funcionamiento del módulo con diferentes materiales aislantes en las paredes, una vez que el sistema funcione con diferentes materiales se puede corroborar que el compresor tiene diferente factor de uso.

Justificación

El presente proyecto tiene como fin implementar un módulo didáctico de enfriamiento con paneles intercambiables para la ESFOT que beneficiará a los estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica. Esto permitirá llevar a cabo las prácticas relacionadas con un sistema de refrigeración en el módulo didáctico de refrigeración que tendrá diferentes materiales aislantes en las paredes del módulo.

Según la ASHRAE, la humanidad “de una manera empírica” comenzó a desarrollar la forma de mantener la frescura de los productos. Esta técnica lentamente fue evolucionando debido a una existencia de sobrepoblación que conllevaba a una demanda de más alimentos a mantener frescos, por lo tanto, se aumenta el consumo de energía eléctrica. Se puede reducir el consumo de electricidad construyendo cámaras frigoríficas con diferentes materiales aislantes. El material aislante que se empleará para este proyecto debe cumplir ciertas características como: tener baja conductividad térmica, ser muy poco higroscópico, ser incombustible y ser neutro químicamente [3] [4].

El módulo didáctico de refrigeración tendrá la opción de cambiar el material aislante de las paredes. Esto con el fin de comparar qué tipo de material aislante mantiene la temperatura por mayor tiempo. Si el material es seleccionado correctamente permite un ahorro energético, dado que el compresor se mantiene encendido menos tiempo, por lo tanto, reduce el consumo de energía eléctrica. El certificado de funcionamiento del equipo se muestra en el Anexo 1.

1.1 Objetivo general

Implementar un módulo didáctico de refrigeración con paneles intercambiables para el laboratorio de tecnología industrial de la ESFOT.

1.2 Objetivos específicos

- Dimensionar el sistema de refrigeración.
- Seleccionar los componentes del sistema de refrigeración e instrumentos de medición y de control para el sistema de refrigeración.
- Construir la estructura del módulo didáctico de un sistema de refrigeración con paneles aislantes e intercambiables.
- Ensamblar el sistema de refrigeración.
- Realizar pruebas de funcionamiento en el módulo didáctico de refrigeración.
- Elaborar un manual de usuario y mantenimiento.
- Elaborar hojas guías para prácticas de laboratorio

1.3 Fundamentos

A continuación, se muestran conceptos teóricos importantes para llevar a cabo el desarrollo del módulo didáctico de refrigeración.

Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo ideal 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 [5]:

- 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 la Figura 1.1, se muestran los componentes que forman parte del ciclo de refrigeración por compresión de vapor y el diagrama T-s del ciclo.

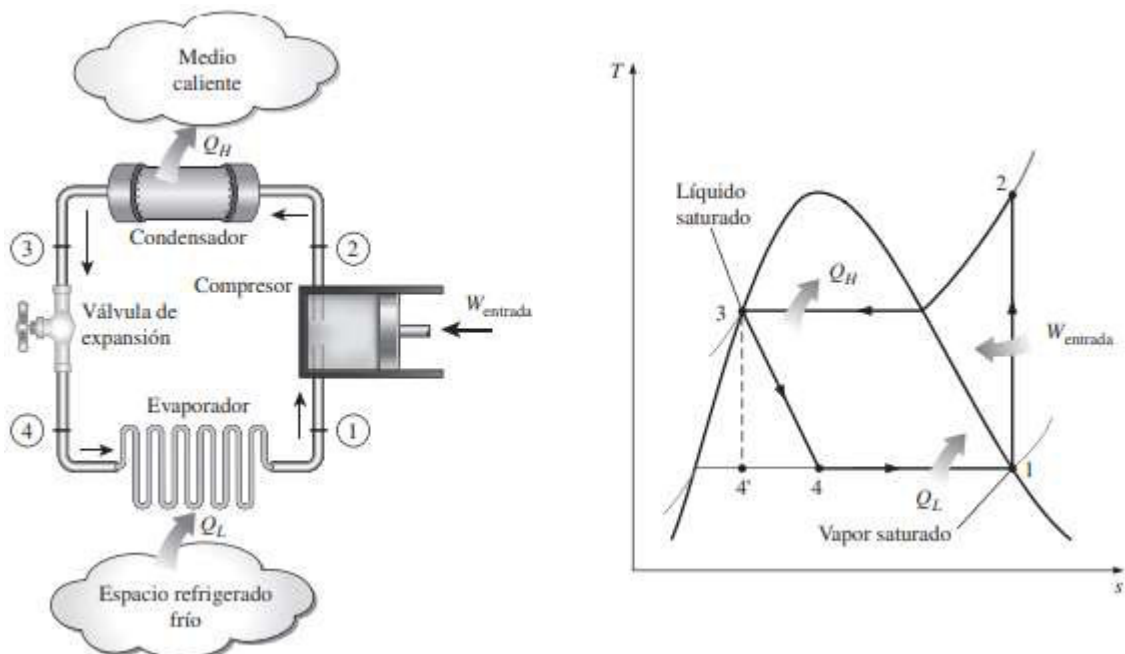


Figura 1.1 Esquema del ciclo de refrigeración por compresión de vapor [5].

En el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra al compresor como vapor saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión del condensador, la temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isentrópica. Luego el refrigerante entra en el condensador como vapor sobrecalentado y sale como líquido saturado hacia una válvula de expansión, la cual la estrangula hasta la presión del evaporador. El refrigerante entra al evaporador 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 [5].

Carga térmica

La carga térmica es la cantidad de calor que debe ser extraída del sitio a refrigerar. Las fuentes de calor más usuales en un equipo de refrigeración son:

- Calor que atraviesa del exterior al espacio refrigerado por conducción a través de paredes no aisladas.
- Calor que llega al espacio refrigerado por radiación directa a través de materiales transparentes.
- Calor que atraviesa al espacio refrigerado debido al aire exterior caliente el cual pasa a través de puertas que se abren y a través de rendijas que se tienen alrededor de puertas y ventanas.
- Calor cedido del producto.
- Calor cedido por las personas dentro del espacio refrigerado.
- Calor cedido por cualquier equipo productor de calor localizado dentro del espacio refrigerado [6].

Carga térmica a través de paredes

La carga térmica a través de las paredes es muy común en aplicaciones de refrigeración y representa una parte considerable de la carga total de enfriamiento. Esta carga térmica es la transferencia de calor que existe entre el ambiente y el espacio refrigerado por las paredes, siempre habrá un intercambio de calor entre el espacio refrigerado y el ambiente debido a que la temperatura del interior es menor a la temperatura del exterior [7]. La transferencia de calor a través de paredes se da por: conducción y convección.

- **Conducción**

La transferencia de calor por conducción es el resultado de interacciones directas entre cuerpos sólidos, líquidos o gases, la tasa de conducción de calor de un cuerpo depende de su geometría, su grosor y su material [8].

- **Convección**

La transferencia de calor por convección se produce entre un cuerpo sólido y un líquido o gas adyacente que está en movimiento, e involucra los efectos combinados de conducción y movimiento de fluidos. Cuanto más rápido sea el movimiento del fluido, mayor será la transferencia de calor por convección [8].

Sistema de control de refrigeración

Para controlar la temperatura de refrigeración en un sistema, una alternativa es utilizar el controlador MT-512el2HP de la marca Full Gauge que se observa Figura 1.2.



Figura 1.2 Controlador Full Gauge [9].

El controlador MT-512el2HP muestra los cambios de temperatura en una pantalla, además, permite tener un control ON/OFF con histéresis para controlar la temperatura dentro de la cámara de enfriamiento, a los 5 (°C) el compresor junto al ventilador se apaga y a los 10 (°C) el compresor y ventilador se enciende teniendo un valor de histéresis de 5 (°C). La temperatura es medida por un sensor NTC que está conectado al mismo. En la Tabla 1.1, se muestra las características de funcionamiento del controlador.

Tabla 1.1 Características del controlador

Características	
Alimentación	12 o 24 V _{DC}
Temperatura de control	-50 a 105°C (-58 a 221°F)
Temperatura de operación	0 a 50°C / 32 a 122°F
Humedad de operación	10 a 90% HR (sin condensación)
Resolución	0,1°C
Corriente máxima de la carga	16A para cargas tipo resistivas y 12A para cargas tipo inductivas
Potencia máxima de la carga	2HP

Fuente: [9]

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la metodología usada

El diseño del módulo didáctico para el análisis del sistema de refrigeración y carga térmica por paredes se basó en un estudio aplicado. Tiene como finalidad solventar la falta de equipos del Laboratorio de Tecnología Industrial en el área de refrigeración.

En la Figura 2.1, se muestra el esquema de la metodología usada para el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se determinó las condiciones de diseño en base a la capacidad de un compresor reciclado y la carga térmica. Los parámetros que se consideraron fueron: área a enfriar, temperatura de enfriamiento y el material aislante que se utilizaría como paredes.

Se analizó el tipo de refrigerante adecuado para el compresor y se seleccionaron el condensador, válvula de expansión y evaporador en base al refrigerante y compresor seleccionado. Además de los componentes principales del sistema de refrigeración, se implementó manómetros, sensor de temperatura y controlador.

En el proceso de montaje del módulo, se fabricó la estructura para el apoyo de los componentes de refrigeración y el sistema eléctrico y de control utilizando ángulos 1 ½ (in) de acero, planchas de tol negro 25 y tubos cuadrados 2x2 (cm) de acero basándose en los planos esquemáticos que se realizó en un *software* CAD. Las dimensiones se eligieron en base al tamaño de cada uno de los componentes del sistema de refrigeración.

Se ensambló el sistema de refrigeración utilizando tubería de cobre para unir los diferentes componentes, la unión se realizó con soldadura oxiacetilénica (OAW) con varilla de plata al 5% como material de aporte. Posteriormente, se realizaron pruebas de nitrógeno y de vacío en el sistema de refrigeración para detectar fugas de refrigerante y limpiar el sistema.

Se realizaron pruebas de funcionamiento del equipo tomando datos de presión de condensación, presión de evaporación, temperatura del ambiente refrigerado y tiempo de encendido y apagado del compresor para diferentes materiales aislantes. Finalmente, se realizó el manual de uso y mantenimiento del equipo y hojas guías para las prácticas de laboratorio.

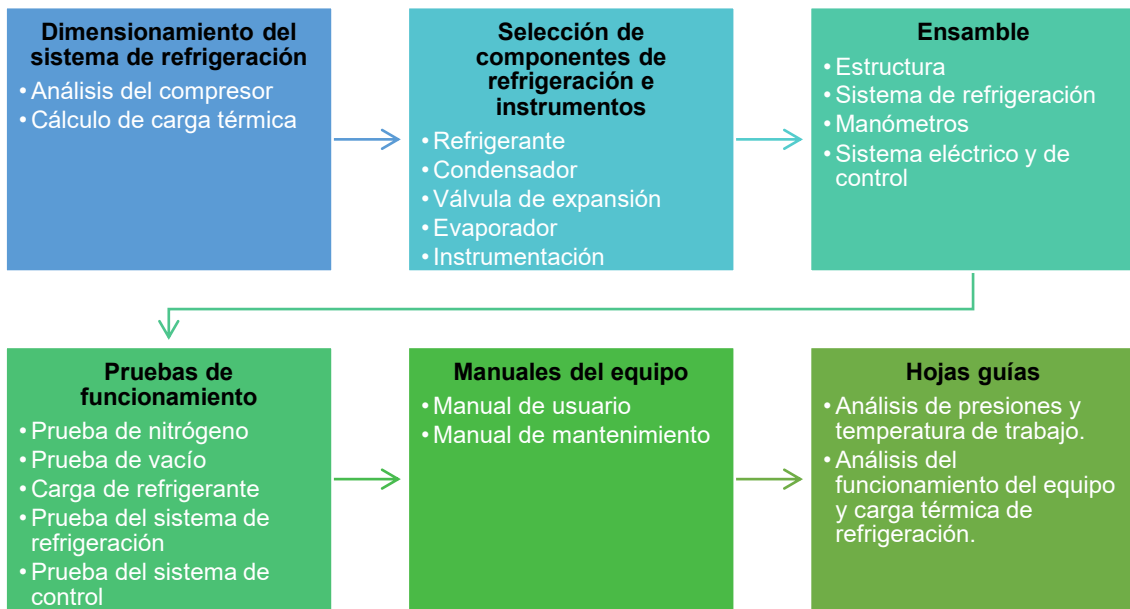


Figura 2.1 Esquema de la metodología del proyecto.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se construyó un módulo didáctico para el análisis del ciclo de refrigeración y carga térmica a través de paredes y se identificaron los componentes principales y secundarios del sistema de refrigeración. Con los diferentes tipos de paredes en el módulo se analizó el funcionamiento del sistema.

A continuación, se presenta el dimensionamiento del sistema de refrigeración, selección de componentes de refrigeración e instrumentación, ensamble, pruebas de funcionamiento, manual de usuario y mantenimiento del equipo y por último hojas guías para prácticas de laboratorio.

3.1 Dimensionamiento del sistema de refrigeración

Condiciones de diseño

El diseño y análisis del sistema de refrigeración se desarrolla con un compresor hermético reciclado de 1/8 hp (\dot{W}_{motorhp}), el cual tiene una eficiencia mecánica del motor del 90% [10] y una eficiencia isentrópica del 50% [11]. En la Tabla 3.1, se indica las características del compresor hermético.

Tabla 3.1 Características del compresor

Características	
Marca	Embraco
Modelo	EMIE 40 HJP
Potencia	1/8 HP
Refrigerante	R 134a
Voltaje de alimentación	115-127 V
Frecuencia	60 Hz

Fuente: [12]

La temperatura del evaporador debe ser menor a la temperatura del espacio a refrigerar para absorber el calor que hay dentro de la cámara de enfriamiento y la temperatura del condensador debe ser mayor a la temperatura del ambiente para rechazar el calor. De esta manera la temperatura del evaporador es de -20 (°C) y la del condensador es 35 (°C). Las presiones de evaporación y condensación se hallaron a partir del concepto de presión de saturación, la presión en el evaporador es de 132.82 (kPa) y en el condensador es de 887.5 (kPa). Durante el análisis, las caídas de presión por fricción del refrigerante en las tuberías y en los componentes principales y secundarios se

consideran despreciables ya que la caída de presión tiene un bajo impacto en el coeficiente de rendimiento (COP) [6].

En un ciclo de refrigeración real existe un sobrecalentamiento a la salida del evaporador y un subenfriamiento a la salida del condensador. Se considera que hay un sobrecalentamiento y un subenfriamiento de 10 (°C) [6].

Ciclo de refrigeración

Para el cálculo de los principales parámetros del ciclo de refrigeración se hace un análisis termodinámico que se parte del ciclo ideal de refrigeración tomando en cuenta los aspectos reales más influyentes que son: eficiencia isentrópica del compresor, sobrecalentamiento y subenfriamiento en la tubería [5]. Para este análisis se utiliza las propiedades termodinámicas del R-134a. En la Figura 3.1, Se muestra el ciclo real de refrigeración y el diagrama de presión vs entalpía del refrigerante.

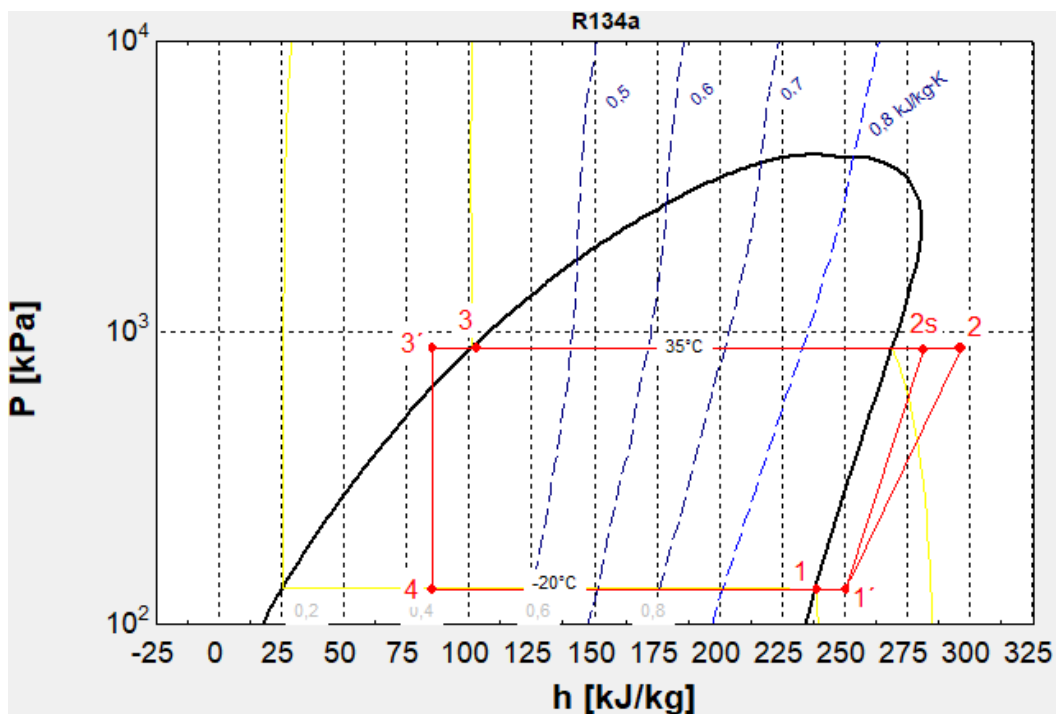


Figura 3.1 Ciclo real de refrigeración

Para el cálculo del ciclo real de refrigeración se parte de las presiones y temperaturas del condensador y evaporador para obtener los valores de temperatura, presión, entalpía, entropía y calidad de refrigerante en cada punto del ciclo considerando lo siguiente:

- Punto 1: Vapor saturado, con la presión de evaporación de 132.82 (kPa) y la calidad del refrigerante de 1 (100% vapor) se calcula la entalpía y entropía en el punto 1.
- Punto 1': Vapor sobrecalentado, con la presión de evaporación de 132.82 (kPa) y el aumento de temperatura a -10 (°C) por sobrecalentamiento se calcula la entalpía y entropía en el punto 1'.
- Punto 2s: Vapor sobrecalentado, con la presión de condensación de 887.5 (kPa) y considerando un proceso isentrópico entre 1' y 2s, es decir manteniendo constante la entropía se calcula la entalpía en el punto 2s.
- Punto 2: Vapor sobrecalentado, con la Ecuación 3.1 se calcula el valor real de la entalpía en el punto 2 considerando la eficiencia isentrópica del compresor hermético y la entalpía en los puntos 1' y 2s.

$$\eta_{sc} = \frac{h_{2s} - h_{1'}}{h_2 - h_{1'}}$$

Ecuación 3.1 Eficiencia isentrópica.

Donde:

- η_{sc} : 0.5 eficiencia isentrópica del motor
- h_{2s} : (kJ/kg) entalpía en el punto 2s
- $h_{1'}$: (kJ/kg) entalpía en el punto 1'
- h_2 : (kJ/kg) entalpía en el punto 2 (valor real)

- Punto 3: Líquido saturado, con la presión de condensación de 887.5 (kPa) y la calidad del refrigerante de 0 (100% líquido) se calcula la entalpía en el punto 3.
- Punto 3': Líquido comprimido, con la presión de condensación de 887.5 (kPa) y la reducción de temperatura a 25 (°C) por subenfriamiento se calcula la entalpía en el punto 3'.
- Punto 4: Mezcla, considerando un proceso isoentálpico, la entalpía es constante entre el punto 3' y 4 ya que no existe trabajo ni calor. La calidad de refrigerante se calcula con la Ecuación 3.2 considerando la entalpía en el punto 4 y entalpías en líquido y vapor saturado.

$$x = \frac{h_4 - h_f}{h_g - h_f}$$

Ecuación 3.2 Calidad de refrigerante.

Donde:

- x : Calidad del refrigerante
- h_4 : (kJ/kg) entalpía en el punto 4
- h_f : (kJ/kg) entalpía del R-134a en líquido saturado
- h_g : (kJ/kg) entalpía del R-134a en vapor saturado

En la Tabla 3.2 se muestra en cada punto del ciclo de refrigeración las propiedades termodinámicas.

Tabla 3.2 Propiedades termodinámicas

Punto	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg*K)	Calidad del refrigerante
1	-20	132.8	238.4	-	1
1'	-10	132.8	246.6	0.9772	-
2s	52.97	887.5	288.1	0.9772	-
2	93.5	887.5	329.6	-	-
3	35	887.5	100.9	-	0
3'	25	887.5	86.41	-	-
4	-20	132.8	86.41	-	0.2861

Cálculos relativos al ciclo de refrigeración

En base a las entalpías en cada punto del ciclo, se calcula el calor absorbido en el evaporador con la Ecuación 3.3 y el trabajo real del compresor con la Ecuación 3.4, ambos por unidad de masa para finalmente obtener el valor de COP con la Ecuación 3.5.

$$q_{\text{evaporador}} = h_1 - h_4$$

Ecuación 3.3 Calor absorbido en el evaporador por unidad de masa.

$$w_{\text{compresor}} = h_2 - h_{1'}$$

Ecuación 3.4 Trabajo real del compresor por unidad de masa.

$$COP = \frac{q_{\text{evaporador}}}{w_{\text{compresor}}}$$

Ecuación 3.5 COP del ciclo de refrigeración.

Donde:

- $w_{\text{compresor}}$: (kJ/kg) Trabajo real del compresor
 COP : Coeficiente de rendimiento
 $q_{\text{evaporador}}$: (kJ/kg) calor del evaporador por unidad de masa

Usando la Ecuación 3.3, Ecuación 3.4 y Ecuación 3.5 se obtiene:

$$q_{\text{evaporador}} = 152 \text{ (kJ/kg)}$$

$$w_{\text{compresor}} = 83 \text{ (kJ/kg)}$$

$$COP = 1.83$$

Con los datos de COP del ciclo de refrigeración y del compresor hermético reciclado se calcula la carga total de refrigeración.

Con la potencia y eficiencia mecánica del motor, se halla el valor de trabajo del compresor con la Ecuación 3.6.

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\dot{W}_{\text{compresor}}}{\dot{W}_{\text{motor}}}$$

Ecuación 3.6 Eficiencia del motor.

Donde:

- η_{motor} : 0.9 eficiencia del motor
 \dot{W}_{motor} : 1/8 (hp); 93.21(W) potencia de trabajo del motor
 $\dot{W}_{\text{compresor}}$: (W) potencia de trabajo del compresor

Usando la Ecuación 3.6 se obtiene:

$$\dot{W}_{\text{compresor}} = 83.89 \text{ (W)}$$

La carga total de refrigeración analizando el ciclo de refrigeración se obtiene con la Ecuación 3.7.

$$\dot{W}_{\text{compresor}} = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporador}}}{COP}$$

Ecuación 3.7 Carga total de refrigeración.

Donde:

- $\dot{W}_{\text{compresor}}$: 83.89 (W) potencia de trabajo del compresor
 COP : 1.83 coeficiente de rendimiento
 $\dot{Q}_{\text{evaporador}}$: (W) calor del evaporador

Usando la Ecuación 3.7 se obtiene:

$$\dot{Q}_{\text{evaporador}} = 153.5 \text{ (W)}$$

Cálculo de carga térmica

Según la referencia [13] para el cálculo de la carga térmica se debe tomar en cuenta la carga por transmisión de calor a través de las paredes, carga del producto, carga por equipos, carga de servicio y considerar un factor de seguridad.

Carga por transmisión de calor a través de las paredes

Esta carga es el calor que ingresa a través de las paredes, piso y techo del módulo. La cámara de enfriamiento funciona con tres configuraciones diferentes como materiales aislantes que son: paredes de tol (A), paredes de tol-madera-tol (B) y paredes de tol-poliestireno-tol (C). Con la Ecuación 3.8, se calcula la carga a través de paredes

$$q_1 = U * A * \Delta T$$

Ecuación 3.8 Carga a través de paredes.

Donde:

- q_1 : (W) carga por transmisión a través de paredes.
- U : (W / (m² · °K)) coeficiente de transferencia de calor.
- A : (m²) área de la sección
- ΔT : (°K) diferencia entre la temperatura del aire exterior y aire interior

Con la Ecuación 3.9, se calcula el área, que resulta ser la suma de las áreas de las paredes, piso y techo, a este valor se resta el área de un orificio que se hizo en la parte posterior.

$$A = 2(a * h) + 2(a * l) + 2(h * l) - 2(2 * \pi * 0.003175^2)$$

Ecuación 3.9 Área total del módulo.

Donde:

- a : 0.55 (m) ancho de la pared.
- l : 0.35 (m) largo de la pared.
- h : 0.25 (m) alto de la pared.
- A : (m²) área total de la cámara.

Usando la Ecuación 3.9 se obtiene:

$$A = 0.8349 \text{ (m}^2\text{)}$$

La diferencia de temperatura se da entre el aire exterior que corresponde a la temperatura media máxima del ambiente en Quito que es de 25 (°C) [14] y el aire interior que corresponde a la temperatura objetivo del espacio a enfriar que es de 5 (°C) ya que a esta temperatura se evita la formación de escarcha en las tuberías del evaporador, la Ecuación 3.10 se refiere a la diferencia de temperatura.

$$\Delta T = (T_{ext} - T_{int})$$

Ecuación 3.10 Diferencia entre la temperatura del aire exterior y aire interior.

Donde:

T_{ext} : 298 (°K) temperatura del aire exterior.

T_{int} : 278 (°K) temperatura del aire interior.

ΔT : (°K) diferencia entre la temperatura del aire exterior y aire interior.

Usando la Ecuación 3.10 se obtiene:

$$\Delta T = 20 \text{ (°K)}$$

Para el coeficiente de transferencia de calor se considera el espesor y conductividad térmica de cada material aislante que se utiliza en las paredes, además, del coeficiente de convección interior y exterior. En la Tabla 3.3, y Tabla 3.4, se muestra los datos de conductividad térmica y coeficiente de convección respectivamente los cuales se utiliza para hallar el coeficiente de transferencia de calor para cada uno de los materiales aislantes.

Tabla 3.3 Características de materiales aislantes

Material aislante	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/ (m · K))
Tol	0.0009	58
Madera	0.02	0.14
Poliestireno	0.02	0.037

Fuente: [15]

Tabla 3.4 Coeficiente de convección

Coeficiente de convección interior (W/ (m ² · K))	Coeficiente de convección exterior (W/ (m ² · K))
6 (convección forzada de aire)	1.6 (convección natural de aire)

Fuente: [13]

Con la Ecuación 3.11 se calcula la carga por transmisión de calor a través de la pared de tol. Este cálculo se hace para cada una de las configuraciones.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{1}{h_{ext}}}$$

Ecuación 3.11 Coeficiente de transferencia de calor de la pared de tol.

Donde:

- x_1 : 0.0009 (m) espesor de pared de tol.
- k_1 : 58 (W / (m · K)) conductividad térmica del tol
- h_{int} : 6 (W / (m² · K)) coeficiente de convección interior
- h_{ext} : 1.6 (W / (m² · K)) coeficiente de convección exterior
- U : (W / (m² · K)) coeficiente de transferencia de calor

usando la Ecuación 3.11 se obtiene:

$$U = 1.263 \text{ (W / (m}^2 \cdot \text{K))}$$

En base a los valores calculados empleando la Ecuación 3.9, Ecuación 3.10 y Ecuación 3.11, se obtiene la carga a través de la pared de tol con la Ecuación 3.8:

$$q_1 = 21.09 \text{ (W)}$$

Para el cálculo de la carga a través de la pared de la configuración B y C se utiliza las mismas ecuaciones que se utiliza para la carga a través de la pared de tol. En la Tabla 3.5, se muestran los resultados.

Tabla 3.5 Carga a través de paredes

Configuración	Paredes	U (W/(m ² · K))	Carga a través de paredes (W)
A	Tol	1.263	21.09
B	Tol-Madera-Tol	1.07	17.86
C	Tol-Poliestireno -Tol	0.75	12.52

Carga del producto

Se toma como producto al aire que se encuentra dentro de la cámara de enfriamiento donde hay una diferencia de temperatura entre el aire exterior y aire interior, en la sección “Carga por transmisión de calor a través de las paredes” se fija los valores de temperatura. El módulo está funcionando en Quito, por lo que la densidad cambia respecto al aire que se encuentra a nivel del mar, con la Ecuación 3.12, se calcula la densidad del aire para Quito aplicando la ley del gas ideal.

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

Ecuación 3.12 Ley del gas ideal

Donde:

- T : 298 (°K) temperatura de Quito
 R : 0.287 ((kPa * m³)/(kg * K)) constante universal de los gases ideales
 P : 71.94 (kPa) presión de Quito
 ρ : (kg/m³) densidad del aire

Usando la Ecuación 3.12 se obtiene:

$$\rho = 0.8411 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Con la Ecuación 3.13, se calcula la masa de aire.

$$\rho = \frac{m_{aire}}{V_{aire}}$$

Ecuación 3.13 Densidad del aire

Donde:

- V_{aire} : 0.048 (m³) volumen del aire dentro de la cámara de enfriamiento
 ρ : 0.8411 (kg/m³) densidad del aire
 m_{aire} : (kg) masa del aire dentro de la cámara de enfriamiento

Usando la Ecuación 3.13 se obtiene:

$$m_{aire} = 0.0403 \text{ kg}$$

Con la Ecuación 3.14, se calcula la carga de producto.

$$q_2 = \frac{m_{aire} * C_p * \Delta T}{240}$$

Ecuación 3.14 Carga del producto.

Donde:

- ΔT : 20 (K) diferencia entre la temperatura del aire exterior y aire interior
 C_p : 1044 (J/(kg*K)) calor específico del aire
 m_{aire} : 0.04048 (kg) masa del aire dentro de la cámara de enfriamiento
 t : 240 (s) tiempo de enfriamiento
 q_2 : (W) carga de producto

Usando la Ecuación 3.14 se obtiene:

$$q_2 = 3.5 \text{ (W)}$$

Carga por equipos

Esta carga se refiere a la existencia de equipos eléctricos dentro del espacio a enfriar. El consumo eléctrico se convierte en calor y la carga térmica corresponde a la potencia eléctrica del equipo. De esta forma, por cada (hp) eléctrico la totalidad de esta potencia

eléctrica se convertirá en potencia calórica, es decir en 2545 (Btu/h) [13]. Dentro de la cámara de enfriamiento hay un ventilador de 25 (W), por lo tanto:

$$q_3 = 25 (W)$$

Carga de servicio

Esta carga se refiere cuando hay un intercambio de calor entre el lugar refrigerado con el exterior de manera directa, es decir, cuando la puerta de la cámara de enfriamiento se encuentra abierta. A la carga por transmisión de calor a través de las paredes se le agrega un porcentaje para obtener la carga de servicio, se considera un 40% porque el módulo es de paneles intercambiables. Esta carga se halla para cada configuración.

Con la Ecuación 3.15, se calcula la carga de servicio para cada uno de los tres casos. En la Tabla 3.6, se muestra los resultados de la carga de servicio.

$$q_4 = 0.4 * q_1$$

Ecuación 3.15 Carga de servicio.

Donde:

q_1 : (W) carga por transmisión a través de paredes.

q_4 : (W) carga de servicio.

Usando la Ecuación 3.15 se obtiene la carga de servicio con la configuración A:

$$q_4 = 8.44 (W)$$

Tabla 3.6 Carga de servicio

Configuración	Paredes	Carga a través de paredes (W)	Carga de servicio (W)
A	Tol	21.09	8.44
B	Tol-Madera-Tol	17.86	7.14
C	Tol-Poliestireno-Tol	12.52	5

Carga total

La carga total es la sumatoria de todas las cargas, además se incrementa un 10% por factor de seguridad ya que puede haber diferencias entre los criterios de diseños y la operación real.

Con la Ecuación 3.16, se calcula la carga total para cada configuración A. En la Tabla 3.7, se muestra los resultados de la carga total.

$$\dot{Q}_{\text{total}} = 1.1 * (q_1 + q_2 + q_3 + q_4)$$

Ecuación 3.16 Carga total.

Donde:

- \dot{Q}_{total} : (W) carga total.
 q_1 : (W) carga por transmisión a través de paredes.
 q_2 : (W) carga del producto.
 q_3 : (W) carga por equipos.
 q_4 : (W) carga de servicio.

Usando la Ecuación 3.16 se obtiene la carga total para la configuración A

$$\dot{Q}_{\text{total}} = 63.83 \text{ (W)}$$

Tabla 3.7 Carga total

Configuración	Paredes	Carga a través de paredes (W)	Carga de producto (W)	Carga por equipos (W)	Carga de servicio (W)	Carga total (W)
A	Tol	21.09	3.5	25	8.44	63.83
B	Tol-Madera-Tol	17.86			7.14	58.85
C	Tol-Poliestireno-Tol	12.52			5	50.62

En la Tabla 3.7, se muestra la carga térmica total de todas las configuraciones, obteniendo la mayor carga térmica con la pared de tol (configuración más crítica) la cual es de 63.83 (W), el calor del evaporador es de 153.5 (W) obtenido analizando el ciclo de refrigeración, con lo que se demuestra que el compresor hermético reciclado de 1/8 hp (\dot{W}_{motorhp}) si funciona correctamente para cada una de las configuraciones.

3.2 Selección de componentes e instrumentos

Refrigerante

Se escoge el refrigerante R-134a porque el compresor reciclado trabajaba con este refrigerante. Si se utiliza otro refrigerante puede que haya inconvenientes en el compresor, se debe tener en cuenta que el refrigerante no debe reaccionar de manera negativa con el aceite lubricante del compresor o con cualquier otro material usado en la construcción del equipo de refrigeración. En la Figura 3.2 se muestra el recipiente que contiene refrigerante R-134a.



Figura 3.2 Refrigerante R-134a.

Condensador

El condensador es de tipo parrilla que permite un mejor intercambio de calor, además ya está diseñado para el compresor de 1/8 hp. En la Figura 3.3, se muestra el condensador.



Figura 3.3 Condensador tipo parrilla.

Visor de refrigerante

Con este visor se observa al refrigerante en líquido saturado y se ubica a la salida del condensador, el objetivo de este visor es saber cuándo se debe hacer mantenimiento al sistema de refrigeración, ya que se observa al refrigerante si está o no con demasiada humedad [16]. En la Figura 3.4, se muestra el visor de refrigerante.



Figura 3.4 Visor de refrigerante.

Filtro hércules

El filtro hércules o también conocido como filtro deshidratador atrapa la humedad que haya en el sistema de refrigeración, el filtro siempre debe ir junto al tubo capilar para evitar el paso de sustancias contaminantes en el sistema de refrigeración, y evitar problemas en el equipo [16]. En la Figura 3.5 se muestra el filtro hércules.



Figura 3.5 Filtro hércules.

Válvula de expansión

La válvula de expansión disminuye la presión del refrigerante. Se toma un tubo capilar para que haga esta función, este tubo capilar se selecciona por información de técnicos, que recomiendan utilizar tubo capilar de 0.31 (mm) de diámetro y 3 (m) de longitud. En la Figura 3.6, se muestra el tubo capilar.



Figura 3.6 Tubo capilar.

Evaporador

Se utiliza un evaporador de placas que se escogió por la capacidad del compresor que es de 1/8 (hp). En la Figura 3.7, se muestra el evaporador.



Figura 3.7 Evaporador.

Manómetros de presión

Para medir la presión del sistema de refrigeración se utilizan manómetros mecánicos que funcionan con el principio de tubo de Bourdon, con una aguja se muestra la presión a la cual se encuentra. Para la presión alta el manómetro es de color rojo y para la presión baja es un manómetro azul [17]. En la Figura 3.8, se muestra los manómetros de baja (azul) y de alta presión.



Figura 3.8 Manómetros de baja y alta presión.

Controlador de temperatura

Se utiliza un control ON/OFF con histéresis para controlar la temperatura. El controlador MT-512eI2HP de la marca Full Gauge mide, controla e indica la temperatura del espacio

a enfriar. Sus características principales se observan en la Tabla 1.1 y en la Figura 3.9, se muestra el controlador. El manual del controlador se observa en el Anexo 2.



Figura 3.9 Controlador de temperatura Full Gauge.

3.3 Construcción de la estructura

En la Figura 3.10, se muestra la estructura que es el apoyo del sistema de refrigeración, instrumentos de medición y sistema eléctrico y de control. Además, en el Anexo 3 se muestran los planos respectivos.

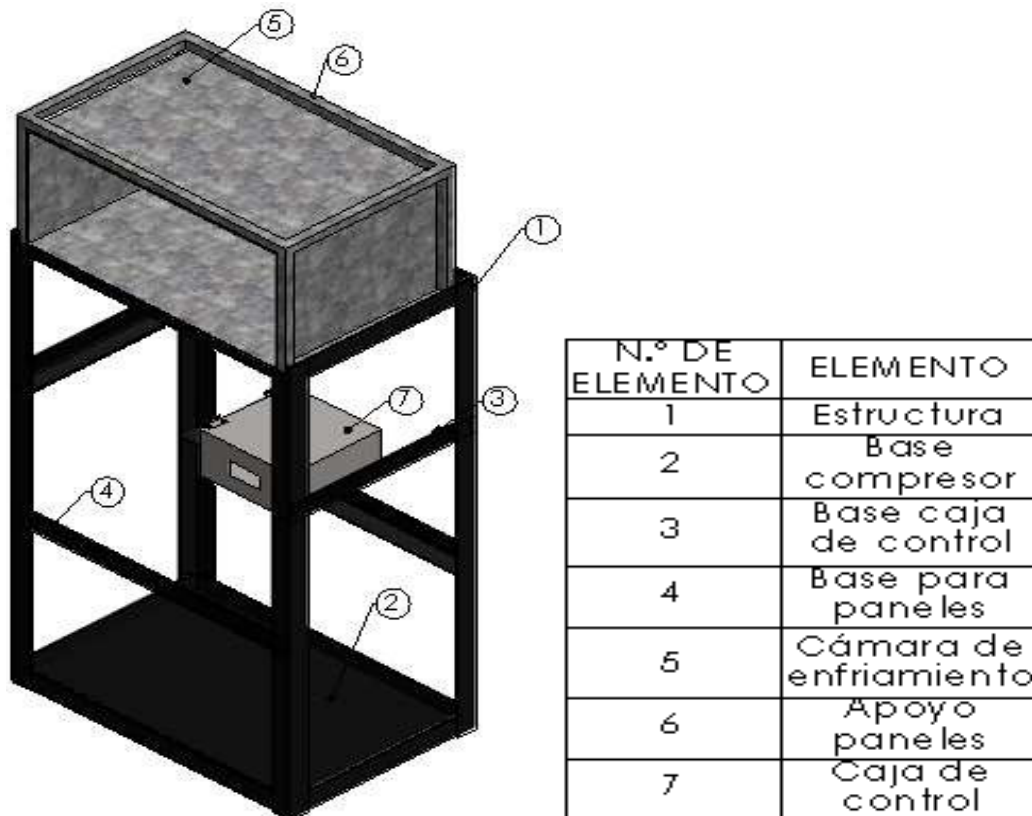


Figura 3.10 Esquema del módulo didáctico

Estructura

La estructura del módulo se fabricó de ángulo de acero de 1 1/2 1/8", se fijó con soldadura por arco eléctrico (SMAW) y electrodos E6011 [18] , en la Figura 3.11, se muestra el proceso de soldadura, además se soldó un pedazo de tol para fijar al compresor, en este caso se utilizó electrodos E6013 por el espesor del material ver. Las dimensiones se eligieron en base al tamaño del evaporador y condensador. En la Figura 3.12, se muestra el ensamble de la estructura del módulo didáctico. Finalmente, se pintó con color negro mate y una capa de brillo.



Figura 3.11 Proceso de soldadura.



Figura 3.12 Ensamble de la estructura del módulo didáctico.

Cámara de enfriamiento

La cámara de enfriamiento se fabricó con tol negro 25, se dobló las esquinas y se fijó con soldadura GMAW. Además, se fabricó una estructura para apoyar los paneles intercambiables con tubo cuadrado 2x2 (cm), se fijó con soldadura SMAW y electrodos E6013. Las dimensiones se eligieron en base al tamaño del evaporador. En la Figura 3.13, se muestra la cámara de enfriamiento. Por último, se procede a pintar de color blanco mate y una capa de brillo.



Figura 3.13 Construcción de la cámara de enfriamiento

Paneles intercambiables

Una vez obtenido la cámara de enfriamiento se fabricó las paredes intercambiables que se observa en la Figura 3.14, se cuenta con 5 paredes de material madera y 5 de material poliestireno ambos forrados con tol, los materiales aislantes se muestran en la Figura 3.15. Adicional se añadió una manija para el agarre de la pared que se muestra en la Figura 3.16. Finalmente, se procede a pintar de blanco mate y añadir una capa de brillo como se muestra en la Figura 3.17.



Figura 3.14 Recubrimiento de paredes



Figura 3.15 Materiales aislantes para las paredes (madera y poliestireno).



Figura 3.16 Manija



Figura 3.17 Pared intercambiable.

Caja de control

La caja de control se fabricó con tol negro 25, se dobló las esquinas y se fijó con soldadura GMAW. Además, se realizó perforaciones para el ingreso del cableado y para apoyar el controlador. Las dimensiones se eligieron en base al tamaño de cada uno de los componentes que forman parte del sistema eléctrico y de control. En la Figura 3.18, se muestra la caja de control. Por último, se procede a pintar de color blanco mate y una capa de brillo.



Figura 3.18 Caja de control

Sistema eléctrico y de control

El sistema eléctrico y de control está formado por el controlador de temperatura, sensor de temperatura NTC, fuente AC/DC, compresor, ventilador, fusible e interruptor. A continuación, se presenta en la Figura 3.19, el diagrama eléctrico que indica las conexiones eléctricas y de control que se necesita para que funcione correctamente el controlador de temperatura con el compresor y ventilador.

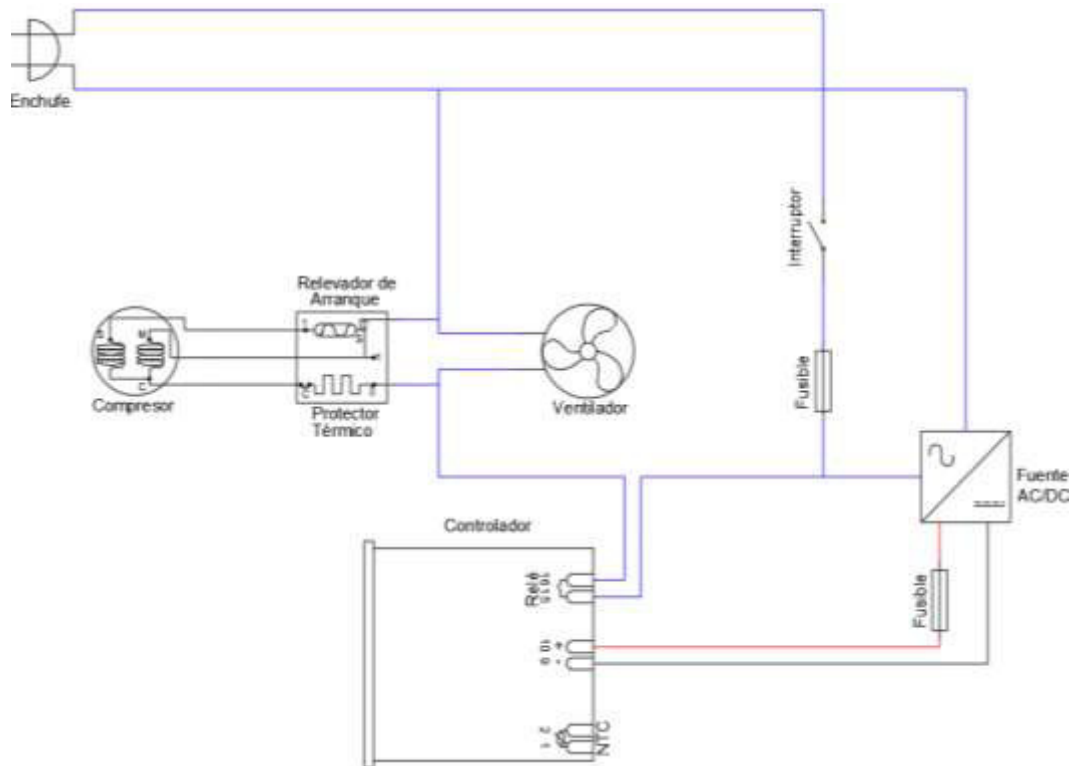


Figura 3.19 Diagrama eléctrico.

Los fusibles son de 10 (A) para la línea de corriente alterna y de 2 (A) para la línea de corriente continua. Estos valores dependen de la corriente que consume cada equipo la cual se puede hallar con la Ecuación 3.17.

$$P = V * I * \cos \theta$$

Ecuación 3.17 Potencia eléctrica en corriente alterna.

Donde:

- V : (V) voltaje
- P : (W) potencia eléctrica
- I : (A) corriente
- $\cos \theta$: Factor de potencia

Como el factor de potencia es un valor que se desconoce, se prefiere medir la corriente de cada equipo con un amperímetro cuando estén en funcionamiento. Se debe tener en cuenta que el ventilador y compresor tienen motores eléctricos que requieren una corriente de arranque mucho mayor a la corriente nominal, por esta razón, para la línea de corriente alterna se escogió un fusible de 10 (A).

3.4 Ensamble del sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración se colocó en la estructura metálica donde se fijó con tuercas y pernos. En la Figura 3.20, se muestra los componentes principales y secundarios del sistema de refrigeración. Además, en el Anexo 4 se muestra el diagrama P&ID del sistema.

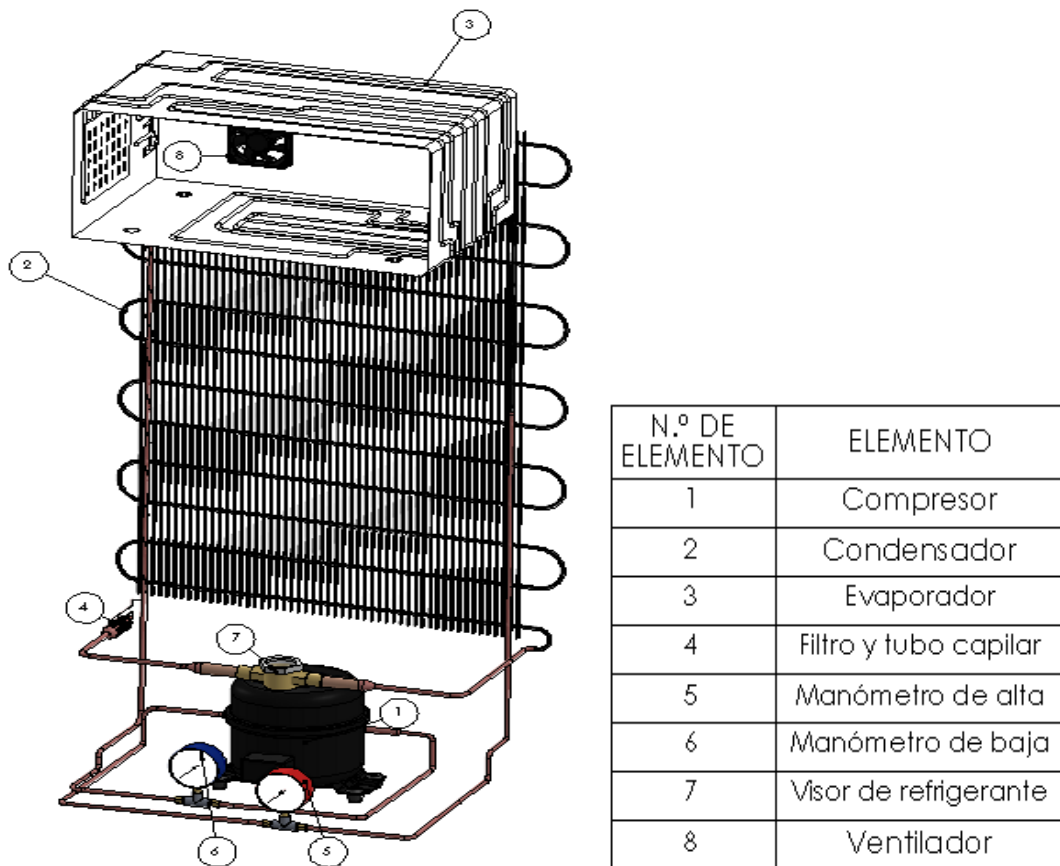


Figura 3.20 Esquema del sistema de refrigeración.

Sistema de refrigeración

La unión de las tuberías de todo el sistema de refrigeración se lo hizo con soldadura OAW, el material de aporte fue varilla de plata al 5% debido a que este material se usa para soldar cobre y sus aleaciones [18].

Primero, se soldó los manómetros de alta y baja presión al condensador y evaporador respectivamente que se muestra en la Figura 3.21.

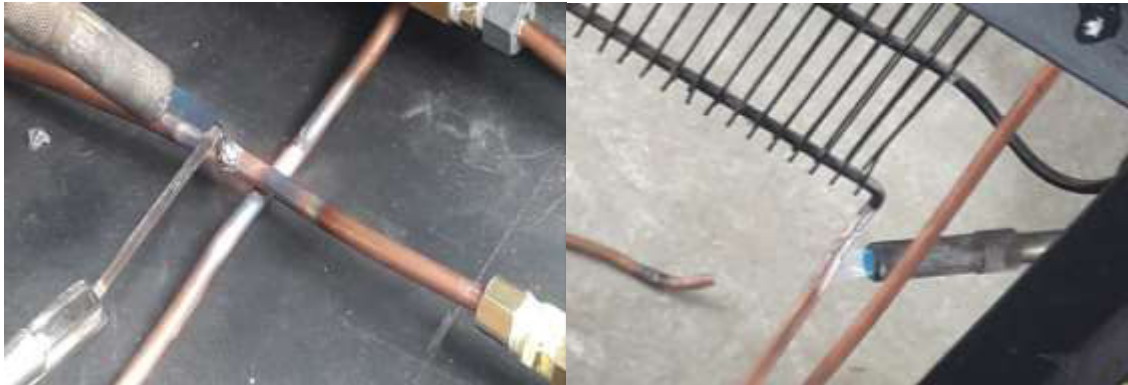


Figura 3.21 Unión de manómetros con condensador y evaporador.

Luego, se unió el condensador con el visor de refrigerante, el visor con el filtro hércules y seguido el tubo capilar como se muestra en la Figura 3.22.



Figura 3.22 Unión de visor, filtro y tubo capilar.

Por último, se soldó la tubería de descarga y succión del compresor a los manómetros de alta y baja presión respectivamente para cerrar el sistema de refrigeración como se muestra en la Figura 3.23.

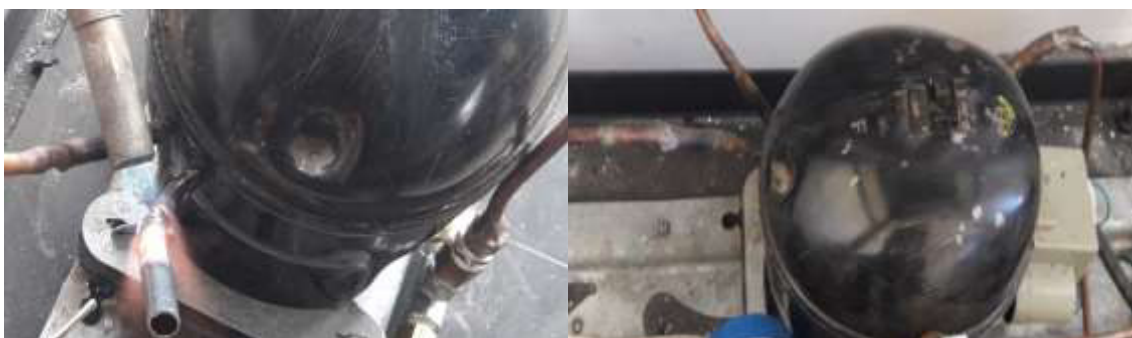


Figura 3.23 Unión del compresor a los manómetros.

3.5 Pruebas de funcionamiento

Durante el ensamble del sistema de refrigeración, se realizó presurización de nitrógeno y vacío en el sistema con el fin de detectar fugas en tuberías y corregir en caso de ser necesario. Posteriormente se cargó el refrigerante.

Una vez ensamblado el sistema de refrigeración, se realiza un análisis de funcionamiento, obteniendo datos reales de temperatura y presión con distintos materiales aislantes en la cámara de enfriamiento.

Procedimiento durante el ensamble: Presurización con nitrógeno

La presurización con nitrógeno sirve para la detección de fugas y limpieza del sistema como, por ejemplo los residuos de óxido de cobre que se forma en el interior del tubo y los accesorios [19].

La presurización con nitrógeno se realiza con el juego de manómetros y el compresor apagado. El proceso consiste en conectar el tanque de nitrógeno con el juego de manómetros por medio de las mangueras como se muestra en la Figura 3.24, e introducir nitrógeno a una presión aproximada de 60 (psig) a la parte de baja presión del sistema, además, se coloca agua con jabón en las uniones de cobre y del manómetro para localizar fugas como se muestra en la Figura 3.25. No hay fugas cuando la presión del manómetro de baja es constante e igual a la presión con la cual se introduce el nitrógeno, es decir, se debe comprobar dichas presiones como se muestra en la Figura 3.26.



Figura 3.24 Presurización con nitrógeno.



Figura 3.25 Inspección visual para localizar fugas.



Figura 3.26 Comprobación de presiones de baja.

El proceso ya mencionado también es usado para la parte de alta presión del sistema con la diferencia de que se introduce nitrógeno a una presión aproximadamente de 320 (psig). Para localizar fugas se coloca agua con jabón en las uniones del manómetro, además, se comprueba que la presión del manómetro de alta sea constante e igual a la presión con la cual se introduce el nitrógeno como se muestra en la Figura 3.27, para corroborar que no exista fugas. Cabe mencionar que la presurización con nitrógeno dura aproximadamente dos horas.



Figura 3.27 Comprobación de presiones de alta.

Procedimiento durante el ensamble: vacío en el sistema

En la Figura 3.28, se muestra el proceso de vacío, la cual consiste en la extracción de aire y humedad mediante una bomba de vacío conectada a la tubería de servicio del compresor, esto implica reducir la presión del sistema hasta un nivel lo más cercano a 0 [psia] [19]. Por recomendaciones técnicas, se realizó un vacío por un tiempo de 40 minutos para eliminar y extraer la mayor cantidad de humedad y de aire posible. Cabe mencionar que este proceso no afecta a los manómetros que se encuentran instalados en el equipo.



Figura 3.28 Proceso de vacío en el sistema de refrigeración.

Procedimiento durante el ensamble: carga de refrigerante

Una vez comprobado la ausencia de fugas y que se haya extraído el aire y la humedad a través de la bomba de vacío, se procede a cargar el refrigerante R-134a al compresor, para esto se conecta una manguera al recipiente del refrigerante y a la tubería de servicio del compresor como se muestra en la Figura 3.29. Con ayuda de un amperímetro y recomendaciones técnicas se carga el refrigerante hasta llegar a una

corriente de 1,29 (A) que se muestra en la Figura 3.30, con el compresor en funcionamiento.



Figura 3.29 Carga de refrigerante R-134a.



Figura 3.30 Corriente de trabajo del compresor para la carga del R-134a.

Análisis del funcionamiento del sistema

Una vez ensamblados los componentes de refrigeración se realizan los siguientes análisis:

- Presiones del sistema de refrigeración.
- Análisis de la temperatura de condensación y evaporación.
- Temperatura de la cámara de enfriamiento en un intervalo de tiempo de 1 hora con diferentes materiales aislantes como paredes.
- Análisis de carga térmica del sistema con diferentes materiales aislantes como paredes.

Presiones del sistema de refrigeración

En el sistema de refrigeración se tiene dos presiones debido a que el compresor aumenta la presión del refrigerante y el tubo capilar disminuye la presión. Se instaló dos manómetros en las líneas de succión y descarga del compresor para medir ambas presiones y en base a estos datos se determina la temperatura de saturación.

Los manómetros indican la presión manométrica en libra por pulgada cuadrada (psig), pero para analizar las propiedades termodinámicas del refrigerante se necesita la presión absoluta. Con la Ecuación 3.18, se obtiene la presión absoluta.

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{manométrica}} + P_{\text{atmosférica}}$$

Ecuación 3.18 Presión absoluta

Donde:

P_{absoluta} : (kPa) presión total del sistema

$P_{\text{manométrica}}$: (kPa) presión que mide el manómetro

$P_{\text{atmosférica}}$: 71.7 (kPa) presión que ejerce el aire en Quito.

Con el equipo en funcionamiento, se tomó datos de las presiones de alta y baja cada 2 minutos por un periodo de 60 minutos con cada uno de los materiales aislantes obteniendo gráficas de presión vs tiempo, además en la misma gráfica se muestra los periodos de encendido y apagado del compresor.

En la Figura 3.31, Figura 3.32, y Figura 3.33, se muestran las gráficas de las presiones de alta y baja en función del tiempo con los diferentes materiales aislantes donde las presiones son iguales cuando el compresor permanece apagado, mientras que si el compresor se mantiene encendido la presión aumenta (presión de alta) y disminuye (presión de baja) hasta los valores de trabajo.

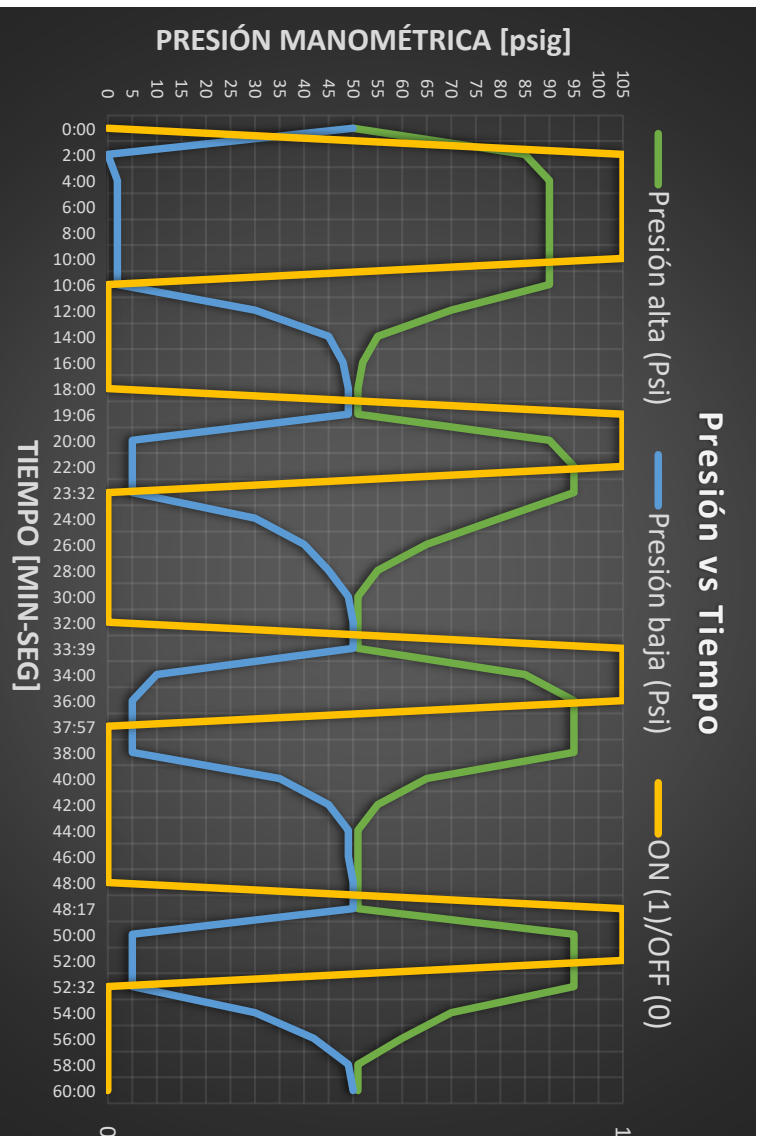


Figura 3.31 Gráfica presión vs tiempo con pared de tol

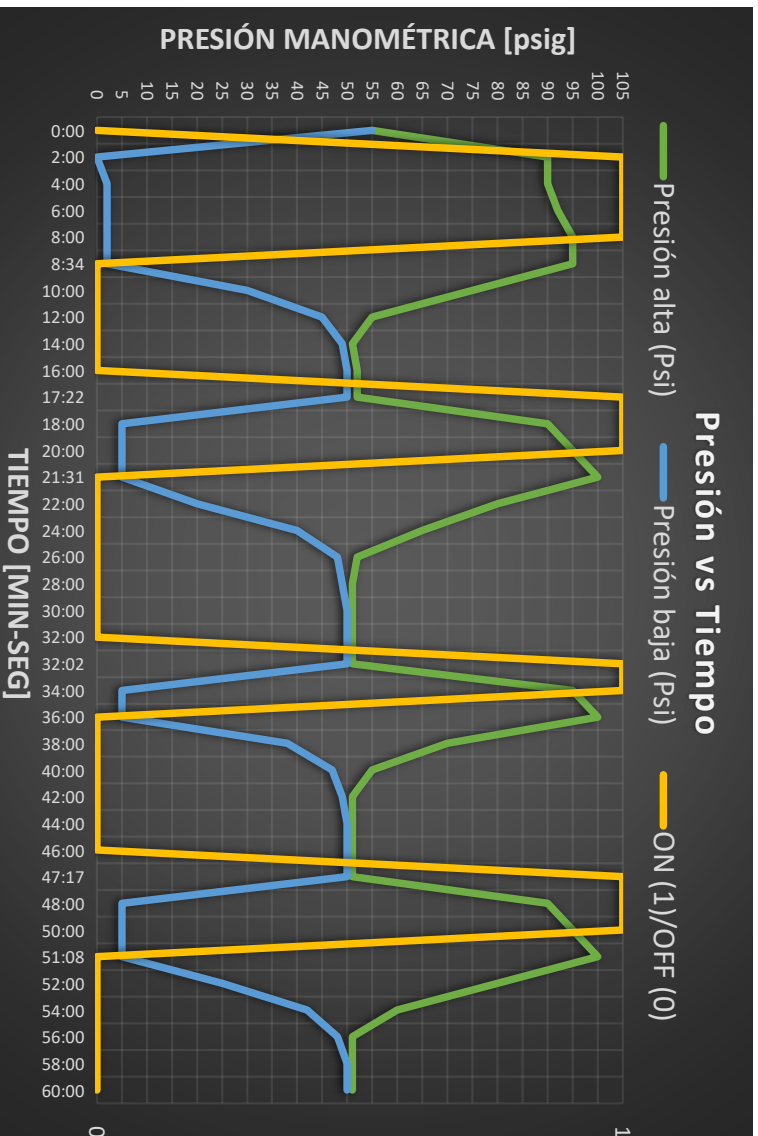


Figura 3.32 Gráfica presión vs tiempo con pared de tol-madera-tol

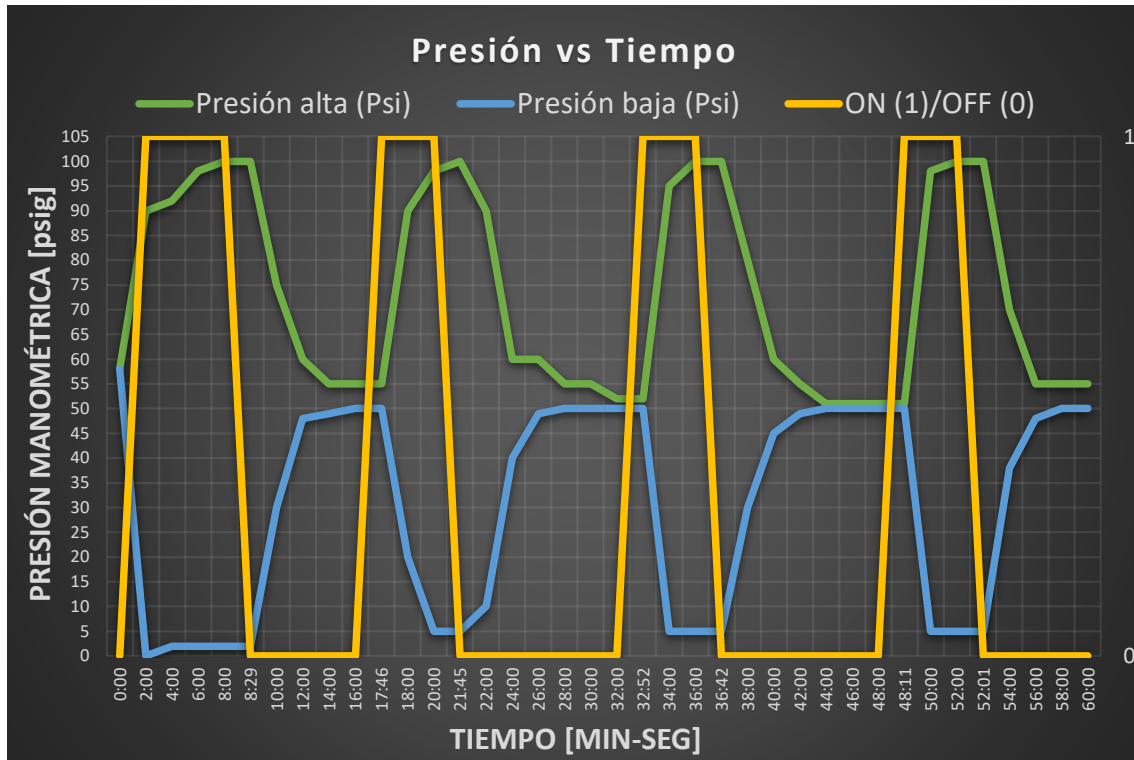


Figura 3.33 Gráfica presión vs tiempo con pared de tol-poliestireno-tol

Análisis de la temperatura de condensación y evaporación

Cuando el sistema de refrigeración se haya estabilizado (que las presiones ya no cambien), se observa en los manómetros los valores de las presiones de alta (presión de condensación) y de baja (presión de evaporación) para determinar las temperaturas de evaporación que se muestra en la Tabla 3.8, y de condensación que se muestra en la Tabla 3.9. Es importante recordar que las mediciones de los manómetros instalados son presiones manométricas, mientras que se determinan las temperaturas de condensación y evaporación con presiones absolutas, además se necesita las tablas con las propiedades termodinámicas del refrigerante R-134a para hallar las temperaturas [5].

Tabla 3.8 Presión y temperatura de evaporación

Presión manométrica de baja (psi)	Presión manométrica de baja (kPa)	Presión absoluta de baja (psi)	Presión absoluta de baja (kPa)	Temperatura de evaporación (°C)
9	62.05	19.4	133.75	-19.84

Tabla 3.9 Presión y temperatura de condensación

Presión manométrica de alta (psi)	Presión manométrica de alta (kPa)	Presión absoluta de alta (psi)	Presión absoluta de alta (kPa)	Temperatura de condensación (°C)
105	723.93	115.4	795.65	31.12

Temperatura de la cámara de enfriamiento

En la cámara de enfriamiento se colocó un sensor de temperatura NTC para que mida la temperatura dentro de la misma, este sensor va conectado en los pines 1 y 2 del controlador el cual muestra la temperatura en grados Celsius. Además, el controlador es el encargado de apagar el compresor y ventilador cuando la temperatura es de 5 (°C) (SetPoint) y de encender los mismos cuando existe una diferencia de 5 (°C) o mayor respecto al SetPoint.

Con el equipo en funcionamiento, se tomó datos de la temperatura del espacio a refrigerar cada 2 minutos por un periodo de 60 minutos con cada uno de los materiales aislantes obteniendo gráficas de temperatura vs tiempo, además en la misma gráfica se muestra el encendido y apagado del compresor.

- **Gráfica temperatura vs tiempo con la configuración A**

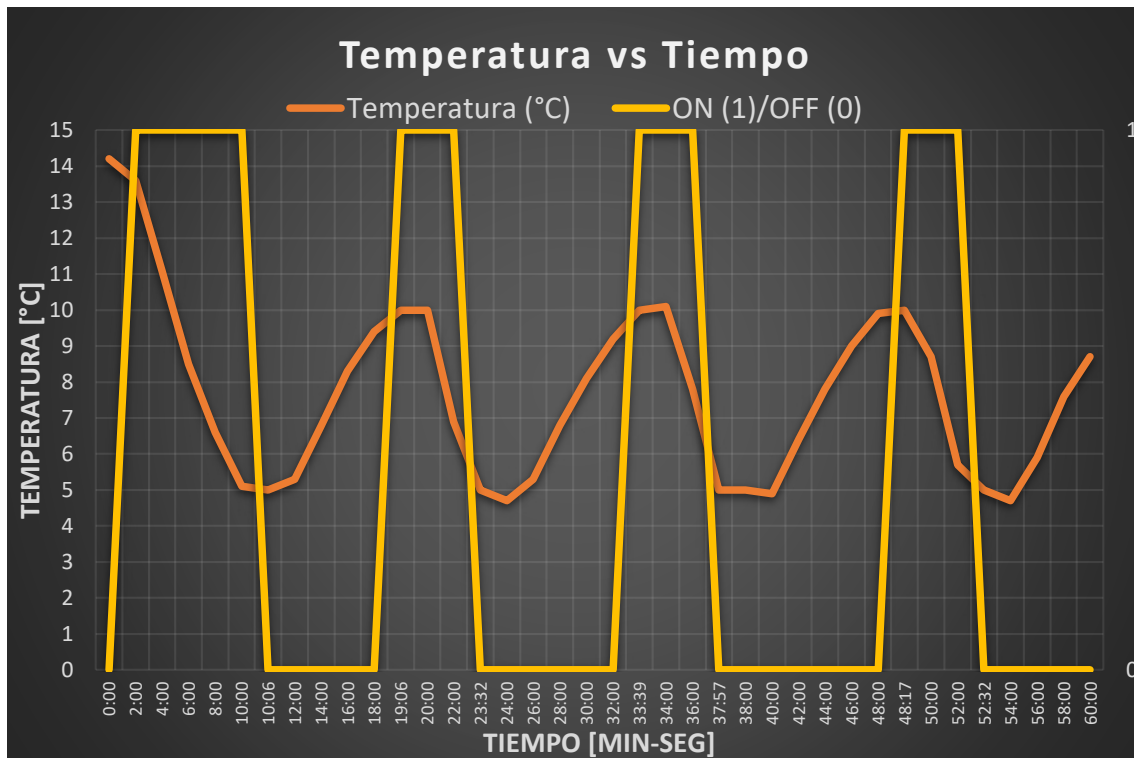


Figura 3.34 Gráfica temperatura vs tiempo con pared de tol

En la Figura 3.34, se muestra la gráfica de la temperatura del espacio a enfriar en función del tiempo con pared de tol. La temperatura disminuye cuando el compresor está encendido hasta llegar al SetPoint que toma un tiempo alrededor de cinco minutos luego de que se estabilice el sistema, la gráfica amarilla indica un tiempo de 24 minutos con 4 segundos de encendido del compresor. La temperatura aumenta cuando el compresor está apagado hasta llegar a 10 (°C) que toma un tiempo alrededor de nueve minutos.

- **Gráfica temperatura vs tiempo con la configuración B**

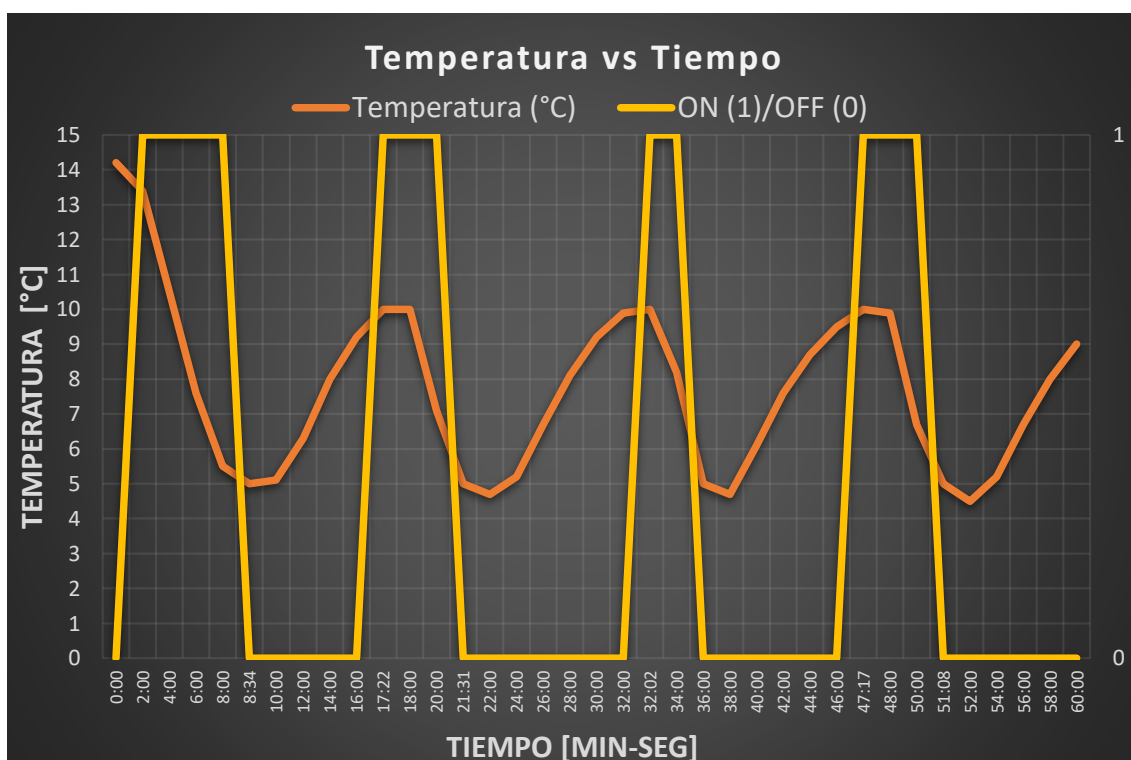


Figura 3.35 Gráfica temperatura vs tiempo con pared de tol-madera-tol

En la Figura 3.35, se muestra la gráfica de la temperatura del espacio a enfriar en función del tiempo con pared de tol-madera-tol. La temperatura disminuye cuando el compresor está encendido hasta llegar al SetPoint que toma un tiempo alrededor de cuatro minutos y medio luego de que se estabilice el sistema, la gráfica amarilla indica un tiempo de 23 minutos con 13 segundos aproximado de encendido del compresor. La temperatura aumenta cuando el compresor está apagado hasta llegar a 10 (°C) que toma un tiempo alrededor de diez minutos.

- **Gráfica temperatura vs tiempo con la configuración C**

En la Figura 3.36, se muestra la gráfica de la temperatura del espacio a enfriar en función del tiempo con pared de tol-poliestireno-tol. La temperatura disminuye cuando el

compresor está encendido hasta llegar al SetPoint que toma un tiempo alrededor de cuatro minutos luego de que se estabilice el sistema, la gráfica amarilla indica un tiempo de 22 minutos con 57 segundos aproximado de encendido del compresor. La temperatura aumenta cuando el compresor está apagado hasta llegar a 10 (°C) que toma un tiempo alrededor de once minutos.

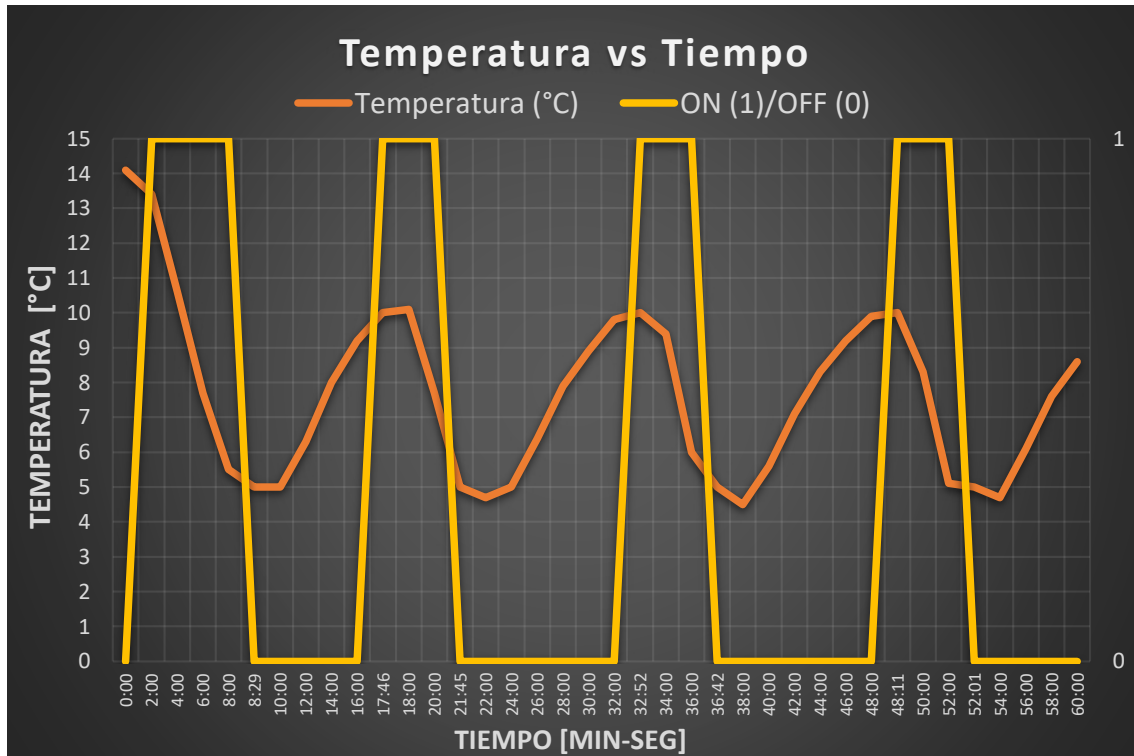


Figura 3.36 Gráfica temperatura vs tiempo con pared de tol-poliestireno-tol

Análisis de carga térmica

Realizadas las pruebas de funcionamiento se sumó todo el tiempo que se mantuvo encendido y apagado el compresor con los diferentes materiales aislantes en el periodo de 60 minutos obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Tiempo de encendido y apagado del compresor

Configuración	Paredes	Tiempo de encendido (Min-Seg)	Tiempo de apagado (Min-Seg)
A	Tol	23:04	36:56
B	Tol-Madera-Tol	20:33	39:27
C	Tol-Poliestireno-Tol	20:07	39:53

En base a los cálculos de carga térmica mostrados en la sección Cálculo de carga térmica y los datos experimentales de tiempo de funcionamiento del compresor de la Tabla 3.10, se comprueba:

- La mayor carga térmica es con la configuración A con un valor calculado de 63.83 (W) como se muestra en la Tabla 3.7, comprobando experimentalmente que el tol no es un buen material para mantener el calor ya que el tiempo de encendido es de 23:04 (min-seg) en 60 minutos.
- La menor carga térmica es con la configuración C con un valor calculado de 50.62 (W) como se muestra en la Tabla 3.7, comprobando experimentalmente que el poliestireno es un buen material para mantener el calor ya que el tiempo de encendido es de 20:07 (min-seg) en 60 minutos.
- La carga térmica con la configuración B está entre las cargas térmicas de las configuraciones anteriores con un valor calculado de 58.85 (W) como se muestra en la Tabla 3.7, comprobando experimentalmente que la madera es mejor y peor aislador térmico que el tol y poliestireno respectivamente ya que el tiempo de encendido es de 20:33 (min-seg) en 60 minutos.

3.6 Manual de usuario y mantenimiento

Para usar de forma adecuada el módulo didáctico de refrigeración con paneles intercambiables, se realizó un video explicativo del manual de usuario y manual de mantenimiento, al cual se accede con el código QR que se muestra en la Figura 3.37.



Figura 3.37 Manual de usuario y mantenimiento

Adicionalmente en el Anexo 5, se presenta el manual de usuario y mantenimiento en formato escrito.

3.7 Hojas guías

Las hojas guías se desarrollaron para que los estudiantes puedan analizar el sistema de refrigeración y carga térmica por paredes. El módulo permite analizar las presiones y temperaturas (evaporación y condensación) y analizar el funcionamiento del equipo y la carga térmica de refrigeración con diferentes materiales aislantes. Se desarrollaron dos hojas guías que se detallan a continuación.

Hoja guía 1: Presiones y temperaturas de evaporación y condensación

El objetivo de la práctica 1, es analizar los diferentes componentes del sistema de refrigeración y su funcionamiento en base a las presiones y temperaturas de evaporación y condensación.

Hoja guía 2: Funcionamiento del equipo y la carga térmica de refrigeración con diferentes materiales aislantes

El objetivo de la práctica 2, es analizar la influencia que tiene los diferentes tipos de paneles intercambiables en la cámara de enfriamiento durante su funcionamiento.

En el anexo 6, se presenta las hojas guías realizadas.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se implementó de manera correcta un módulo didáctico de refrigeración con paneles intercambiables, que será utilizado por los estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica. El módulo permite analizar los componentes del sistema de refrigeración y su funcionamiento en base a las presiones y temperaturas de evaporación y condensación con paneles de distinto material.
- El dimensionamiento del sistema de refrigeración parte de un compresor reciclado de 1/8 (hp). Se analizó el ciclo termodinámico del refrigerante R-134a en base a las presiones y temperaturas de evaporación y condensación, obteniendo una tasa de calor del evaporador de 153.5 (W).
- Para el cálculo de la carga térmica se incluye la carga por transmisión de calor a través de las paredes, carga de producto, carga de equipo, carga de servicio y un factor de seguridad del 10%, con la configuración más crítica (tol) se obtuvo un valor de 63,83 (W), demostrando que el compresor funciona correctamente con todas las configuraciones de las paredes.
- Mediante un software CAD se diseñó la estructura del módulo para soportar el sistema de refrigeración, se la fabricó con ángulos de acero. Además, en la cámara de enfriamiento de aire se utilizan paneles intercambiables de distintos materiales aislantes, realizando procesos de medición, corte, doblado, perforaciones y soldadura.
- Para la selección de los componentes del sistema de refrigeración, se parte de criterios ya establecidos para el compresor reciclado, como lo son: el refrigerante R-134a, condensador tipo parrilla y evaporador de placas. Por recomendaciones técnicas se escogió un tubo capilar de 0.31(mm) de diámetro para tener una correcta disminución de presión del refrigerante y se adquirió un nuevo filtro deshidratador.
- La unión de la tubería durante el ensamble del sistema de refrigeración se lo realizó con soldadura OAW con varilla de plata al 5% para una correcta fusión del tubo de cobre.
- Se instalaron dos manómetros de presión que funcionan con el principio de tubo de Bourdon, para el lado de alta presión (condensador) y para el lado de baja

presión (evaporador), para observar las presiones de condensación y evaporación del sistema.

- Para controlar la temperatura en el espacio refrigerado se utilizó un controlador ON/OFF con histéresis de 5 (°C) que controla la misma. El controlador apaga el compresor cuando la temperatura dentro de la cámara de enfriamiento es de 5 (°C) y activa a los 10 (°C).
- La presurización con nitrógeno garantiza que no exista fugas de refrigerante en las uniones de la tubería de cobre donde el nitrógeno ingresa al sistema a 60 (psig) para la parte de baja presión y de 320 (psig) para la parte de alta presión, posteriormente con una bomba de vacío se extrae la humedad/aire hasta que la presión disminuya a 21(inHg).
- La carga total de refrigeración calculada cambia dependiendo la conductividad térmica de cada material aislante en las paredes, con el poliestireno se tiene una carga térmica de 50.62 (W), con la madera es de 58.85 (W) y con el tol se tiene 63.83 (W).
- El tiempo de encendido y apagado del compresor es diferente para cada una de las configuraciones, en un periodo de 60 minutos el menor tiempo de encendido se tiene con el material poliestireno con un tiempo de 20 minutos con 7 segundos, con la madera el tiempo es de 20 minutos con 33 segundos y con el tol es de 23 minutos con 4 segundos, corroborando que, a menor carga térmica, se tiene un menor tiempo de encendido del compresor para enfriar el aire en la cámara.

4.2 Recomendaciones

- Se debe fabricar los paneles intercambiables con un rango de 2% menos en sus dimensiones, dado que los paneles encajan en la estructura que recubre a la cámara de enfriamiento, si la fabricación es con medidas exactas, se dificulta ingresar y extraer los paneles en la estructura.
- Se debe realizar la presurización con nitrógeno por 2 horas para asegurarse que no haya microfugas y la prueba de vacío por 40 minutos para extraer toda la humedad al sistema de refrigeración.
- Se debe revisar que las presiones de alta y de baja sean las mismas con el equipo apagado antes de utilizar el mismo para asegurarse que el sistema de refrigeración continúa hermético y que funcionará de manera correcta.
- Se debe esperar a que el sistema de refrigeración se estabilice antes de tomar cualquier dato.
- Para manipular o cambiar cualquier parámetro del controlador, se recomienda revisar el manual del controlador MT-512EL-2HP que se muestra en el anexo 2.
- Se debe considerar las diferentes actividades del manual de mantenimiento que se muestra en el anexo 5 para que el equipo cumpla su vida útil, por ejemplo: medir la corriente del compresor durante su funcionamiento para asegurarse que la cantidad de refrigerante sea la suficiente.
- Para tener una mejor hermeticidad del equipo se recomienda implementar un panel intercambiable de los materiales que corresponden para cada caso, que cubra la puerta de la cámara de enfriamiento.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Cinat and A. Fissore, "Diseño de una propuesta didáctica multidisciplinar de laboratorio para estudio de termodinámica," *AJEA*, 2019.
- [2] E. Vallejo Coral, "RECUPERACIÓN Y READECUACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL," Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [3] ASHRAE, "Plan estratégico ASHRAE 2019-2024," 2019.
- [4] D. Cedeño, "Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Cocción de Atún usado un Detector de Temperatura Resistiva (Rtd) como instrumentos de Medición de Temperatura para una Empresa Empacadora de Atún en la ciudad de Manta," Universidad Poltécnica Salesiana, 2020.
- [5] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, 7ma ed. México, D.F., 2012.
- [6] R. j. Dossat, *Principios de Refrigeración*. 1991.
- [7] I. Dincer, *Refrigeration Systems and Applications*. 2003.
- [8] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor*, 2da ed. México, D.F., 2004.
- [9] F. G. Controls, "MT-512E2HP," 2021. .
- [10] O. Prias Caicedo, "Eficiencia energética en motores eléctricos," Universidad Autónoma de Occidente.
- [11] Danfoss, "Compresores scroll de Danfoss SM, SY y SZ," 2020.
- [12] SMARTWEB, "REFRIGIRATOR SPARE PARTS," *stock Parts & Components*, 2016. .
- [13] ASHRAE, *Refrigeration Load in ASHRAE Refrigeration Handbook*. 2002.
- [14] INAMHI, *Anuario Meteorológico*. Quito, 2015.
- [15] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, 4ta ed. México, D.F., 2011.
- [16] J. M. Franco Lijó, *Manual de Refrigeración*. Barcelona, 2006.
- [17] Sergio, "Cómo usar los manómetros de refrigeración," 2019. .
- [18] Indura, "Manual de sistemas y Materiales de Soldadura," 2007.

- [19] G. Barletta and O. Acevedo, *Buenas prácticas en los procesos de instalación y mantenimiento de sistemas de refrigeración y aire acondicionado*. 2021.

ANEXOS

Anexo 1: Certificado de Funcionamiento

**Anexo 2: Manual del Controlador de Temperatura MT
512E2HP**

Anexo 3: Planos y Esquemas

Anexo 4: Diagrama PI&D

Anexo 5: Manual de uso y Mantenimiento

Anexo 6: Hojas Guías