

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE UN SISTEMA
DE AIRE ACONDICIONADO TIPO SPLIT DE REFRIGERANTE R290**

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO SUPERIOR
EN ELECTROMECAÁNICA**

JUAN ESTEBAN ESTRELLA MUELA

DIRECTOR: ING. HUGO FRANCISCO ZÚÑIGA PUEBLA MSc.

DMQ, Septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, JUAN ESTEBAN ESTRELLA MUELA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



JUAN ESTEBAN ESTRELLA MUELA

juan.estrella03@epn.edu.ec

stellajuan098@gmail.com

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JUAN ESTEBAN ESTRELLA MUELA, bajo mi supervisión.



Ing. Hugo Francisco Zúñiga Puebla MSc.

DIRECTOR

hugo.zuniga@epn.edu.ec

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmo que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales me corresponde como autor que he contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Estrella Muela', with a long horizontal flourish extending to the right.

JUAN ESTEBAN ESTRELLA MUELA

DEDICATORIA

Le dedicó esta meta a mis padres y a mi familia que me han dado apoyo incondicional desde que era pequeño, para que siga mis sueños y no me rinda en todo lo que me proponga en la vida.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis amigas de colegio y amigos de la universidad que me han apoyado en cada tropiezo que tenía, pero también han estado en cada logro que conseguía y siempre felicitándome y dándome aliento.

Gracias a esa personita especial que forma parte de mi vida ya un año entero, por apoyarme, por hacerme reír en los momentos malos, por estar todos los días pendiente de mí y siempre deseándome un bonito día. Gracias por enseñarme algo nuevo cada día y ayudarme a ser una mejor persona.

Gracias a mi tutor de tesis que me dio la oportunidad de realizar este presente proyecto y por todas las enseñanzas que nos inculcó que son muy valiosas para mí.

Mis agradecimientos a la ONUDI por haber financiado el presente proyecto que se encuentra enmarcado en el convenio: número 21 016 suscrito entre la Escuela Politécnica Nacional y el Ministerio de Producción

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo General.....	1
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	2
Diagrama de Mollier	3
Coeficiente de funcionamiento COP.....	4
Uso del Propano R290 como refrigerante.....	5
Sistemas de aire acondicionado tipo Split.....	5
Procedimiento en el ensamblaje del sistema de refrigeración.....	5
Soldadura Oxiacetilénica	6
Sistema de Control de un Sistema de Refrigeración tipo Split.	7
2 METODOLOGÍA.....	9
2.1 Análisis de Equipos.....	10
Unidad condensadora	11
Compresor rotativo.....	11
Condensador de tubo con aletas.....	13
Válvula de Expansión Electrónica	13
Evaporador de tubos con aletas	14

2.2	Ensamblaje del sistema de refrigeración	15
	Ubicación de los sensores de presión Full Gauge	15
	Ubicación de los sensores de temperatura Full Gauge	15
	Ubicación de los sensores de temperatura Arduino.....	16
	Soldadura Oxiacetilénica	17
	Manómetro de baja	18
	Manómetro de alta	19
2.3	Puesta en marcha del sistema de refrigeración.....	20
	Presurización de nitrógeno	21
	Corrección de fugas	23
	Vacío en el Sistema	26
	Carga del refrigerante	27
2.4	Configuración del sistema de control	28
3	RESULTADOS	29
3.1	Montaje de equipos en la estructura	31
3.2	Ensamble del sistema de refrigeración	31
3.3	Pruebas de funcionamiento.....	32
	Presiones de trabajo del ciclo de refrigeración	33
	Temperaturas de funcionamiento del ciclo a 16°C ambiente	34
3.4	Análisis de resultados.....	36
	Error entre transductor y manómetro.....	36
	Análisis del ciclo ideal con las temperaturas de funcionamiento	37
	Análisis del ciclo real para la condición de 16°C.....	40
3.5	Manual de uso y mantenimiento.....	41
4	Conclusiones.....	42
5	Recomendaciones	43
6	Referencias bibliográficas.....	45
7	ANEXOS.....	47

RESUMEN

En el presente proyecto se implementó un sistema de refrigeración tipo Split con refrigerante R290 ensamblado en una estructura metálica capaz de soportar su peso y la implementación de un sistema de monitoreo con sensores full gauge y Arduino.

Este módulo está orientado en la capacitación de técnicos para la instalación de sistemas de refrigeración que utilizan hidrocarburos como refrigerantes (ej: propano-R290) de manera eficaz y segura.

Se utilizó la unidad condensadora y el evaporador para la implementación del módulo, se realizó el montaje de los equipos en los puntos estratégicos de la estructura metálica y posteriormente, se comenzó con la soldadura oxiacetilénica para unir los dos equipos principales con la tubería de cobre y finalmente se instalaron los manómetros de alta y baja.

Se procedió a detectar fugas en el sistema, al dejar por 3 días presurizado con nitrógeno las tuberías de cobre y se colocó agua con jabón en cada unión soldada y roscada para verificar que no exista alguna salida del gas, puesto que, el propano es un hidrocarburo lo que quiere decir que es inflamable y si existen fugas puede ser dañino y peligroso para las personas que estén cerca.

Después, se eliminó toda la humedad y aire del sistema con una bomba de vacío conectada a cada válvula de servicio del manómetro de alta y baja y dejándolo un estimado de 30 minutos. Finalmente, dado que la unidad condensadora venía precargada de propano, se utilizó una válvula pincha tubo y posteriormente se abrieron las válvulas con una llave Allen, de manera que el refrigerante se expanda a todo el sistema de refrigeración.

Las pruebas de funcionamiento se realizaron en dos condiciones de trabajo del sistema a 16 [°C] y 25 [°C]; posteriormente, con todo el equipo estabilizado se procedió a tomar datos de presión en alta y baja para realizar el análisis del ciclo ideal del sistema, donde se observó que las presiones de trabajo son mayores o menores dependen de la condición que se programe en el equipo.

PALABRAS CLAVE: refrigeración, unidad condensadora, evaporador, ciclo de refrigeración, R290

ABSTRACT

In the present project, a Split type cooling system was implemented with R290 refrigerant assembly in a metal structure capable of supporting its weight and the implementation of a monitoring system with full gauge and Arduino sensors.

This module is going to be used in the training of technicians for the installation of refrigeration systems that use hydrocarbons as refrigerants (ej: propane-R290) effectively and safely.

The condensing unit and the evaporator were used for the implementation of the module, the assembly of the equipment was carried out at the strategic points of the metal structure and later, the OAW process was used to join the two main equipment with the copper pipe and finally the high and low-pressure gauges were installed.

To detect leaks in the system, the copper pipes were pressurized with nitrogen for 3 days and soap water was placed in each welded and threaded joint to verify that there is no exit of the gas, since propane is a hydrocarbon which means that it is flammable and if there are leaks it can be harmful and dangerous for people who are nearby.

Afterwards, all moisture and air were removed from the system with a vacuum pump connected to each service valve of the high and low-pressure gauge and leaving it an estimated 30 minutes. Finally, considering that the condensing unit was preloaded with propane, a special valve was used, after the valves were opened with an Allen wrench, so that the refrigerant expands to the entire cooling system.

The performance tests were carried out in two working conditions of the system at 16 [°C] and 25 [°C] and with all the equipment as stable state, high and low-pressure data was taken to perform the analysis of the ideal cycle of the system, where it was observed that the working pressures are higher or lower depending on the condition that is programmed in the equipment.

KEYWORDS: refrigeration, condensing unit, evaporator, refrigeration cycle, R290

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Se implementó un sistema de refrigeración con refrigerante propano (R290) de manera didáctica con sus respectivos instrumentos de medición como: Full Gauge, y Arduino, para conocer las temperaturas de cada punto del ciclo termodinámico y, las presiones de alta y baja del sistema. Así también, todos los equipos se han situado en una estructura metálica, de tal modo, que se identifique las diferentes partes del sistema tales como: el evaporador, la unidad condensadora, las conexiones eléctricas y, las conexiones de los sensores.

Al ser un módulo didáctico se colocó los instrumentos de medición como material de aprendizaje para los estudiantes, y de esta manera se permite conocer que función cumple cada uno de los equipos de refrigeración, por tanto, facilita el reconocimiento de los estados (líquido o gaseoso) en que se encuentra el refrigerante [1] al momento de instalar los sensores de temperatura y de presión en puntos específicos del sistema.

Por otra parte, en el ensamblaje del evaporador y la unidad condensadora se realizó las respectivas soldaduras en las tuberías de cobre para conectarlos entre sí. Así mismo, se hizo un corte en la tubería a la salida del compresor y antes del condensador, ya que se colocó un manómetro y un transductor de presión alta; además, se conectaron dichos instrumentos a la salida de la unidad condensadora con el fin de obtener valores de presiones en baja.

Posteriormente al proceso de soldadura, se efectuó la presurización de nitrógeno para detectar fugas y quitar cualquier residuo del sistema, después se extrajo toda la humedad y aire de las tuberías con una bomba de vacío y finalmente se cargó el refrigerante propano R290 en el sistema de refrigeración.

Para concluir, se llevó a cabo las pruebas correspondientes para evaluar el correcto funcionamiento de todo el sistema, y verificar las presiones y temperaturas de encendido y apagado de los equipos. Por consiguiente, se tomó datos de presión en alta y baja del para el análisis del ciclo ideal en dos condiciones y real a una condición.

En el Anexo II, se presenta el certificado de funcionamiento del equipo.

1.1 Objetivo General

Implementar un sistema de aire acondicionado con su sistema de control para un módulo didáctico.

1.2 Objetivos Específicos

1. Analizar los requisitos necesarios para el funcionamiento de los equipos de refrigeración
2. Ensamblar el sistema de refrigeración en la estructura metálica
3. Instalar el sistema de control para el módulo didáctico
4. Realizar procedimientos para puesta en marcha sistema refrigeración.
5. Realizar pruebas de funcionamiento
6. Elaborar un manual de uso y mantenimiento

1.3 Alcance

Implementar un módulo didáctico de un sistema de refrigeración tipo Split con Propano (R290), para ello se contará con el evaporador y la unidad condensadora ensamblados en una estructura metálica, de manera que todos los elementos tengan una jerarquía y sirva para reconocer y diferenciar cada proceso termodinámico.

Por otra parte, al contar con los sensores de temperatura y presión se podrá observar cual es el trabajo principal que realiza cada uno de los equipos de refrigeración, además de como cada uno de estos van a cambiar el estado del refrigerante de líquido a gaseoso o viceversa en cada parte del proceso de evaporación, compresión, condensación y expansión del sistema [2], y así analizar el comportamiento del equipo.

1.4 Marco teórico

El dimensionamiento y ensamblaje de un sistema de refrigeración conlleva varios pasos por analizar y realizarlos de manera correcta, y así tener ciclo óptimo para las condiciones requeridas según el lugar a refrigerar. Por ende, esta sección relata diferentes conceptos necesarios para el desarrollo del proyecto.

Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo de refrigeración por compresión a vapor es uno de los más conocidos y utilizados en sistemas de refrigeración y refrigeradoras. Este ciclo consiste en que el refrigerante vaya cambiando su estado de líquido a gaseoso cuando extrae calor en el evaporador y de gaseoso a líquido cuando lo expulsa en el condensador. Por otra parte, también va a subir su presión al momento de salir del compresor y bajar su presión al pasar por la válvula de expansión [3].

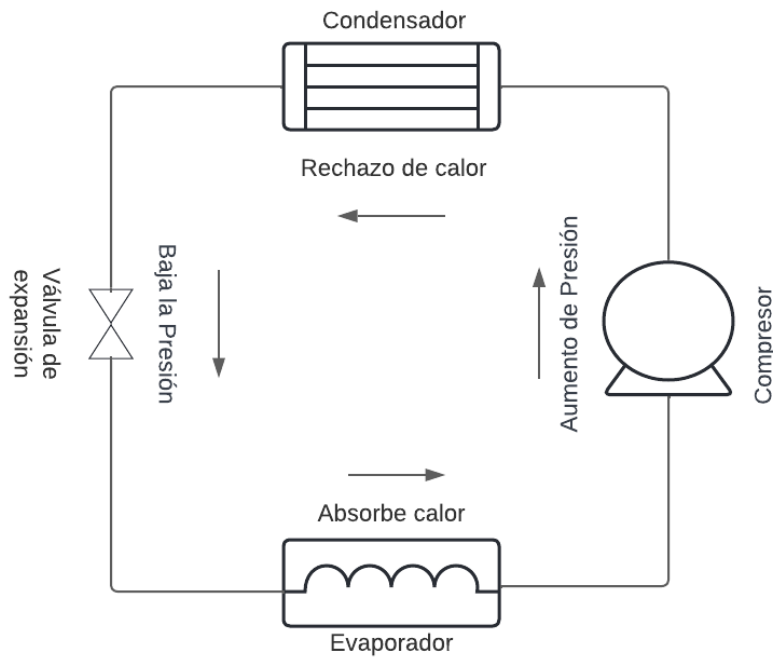


Figura 1.1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Como se observa en la Figura 1.1, el ciclo trabaja con 4 equipos primordiales que son:

- Evaporador: es un intercambiador de calor donde el refrigerante se encuentra de forma líquida y va a absorber el calor del espacio a refrigerar hasta que llegue al punto de ebullición [4].
- Compresor: va a comprimir el refrigerante de una baja presión hasta llegar a vapor sobrecalentado y después se condense [4].
- Condensador: es un intercambiador de calor donde el refrigerante se encuentra en forma de gas y va a ceder calor al medio en que se encuentra hasta que cambie el estado a líquido [4].
- Válvula de expansión: es el elemento que regula el flujo del refrigerante que se encuentra de forma líquida para bajar su presión y pasar al evaporador [4].

Diagrama de Mollier

En el diagrama de Mollier se representa el ciclo termodinámico y observar los diferentes estados que se encuentra el refrigerante, además cada uno va a tener su propio diagrama lo que no se puede utilizar de un fluido para otro. El diagrama se lo arma con datos de presión y entalpía (p-h) y con estos valores se obtienen con cálculos datos de eficiencia y presión del sistema [4].

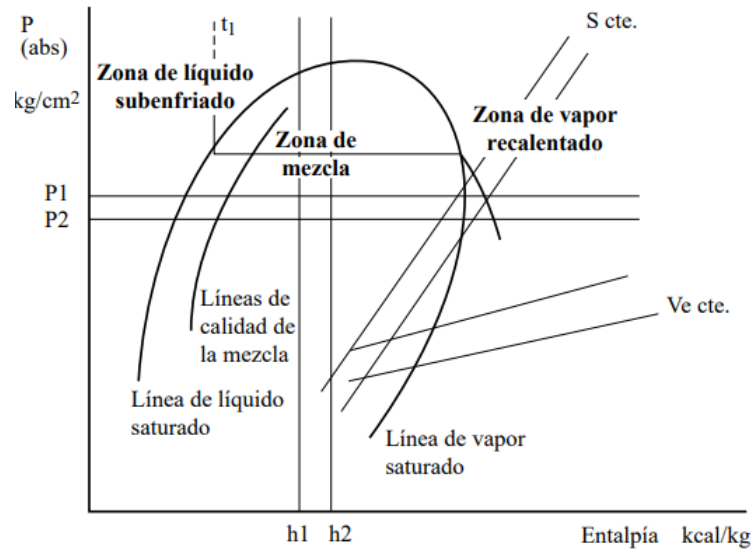


Figura 1.2 Diagrama (P-h) [5]

En la Figura 1.2, se observan diferentes zonas que representan las fases del refrigerante y a cuanta presión y entalpía se encuentran:

- Líquido saturado: todo el fluido se encuentra en forma líquida [4].
- Vapor saturado: todo el fluido se encuentra en forma de vapor [4].
- Vapor recalentado o sobrecalentado: el fluido se encuentra a una mayor temperatura que en vapor saturado [4].
- Líquido subenfriado: el fluido se encuentra a una menor temperatura que en líquido saturado [4].
- Mezcla: se tiene la unión del fluido en dos estados (líquido y gas) [4].

Coeficiente de funcionamiento COP

Es la relación de la cantidad de calor extraída del lugar a refrigerar por el evaporador y el trabajo realizado por el compresor [3], esta es la relación de eficiencia de todo el ciclo y su ecuación se expresa:

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

Ecuación 1.1 Coeficiente de funcionamiento [3]

Donde:

- q_{evap} : (kJ/kg) Calor absorbido por el evaporador
- $w_{\text{compresor}}$: (kJ/kg) Trabajo del compresor

Uso del Propano R290 como refrigerante

Refrigerantes mayormente usados como los Clorofluorocarbonos (CFC) o los Hidro clorofluorocarbonados (HFC) son los principales causantes del efecto invernadero y por consiguiente del calentamiento global, de esta manera se han buscado las mejores alternativas para remplazarlos y una de las mejores soluciones es el Propano R290 [6].

Para determinar cuáles son los refrigerantes que más generan un impacto ambiental se crearon indicadores como: Potencial Agotador de Ozono (PAO) y Potencial de Calentamiento Global (PCG). Por ende, el propano tiene un bajo PCG y es nulo en PAO, por esta razón tiene una acción directa al calentamiento global muy bajo y su acción indirecta igual [7].

En cuanto a los sistemas de refrigeración el R290 tiene un alto rendimiento y con diseños especiales este rendimiento se lo puede elevar, además se puede tener menor temperatura en generación, esto mejorando la vida útil del compresor. Otra ventaja del propano es que no genera corrosión en metales. Las desventajas de este refrigerante es su inflamabilidad, pero este se encuentra internamente en el sistema, y no se combustionaría ya que necesita una relación exacta del propano y aire del 1% a 10%. Si se toma las correctas precauciones en el sistema de refrigeración, y evitando fugas o sellándolo herméticamente, este no presenta ningún riesgo [7].

Sistemas de aire acondicionado tipo Split

Los sistemas de aire acondicionado tipo Split están divididos en dos equipos que es la unidad interior (evaporador) y la unidad exterior (unidad condensadora), se les denomina así con el objetivo de no tener las dos unidades en un mismo entorno. El evaporador extrae el calor de la parte interior del domicilio y después se realiza la condensación en la parte exterior y se expulsa todo el calor al ambiente. Además, estas dos unidades estarán conectadas por la tubería de cobre donde fluirá todo el refrigerante [8].

Procedimiento en el ensamblaje del sistema de refrigeración

Al iniciar el procedimiento de ensamblaje se debe conocer cuáles son las características de los equipos a instalar como la carga de refrigeración y las instalaciones eléctricas. Después se debe tener en cuenta la ubicación de donde se van a colocar los equipos para tener una fácil disposición y a futuro realizar los respectivos mantenimientos [9]. De esta manera, el evaporador se lo ubica en la parte interior del domicilio y el

condensador en la parte exterior, además en los dos casos no debe de haber nada que obstruya el flujo de aire.

Para el montaje de tuberías de cobre se requieren las herramientas y protecciones indicadas para realizar la soldadura oxiacetilénica, de lo contrario sin los conocimientos técnicos necesarios se puede causar daños a los equipos y en el peor de los casos poner en riesgo a terceras personas [9].

Finalmente, se verifica que no existan fugas y este en vacío todo el sistema de refrigeración, luego se carga el refrigerante y la cantidad específica según la placa del fabricante. Por otro lado, se lo puede introducir en estado líquido por el lado de presión alta y en estado gaseoso por el lado de presión baja y con todo el sistema apagado. [9]

Soldadura Oxiacetilénica

La soldadura oxiacetilénica es el proceso de fusionar dos piezas mediante una llama que es la reacción cuando se realiza la mezcla de gas combustible (acetileno) y gas comburente (oxígeno). Por otra parte, esta mezcla puede ser de diferentes tipos como: normal, cuando la salida del oxígeno y acetileno es la misma; oxidante, cuando la salida del oxígeno es 1,3 veces mayor que el acetileno; y carburante cuando la salida del acetileno es 1,3 veces mayor que la del oxígeno [10].

El material de aporte que se utiliza son varillas plata al 5%, ya que se realiza una soldadura fuerte para las tuberías de cobre, estas tienen un diámetro de entre 1,6 a 6,4 (mm) y una longitud de entre 600 a 900 (mm). Además, para mejorar la soldadura se usan fundentes como: en pasta o en polvo [10].

Como se observa en la Figura 1.3, se tiene los elementos que conforman para realizar la soldadura oxiacetilénica y como parte más importante es el soplete donde se realiza la reacción y mezcla del oxígeno y el acetileno (1); esto con cada tanque que lleva el oxígeno (2) y el acetileno (5), además con las válvulas reguladoras se controla la salida de cada uno de los gases (3) y (6) y este gas finalmente sale por la manguera para ir al soplete (4) y (7).

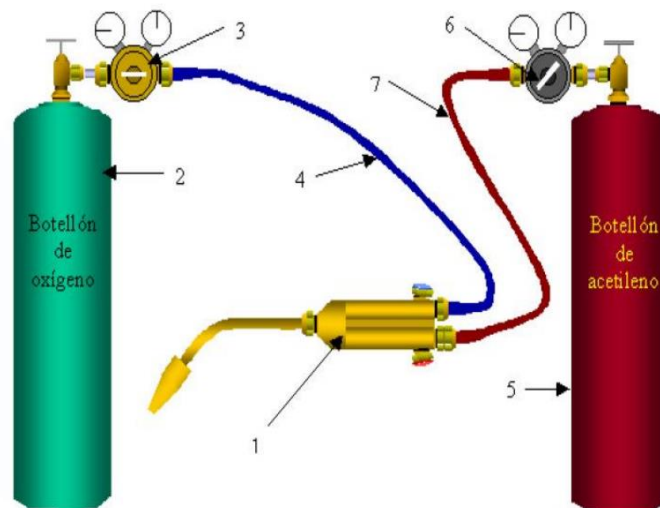


Figura 1.3 Partes de la soldadura oxiacetilénica [10]

Sistema de Control de un Sistema de Refrigeración tipo Split.

Como se observa en la Figura 1.4, se tiene la distribución de los controladores on/off del sistema de refrigeración como: presostatos, termostato y válvula solenoide.

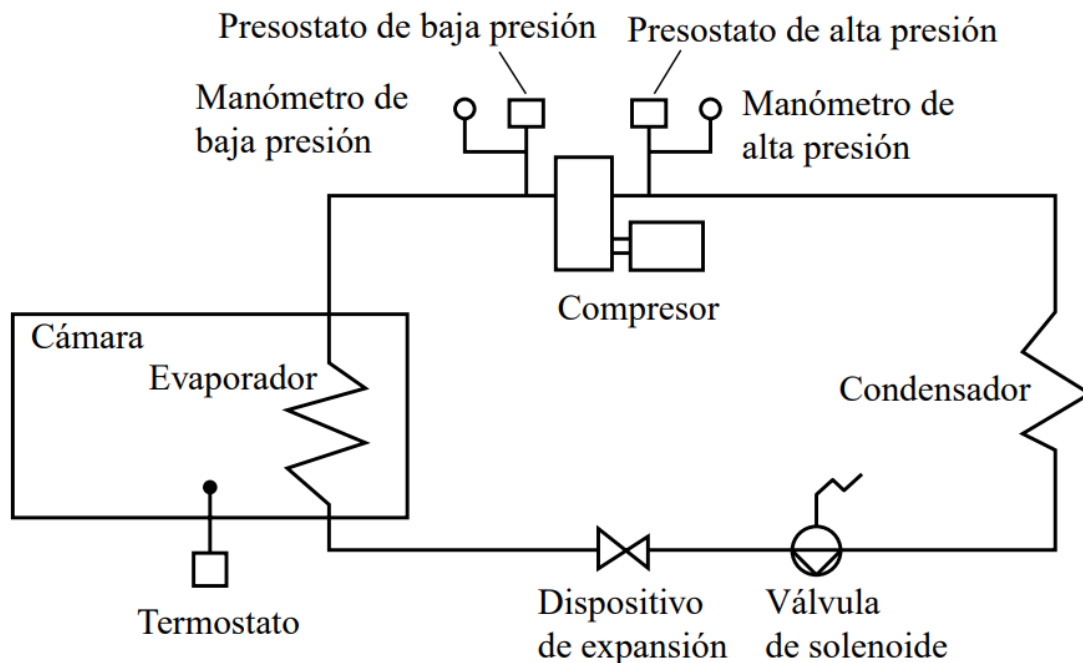


Figura 1.4 Sistema de Control y Seguridad [5]

Al momento de encender el sistema de refrigeración, el evaporador empieza a extraer el calor del lugar a refrigerar hasta la temperatura deseada, luego el termostato detecta este valor y corta la corriente de la válvula solenoide y está se cierra impidiendo el paso del refrigerante. El compresor empieza a aspira menor fluido y la presión de entrada

empieza a bajar hasta alcanzar la presión fijada por el presostato de baja, y deja de trabajar el compresor [5].

Después de cierto tiempo la temperatura del lugar empieza a subir hasta que el termostato lo detecta y devuelve la corriente a la válvula solenoide para que se abra y deje el paso del fluido al sistema. El refrigerante pasa por la válvula de expansión para luego entrar al evaporador y subir su presión y temperatura, después pasa por el presostato hasta el valor configurado para arrancar el compresor y vuelva a su funcionamiento [5].

2 METODOLOGÍA

El presente proyecto se basó en una investigación aplicada con el objetivo de generar conocimiento teórico y práctico [11], implementando un módulo didáctico de un sistema de refrigeración con los aprendizajes obtenidos en la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica.

En la Figura 2.1, se observa el esquema de la metodología utilizada para el desarrollo del componente de sistema de refrigeración del proyecto. Primero, se analizaron las características y parámetros del evaporador y unidad condensadora como: capacidad de refrigeración, potencia del compresor, el refrigerante y la cantidad que entra en el sistema.

Se ensambló el sistema de refrigeración utilizando la soldadura oxiacetilénica y varillas de plata para unir la tubería de cobre de 1/4 y 3/8. Durante el proceso, se colocaron dos manómetros de presión alta y baja en el sistema, para el caso de alta se tuvo que cortar la tubería a la entrada del condensador y el de baja se lo conectó a la misma salida de la unidad condensadora.

Posteriormente, se pone en marcha el equipo, para lo cual se presurizó con nitrógeno el sistema para detectar fugas en las uniones soldadas y limpiar el sistema de residuos que generan las tuberías al momento de soldar, luego con una bomba de vacío se extrajo aire y humedad existente, y por último se cargó el refrigerante propano R (290).

Con el control del sistema de refrigeración se probó los 4 modos de funcionamiento del equipo, y se utilizó el modo de enfriamiento, en el cual se puede cambiar la temperatura ambiente desde 16 [°C] hasta 31 [°C] y se espera que el sistema de refrigeración se estabilice para la toma de datos.

Se realizó las pruebas de funcionamiento para verificar el correcto desempeño del control on/off del sistema, después, se tomó las presiones de alta y baja en dos temperaturas de ambiente para el lugar a refrigerar, y posteriormente se tomó datos de temperatura en cada uno de los puntos del sistema para el análisis el ciclo ideal en dos condiciones de trabajo y el ciclo real para una condición de trabajo. Finalmente, se desarrolló el manual de uso y mantenimiento del equipo.

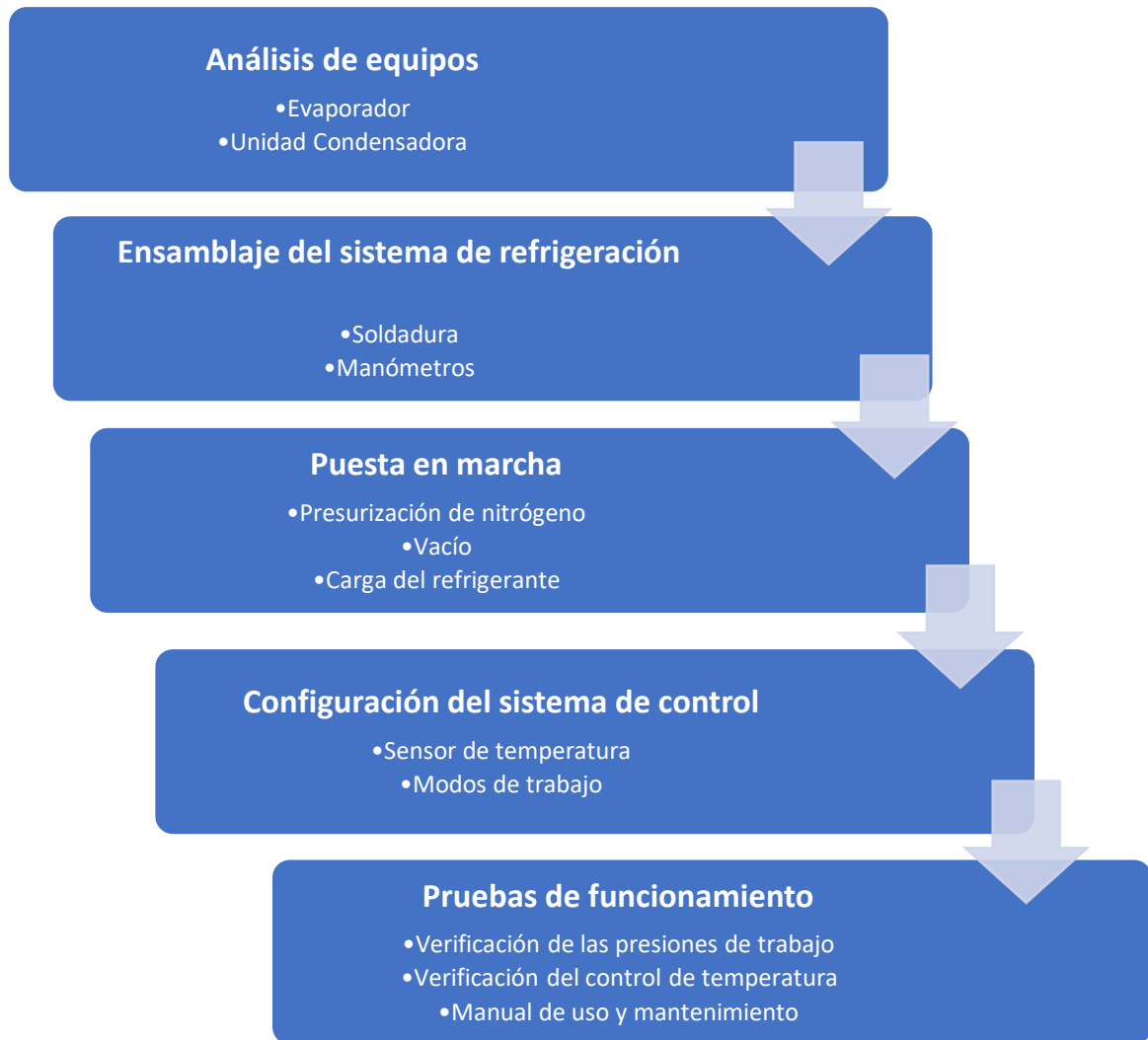


Figura 2.1 Esquema de la metodología

2.1 Análisis de Equipos

En la siguiente sección se explican las características de los equipos del sistema de refrigeración como se muestra en la Figura 2.2.

1. Compresor
2. Condensador
3. Válvula de expansión
4. Evaporador

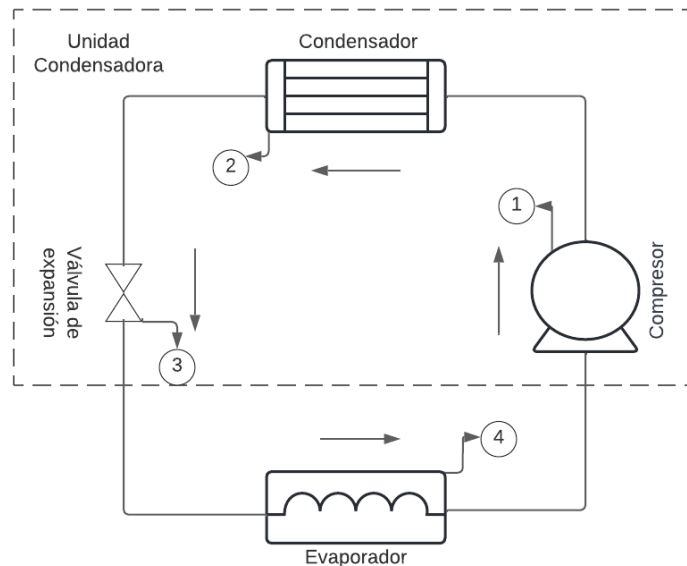


Figura 2.2 Diagrama de los equipos de refrigeración

Unidad condensadora

La unidad condensadora sirve como un intercambiador de calor ya que se encuentra fuera del domicilio y está conformado por los elementos de presión alta del ciclo de refrigeración, tales como: el compresor, condensador y la válvula de expansión como se observa en la Figura 2.3. Además, la instalación es más sencilla ya que solo se necesita conectar las salida y entrada del evaporador a la unidad condensadora.



Figura 2.3 Unidad Condensadora

Compresor rotativo

El compresor es de tipo rotativo como se observa en la Figura 2.4, lo que quiere decir que comprime el refrigerante con la fuerza centrífuga que genera el movimiento circular

de un rotor, dentro de un estator cilíndrico que produce la potencia de funcionamiento. Además, al estar en contacto el rotor y el estator se genera fricción, por lo que necesita lubricación [5].



Figura 2.4 Compresor rotativo [5]

Como se muestra en la Tabla 2.1, se tiene las características de funcionamiento del compresor y el refrigerante que va a utilizar el sistema de refrigeración.

Tabla 2.1 Características operacionales del compresor

Condición	Características
Modelo	GIC 18 LAH 5GWQG
Modo de funcionamiento	Enfriamiento
Tensión nominal	230 (V)
Corriente de entrada nominal	6.7 (A)
Frecuencia nominal/Fases	50 (Hz), 1 (Φ)
Potencia nominal de entrada (100%)	1380 (Watt)
Potencia nominal de entrada (50%)	448 (Watt)
Consumo anual de energía	789.52 (Kwh)
Refrigerante	R (290)
Carga del refrigerante	0.340 (kg)

Condensador de tubo con aletas

El condensador como se observa en la Figura 2.5, expulsa el calor por medio de la tubería de cobre en forma de serpentín y las aletas de aluminio, y con esto aumenta el área de transmisión de calor. Además, tiene un ventilador axial para realizar el intercambio térmico y aumentar la capacidad del condensador [5].



Figura 2.5 Condensador de aletas de aluminio

Válvula de Expansión Electrónica

La válvula de expansión electrónica como se observa en la Figura 2.6, dosifica la cantidad exacta de refrigerante que pasa al evaporador. De esta manera, aumenta la eficiencia de todos los equipos de refrigeración y mejora el confort térmico. Por otro lado, se puede programar un control automático para realizar una mejor optimización del sistema [12].



Figura 2.6 Válvula de expansión

Evaporador de tubos con aletas

El evaporador es un intercambiador de calor que se encuentra dentro del lugar a enfriar como se observa en la Figura 2.7 y su funcionamiento consiste en la circulación del aire por la parte de la tubería de cobre y las aletas de aluminio con la ayuda de un ventilador centrífugo. Por otra parte, la forma de los tubos es en tresbolillo para garantizar el mayor contacto con el aire [5].



Figura 2.7 Evaporador con aletas de aluminio

Como se observa en la Tabla 2.2 se detallan las características de funcionamiento del evaporador.

Tabla 2.2 Características operacionales del evaporador

Condición	Características
Modelo	GIC 18 LAH 5GWQG
Modo de funcionamiento	Enfriamiento
Tensión nominal	230 (V)
Corriente de entrada nominal	6.7 (A)
Frecuencia nominal/Fases	50 (Hz), 1 (Φ)
Capacidad de refrigeración (100%)	5300 (Watt)
Capacidad de refrigeración (50%)	2650 (Watt)
Volumen del flujo de aire	1100 (m ³ /h)
Peso	16.5 (kg)

2.2 Ensamblaje del sistema de refrigeración

Se ensambló el sistema de refrigeración sobre una estructura metálica y luego se procedió a la conexión de la tubería de cobre del evaporador y la unidad condensadora. Además, se determinó la ubicación de los sensores de presión y temperatura mostrados en un diagrama P&ID, siguiendo la norma ISA 5.1 [13]. En el Anexo III, se muestra un esquema de equipos en 3D.

Ubicación de los sensores de presión Full Gauge

Se ubicó los transductores de presión para la toma de datos del sistema de refrigeración, tomando en cuenta los lugares más aptos para estos, como se observa en la Figura 2.8. Para el transductor de baja (PT 101) y alta (PT 100), se lo instaló en el tramo del manómetro de baja y alta respectivamente, después de la válvula de servicio en la T de cobre soldada.

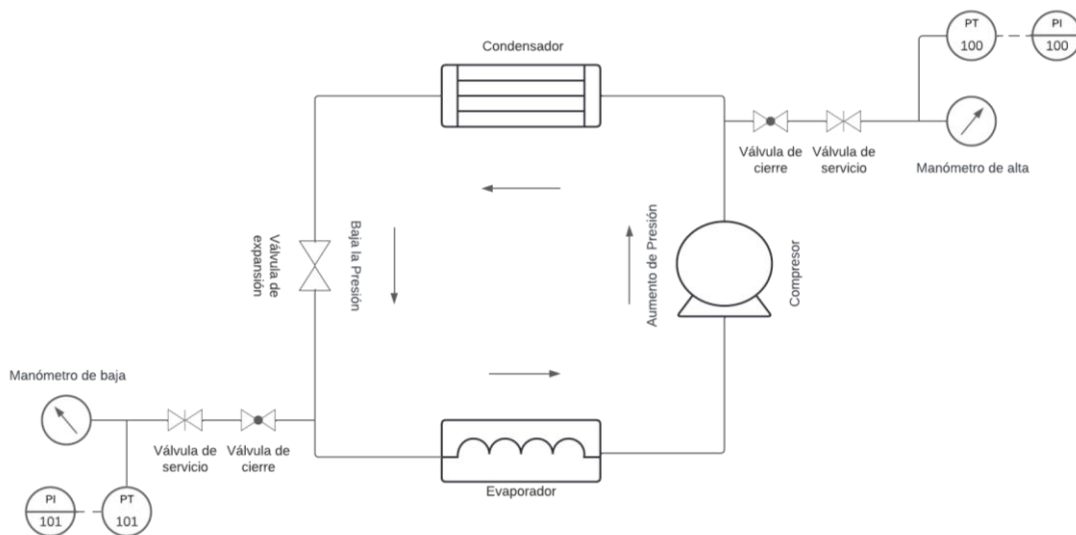


Figura 2.8 Diagrama P&ID de los sensores de presión

Ubicación de los sensores de temperatura Full Gauge

Se determinó los mejores lugares para tomar datos de los 4 sensores de temperatura Full Gauge para el sistema como se muestra en la Figura 2.9, por lo tanto 2 sensores se colocaron dentro de la unidad condensadora, tales como: a la salida del compresor (TT 102-B), a la salida del condensador (TT 102-C). Y los 2 últimos sensores se colocaron a la entrada del evaporador (TT 102-D) y salida del evaporador (TT 102-A). Además, en el Anexo IV se observa un diagrama PID más detallado.

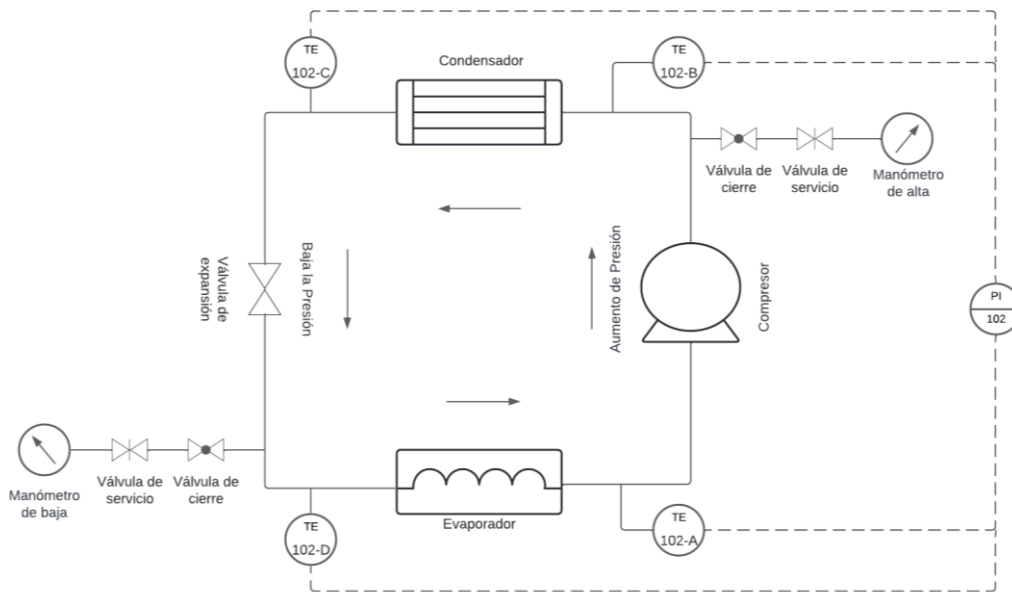


Figura 2.9 Diagrama P&ID de los sensores de temperatura

Ubicación de los sensores de temperatura Arduino

Para la ubicación de los termopares en el sistema de refrigeración, se tuvo la posibilidad de conectar 8 sensores de temperatura como se observa en la Figura 2.10. Por lo tanto, se conectó 5 termopares en la unidad condensadora, tales como: entrada del compresor (TT 103-D), entrada del condensador (TT 103-E), dentro del condensador (TT 103-F), entrada de la válvula de expansión (TT 103-G), salida de la válvula de expansión (TT 103-H). Por último, se conectó los 3 sensores en el evaporador, tales como: entrada del evaporador (TT 103-A), dentro del evaporador (TT 103-B) y a la salida del evaporador (TT 103-C).

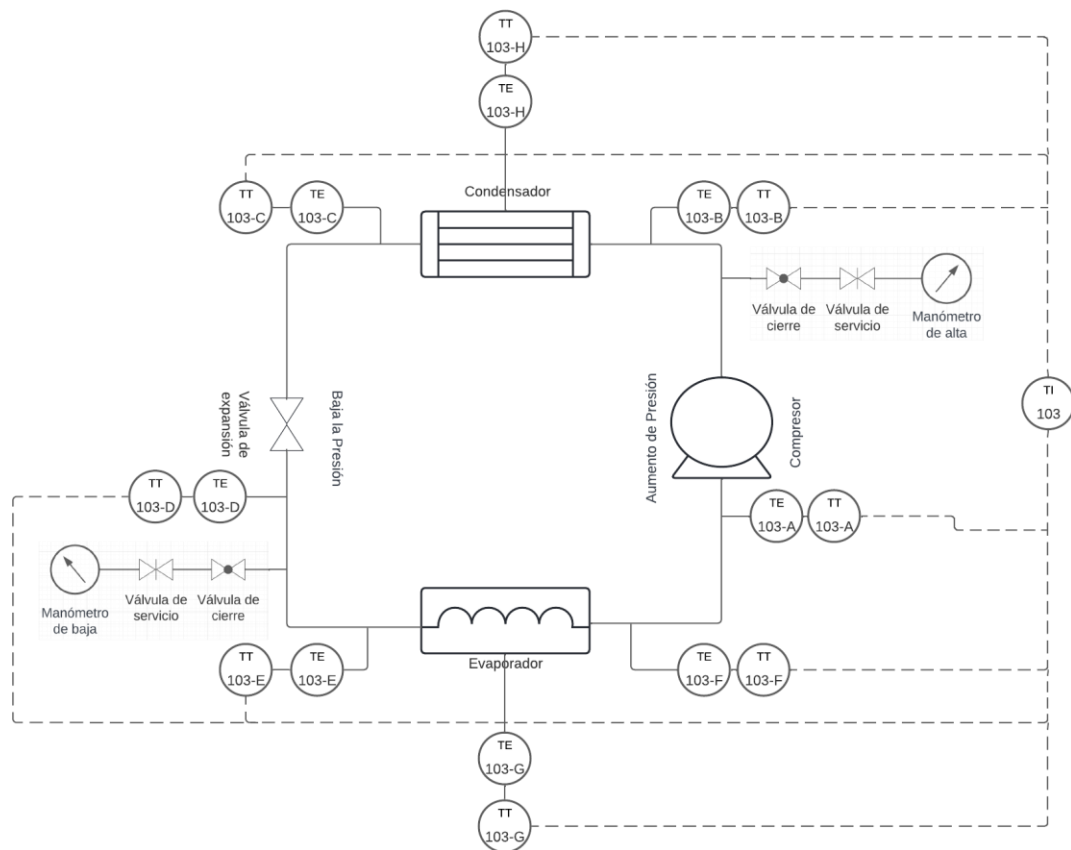


Figura 2.10 Diagrama P&ID de los sensores de temperatura en Arduino

Soldadura Oxiacetilénica

Se realizó la soldadura OAW con varillas de plata al 5% para obtener una mejor sujeción en las conexiones de las tuberías de cobre.

Se utilizó tubería de cobre de 1/2" para la salida del evaporador y la entrada de la unidad condensadora, y tubería de 1/4" para la salida de la unidad condensadora y la entrada del evaporador. Posteriormente, se doblaron los tubos mencionados desde la unidad condensadora hacia el evaporador por detrás de la estructura metálica como se muestra en la Figura 2.11 y, finalmente, se colocó rubatex como aislante térmico.



Figura 2.11 Ensamblaje del sistema de refrigeración

Manómetro de baja

La tubería que está conecta al evaporador fue utilizada para tener la línea de baja, así también, se soldó una reducción de 1/2" a 3/8" y otra a 1/4" como se observa en la Figura 2.12, además, se instaló una válvula de cierre, una válvula de servicio, una salida para el transductor de 0-100 (psi) y, para finalizar se colocó el manómetro de baja por la parte frontal del módulo como se aprecia en la Figura 2.13.



Figura 2.12 Reducción de 3/8 a 1/4



Figura 2.13 Manómetro de baja

Manómetro de alta

Se situó una válvula pincha tubo en la entrada del condensador dado a que la unidad condensadora se encontraba precargada de propano, por tanto, al abrir la válvula el refrigerante se expande en todo el sistema hasta la línea de alta en donde se instalaron los instrumentos de medición, como se observa en la Figura 2.14. Seguidamente, la tubería de 1/4 fue colocada en dirección al tablero principal por la parte de atrás de la estructura del módulo didáctico. Se instaló también, una válvula de cierre, una válvula de servicio, una salida para el transductor de presión, y la salida al manómetro de alta por la parte frontal del tablero, como se muestra en la Figura 2.15.



Figura 2.14 Válvula pincha tubo

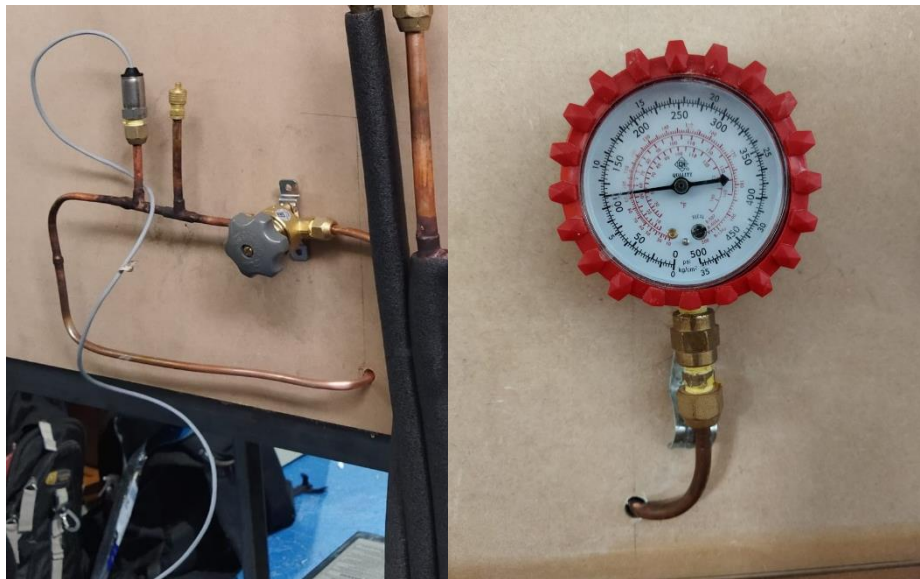


Figura 2.15 Equipos de la línea de alta y manómetro

2.3 Puesta en marcha del sistema de refrigeración

Una vez elaborada la soldadura y la conexión de los manómetros del sistema de refrigeración se examinó que todos los equipos se encuentren conectados correctamente por la soldadura de cobre para proceder con la carga del refrigerante.

En cuanto a la soldadura oxiacetilénica en los equipos y manómetros es importante comprobar que el sistema no contenga fugas en las uniones soldadas o roscadas, por lo cual, se realizó la técnica tradicional de agua y jabón y de esta manera se continuo con el vacío en el sistema para extraer toda la humedad y aire de las tuberías de cobre,

y así, ingresar el refrigerante con las válvulas de la unidad condensadora y la válvula pincha tubo.

Presurización de nitrógeno

Se verificó que no existan fugas o impurezas en el sistema de refrigeración al introducir un gas inerte, comúnmente nitrógeno, a una presión establecida por norma o por el fabricante [14].

Para la presurización de nitrógeno todo el equipo debe estar apagado y el tanque de nitrógeno será conectado a un juego de manómetros a través de mangueras, como se observa en la Figura 2.16.



Figura 2.16 Tanque de nitrógeno con juego de manómetros

Este procedimiento se lo realizó en 3 tramos del sistema:

- **La conexión de la unidad condensadora y evaporador:** en esta sección se conectó la manguera a la entrada del compresor y se lo presurizó a una presión de 360 (psi) como se muestra en la Figura 2.17.

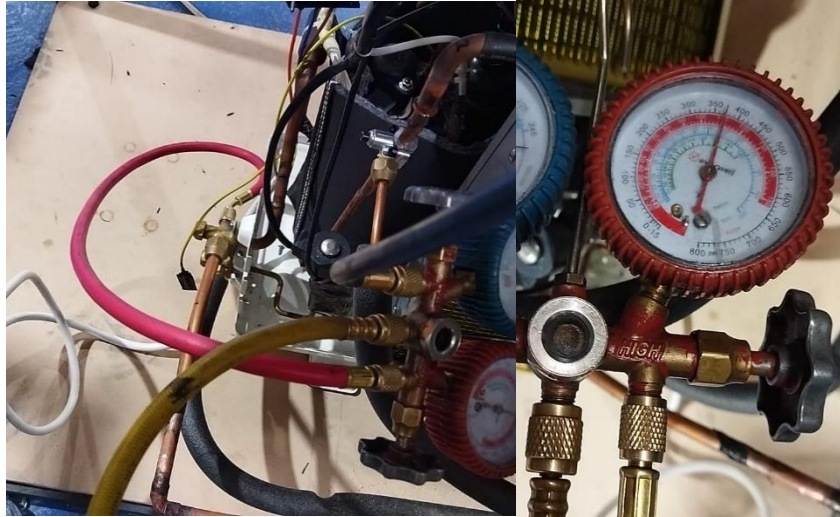


Figura 2.17 Presurización a baja presión

- **Manómetro de alta:** esta sección se conforma a partir de la válvula pincha tubo hasta el manómetro y se lo presurizó mediante la válvula de servicio a una presión de 300 (psi) como se muestra en la Figura 2.18.

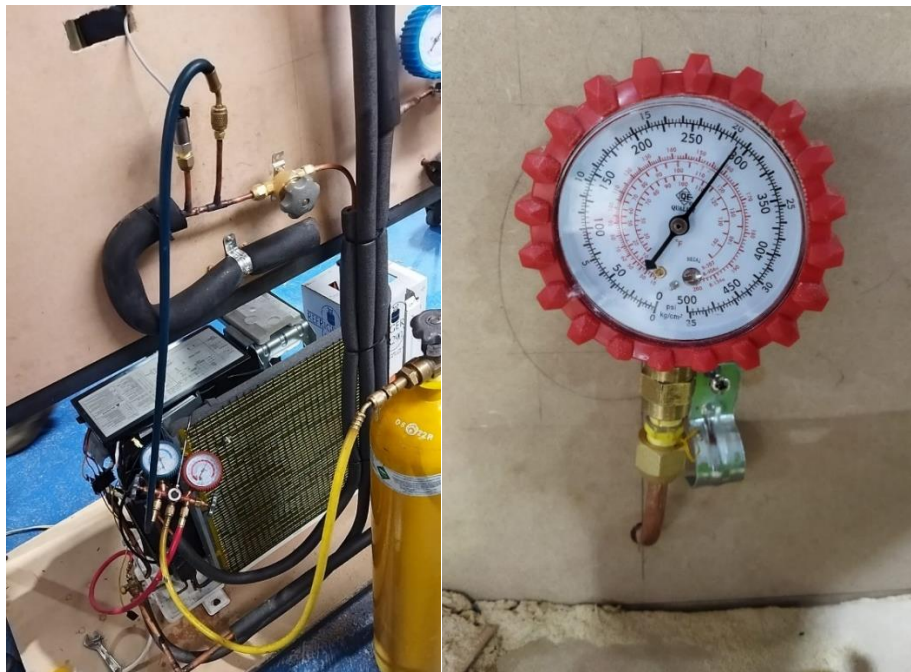


Figura 2.18 Presurización en el manómetro de alta

- **Manómetro de baja:** esta sección se integra desde la válvula de cierre hasta el manómetro, aquí se conectó la manguera a la válvula de servicio y se lo presurizó a una presión de 105 (psi) como se observa en la Figura 2.19.



Figura 2.19 Presurización en el manómetro de baja

Corrección de fugas

Visto que el sistema contiene un refrigerante inflamable como lo es el propano es necesario presurizarlo por 8 días para revisar la existencia de fugas en las soldaduras y/o uniones roscadas.

- El primero y segundo día se mantuvieron las presiones en un valor similar, como se puede observar en los manómetros de alta y baja de la Figura 2.20 y Figura 2.21.



Figura 2.20 Presión de presurización en la línea de alta y baja (11 de julio)



Figura 2.21 Presión de presurización en la línea de alta y baja (12 de julio)

- Al tercer día se obtuvo una pérdida de presión considerablemente en el lado de alta como se muestra en la Figura 2.22. Por consiguiente, se conservó dicha presión para analizar si la pérdida de presión era provocada por posibles fugas.



Figura 2.22 Presión de presurización en la línea de alta y baja (13 de julio)

- Al cuarto día de igual forma se observó una pérdida de presión en el lado de alta como se muestra en la Figura 2.23, por lo que, se utilizó agua con jabón para encontrar las fugas del sistema en las uniones soldadas y roscadas como se observa en la Figura 2.24.



Figura 2.23 Presión de presurización en la línea de alta y baja (14 de julio)

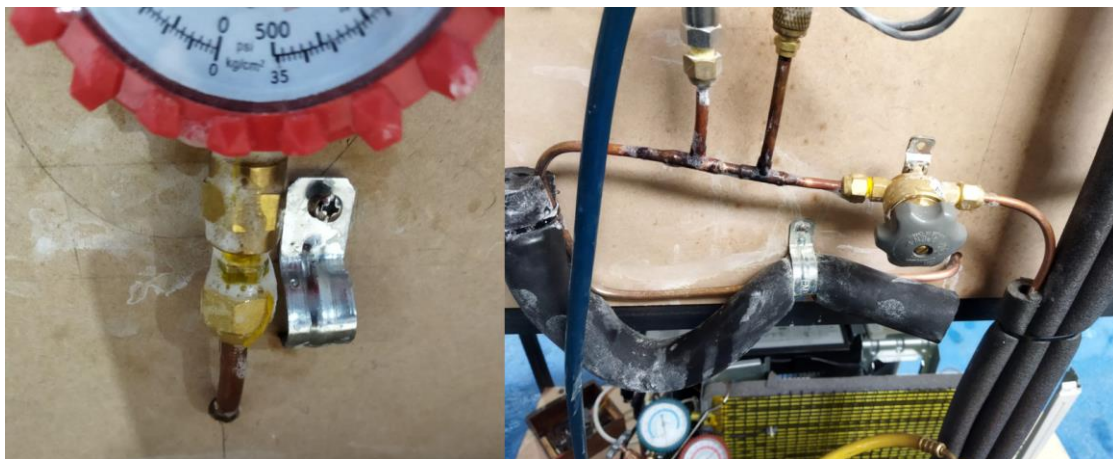


Figura 2.24 Revisión de fugas con agua y jabón

Con este método, se determina la existencia de una fuga en el manómetro de alta, ya que, en esta sección se formaron pequeñas burbujas en la unión roscada por donde salía el nitrógeno, entonces, se ajustó la tuerca reforzada y se fijó una presión de 150 [psi] en el lado de alta.

- Se presurizo al sistema 4 días más con la finalidad de no presentar ninguna fuga en el sistema y, al octavo día se mantuvieron las presiones, como se muestra en la Figura 2.25.



Figura 2.25 Presión de presurización en la línea de alta y baja (18 de julio)

Vacío en el Sistema

El procedimiento de vacío consiste en extraer el aire y la humedad que puede presentarse en el sistema. En esta operación se utilizó una bomba de vacío con un juego de manómetros conectados a las válvulas de servicio tanto del manómetro de alta y de baja como se muestra en la Figura 2.26. Se disminuye la presión hasta que la temperatura de ebullición del agua sea menor a la del ambiente [14] y el manómetro de baja del sistema este a una presión menor a 0 [psi] y el de alta a 0 [psi] como se muestra en la Figura 2.27. Este procedimiento llevo aproximadamente 30 minutos para extraer toda la cantidad de aire y humedad.



Figura 2.26 Proceso de vacío



Figura 2.27 Presión en los manómetros

Carga del refrigerante

En el procedimiento de carga de refrigerante se usó el propano que estaba dentro de la unidad condensadora, de modo que, se abrieron las válvulas de entrada y salida con una llave Allen para que todo el refrigerante se traslade al evaporador y al manómetro de baja como se muestra en la Figura 2.28. Además, se abrió la válvula pincha tubo para que el refrigerante circule al manómetro de alta como se observa en la Figura 2.29.



Figura 2.28 Paso de refrigerante



Figura 2.29 Válvula pincha tubo

2.4 Configuración del sistema de control

Para la configuración de la temperatura de trabajo en el sistema de refrigeración se emplea un control remoto, como se ve en la Figura 2.30. En este sentido, para iniciar con la configuración se aplasta el botón “On/Off” para encender los quipos, y luego al aplastar el botón “MODO” se generan diferentes modos de trabajo, tales como: Auto Mode, Cool Mode, Dry Mode y Fan Mode [15]. En el Anexo V, se presenta el manual de uso del sistema SPLIT.



Figura 2.30 Control Remoto

- **AUTO MODE:** en este modo el sistema de refrigeración elegirá automáticamente el funcionamiento de enfriamiento o solo el ventilador que dependerá de la temperatura establecida y la temperatura ambiente. Además, se tiene una temperatura preestablecida de 25°C la cual no se puede cambiar [15].
- **COOL MODE:** en este modo el usuario puede establecer la temperatura en el rango de 16°C a 31°C y el aire acondicionado enfriará y disminuirá la humedad del aire, ya que el compresor funcionará a diferentes frecuencias que dependerán de la temperatura establecida y la temperatura ambiente [15].
- **DRY MODE:** en este modo el aire acondicionado solo va a eliminar la humedad del aire, pero no enfriar la habitación. Por otra parte, no se puede configurar la temperatura, ya que el ventilador trabaja a una velocidad baja [15].
- **FAN MODE:** en este modo se cambia la velocidad del ventilador entre: baja, alta y automática [15].

3 RESULTADOS

El módulo didáctico tiene 4 componentes principales desarrollado por varios estudiantes, y estos son:

- Diseño e implementación de la estructura metálica como soporte de equipos y conexión del sistema eléctrico como se observa en la Figura 3.1



Figura 3.1 Estructura del módulo

- Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de presiones y temperaturas con instrumentos full gauge como se muestra en la Figura 3.2.

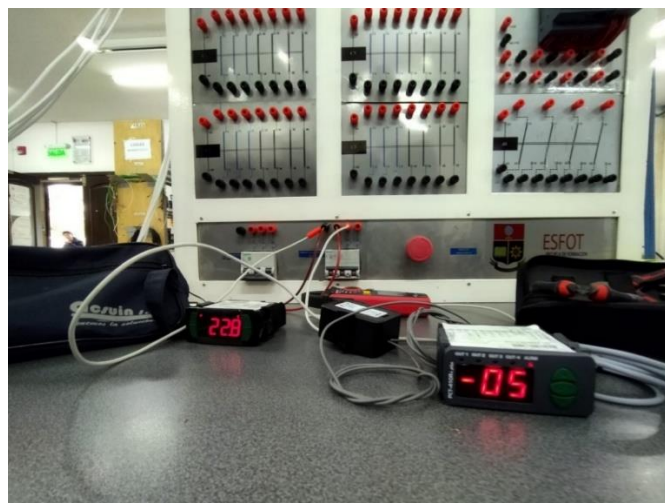


Figura 3.2 Sensores de presión y temperatura Full Gauge

- Diseño e implementación de un sistema de monitoreo para temperatura, voltaje y corriente en Arduino como se observa en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Sensores temperatura voltaje y corriente en Arduino

- Ensamble y pruebas del sistema de refrigeración. Este componente corresponde al presente documento escrito y se detallará en esta sección.



Figura 3.4 Sistema de refrigeración

Con todo el sistema de refrigeración ensamblado y comprobado de que no existan fugas, se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento de las presiones de trabajo y el sistema de control de temperatura.

3.1 Montaje de equipos en la estructura

Como se observa en la Figura 3.5, se realizó el diagrama en 3D con la ubicación de los equipos refrigeración, los instrumentos de medición, válvulas de cierre y de servicio y el sentido de la tubería de cobre por la parte trasera de la estructura metálica, además se enumeró los elementos principales utilizados. En el Anexo III, se muestra un esquema de equipos en 3D.

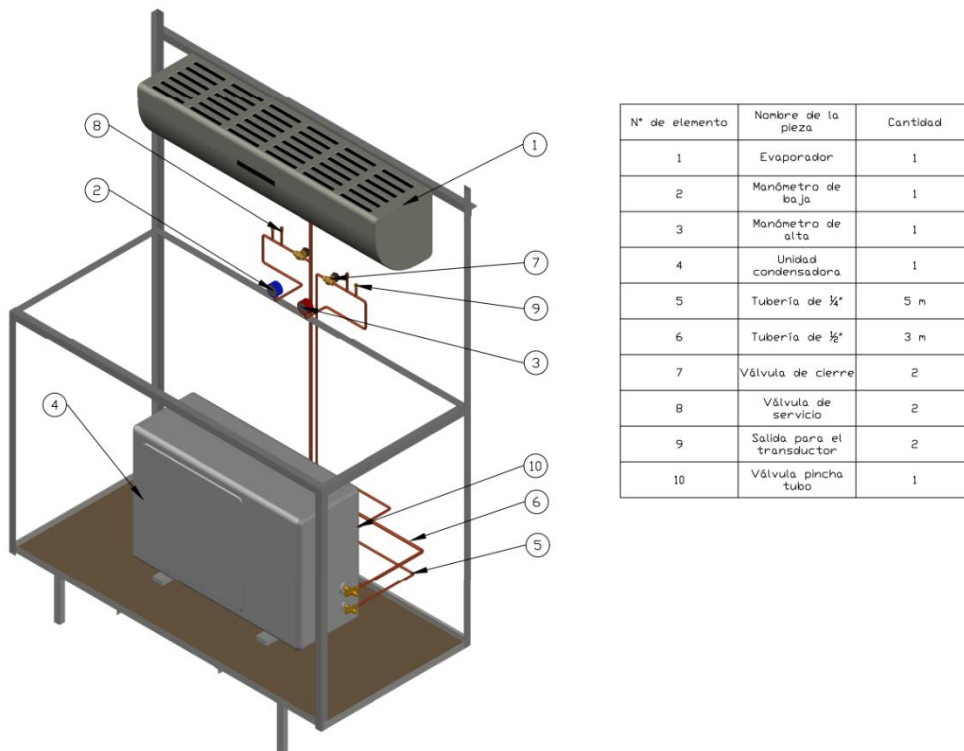


Figura 3.5 Sistema de refrigeración

3.2 Ensamble del sistema de refrigeración

Como se observa en la Figura 3.6, se detalla el módulo finalizado con el montaje de los equipos de refrigeración en la estructura metálica, y su conexión de la tubería de cobre del evaporador a la unidad condensadora y sus respectivos manómetros de alta y baja.

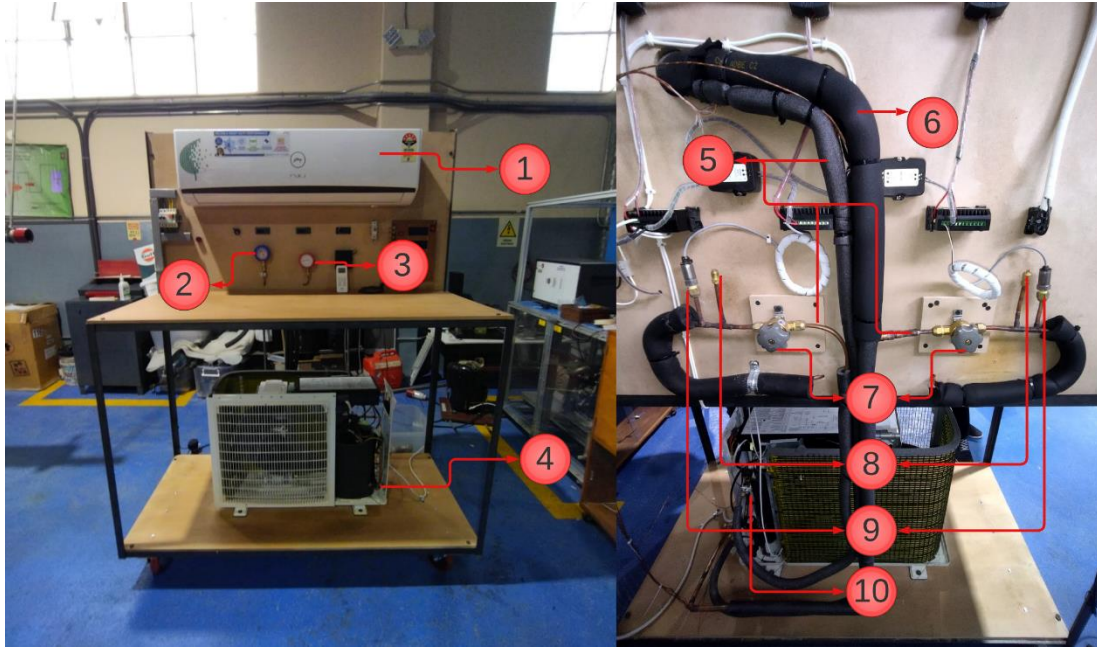


Figura 3.6 Elementos del sistema de refrigeración

Además, se realizó la numeración de cada elemento del sistema de refrigeración descritos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Elementos del sistema de refrigeración

N°	Elemento del sistema
1	Evaporador
2	Manómetro de baja
3	Manómetro de alta
4	Unidad condensadora
5	Tubería de ¼"
6	Tubería de ½"
7	Válvulas de cierre de ¼" de rosca
8	Válvulas de servicio
9	Transductores
10	Válvula pincha tubo

3.3 Pruebas de funcionamiento

Se tomaron presiones de trabajo en 2 condiciones de temperatura ambiente (16°C y 25°C) para el análisis del ciclo ideal y el error entre los dos instrumentos de medición

(manómetro y transductor). Además, se tomaron datos de temperatura en los diferentes puntos del ciclo de refrigeración en la condición de 16°C para el análisis del ciclo real del sistema.

Presiones de trabajo del ciclo de refrigeración

- **Temperatura a 16°C**

Se colocó una temperatura ambiente de 16°C al sistema de refrigeración y se esperó hasta que se establezca como se muestra en la Figura 3.7, y se tomaron los datos de presión en alta y baja de los instrumentos de medición (transductor y manómetro) del sistema como se muestra en la Tabla 3.2.

Para esta condición las presiones de funcionamiento son más altas ya que el ambiente del lugar se encontraba entre 20 y 25°C por lo que el compresor trabajaba más tiempo para mantener la temperatura ambiente de 16°C del termostato del sistema.

Tabla 3.2 Condición de trabajo a 16°C

Condición 3	Instrumento de medición	Presión de alta (psi)	Presión de baja (psi)
16 °C	Manómetro	210	75
	Transductor	209	67



Figura 3.7 Condición a 16°C

- **Temperatura a 25°C**

Se colocó una temperatura ambiente de 25 [°C] al sistema de refrigeración y se esperó hasta que se estabilice como se muestra en la Figura 3.8, y se tomaron los datos de presión en alta y baja de los instrumentos de medición (transductor y manómetro) del sistema como se muestra en la Tabla 3.3.

En este caso el lugar a refrigerar se encontraba de igual forma entre 20 y 25 [°C], pero la condición se cambió a 25 [°C], por esta razón las presiones de trabajo son menores y el compresor trabaja en intervalos de tiempo para mantener la temperatura ambiente de 25 [°C] del termostato del sistema.

Tabla 3.3 Condición de trabajo a 25°C

Condición 2	Instrumento de medición	Presión de alta (psi)	Presión de baja (psi)
25 °C	Manómetro	175	87
	Transductor	174	82



Figura 3.8 Condición a 25 °C

Temperaturas de funcionamiento del ciclo a 16°C ambiente

Se tomó datos de temperatura de funcionamiento a una condición de 16 [°C] en todos los puntos del sistema termodinámico para el análisis del ciclo real como se muestra en la Tabla 3.4.

Se encendió el módulo didáctico y se colocó a una temperatura ambiente de 16 [°C] hasta que el sistema se estabilizó a una presión de alta de 209 [psi] y de baja de 67 [psi] y se tomaron datos de temperatura para el análisis del ciclo real como se muestra en la Tabla 3.4. Además, estos datos se tomaron de los termopares conectados en los diferentes puntos del sistema como se observa en la Figura 3.9.

Tabla 3.4 Temperaturas de funcionamiento a 25°C ambiente

N°	Temperatura (°C)
T1	11.75
T2	49.50
T3	33.25
T4	17.00
T5	4.25
T6	5.00
T7	3.75
T8	34.75

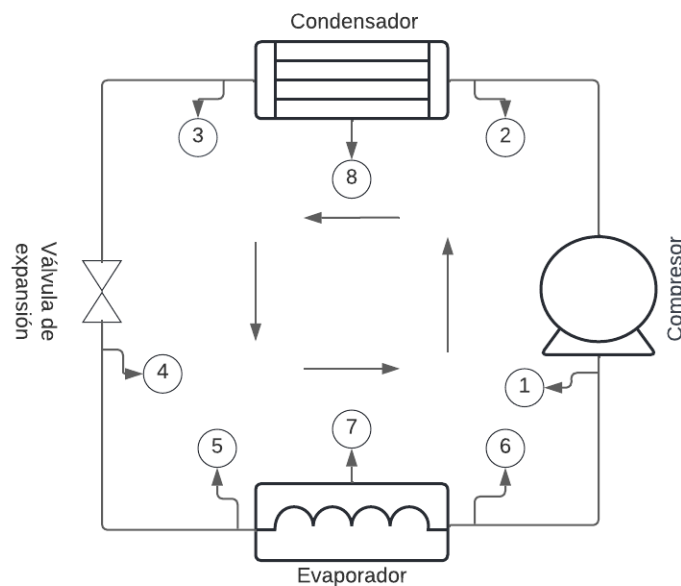


Figura 3.9 Temperatura en diferentes puntos del sistema

Las pruebas de funcionamiento del equipo de refrigeración a diferentes condiciones y con sus presiones de trabajo se lo observa en el siguiente video escaneando el código QR de la Figura 3.10.



Figura 3.10 Código QR del video de las pruebas de funcionamiento.

Enlace (<https://youtu.be/ecQx55uZhnw>)

3.4 Análisis de resultados

Se analizó el error entre los valores de presión tomadas con el transductor y con el manómetro en alta y baja. Por otro lado, se calculó las temperaturas con las presiones tomadas para dibujar el diagrama T-s en el Software EES para realizar el análisis del ciclo ideal en las dos condiciones y el análisis del ciclo real para la condición de trabajo de 16 [°C].

Error entre transductor y manómetro

El módulo didáctico cuenta con dos instrumentos de medición como: el transductor que da un valor de presión más preciso y el manómetro que tiene un rango de error entre 0 a 5 [psi]. En la Tabla 3.5, se observa que los dos instrumentos en alta tienen valores similares y el error relativo es muy bajo, por otro lado, los instrumentos en baja tienen un mayor desfase entre los valores de presión.

Tabla 3.5 Cálculo del error relativo entre el transductor y manómetro

Condición	Presión	Transductor	Manómetro	Error %
16°C	P alta [psi]	209	210	0.47%
	P baja [psi]	67	72	6.94%
25°C	P alta [psi]	174	175	1.33%
	P baja [psi]	82	87	5.74%

Análisis del ciclo ideal con las temperaturas de funcionamiento

- Condición a 16 °C

Con el equipo en funcionamiento a una condición de trabajo de 16 [°C] ambiente y con el sistema estable, se tomaron los datos de presión de 209 [psi] en alta y 67 [psi] en baja, para calcular las temperaturas y entropías de funcionamiento en los cuatro puntos del ciclo como se observa en la Figura 3.12. Los resultados se los detalla en la Tabla 3.6, que ayudan a graficar el diagrama T-s y se detallan a continuación cada parte del proceso:

- Evaporación: como se observa en la Figura 3.11, el proceso de evaporación de T[4] a T[1], en donde el evaporador extrae el calor del lugar a refrigerar y el refrigerante cambia de mezcla a vapor saturado. Este proceso se realiza a una presión constante de 534 [kPa] y a temperatura constante en los puntos T[4]= T[1]= 3,921 °C
- Compresión: como se muestra en la Figura 3.11, en este proceso los puntos T[1] a T[2] elevan la presión de 534 [kPa] a 1513 [kPa] y la temperatura de 3,921[°C] a 48,47[°C] con el trabajo realizado por el compresor al refrigerante. Por otro lado, este es un proceso isentrópico, esto quiere decir que la entropía se mantiene constante en los dos puntos.
- Condensación: en la Figura 3.11, el proceso de condensación es del punto T[2] a T[3], en donde expulsa todo el calor al ambiente y se realiza el cambio de vapor sobrecalentado 48,47 [°C] a líquido saturado 44,38 [°C] a una presión constante de 1513 [kPa].
- Expansión: como se observa en la Figura 3.11, el proceso de T[3] a T[4] donde reduce la presión a 534 [kPa] y la temperatura a 3,921[°C]. Además, una parte del refrigerante líquido se hace vapor, por esta razón el punto T[4] se encuentra en mezcla en el diagrama T-s.

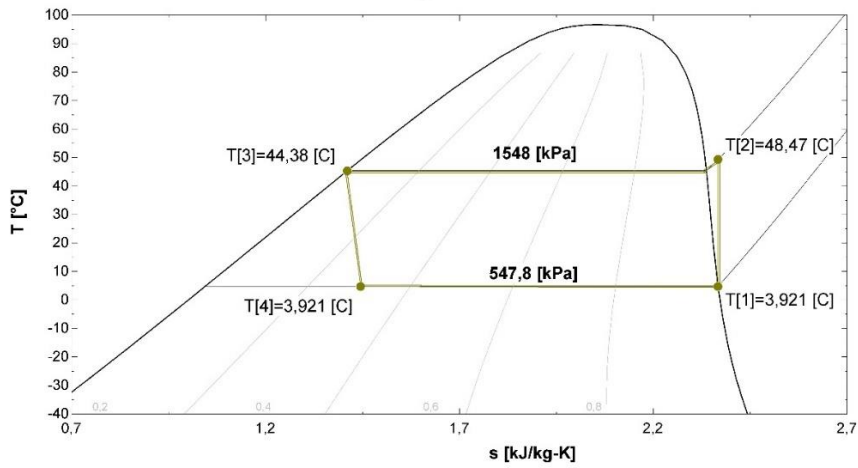


Figura 3.11 Diagrama T-s a una condición de 16°C

```

Equations Window
P_alta= 209 [psig]
P_baja= 67 [psig]

P_atm=72[kPa]

P[1]=(P_baja*6.895)+P_atm
P[2]=(P_alta*6.895)+P_atm
P[3]=P[2]
P[4]=P[1]

T[1]=T_sat(R290;P=P[1])
T[2]=Temperature(R290;P=P[2];s=s[2])
T[3]=T_sat(R290;P=P[3])
T[4]=T[1]

s[1]=Entropy(R290;P=P[1];x=1)
s[2]=s[1]
s[3]=Entropy(R290;T=T[3];x=0)
s[4]=Entropy(R290;T=T[1];x=x[4])

h[3]=Enthalpy(R290;P=P[3];s=s[3])
h[4]=h[3]

x[4]=Quality(R290;P=P[4];h=h[4])

```

Figura 3.12 Cálculos para el diagrama T-s

Tabla 3.6 Resultados para el diagrama T-s

	P [kPa]	S [kJ/kg·K]	T [°C]	h [kJ/kg]	x
[1]	534	2,368	3,921	-	1
[2]	1513	2,368	48,47	-	-
[3]	1513	1,401	44,38	320,7	0
[4]	534	1,435	3,921	320,7	0,3001

- Condición a 25°C

Se configuró el equipo a una condición de trabajo de 25 [°C] ambiente y se esperó que el sistema se estabilice; se tomaron los datos de presión de 174 [psi] en alta y 82 [psi] en baja, para calcular las temperaturas y entropías de funcionamiento en los cuatro puntos del ciclo como se observa en la Figura 3.14. Los resultados se los detalla en la Tabla 3.7, que ayudan a graficar el diagrama T-s y se detallan a continuación cada parte del proceso:

- T[4] a T[1]: como se observa en la Figura 3.13, se realiza el proceso de evaporación al absorber calor del espacio a refrigerar y el refrigerante cambia de mezcla a vapor saturado. Este proceso se realiza a una presión constante de 637,4 [kPa] y a temperatura constante de 10,04 [°C].
- T[1] a T[2]: como se muestra en la Figura 3.13, en este proceso se comprime el refrigerante y elevar la presión de 637,4 [kPa] a 1272 [kPa] y la temperatura de 10,04 [°C] a 39,51[°C]. Por otro lado, este es un proceso isentrópico, esto quiere decir que la entropía se mantiene constante en los dos puntos.
- T[2] a T[3]: en la Figura 3.13, el proceso de condensación para expulsar todo el calor al ambiente y se realiza el cambio de vapor sobrecalentado 38,51 [°C] a líquido saturado 36,82 [°C] a una presión constante de 1272 [kPa].
- T[3] a T[4]: como se observa en la Figura 3.13, el proceso de expansión del refrigerante donde reduce la presión a 637,4 [kPa] y la temperatura a 10,04 [°C]. Además, una parte del refrigerante líquido se hace vapor, por esta razón el punto T[4] se encuentra en mezcla en el diagrama T-s.

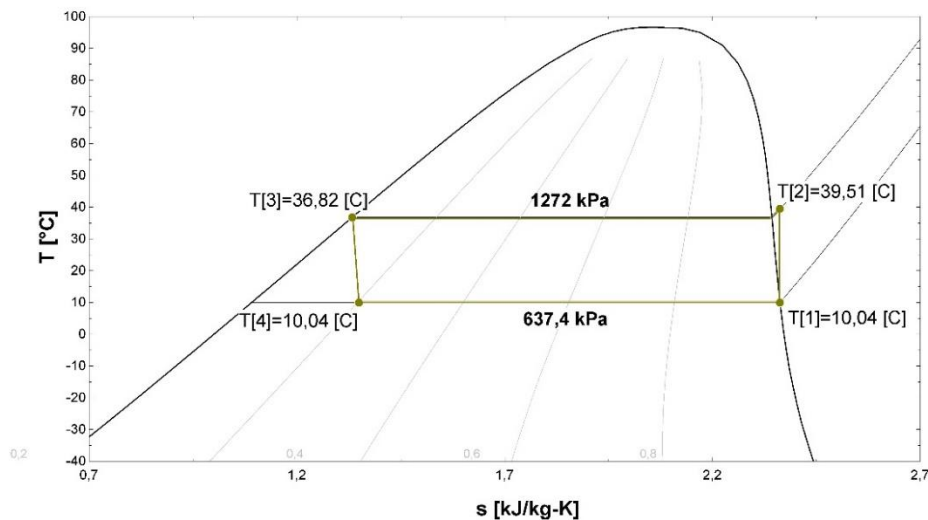


Figura 3.13 Diagrama T-s a una condición de 25°C


```

Equations Window
P_alta= 174 [psig]
P_baja= 82 [psig]

P_atm=72[kPa]

P[1]=(P_baja*6.895)+P_atm
P[2]=(P_alta*6.895)+P_atm
P[3]=P[2]
P[4]=P[1]

T[1]=T_sat(R290;P=P[1])
T[2]=Temperature(R290;P=P[2];s=s[2])
T[3]=T_sat(R290;P=P[3])
T[4]=T[1]

s[1]=Entropy(R290;P=P[1];x=1)
s[2]=s[1]
s[3]=Entropy(R290;T=T[3];x=0)
s[4]=Entropy(R290;T=T[1];x=x[4])

h[3]=Enthalpy(R290;P=P[3];s=s[3])
h[4]=h[3]

x[4]=Quality(R290;P=P[4];h=h[4])

```

Figura 3.14 Cálculos para el diagrama T-s

Tabla 3.7 Resultados para graficar el diagrama T-s

	P [kPa]	S [kJ/kg·K]	T [°C]	h [kJ/kg]	x
[1]	637,4	2,362	10,04	-	1
[2]	1272	2,362	39,51	-	-
[3]	1272	1,333	36,82	298,6	0
[4]	637,4	1,349	10,04	298,6	0,2028

Análisis del ciclo real para la condición de 16°C

Se tomaron los datos de temperatura del sistema de monitoreo con Arduino conectado en los diferentes puntos del sistema de refrigeración para graficar el ciclo ideal en el diagrama T-s.

En el sistema de refrigeración se tiene los termopares conectados en todo el ciclo, por esta razón al graficar el ciclo real en el diagrama T-s se aprecia el sobrecalentamiento antes de entrar al compresor y el subenfriamiento al salir del condensador.

Como se observa en la Figura 3.15, se tiene los procesos del ciclo real en azul y el ciclo ideal en verde y se detalla cada proceso a continuación:

- $T[6']-T[1']$ = Sobrecalentamiento en la tubería de cobre a la salida del evaporador y antes de entrar al compresor

- T[1'] a T[2'] = Compresión del refrigerante hasta una presión alta y una temperatura de sobrecalentamiento.
- T[2'] a T[8'] = Condensación del vapor sobrecalentado hasta líquido saturado
- T[8'] a T[3'] = Subenfriamiento a la salida del condensador y antes de entrar a la válvula de expansión
- T[3'] a T[4'] = Expansión del refrigerante hasta una presión y temperatura baja
- T[4'] a T[5'] = Disminución de temperatura en la tubería de cobre a la salida de la válvula de expansión y antes de entrar al evaporador
- T[5'] a T[7'] = Evaporación con reducción de temperatura.

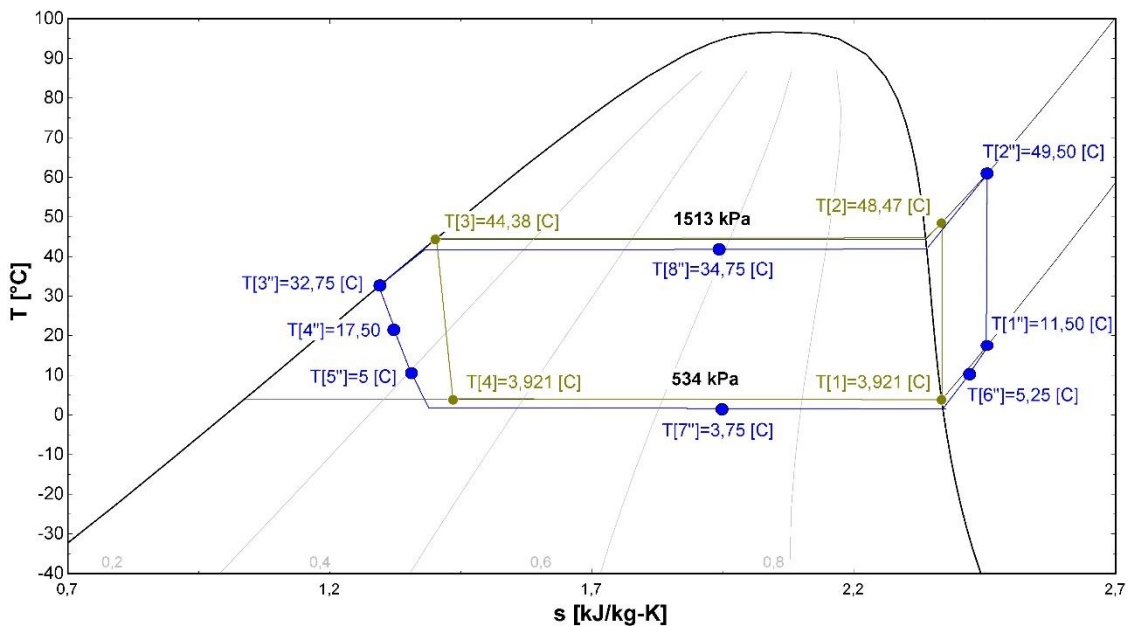


Figura 3.15 Ciclo real a la condición de 16 °C

3.5 Manual de uso y mantenimiento

Para conocer el funcionamiento del sistema de refrigeración y sus respectivas acciones de mantenimiento para conservar los equipos en buen estado, se realizó un manual de uso y mantenimiento donde se describe paso a paso el uso del módulo y el mantenimiento que se debe realizar cada cierto tiempo. Dichos manuales se observan en el Anexo VI

De igual forma, se puede escanear el código QR de la Figura 3.16 o ingresar a su respectivo enlace, y observar un video del funcionamiento y sus modos de trabajo del sistema de refrigeración como también el mantenimiento de los equipos



Figura 3.16 Código QR del video de manual de uso y mantenimiento

Enlace (<https://youtu.be/6w37P3zPFeU>)

4 CONCLUSIONES

- La finalidad del módulo didáctico es para preparar a técnicos especializados en los sistemas de refrigeración con propano (R290), y tengan conocimientos en procesos de presurización, corrección de fugas, vacío, carga de refrigerante y sobre todo sea una instalación segura.
- El sistema utiliza especialmente el propano debido a sus propiedades termodinámicas y para dejar atrás los refrigerantes convencionales que son perjudiciales para el medio ambiente.
- El sistema de refrigeración permite realizar procesos como presurización del sistema, vacío y carga o descarga del refrigerante gracias a la válvula de servicio, además, al solo cerrar las válvulas de cierre se puede cambiar los instrumentos de medición (transductor o manómetro) sin necesidad de sacar todo el propano del sistema.
- Se utilizó una válvula pincha tubo conectada a la salida del compresor, debido a que la unidad condensadora venía precargada con propano, y al ser un sistema sellado no se quería extraer el refrigerante de la unidad. Esta válvula realizó un hueco al tubo para dejar fluir el propano a los instrumentos de presión alta.
- En las pruebas de funcionamiento se tomaron las presiones de los dos instrumentos de medición instalados, pero para realizar los cálculos de los ciclos ideales se hicieron con los valores del transductor ya que es un valor más exacto a comparación de los manómetros que tienen un rango de error.
- El análisis del ciclo real del equipo se determinó que existía un aumento de temperatura de 6 [°C] en la tubería de cobre entre el evaporador y compresor y

una reducción de temperatura de 12,5 [°C] de entre el evaporador y la válvula de expansión, por ende, se verifica el subenfriamiento y el sobrecalentamiento en el sistema de refrigeración.

- La unidad condensadora contiene una tarjeta inverter que sirve como un variador de frecuencia, para disminuir o aumentar la velocidad del compresor según el lugar a refrigerar lo necesite, cabe recalcar que el compresor no se apaga cuando llega a la temperatura deseada, si no que se mantiene prendido, pero a una baja velocidad.

5 RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar la soldadura oxiacetilénica con varillas de plata al 5% ya que tienen una mejor sujeción, además es importante verificar que todo el material de aporte unió las dos tuberías de cobre por toda la circunferencia.
- Es necesario utilizar dos llaves para ajustar las uniones roscadas, ya que si no se lo realiza se puede doblar la tubería hasta romperla. Por otra parte, no se debe ajustar demasiado porque se puede romper la campana que sostiene a la tuerca reforzada.
- Se debe colocar rubatex alrededor de la tubería de cobre ya que esta sirve como un aislante térmico y evita que exista un intercambio de calor entra la tubería y el ambiente.
- Se debe revisar que la presión del manómetro sea similar a la del transductor ya que si se excede del valor se lo puede calibrar sacando el instrumento para ajustarlo poco a poco hasta que la aguja indique cero.
- Es necesario verificar que el sistema de refrigeración no tenga fugas y para una mejor detección usar el sensor "Inficon Gas-Mate" que solo se acerca la punta del instrumento alrededor de la unión soldada o roscada y pita si encuentra alguna salida de propano
- Es importante realizar el proceso de presurización del sistema de refrigeración con propano es necesario dejarlo con el nitrógeno dentro por 72 horas, ya que se tiene un refrigerante inflamable y si existen fugas puede ser perjudicial para las personas que estén cerca. Además, el método más sencillo para detectar fugas es colocar agua con jabón en las uniones soldadas o roscadas.

- Es fundamental realizar el proceso de vacío para no dejar rastros de humedad o aire en la tubería de cobre, ya que, si no lo extraemos completamente, hay la probabilidad de que se congelen las partes internas del sistema de refrigeración
- Para realizar pruebas de funcionamiento de temperaturas del sistema se puede utilizar los sensores full gauge para realizar el ciclo ideal del sistema de refrigeración y los sensores Arduino para el ciclo real.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. M. Faires y C. M. Simmang, *Termodinámica*, Limusa, 2004.
- [2] F. E. Moreno, J. J. Ramírez y O. D. Ortiz, «Sistema de supervisión y control para un banco experimental de refrigeración por compresión,» vol. 21, nº 1, pp. 99-107, 2016.
- [3] Y. Cengel y M. Boles, *Termodinámica*, MC Graw Hill, 2009.
- [4] J. A. Puebla, *Manual de Buenas Prácticas de Refrigeración*, Venezuela: FONDOIN, 2005.
- [5] J. M. Franco, *Manual de Refrigeración*, Editorial Reverté, 2006.
- [6] S. Yavad, J. Liu y S. C. Jim, «A comprehensive study on 21st-century refrigerants - R290 and R1234yf: A review,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 182, pp. 346-352, 2022.
- [7] Choudari y Sapali, «Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems,» *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 346-352, 2017.
- [8] J. Grajales, J. Gonzales y S. Rojas, *Instalación y caracterización de un sistema SPLIT de alta eficiencia para realizar comparaciones de consumos energéticos en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la IUPB*, Medellín: Tecnológico Pascual Bravo Institución Universitaria, 2014.
- [9] K. Star, *Unidad de condensación y sistema de refrigeración*, Standex, 2009.
- [10] J. C. R. Romero, *Manual para la Formación de Nivel Superior en Prevención de Riesgos Laborales*, Diaz de Santos, 2005.
- [11] Z. R. V. Cordero, «La Investigación Aplicada: Una Forma de Conocer las Realidades con Evidencia Científica,» *Revista Educación*, vol. 33, nº 1, pp. 155-165, 2009.
- [12] R. Lazzarin, D. Nardotto y M. Noro, *Válvula de Expansión Electrónica vs. Válvula de Expansión Termostática*, 2009.

- [13] A. /. ISA-5.1-2009, *Símbolos de instrumentación e identificación*, 2009.
- [14] G. Barletta y O. Acevedo, Buenas prácticas en los procesos de instalación y mantenimiento de sistemas de refrigeración y aire acondicionado, 2021.
- [15] Godrej, *Split Air Conditioner Manual*.
- [16] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [17] J. M. Firmino, *La Ingeniería Eléctrica de un Sistema de Refrigeración*, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1999.

7 ANEXOS

ANEXO I. Reporte de Similitud Generado por Turnitin

ANEXO II. Certificado de Funcionamiento de Trabajo de Integración Curricular

ANEXO III. Esquema de equipos en 3D

ANEXO IV. Diagrama P&ID de los instrumentos de medición

ANEXO V. Manual de uso del fabricante del sistema de refrigeración tipo Split

ANEXO VI. Manual de uso y mantenimiento