

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA ENFRIADORA DE LECHE PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES DE LA PARROQUIA DE LLOA**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO ELECTROMECAÁNICO**

**MARCO VINICIO LUGMAÑA SANDOVALIN**

marco.lugmana@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. HUGO ZÚÑIGA MSc.**

hugo.zuniga@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: DR. ÁLVARO AGUINAGA**

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

**DICIEMBRE, 2019**

## DECLARACIÓN

Yo, Marco Vinicio Lugmaña Sandovalin, declaro bajo juramento que el trabajo 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.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación -COESC-, soy titular de la obra en mención y otorgo una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional. Entregaré toda la información técnica pertinente. En el 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

Marco Vinicio Lugmaña Sandovalin

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Marco Vinicio Lugmaña Sandovalin, bajo nuestra supervisión.

Ing. Hugo Zúñiga MSc.  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Dr. Álvaro Aguinaga  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre, pilar fundamental en toda mi vida, gracias por el apoyo incondicional y sus sabios consejos brindado durante mi carrera universitaria, por ser ejemplo de esfuerzo, amor y sacrificio.

A mi hermano por su confianza depositada en mí y por su ayuda brindada cuando yo lo necesitaba sin importar su situación, gracias por siempre cuidarnos.

Agradezco a mis abuelitos, Papá Ángel y Mamita Rosa, quienes han sido mis segundos padres y me han enseñado que todo el trabajo y sacrificio realizado al final tiene su recompensa, por sus consejos, apoyo y valores inculcados en cada uno de sus nietos.

A quienes confirman la Escuela de Formación de Tecnólogos de la Escuela Politécnica Nacional, gracias por haber compartido sus conocimientos a lo largo de toda mi carrera universitaria, un agradecimiento especial al Ing. Hugo Zúñiga por haber guiado en la ejecución de este proyecto.

Marco Lugmaña

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre, quien ha sido un gran apoyo durante toda mi vida, con sus consejos y amor incondicional, todo es por y para ella.

En especial lo dedico a mi padre, para cumplir uno de sus más grande anhelos y a pesar de que no se encuentre con nosotros se sienta muy orgulloso.

A mi hermano por confiar en mí, por estar siempre juntos y por su apoyo en cada momento de nuestras vidas.

A mis abuelitos por todo el cariño, apoyo y por siempre estar junto a toda la familia.

Marco Lugmaña

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	<b>pág.</b>
DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos .....	2
• Objetivo general.....	2
• Objetivos específicos.....	2
2. METODOLOGÍA.....	3
2.1 Tipo de investigación .....	3
2.2 Descripción de la metodología usada .....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	5
3.1 Fundamentación técnica.....	5
• Refrigeración.....	5
• Calor.....	5
• Sustancias puras .....	5
• Trabajo .....	5
• Primera ley de la termodinámica.....	5
• Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.....	5
• Transmisión de calor.....	6
• Intercambiadores de calor .....	9
• Dispositivos de expansión .....	9
• Compresor .....	10

• Aspectos reales del ciclo de refrigeración.....	11
3.2 Requerimientos de enfriamiento.....	12
3.3 Cálculo de la carga de refrigeración.....	13
• Carga de transmisión.....	13
• Carga del producto .....	15
• Infiltración de aire.....	16
• Factor de seguridad.....	17
• Carga total.....	17
3.4 Dimensionamiento del sistema de refrigeración .....	18
• Datos de diseño .....	18
• Temperaturas, presiones de evaporización y condensación.....	18
• Selección del refrigerante .....	20
• Cálculos del ciclo de refrigeración utilizando R413A .....	24
• Dimensionamiento del compresor .....	27
• Evaporador y condensador.....	28
• Dispositivo de expansión .....	30
• Filtros.....	31
• Instrumentos de medición y control.....	31
3.5 Construcción de la cámara .....	34
3.6 Montaje del circuito de refrigeración .....	38
• Sistema de refrigeración .....	39
• Detección de fugas: presurización de nitrógeno.....	40
• Prueba de vacío.....	42
• Carga del refrigerante al sistema .....	42
3.7 Pruebas de funcionamiento.....	44
• Verificación de las presiones de trabajo.....	44
• Verificación de las temperaturas del sistema.....	45
• Cámara vacía.....	46
• Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en la leche (primer ciclo encendido/apagado).....	48
• Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en la leche (luego de la estabilización).....	50

• Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en aire de la cámara (primer ciclo encendido/apagado) .....	51
• Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en el aire de la cámara (luego de la estabilización) .....	53
3.8 Costos, operación y mantenimiento .....	54
• Costos .....	54
• Operación.....	55
• Mantenimiento .....	55
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	56
4.1 Conclusiones.....	56
4.2 Recomendaciones .....	58
5. BIBLIOGRAFÍA .....	59
6. ANEXOS.....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de la metodología usada en el proyecto.....	4
Figura 3.1. Esquema y diagrama T-s del sistema de refrigeración por compresión de vapor. .6	6
Figura 3.2. Conducción de calor a través de una pared.....	7
Figura 3.3. Convección forzada y natural. ....	8
Figura 3.4. Enfriamiento por radiación. ....	8
Figura 3.5. Intercambiador de calor con aletas. ....	9
Figura 3.6. Dispositivos de expansión. ....	10
Figura 3.7. Compresor hermético y sus partes.....	11
Figura 3.8. Diagrama P-h ciclo ideal y real de refrigeración. ....	12
Figura 3.9. Estructura interna de las paredes, fenómenos de convección y conducción.....	14
Figura 3.10. Resistencias térmicas en un intercambiador de calor. ....	18
Figura 3.11. Diagrama P-h para R-12 (rojo) y para R-413A (negro).....	21
Figura 3.12. Diagrama P-h con el ciclo de refrigeración y aspectos reales.....	24
Figura 3.13. Compresor reciclado Embraco de 1/8 [HP].....	27
Figura 3.14. Evaporador aletado y protector con ventilador. ....	29
Figura 3.15. Condensador dentro del sistema.....	30
Figura 3.16. Tubo capilar. ....	30
Figura 3.17. Filtro. ....	31
Figura 3.18. Diagrama de bloques del proceso.....	31
Figura 3.19. Termistor NTC.....	32
Figura 3.20. Controlador y contactor. ....	33
Figura 3.21. Manómetros de alta y baja. ....	33
Figura 3.22. Estructura interna y soporte de la cámara. ....	34
Figura 3.23. Proceso de suelda eléctrica.....	35
Figura 3.24. Estructura de la cámara.....	35
Figura 3.25. Vista interna de las paredes, puerta, techo y suelo. ....	36
Figura 3.26. Cámara ensamblada vista frontal.....	36
Figura 3.27. Puerta de la cámara.....	37
Figura 3.28. Cámara frigorífica. ....	37
Figura 3.29. Equipo de suelda oxiacetilénica y sus componentes.....	38
Figura 3.30. Proceso de suelda autógena. ....	39

Figura 3.31. Sistema de refrigeración.....	39
Figura 3.32. Detección de fugas en las uniones con espuma.....	40
Figura 3.33. Juego de manómetros en presurización de nitrógeno.....	41
Figura 3.34. Presión de alta y baja iguales en la presurización de nitrógeno. ....	41
Figura 3.35. Prueba de vacío.....	42
Figura 3.36. Carga del refrigerante R-413A al sistema.....	43
Figura 3.37. Presión de retorno. ....	43
Figura 3.38. Presiones de alta y baja con el sistema encendido.....	44
Figura 3.39. Temperatura a la entrada del compresor.....	45
Figura 3.40. Gráfica temperatura en función del tiempo con la cámara vacía. ....	47
Figura 3.41. Gráfica presión en función del tiempo con la cámara vacía.....	47
Figura 3.42. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la leche.....	48
Figura 3.43. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la leche. ....	49
Figura 3.44. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la leche (estabilización).....	50
Figura 3.45. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la leche (estabilización). .....	51
Figura 3.46. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la cámara.....	52
Figura 3.47. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la cámara.....	52
Figura 3.48. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la cámara (estabilización).....	53
Figura 3.49. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la cámara (estabilización).....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. <i>Diferencia de presiones</i> .....	20
Tabla 3.2. <i>Calor latente en el evaporador y condensador</i> .....	22
Tabla 3.3. <i>Trabajo del compresor por unidad de masa y COP</i> .....	22
Tabla 3.4. <i>Volumen específico y flujo del refrigerante</i> .....	23
Tabla 3.5. <i>Tasa de calor absorbido, rechazado y potencia del compresor</i> .....	23
Tabla 3.6. <i>Datos del ciclo en cada punto</i> .....	25
Tabla 3.7. <i>Datos obtenidos del ciclo</i> .....	26
Tabla 3.8. <i>Características del compresor</i> .....	28
Tabla 3.9. <i>Verificación de las presiones y temperaturas</i> .....	45
Tabla 3.10. <i>Temperaturas del sistema</i> .....	46
Tabla 3.11. <i>Costos de la cámara</i> .....	55

## RESUMEN

En el presente proyecto de titulación, “CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA ENFRIADORA DE LECHE PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES DE LA PARROQUIA LLOA”, se desarrolla un prototipo de un sistema de refrigeración pequeño para los habitantes de la parroquia de Lloa, además servirá como instrumento de enseñanza para los estudiantes de la carrera de Tecnología Electromecánica.

Se desarrolló utilizando elementos antiguos (reciclados) y se verificó el estado de cada uno de los componentes. Para el diseño de la cámara y el sistema de refrigeración, se calculó la carga térmica, la cual involucra carga por transmisión de paredes, carga del producto, por infiltración de aire y un factor de seguridad. Se determinó que la carga total de refrigeración para enfriar 5 litros de leche en 2 horas es de 0,1781 [kW], para lo cual mediante el análisis del sistema se determinó que se debe utilizar un compresor de 1/8 [HP].

Se estudió el ciclo de refrigeración en el cuál fue necesario analizar el remplazo del refrigerante R-413A en lugar del R-12, además se utilizó el análisis del ciclo para determinar la potencia del compresor y seleccionar evaporador, condensador y los elementos auxiliares.

Se construyó la cámara reciclando material aislante de una refrigeradora antigua. La selección de los elementos faltantes del sistema se realizó en base a cálculos, experiencia de empresas y recomendaciones. Se implementó instrumentos de medida y control, permitiendo servir como refuerzo práctico para los estudiantes.

Las pruebas se realizaron con la cámara vacía y con leche, se observa el comportamiento en función del tiempo de las temperaturas de la cámara, leche y las presiones de alta y baja del sistema.

El equipo enfría 5 litros de leche hasta 3 [°C] en 3 horas con 12 minutos cuando el sensor se encuentra dentro de la leche, una vez que la leche llega a 3 [°C] el sistema se estabiliza y presenta periodos de tiempo promedio de encendido y apagado de 35 minutos cada uno. Cuando el sensor se encuentra en el aire de la cámara el sistema tarda 38 minutos en llegar a la temperatura deseada 3 [°C], luego presenta periodos de encendido y apagado de 2 minutos cada uno.

La presión de condensación del sistema cuando el compresor se encuentra encendido fue de 200 [PSI] y la presión de evaporación fue de 22 [PSI], lo que verifica que el sistema se encuentra funcionando correctamente.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

Lloa es una parroquia rural donde los habitantes del sector se dedican mayormente a actividades agrícolas y ganaderas, por lo que gran parte de sus ingresos económicos se basan en la producción, comercialización y venta de leche. Por lo tanto, los productores del lugar requieren de sistemas de refrigeración que contribuyan a mantener el producto en condiciones óptimas para la comercialización.

La limitante recae en que los pequeños productores no cuentan con los recursos necesarios para la instalación de estos sistemas, debido a su costo y alcance de enfriamiento del producto. Por lo que se plantea la construcción de una pequeña máquina enfriadora para uso comunal, la cual permita a los productores de dicha parroquia el conservar su producto de una mejor manera y así tratar de mejorar sus ingresos económicos a futuro.

Este dispositivo se encuentra dentro de lo establecido en los objetivos del Proyecto de Vinculación PVS-2017-025 "Fortalecimiento de los pequeños productores de leche del GAD de Lloa", por lo que en su construcción se deben emplear partes y piezas provenientes de equipos de refrigeración en desuso, los cuales se adquirirán por donación de talleres especializados en su reparación o de otras donaciones, siendo consecuentemente su costo de inversión nulo para los futuros usuarios de la máquina.

## 1.2 Justificación

Para preservar la calidad de la leche se debe refrigerarla de manera rápida y eficiente, por lo que resulta importante llevar todo tipo de procesos con una buena asepsia. En lo concerniente a la producción de leche, es importante mantenerla a un nivel de temperatura adecuado entre 2 a 4 grados centígrados con el fin de impedir el desarrollo de microorganismo dañinos para el ser humano o la transferencia de enfermedades zoonóticas.

El presente proyecto de construcción de una pequeña máquina enfriadora de leche orientará a los productores a llevar buenos procesos para brindar una buena calidad de este producto, con el fin de que cada proceso sea realizado con total responsabilidad, reduciendo así gastos y desperdicios y aumentando ingresos, para que así los productores puedan brindar a sus clientes un producto apto para el consumo de manera directa.

Cabe recalcar que al ser tan sólo una máquina pequeña, abarcará la refrigeración de leche en bajas cantidades. Consecuentemente, los principales beneficiarios de este proyecto serán los pequeños

productores de leche de la parroquia Lloa, quienes verán incrementada su productividad, e indirectamente se beneficiará a toda la comunidad de dicha parroquia y sus alrededores.

### 1.3 Objetivos

- **Objetivo general**

Construir una máquina enfriadora de leche para pequeños productores de la parroquia Lloa.

- **Objetivos específicos**

- Determinar los requerimientos de enfriamiento necesarios para la máquina.
- Dimensionar la capacidad refrigerante de la máquina.
- Elaborar los planos constructivos para la fabricación del dispositivo.
- Construir el dispositivo de refrigeración.
- Realizar pruebas de funcionamiento del dispositivo.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Tipo de investigación

La ejecución del proyecto se basa en la adquisición de información, obtención de datos y aplicación de conocimientos adquiridos.

Para el desarrollo e implementación del proyecto se adquiere información y conocimientos de fuentes de información como libros, tesis y artículos.

### 2.2 Descripción de la metodología usada

Para el desarrollo del proyecto se obtuvo información de campo proporcionada por los pequeños productores, a partir de ahí se determina la capacidad y requerimientos de la cámara frigorífica. Los cálculos son desarrollados utilizando tablas termodinámicas, programas informáticos como por ejemplo Excel.

El análisis del ciclo de refrigeración se lo realiza con dos refrigerantes:

- R-12 al ser el refrigerante que utilizaba el compresor reciclado.
- R-413A es el remplazo actual del R-12.

Los elementos del sistema son reciclados y nuevos, se realiza el análisis de los componentes reciclados para verificar su dimensionamiento y capacidad, para la selección de los elementos nuevos se parte de los datos previamente calculados.

La cámara frigorífica y su estructura se construyeron en base a los planos e información presentados en el Anexo A, los cuales son elaborados con la ayuda del software de diseño AutoCAD, la estructura interna de la cámara es metálica, así como las paredes con aislamiento de poliuretano.

En el sistema de refrigeración se implementan instrumentos de medida y control, los cuales permiten el control de la temperatura de enfriamiento, terminada la construcción y acoplamiento del sistema de refrigeración se realizan pruebas de funcionamiento.

En la Figura 2.1 se observa la metodología usada para el desarrollo del presente proyecto, en primer lugar, se determinó la cantidad de leche y la temperatura de conservación, luego se estableció los datos de diseño para el cálculo de la capacidad de refrigeración y después se analizó el ciclo de refrigeración donde se determinó la potencia del compresor, además se seleccionó el refrigerante y los equipos faltantes.

La construcción de la cámara se lo realizó en base a los planos del Anexo A, el montaje del sistema de refrigeración se lo realizó mediante el proceso de soldadura oxiacetilénica con varillas de plata al 5%

como material de aporte. Previo a la puesta en marcha del equipo se realizó pruebas para dejarlo listo para su funcionamiento, posteriormente se verificó su correcto funcionamiento, realizando pruebas y observando la variación de temperaturas del ambiente refrigerado y presiones del sistema en función del tiempo.

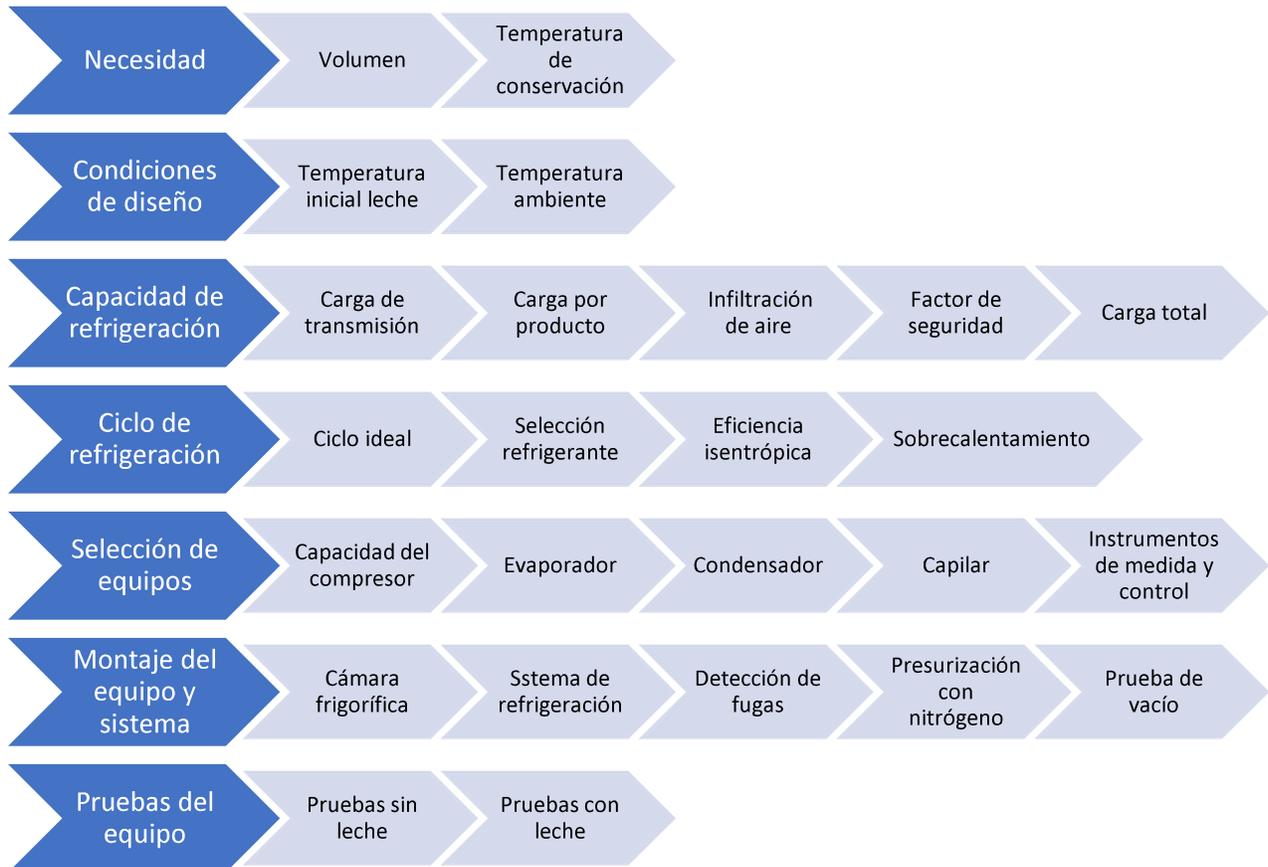


Figura 2.1. Esquema de la metodología usada en el proyecto.  
Fuente propia.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Fundamentación técnica

Los conceptos desarrollados a continuación han sido tomados de: Principios de refrigeración de Dossat y Torres, Termodinámica de Cengel, Transferencia de calor y masa de Cengel, Transferencia de calor de Incropera, Limitaciones y oportunidades termodinámicas de Danfoss, Instalaciones frigoríficas, Compresores de Fernández. [1]–[8]

- **Refrigeración**

Proceso en el cual se reduce y mantiene la temperatura de un área determinada mediante la transferencia de calor. La refrigeración permite el enfriamiento y conservación de alimentos, sustancias y otros; además evita el desarrollo de bacterias.

- **Calor**

El calor se define como una forma de energía, generalmente creada a partir de la transformación de otros tipos de energía en energía de calor. También se la define como energía en tránsito, debido a que se transmite de un cuerpo cálido a uno frío.

- **Sustancias puras**

Existen tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso; la temperatura y presión a la que está expuesta una sustancia determina en qué estado se encuentra.

- **Trabajo**

En termodinámica el trabajo es la cantidad de energía transferida de un sistema a otro mediante una fuerza cuando se produce un desplazamiento.

- **Primera ley de la termodinámica**

Conocida como principio de conservación de la materia, establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso, solo puede cambiar de forma.

- **Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor**

El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor se compone de 4 componentes principales:

- Compresor: encargado de comprimir el refrigerante y hacerlo circular por todo el ciclo.

- Condensador: expulsa el calor del refrigerante hacia el medio de enfriamiento y lo condensa.
- Tubo capilar o válvula de expansión: estrangula el paso del refrigerante hacia el evaporador, controla el flujo del refrigerante.
- Evaporador: extrae el calor del medio a enfriar al evaporizar al refrigerante.

La Figura 3.1 muestra el ciclo ideal de refrigeración por compresión vapor, la ubicación de cada uno de sus componentes y el diagrama T-s del ciclo.

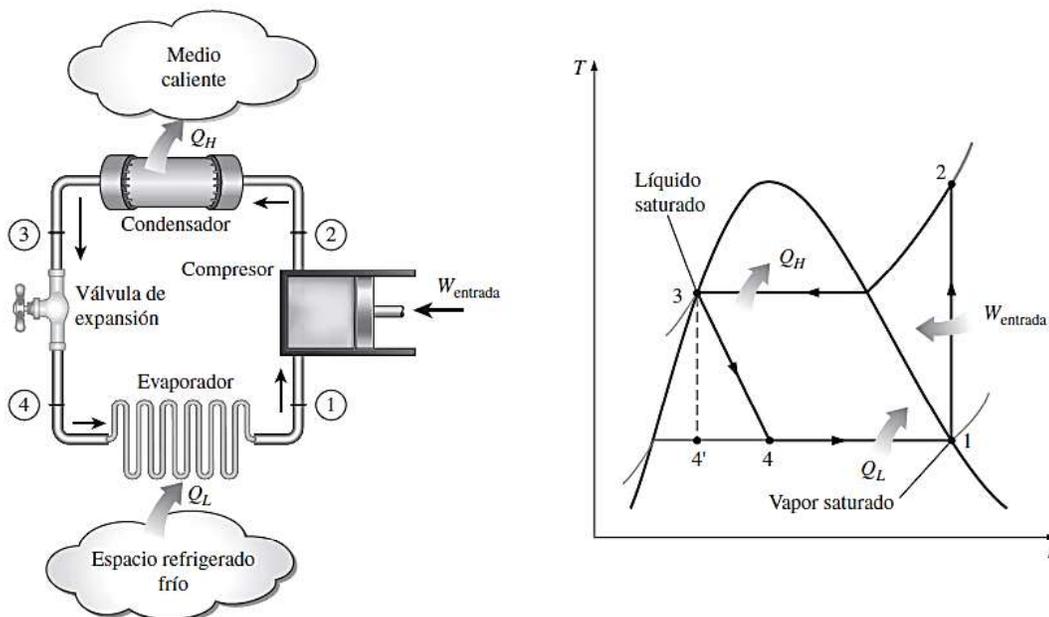


Figura 3.1. Esquema y diagrama T-s del sistema de refrigeración por compresión de vapor.  
Fuente. [2]

En el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra al compresor como vapor saturado y se comprime isoentrópicamente hasta la presión de condensador, la temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isotrópica. Posteriormente, el refrigerante entra en el condensador como vapor sobre calentado y sale como líquido saturado hacia el dispositivo de expansión, el cual lo estrangula hasta la presión del evaporador. El refrigerante entra al evaporador como vapor húmedo de baja calidad y se evapora por completo absorbiendo el calor del espacio refrigerado, el refrigerante sale del evaporador como vapor saturado para volver a entrar al compresor y así completar el ciclo.

- **Transmisión de calor**

El calor siempre se transmite de un objeto cálido a uno frío, la transmisión de calor se puede realizar en tres formas: radiación, conducción y convección. La transmisión de calor no puede coexistir sin que exista una diferencia de temperatura.

### ○ **Conducción**

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre las partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos y gases.

En la Figura 3.2 se observa la transferencia de calor por conducción a través de una pared y la diferencia de temperaturas a través de esta. La rapidez de la conducción de calor a través de un medio depende de su configuración geométrica, espesor y material de construcción.

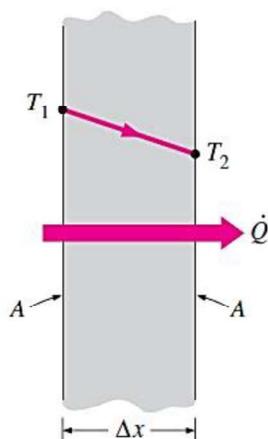


Figura 3.2. Conducción de calor a través de una pared.  
Fuente. [3]

### ○ **Convección**

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que está en movimiento. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. La convección puede ser forzada o natural:

- Convección forzada: cuando el fluido es forzado a fluir sobre la superficie por medios externos como un ventilador, bomba o el viento.
- Convección natural: cuando el movimiento del fluido es causado por la diferencia de densidades debido a la variación de la temperatura en el fluido.

En la Figura 3.3 se observa el enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada (izquierda) producido por un ventilador y convección natural (derecha) donde el aire caliente sube mientras el aire frío baja al ser más denso y enfría al huevo.

Dentro del sistema de refrigeración se presenta ambos fenómenos de convección, en el evaporador se presenta convección forzada producida por un ventilador y en el condensador se presenta convección natural al encontrarse expuesta al ambiente.

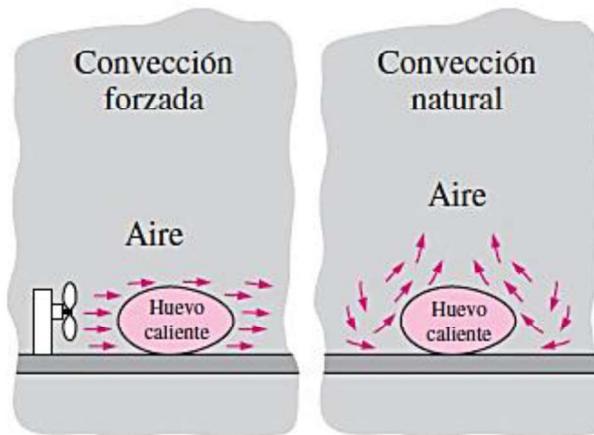


Figura 3.3. Convección forzada y natural.  
Fuente. [3]

### ○ Radiación

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, producidas por los cambios en la configuración electrónica de los átomos. La transferencia de calor por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en un vacío.

Para el estudio de la transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica.

En la Figura 3.4 se observa un ejemplo de transferencia de calor por radiación, se observa como un objeto sólido transmite calor por radiación superficial y de igual forma percibe calor por radiación de los alrededores.

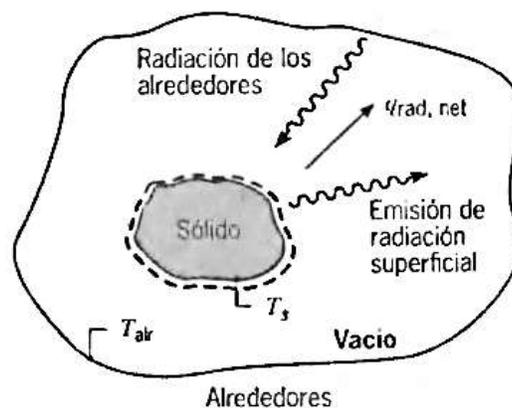


Figura 3.4. Enfriamiento por radiación.  
Fuente. [5]

- **Intercambiadores de calor**

Son aparatos que permiten el intercambio de calor entre dos sustancias que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan que se mezclen entre sí. La transferencia de calor en los intercambiadores de calor suele comprender de: convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa.

Comúnmente a los intercambiadores de calor se les da nombres específicos que reflejan su aplicación. Por ejemplo, un evaporador es un intercambiador de calor en el cual su fluido se calienta y se evapora a través de todo el intercambiador, el condensador es otro intercambiador de calor en el cual su fluido se enfría y se condensa.

Existe una gran variedad de intercambiadores de calor según su construcción; pueden ser con aletas, varillas o tubo liso. Dentro de un sistema de refrigeración se tiene dos intercambiadores de calor:

- Evaporador
- Condensador

En la Figura 3.5 se observa un intercambiador de calor con aletas, el cual es utilizado como evaporador dentro del presente proyecto.

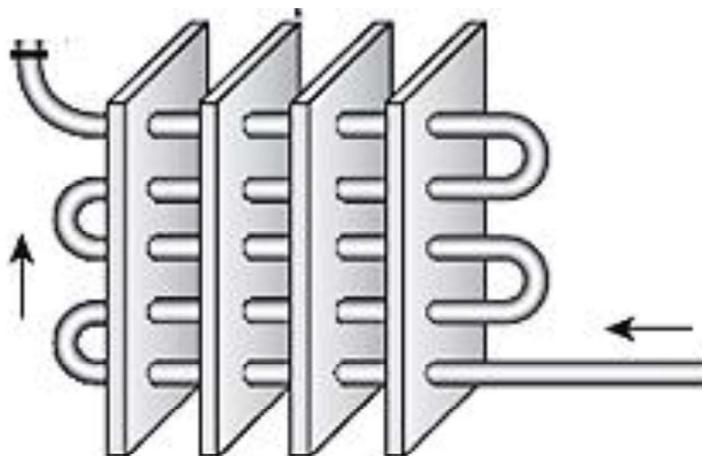


Figura 3.5. Intercambiador de calor con aletas.

Fuente. [2]

- **Dispositivos de expansión**

Son los elementos que disminuyen la presión de un fluido, pasando de un estado de alta presión y temperatura a uno de menor presión y temperatura. Dentro de los sistemas de refrigeración los dispositivos de expansión se encuentran entre el condensador y el evaporador como se observa en la Figura 3.1.

También son usados en sistemas de aire acondicionado, los más comunes son:

- Tubo capilar
- Válvula de expansión manual, termostática, electrónica y automática.

La cámara del presente proyecto es un equipo pequeño por lo que utiliza el tubo capilar como dispositivo de expansión, estos dispositivos son de diámetro interno de aproximadamente un milímetro y su longitud puede variar entre uno y seis metros, esto depende de la carga térmica y del compresor.

En la Figura 3.6 se observa los dispositivos de expansión más comunes, el tubo capilar (izquierda) y válvula de expansión termostática (derecha).

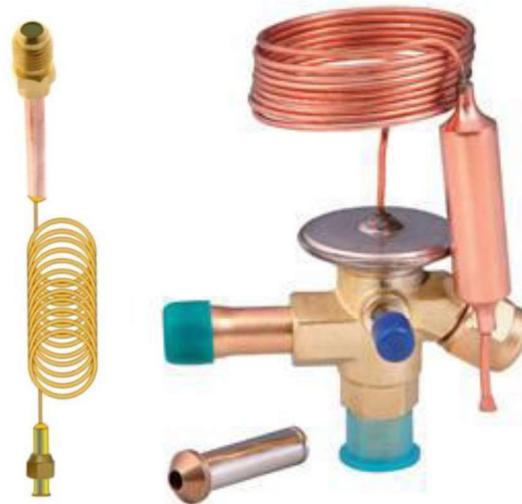


Figura 3.6. Dispositivos de expansión.  
Fuente. [7]

### • Compresor

Son dispositivos que incrementan la presión de un fluido, esto gracias al trabajo que se suministra desde una fuente externa a través de un eje giratorio. Un compresor es capaz de comprimir un gas a muy altas presiones. Existen varios tipos de compresores:

- Compresor de embolo o pistón: potencias pequeñas y medianas.
- Compresor helicoidal: potencias medianas y grandes.
- Compresor de espiral: potencias pequeñas y medianas.
- Turbocompresor: potencias muy elevadas.
- Compresor de chorro de vapor: aplicaciones especiales.

Los compresores dentro del proceso de refrigeración cumplen con la tarea de comprimir el refrigerante gaseoso del nivel de presión del evaporador al nivel de presión del condensador. El compresor utilizado dentro del presente proyecto es un compresor hermético de pistón.

En la Figura 3.7 se observa un compresor hermético y sus partes, además se observa el recorrido que realiza el refrigerante dentro del compresor.

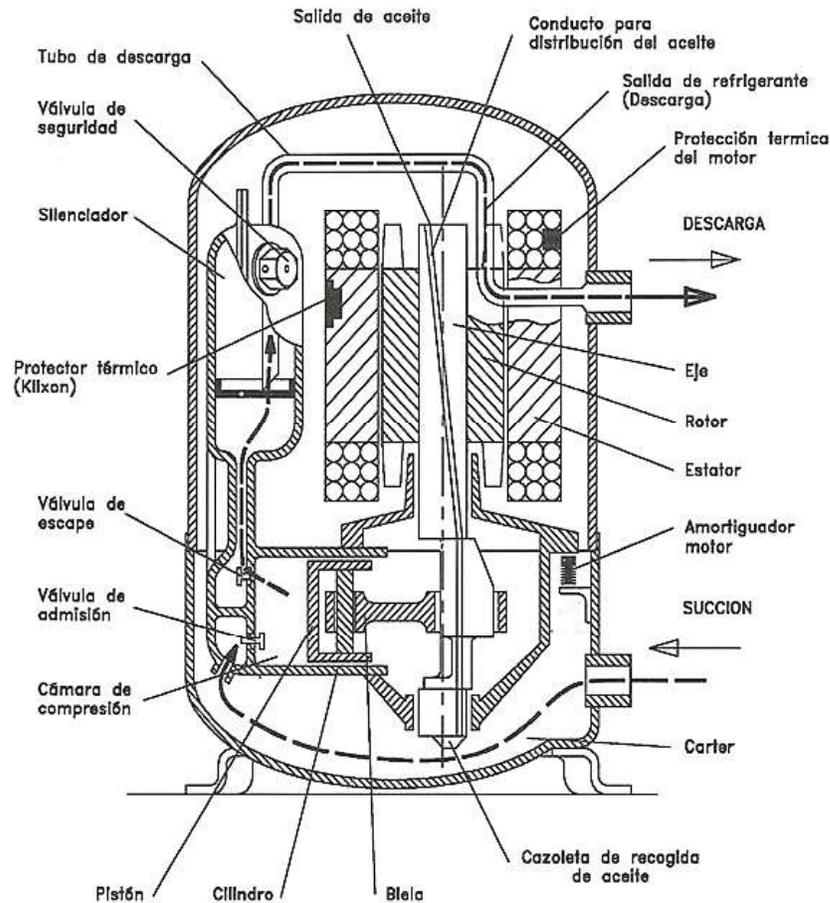


Figura 3.7. Compresor hermético y sus partes.  
Fuente. [8]

- **Aspectos reales del ciclo de refrigeración**

En el ciclo ideal de refrigeración el refrigerante sale del evaporador y entra directamente al compresor como vapor saturado, pero en la práctica no es posible controlar el estado del refrigerante con tanta precisión, por lo que se diseña el sistema de modo que el refrigerante antes de ingresar al compresor se sobrecaliente ligeramente, asegurando que el refrigerante se evapore por completo.

En la Figura 3.8 se observa la comparación entre el ciclo ideal (rojo) y real (verde) de refrigeración, las principales diferencias son:

- El sobrecalentamiento a la succión: entre los puntos 1 y 2.
- Eficiencia isentrópica: entre los puntos 3 y 4.

Se observa también efectos de caídas de presión por fricción en las tuberías, pero los efectos de sobrecalentamiento y eficiencia isentrópica se consideran para el análisis y cálculos dentro del desarrollo del proyecto.

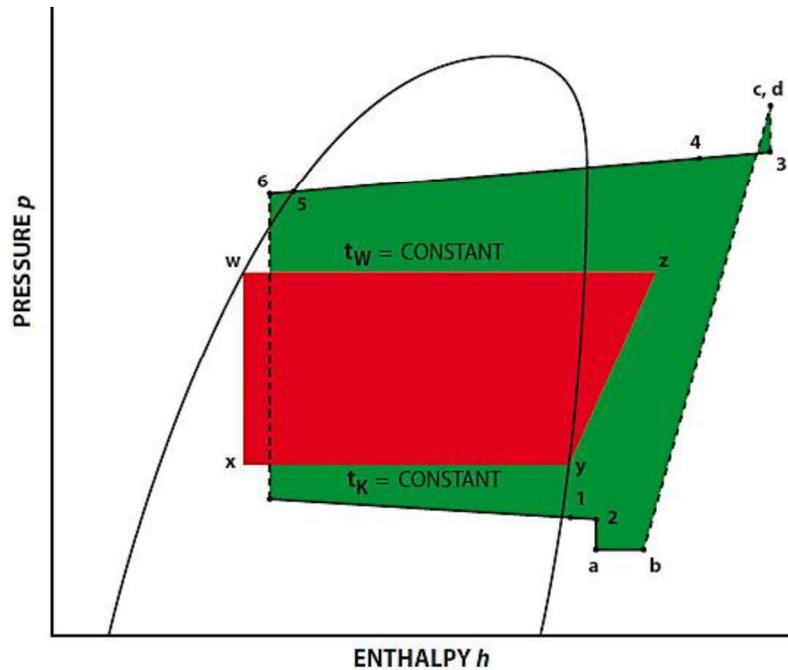


Figura 3.8. Diagrama P-h ciclo ideal y real de refrigeración.  
Fuente. [6]

### 3.2 Requerimientos de enfriamiento

Según el censo agropecuario del año 2017 realizado por el INEC, la producción de leche a nivel nacional fue de 5.135.405 litros/día, existiendo 856.164 vacas ordeñadas, por lo cual se tiene un promedio de 4,99 litros/vaca/día a nivel nacional. [9]

Dentro de la producción de la leche es importante la conservación de esta, con el fin de impedir el desarrollo de microorganismos dañinos para el ser humano o enfermedades zoonóticas. Para conservar la calidad de la leche se debe refrigerarla de manera rápida y eficiente.

En el Reglamento de control y regulación de cadena de producción de leche del ministerio de agricultura, ganadería, acuicultura y pesca; en el capítulo IV, artículo 16 se establece que la leche ordeñada se enfriará y conservará a una temperatura no mayor a 4 grados centígrados. [10]

ASHRAE recomienda la temperatura de conservación de la leche entre 2 a 4 grados centígrados. En base a la información obtenida y al equipo reciclado se procede a desarrollar el proyecto, con la finalidad de cubrir las necesidades de los productores. [11]

### 3.3 Cálculo de la carga de refrigeración

Se realiza tomando como referencia el capítulo 12 de ASHRAE, los datos son de las tablas de Termodinámica de Cengel. La carga de refrigeración consta de: carga de transmisión, carga del producto, carga interna, infiltración de aire, carga relacionada con el equipo y factor de seguridad. [2], [12]

La cámara al ser un equipo pequeño no cuenta con equipos adicionales, por tanto, la carga interna y la carga relacionada con el equipo son nulos.

- **Carga de transmisión**

La carga por transmisión hace referencia a la transferencia de calor que existe por medio de las paredes, se usa poliuretano como material aislante dentro de las paredes. Para el cálculo se utiliza la Ecuación 1.

$$q_1 = UA\Delta t \quad \text{Ec.1}$$

$q_1$  = ganancia de calor [W]

$A$  = área [ $m^2$ ]

$\Delta t$  = diferencia de temperatura [ $^{\circ}C$ ]

En la Figura 3.9 se observa cómo se encuentran diseñadas las paredes, techo y piso de la cámara, con una pared externa de tol galvanizado de 1,4 [mm], un aislamiento de poliuretano de 4 [cm] y una pared interna de tol galvanizado de 0,90 [mm]. También se observa los fenómenos de convección y conducción en las paredes que se expresan como resistencias, y las cuales se calculan con las Ecuaciones 2, 3, 4, 5 y 6.

$$R_1 = \frac{1}{h_i} \quad \text{Ec.2}$$

$$R_2 = \frac{x_1}{k_1} \quad \text{Ec.3}$$

$$R_3 = \frac{x_2}{k_2} \quad \text{Ec.4}$$

$$R_4 = \frac{x_3}{k_3} \quad \text{Ec.5}$$

$$R_5 = \frac{1}{h_o} \quad \text{Ec.6}$$

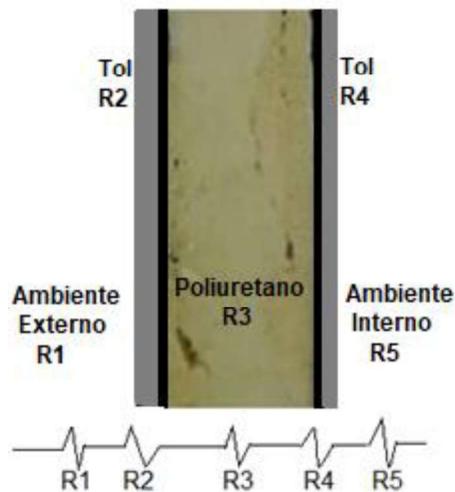


Figura 3.9. Estructura interna de las paredes, fenómenos de convección y conducción.  
Fuente propia.

Las resistencias R1 y R5 expresan el efecto de convección interno y externo, para el cálculo se utiliza los conceptos de convección natural; mientras que las resistencias R2, R3, R4 expresan el efecto de conducción en las paredes, se utiliza el espesor y la conductividad térmica de cada material.

El coeficiente de transferencia de calor de las paredes, techo, piso y puerta (U) es igual al inverso de la suma de las resistencias que se lo calcula mediante la Ecuación 7.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} + \frac{1}{h_o}} \quad \text{Ec.7}$$

U = coeficiente de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup>K]

x = espesor de cada material de la pared [m]

k = conductividad térmica de cada material de la pared [W/mK]

h<sub>i</sub> = conductancia interior [W/m<sup>2</sup>K]

h<sub>o</sub> = conductancia exterior [W/m<sup>2</sup>K]

La cámara se encuentra al interior de un inmueble por lo que no estará expuesta a corrientes de aire, en el libro de ASHRAE recomiendan un valor de 1,6 para h<sub>i</sub> y h<sub>o</sub>. La conductividad térmica de cada material es obtenida de ASHRAE y Cengel termodinámica:

- Conductividad térmica de tol galvanizado = 15,6 [W/mK].
- Conductividad térmica del poliuretano = 0,026 [W/mK].

Con los datos obtenidos se reemplaza en la Ecuación 7 y se calcula un coeficiente de transferencia de calor que es igual a:

$$U = 0,3586 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

La diferencia de temperaturas es entre la temperatura exterior e interior de la cámara, la temperatura exterior se toma del anuario meteorológico del año 2017, que da una temperatura promedio en Quito de 25 [°C] y la temperatura interna se calcula un valor promedio según los datos de la sección “Requerimientos de enfriamiento” que es igual a 3 [°C], el área total del enfriador es de 1,5 [m<sup>2</sup>]. Con todos los datos previamente obtenidos se reemplaza en la Ecuación 1 para calcular la carga por transmisión, dando como resultado: [13]

$$q_1 = 0,3586 * 1,5 * (25 - 3)$$

$$q_1 = 0,011 \text{ [kW]}$$

- **Carga del producto**

Para el cálculo de la carga del producto se utiliza la Ecuación 8, que considera el producto entre la masa, calor específico y la diferencia de temperaturas del producto, dividido para el tiempo de enfriamiento.

$$q_2 = \frac{mC_1(t_1-t_2)}{3600 * n} \quad \text{Ec.8}$$

m = masa del producto [kg]

C<sub>1</sub> = calor específico del producto [kJ/kgK]

t<sub>1</sub> = temperatura inicial del producto [°C]

t<sub>2</sub> = temperatura final del producto [°C]

n = tiempo asignado [h]

La masa del producto es la cantidad de leche que se desea enfriar, 5 litros en base a lo presentado en los requerimientos de enfriamiento, en la Ecuación 8 se utiliza la masa del producto por lo que se transforma el volumen a masa, multiplicando los litros de leche por su densidad que es 1,028 [kg/l].

El calor específico se lo obtiene del libro de ASHRAE que es igual a 3,89 [kJ/kgK]. La temperatura inicial es de la leche es de aproximadamente a la temperatura ambiente 25 [°C], la temperatura de enfriamiento es de 3 [°C] y el tiempo asignado para enfriar la leche desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de conservación es de 2 horas. Con estos datos se calcula la carga del producto en base a la Ecuación 8, dando como resultado:

$$q_2 = 0,061 \text{ [kW]}$$

- **Infiltración de aire**

La carga por infiltración de aire está relacionada con el flujo directo a través de la puerta, la Ecuación 9 se usa para el cálculo por infiltración de aire.

$$q_3 = VA(h_i - h_r)\rho_r D_t \quad \text{Ec.9}$$

V = velocidad promedio del aire [m/s]

A = área de apertura [m<sup>2</sup>]

h<sub>i</sub> = entalpia aire infiltración [kJ/kg]

h<sub>o</sub> = entalpia aire refrigerado [kJ/kg]

ρ<sub>r</sub> = densidad aire refrigerado [kg/m<sup>3</sup>]

D<sub>t</sub> = porción decimal de apertura de la puerta, se calcula con la Ecuación 10.

$$D_t = \frac{P \Theta_p + 60 \Theta_o}{3600 \Theta_d} \quad \text{Ec.10}$$

P = número de personas

Θ<sub>p</sub> = tiempo de apertura y cierre de la puerta [seg]

Θ<sub>o</sub> = tiempo que permanece abierta la puerta [min]

Θ<sub>d</sub> = periodo de tiempo diario [h]

El número de personas que ingresa es cero, los tiempos de apertura, de permanencia y el periodo diario son de acuerdo con el uso, remplazando los datos se obtiene una porción decimal de apertura de la puerta igual a:

$$D_t = 0,0416$$

El valor de la velocidad promedio del aire, ASHRAE recomienda valores entre 0,3 a 1,5 [m/s]; las entalpías y la densidad son obtenidas del libro de Cengel termodinámica:

- Entalpia aire infiltración = 298,18 [kJ/kg]
- Entalpia aire refrigerado = 274,12 [kJ/kg]
- Densidad aire refrigerado = 1,03694 [kg/m<sup>3</sup>]

El área de apertura es el área de la puerta que es igual a 0,2856 [m<sup>2</sup>]. Con todos los datos se calcula la carga por infiltración, obteniendo como resultado:

$$q_3 = 0,089 \text{ [kW]}$$

- **Factor de seguridad**

Como factor de seguridad ASHRAE recomiendan un 10 % más de la suma de todas las cargas. Que se calcula según la Ecuación 11.

$$f_s = 10\% (q_1 + q_2 + q_3) \quad \text{Ec.11}$$

Reemplazando los datos previamente calculados en la Ecuación 11 se obtiene el factor de seguridad que es igual a:

$$f_s = 0,0161 \text{ [kW]}$$

- **Carga total**

La carga total de refrigeración es la suma de todas las cargas y el factor de seguridad. Se calcula con la Ecuación 12, los datos son previamente obtenidos.

$$q_t = q_1 + q_2 + q_3 + f_s \quad \text{Ec.12}$$

Reemplazando los datos en la Ecuación 12 se obtiene el valor de la carga total de refrigeración que es igual a:

$$q_t = 0,1781 \text{ [kW]} = 608,02 \text{ [BTU/h]}$$

### 3.4 Dimensionamiento del sistema de refrigeración

El ciclo termodinámico de refrigeración utiliza las propiedades termodinámicas del refrigerante, por lo tanto, para el análisis de las propiedades del R-12 se utiliza las tablas de las propiedades del refrigerante de ASHRAE fundamentals que se observan en el Anexo B, para el R-413A se utiliza las tablas de DuPont que se observan en el Anexo C. [14], [15]

- **Datos de diseño**

Para el diseño y análisis del sistema de refrigeración se parte de los siguientes datos:

- Temperatura ambiente refrigerado = 3 [°C]
- Temperatura ambiente = 25 [°C]
- Eficiencia isentrópica = 0.5
- Eficiencia mecánica = 0.9

La temperatura del ambiente refrigerado se explica y referencia en la sección “Requerimientos de enfriamiento”, y la temperatura ambiente en la sección “Carga de transmisión”, la eficiencia isentrópica y la del motor se ha tomado como referencia valores de fabricantes. [6]

- **Temperaturas, presiones de evaporización y condensación**

Al ser intercambiadores de calor (en los términos de las ecuaciones se va a definir como HX que es por sus siglas en inglés “Heat Exchanger”), en los cuales se produce los fenómenos de convección y conducción, se considera un  $\Delta T_{HX}$  (salto térmico) de 20 [°C], este valor se lo considera conservador ya que se desprecia las caídas de presión y perdidas a los exteriores. En la Figura 3.10 se observa las resistencias térmicas (R1 y R3 convección, R2 conducción) y el salto térmico presentes en un intercambiador de calor.

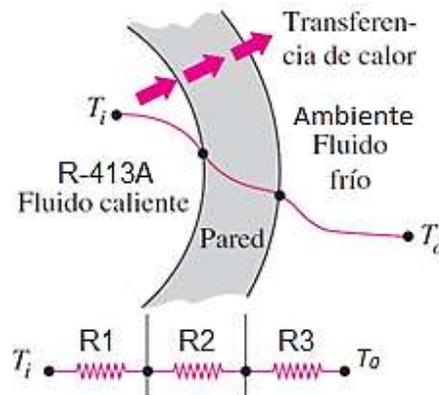


Figura 3.10. Resistencias térmicas en un intercambiador de calor.  
Fuente. [3]

La temperatura en el evaporador y condensador se calculan con las Ecuaciones 13 y 14 respectivamente. En el evaporador, la temperatura del refrigerante (temperatura de evaporación) es menor a la temperatura del ambiente refrigerante (cámara frigorífica) ya que el calor va desde los elementos internos de la cámara hacia el fluido, mientras que en condensador la temperatura de condensación es mayor que el ambiente condensante (aire ambiente) ya que el calor va desde el refrigerante hacia los exteriores.

$$T_{\text{evap}} = T_{\text{cámara}} - \Delta T_{HX} \quad \text{Ec.13}$$

$$T_{\text{cond}} = T_{\text{ambiente}} + \Delta T_{HX} \quad \text{Ec.14}$$

Remplazando con los datos de la sección “Datos de diseño” y el salto térmico de 20 [°C], se calcula la temperatura del evaporador y condensador:

$$T_{\text{evap}} = -17 \text{ [°C]}$$

$$T_{\text{cond}} = 45 \text{ [°C]}$$

Las presiones de evaporización y condensación se calculan con las Ecuaciones 15 y 16 respectivamente.

$$P_{\text{evap}} = P_{\text{sat}@T_{\text{evap}}} \quad \text{Ec.15}$$

$$P_{\text{cond}} = P_{\text{sat}@T_{\text{cond}}} \quad \text{Ec.16}$$

Con las temperaturas de evaporización y condensación se obtienen las presiones de saturación en el evaporador y condensador con el refrigerante R-413A, estos valores se obtienen del Anexo C.

$$P_{\text{evap}} = 164,9 \text{ [KPa]} = 23,91 \text{ [PSI]}$$

$$P_{\text{cond}} = 1250,1 \text{ [KPa]} = 182,31 \text{ [PSI]}$$

- **Selección del refrigerante**

El análisis y desarrollo se lo realiza tomando de referencia la tesis sobre el estudio de hidrocarburos como refrigerantes ecológicos en refrigeración doméstica. [16]

Al ser un sistema antiguo el compresor utilizaba refrigerante R-12, el cual por su alto daño a la capa de ozono actualmente no es utilizado, por tal razón se buscó alternativas amigables con el medio ambiente y compatibles con el equipo.

El refrigerante R-413A es un reemplazo para el R-12, debido a que ambos trabajan con aceite mineral (MO) o alquibenceno (AB). [17]

Se analizó el ciclo de refrigeración con cada uno de los refrigerantes, se parte con los datos de la temperatura de evaporización de  $-17$  [°C] y la temperatura de condensación de  $45$  [°C].

Para el desarrollo y cálculo de los principales parámetros de cada ciclo se utilizó softwares de cálculo como por ejemplo Excel, los principales parámetros a comparar son:

- Diferencia de presiones, calor latente absorbido y rechazado por unidad de masa en el evaporador y condensador.
- Trabajo del compresor por unidad de masa y coeficiente de rendimiento (COP).
- Volumen específico a la succión del compresor y flujo másico del refrigerante.
- Tasa de calor absorbido, rechazado y potencia del compresor.
- **Diferencia de presiones, calor latente absorbido y rechazado por unidad de masa en el evaporador y condensador.**

El compresor reciclado utilizaba refrigerante R12, un remplazo actual es el R-413A. Por lo cual se analiza y compara la variación de presiones con ambos refrigerantes. A continuación, en la Tabla 3.1 se observa los valores de presiones, variación de presión y porcentaje para cada refrigerante.

Tabla 3.1.  
*Diferencia de presiones.*

	<b>R12</b>	<b>R413A</b>
<b><math>P_{alta}</math> [MPa]</b>	1,084	1,2501
<b><math>P_{baja}</math> [MPa]</b>	0,1692	0,1649
<b><math>\Delta P</math> [MPa]</b>	0,9143	1,0852
<b>Porcentaje [%]</b>	100	118,7

Fuente propia.

La variación de las presiones es un 18,7 % mayor del R-413A, por lo tanto, se puede utilizar el mismo compresor con el refrigerante de remplazo ya que en el diseño normalmente se sobredimensiona.

En la Figura 3.11 se observa la comparación entre los diagramas termodinámicos de ambos refrigerantes. La campana del R-413A es más ancha, por lo cual el calor latente de cambio de fase es mayor. Por lo tanto, si se usa el refrigerante R-413A, en el caso del evaporador tendría una mayor capacidad de refrigeración, así mismo en el caso del condensador el calor rechazado es mayor, si el flujo másico del refrigerante es el mismo. En la Tabla 3.2 se observa la comparación y se verifica lo antes mencionado.

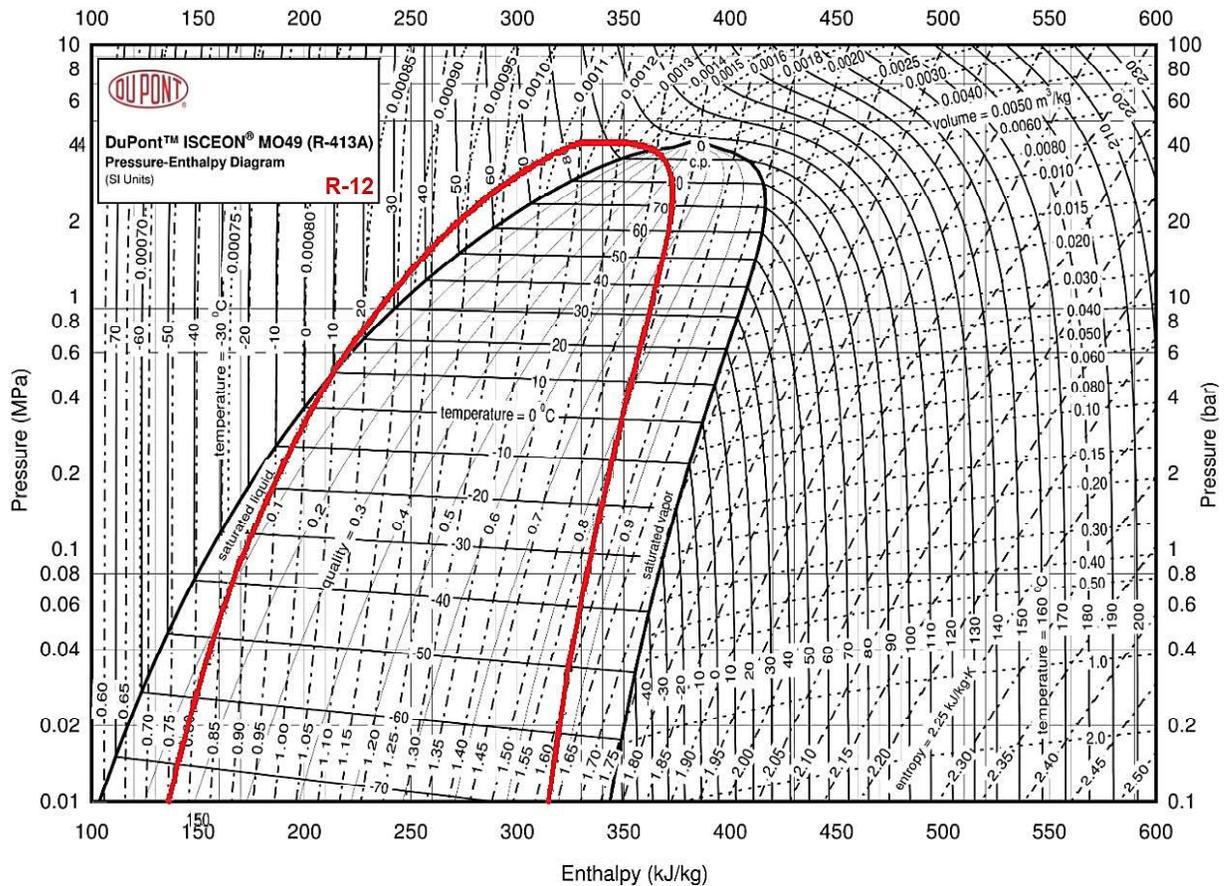


Figura 3.11. Diagrama P-h para R-12 (rojo) y para R-413A (negro).  
Fuente. [14], [15]

En la Tabla 3.2, se muestra los valores del calor latente en el evaporador y condensador obtenidos con ambos refrigerantes, estos valores se calculan con la variación de las entalpías. Se observa que con el refrigerante R-413A en el evaporador se tiene mayor capacidad de absorber calor y en el condensador mayor capacidad de rechazar calor.

Tabla 3.2.  
Calor latente en el evaporador y condensador.

	R12	R413A
$q_{\text{evap}}[\text{kJ/kg}]$	100,4	111,9
$q_{\text{cond}}[\text{kJ/kg}]$	158,9	173,22

Fuente propia

○ **Trabajo del compresor por unidad de masa y coeficiente de rendimiento (COP).**

A continuación, en la Tabla 3.3 se presentan los valores obtenidos con ambos refrigerantes en el ciclo de refrigeración, el trabajo del compresor por unidad de masa se obtiene de la diferencia de entalpías a la succión y descarga del compresor, el COP se obtiene de la relación entre el calor latente en el evaporador y el trabajo del compresor por unidad de masa.

Tabla 3.3.  
Trabajo del compresor por unidad de masa y COP.

	R12	R413A
$w_{\text{comp}}[\text{kJ/kg}]$	49,83	49,12
<b>COP</b>	2,015	2,2781

Fuente propia

○ **Volumen específico a la succión del compresor y flujo másico del refrigerante.**

El volumen del refrigerante se obtiene de las tablas de las propiedades termodinámicas del Anexos B y C con la temperatura del evaporador, para obtener la masa de cada refrigerante se usa la Ecuación 17.

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}$$

Ec.17

$\rho$  = densidad en la succión del compresor [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  = volumen del refrigerante [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$m$  = masa del refrigerante [ $\text{kg}$ ]

$V$  = volumen de la cámara [ $\text{m}^3$ ]

Para el cálculo del flujo másico se utiliza la Ecuación 18, donde la densidad en la succión del compresor se determina con la Ecuación 17. Al usar el mismo compresor se tiene como constantes el volumen de la cámara y la velocidad de rotación del compresor.

$$\dot{m} = \frac{\rho * \eta * V}{60} \quad \text{Ec.18}$$

$\dot{m}$  = flujo másico [kg/s]

$\eta$  = velocidad de rotación del compresor [rpm]

En la Tabla 3.4 se muestran los valores de volumen y masa de cada refrigerante, también el flujo másico.

Tabla 3.4.  
*Volumen específico y flujo del refrigerante.*

	R12	R413A
$v[\text{m}^3/\text{kg}]$	0,09774	0,1168
$m[\text{kg}]$	$10,23 * V$	$8,56 * V$
$\dot{m}_{\text{ref}}[\text{kg/s}]$	$0,17 * \eta * V$	$0,14 * \eta * V$

Fuente propia

○ **Tasa de calor absorbido, rechazado y potencia del compresor**

Los valores presentados en la Tabla 3.5 son obtenidos de la multiplicación del flujo másico y cada uno de los calores latentes del ciclo y el trabajo del compresor por unidad de masa.

Tabla 3.5.  
*Tasa de calor absorbido, rechazado y potencia del compresor.*

	R12	R413A
$\dot{Q}_{\text{evap}}[\text{kW}]$	$17,07 * \eta * V$	$15,67 * \eta * V$
$\dot{Q}_{\text{cond}}[\text{kW}]$	$27,01 * \eta * V$	$24,25 * \eta * V$
$\dot{W}_{\text{comp}}[\text{kW}]$	$8,47 * \eta * V$	$6,87 * \eta * V$

Fuente propia

En conclusión, el refrigerante R-413A se puede usar como remplazo del refrigerante R-12 con el mismo compresor sin inconvenientes. Ya que:

- La diferencia de presiones es 18,7 % mayor con el R-413A, los sistemas normalmente son diseñados sobredimensionados, por lo cual se puede utilizar el mismo compresor.
  - El calor latente en el cambio de fase es mayor, por lo que en el evaporador se tiene mayor capacidad de refrigeración y en el condensador el calor rechazado es mayor, si el flujo másico es el mismo.
- **Cálculos del ciclo de refrigeración utilizando R413A**

Para el estudio se parte del ciclo ideal de refrigeración considerando los aspectos reales más influyentes:

- Eficiencia isentrópica ( $\eta_{sc}$ )
- Sobrecaentamiento en la succión de 20 [°C]

En la sección “Selección de refrigerante”, se concluyó que el refrigerante R-413A sirve como remplazo del R-12, por lo cual se analiza y realizan los cálculos del ciclo de refrigeración con el R-413A, además de poder trabajar con el mismo compresor sin presentar inconvenientes.

En la Figura 3.12 se observa el diagrama de presión vs entalpia (P-h) del refrigerante R-413A, también se observa el ciclo de refrigeración con los aspectos reales que ayudan al análisis y los cálculos.

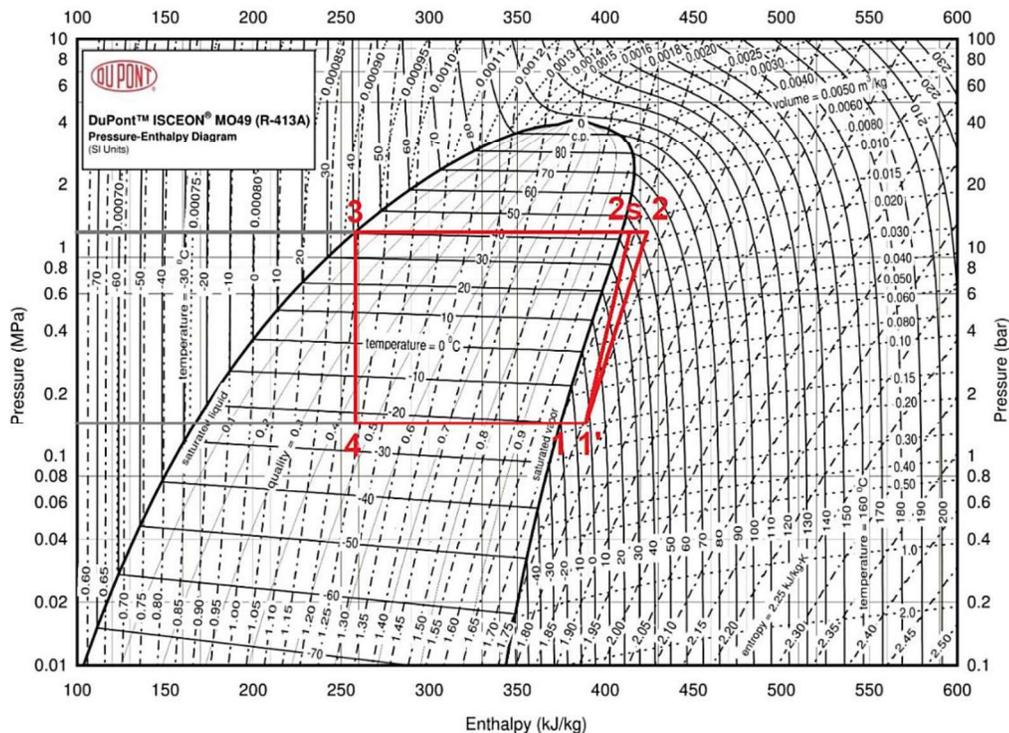


Figura 3.12. Diagrama P-h con el ciclo de refrigeración y aspectos reales.  
Fuente propia.

Los datos presentados en la sección “Datos de diseño” y los datos calculados en la sección “Temperaturas, presiones de evaporación y condensación” se utilizan para el análisis y cálculos del ciclo de refrigeración, las tablas de las propiedades termodinámicas del R-413A del Anexo C permiten obtener los valores de presión, entalpías y entropías.

La temperatura del evaporador es igual a -17 [°C] y del condensador igual a 45 [°C], por lo cual se procede a obtener los valores de presión en el evaporador y condensador. En la Tabla 3.6 se presentan los valores de temperaturas, entalpías, entropías y presiones en cada punto del ciclo.

Tabla 3.6.  
*Datos del ciclo en cada punto.*

	<b>Temperatura</b> [°C]	<b>Presión</b> [MPa]	<b>Entalpia</b> [kJ/kg]	<b>Entropía</b> [kJ/kgK]
<b>1</b>	-17	0,1649	376,5	-
<b>1'</b>	3	0,1649	388,7	1,6869
<b>2s</b>	45	1,2501	413,26	1,6869
<b>2</b>	65	1,2501	437,82	-
<b>3</b>	45	1,2501	264,6	-
<b>4</b>	-17	0,1649	264,6	-

Fuente propia.

El valor de la entalpia en el punto 2 se calcula con la Ecuación 19, donde la eficiencia isentrópica se considera igual a 0,5 al ser un compresor usado.

$$\eta_{sc} = \frac{W_{ideal}}{W_{real}} = \frac{h_{2s} - h_1'}{h_2 - h_1'} \quad \text{Ec.19}$$

Con los valores de las entalpías se calcula:

- Calor latente en el evaporador se calcula con la Ecuación 20.
- Calor latente en el condensador se calcula con la Ecuación 21.
- Trabajo del compresor por unidad de masa se calcula con la Ecuación 22.

$$q_{evap} = h_1 - h_4 \quad \text{Ec.20}$$

$$q_{cond} = h_2 - h_3 \quad \text{Ec.21}$$

$$w_{\text{comp}} = h_2 - h_1' \quad \text{Ec.22}$$

Los valores presentados en la Tabla 3.7 corresponden al calor latente en el evaporador, calor latente en el condensador y trabajo del compresor por unidad de masa, calculados con las Ecuaciones 20, 21 y 22 respectivamente.

Tabla 3.7.  
*Datos obtenidos del ciclo*

	[kJ/kg]
$q_{\text{evap}}$	111,9
$q_{\text{cond}}$	173,22
$w_{\text{comp}}$	49,12

Fuente propia.

El coeficiente de rendimiento (COP) es la relación entre el trabajo del evaporador y el trabajo del compresor, también es la relación entre el flujo másico por el calor latente en el evaporador y el flujo másico por el trabajo del compresor por unidad de masa, se obtiene con la Ecuación 23.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{W}_{\text{comp}}} = \frac{\dot{m}(q_{\text{evap}})}{\dot{m}(w_{\text{comp}})} \quad \text{Ec.23}$$

Reemplazando los datos previamente obtenidos en la Ecuación 23 se calcula el valor de COP:

$$\text{COP} = 2,2781$$

La carga total de refrigeración calculada en la sección "Calculo de la carga de refrigeración" es igual al producto del flujo másico por calor de evaporación por unidad de masa, por lo tanto, se tiene:

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = 0,1781 \text{ [kW]}$$

El flujo másico se calcula con la Ecuación 24, la cual se obtiene de la Ecuación 23.

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m} * q_{\text{evap}} \quad \text{Ec.24}$$

Despejando el flujo másico y reemplazando los datos se obtienen un valor de:

$$\dot{m} = 0,00159 \text{ [kg/s]}$$

La potencia del compresor se calcula con la Ecuación 23, la cual es igual a:

$$\dot{W}_{\text{comp}} = 0,07817 \text{ [kW]}$$

La potencia del motor se calcula con la Ecuación 25, donde la eficiencia mecánica es 0,9; obteniendo un valor de:

$$\dot{W}_{\text{motor}} = \frac{\dot{W}_{\text{comp}}}{\eta_{\text{mec}}} \quad \text{Ec.25}$$

$$\dot{W}_{\text{motor}} = 0,08686 \text{ [kW]} = 0,1164 \text{ [HP]}$$

- **Dimensionamiento del compresor**

Con los datos obtenidos y el análisis desarrollado en las secciones “Cálculo de la carga de refrigeración” y “Cálculos del ciclo de refrigeración utilizando R-412A” se determina que el compresor necesario es de 0,08686 [kW] = 0,1164 [HP], por lo tanto, se puede utilizar un compresor antiguo de 1/8 [HP] = 0,125 [kW]. En la Figura 3.13 y la Tabla 3.8 se observa el compresor reciclado y las principales características de este. La información del compresor se obtuvo del manual de aplicación de compresores de Embraco. [18]



Figura 3.13. Compresor reciclado Embraco de 1/8 [HP]. Fuente propia.

Tabla 3.8.  
*Características del compresor.*

<b>Características</b>	
<b>Marca</b>	Embraco
<b>Modelo</b>	PW 4.5 K9
<b>Voltaje de alimentación</b>	115 [VAC]
<b>Frecuencia</b>	60 [Hz]

Fuente propia.

- **Evaporador y condensador**

El sistema de refrigeración cuenta con dos intercambiadores de calor:

- Evaporador
- Condensador

En la Figura 3.1 se observa el sistema de refrigeración y como se encuentran ubicados los intercambiadores de calor.

- **Evaporador**

El evaporador es donde el refrigerante cambia de estado líquido a vapor para lo cual extrae el calor del interior de la cámara, en este caso se ha seleccionado un evaporador para un compresor de 1/8 [HP].

La selección del evaporador depende del espacio disponible dentro de la cámara, por lo cual se selecciona uno de una capacidad de un 1/6, siendo el más pequeño en el mercado. Al ser la capacidad del evaporador más grande se debe cargar la cantidad de refrigerante adecuada con el fin de que funcione correctamente el equipo.

El evaporador tiene aletas, las cuales permiten un mejor intercambio de calor y también cuenta con un ventilador, permitiendo circular el aire frío por toda la cámara, por lo tanto, el proceso de transferencia de calor se da por convección forzada.

Cuando el sistema se encuentra encendido se produce escarcha en las aletas del evaporador, esto debido a la humedad presente en el aire dentro de la cámara. Por otro lado, cuando el sistema se encuentra apagado la escarcha de las aletas se convierte en agua, por lo cual se implementó una manguera para que el agua pueda ser drenada.

En la Figura 3.14 se observa el evaporador, el protector con el ventilador y como se encuentran ubicados dentro de la cámara.



Figura 3.14. Evaporador aletado y protector con ventilador.  
Fuente propia.

- **Condensador**

Es un intercambiador de calor donde el refrigerante cambia de estado gaseoso a líquido y expulsa el calor absorbido en el evaporador, el calor es expulsado al exterior (ambiente). En el sistema de refrigeración se usa un compresor reciclado, por lo que se usa el mismo condensador ya diseñado que fue utilizado con el compresor, es decir anteriormente ambos funcionaban juntos.

El condensador reciclado cuenta con varillas, las cuales permiten un mejor intercambio de calor con el ambiente. En la Figura 3.15 se observa el condensador y como se encuentra ubicado en la parte trasera de la cámara. El proceso de transferencia de calor en el condensador se da por convección natural, debido a que se encuentra ubicado en la parte trasera de la cámara y expuesta al aire del ambiente.

Cuando el aire frío del ambiente hace contacto con el condensador este se calienta y sube, debido a que es menos denso, mientras que el aire frío baja y hace contacto de nuevo con el condensador, obteniendo así el proceso de transferencia de calor por convección natural.



Figura 3.15. Condensador dentro del sistema.  
Fuente propia.

- **Dispositivo de expansión**

Los dispositivos de expansión son los encargados de reducir la presión del refrigerante antes de que ingrese al evaporador. Como dispositivo de expansión se toma el tubo capilar, que siempre va acompañado de un filtro. En la Figura 3.16 se observa el tubo capilar.

El tubo capilar se selecciona en base a la experiencia e información proporcionada por técnicos dentro del taller de refrigeración, que recomiendan utilizar tubo capilar de 0,42 [mm] de diámetro y 3 metros de longitud.

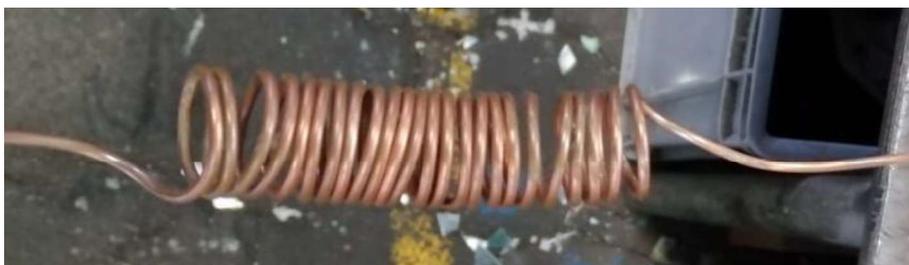


Figura 3.16. Tubo capilar.  
Fuente propia.

- **Filtros**

Restringe el paso de partículas extrañas hacia el tubo capilar, evitando así se obstruya el paso del refrigerante y ocasione fallas en el sistema. Además, permite que se igualen las presiones entre la línea de baja y de alta mientras el compresor este apagado. En la Figura 3.17 se observa el filtro, el cual se ubica a la salida del condensador y a la entrada del tubo capilar.



Figura 3.17. Filtro.  
Fuente propia.

- **Instrumentos de medición y control**

La instrumentación es un conjunto de elementos que sirven para medir, controlar, registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos. [19]

Dentro del sistema de refrigeración se utiliza instrumentos para medir y controlar, el control se realiza mediante la temperatura interna de la cámara, además se podrá observar los valores de presión y temperatura. En el Anexo D se observa el diagrama P&ID del sistema.

El sistema de control es el conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control, puede ser en lazo abierto o cerrado. [20]

Para el control de la temperatura se utiliza un sistema de control de lazo cerrado, el cual se observa en la Figura 3.18. Con la temperatura del interior de la cámara, se controla el encendido y apagado del compresor, esta temperatura es medida por un termistor el cual envía la información al controlador, y este se encarga de abrir o cerrar el contactor para encender o apagar el compresor según la temperatura del interior de la cámara.

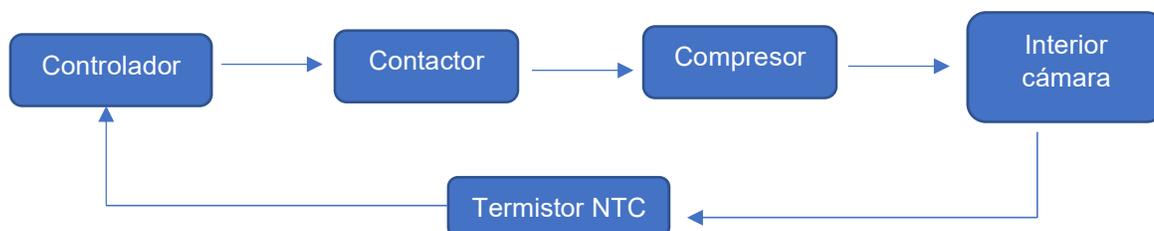


Figura 3.18. Diagrama de bloques del proceso.  
Fuente propia.

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia de valor elevado, por lo que presentan variaciones rápidas y extremadamente grandes para cambios relativamente pequeños en la temperatura. Existen dos tipos: [21]

- NTC (coeficiente de temperatura negativo) = menor linealidad, mayor sensibilidad, usados en control de temperatura
- PTC (coeficiente de temperatura positivo) = mayor linealidad, menor sensibilidad, usados para protección contra sobre corriente.

En la Figura 3.19 se observa el termistor NTC dentro de la cámara, el cual se utiliza para la medición y control de la temperatura.



Figura 3.19. Termistor NTC.  
Fuente propia.

El modo de regulación del controlador es del tipo ON/OFF; activa o apaga el contactor en función de la lectura del termistor, del valor de la temperatura deseada o set point (SP) y del diferencial o histéresis. Para el control de la temperatura de la cámara se configura el SP a 3 [°C] y el diferencial a + 2 grados, cuando la temperatura de la cámara sea igual o menor a 3 [°C] el controlador abre el contactor y este apaga el compresor, y cuando la temperatura de la cámara sea igual o mayor a 5 [°C] el controlador cierra el contactor y enciende el compresor.

A continuación, en la Figura 3.20 se observa el controlador y el contactor para el control de temperatura. Estos elementos se encuentran sobre la cámara de fácil acceso para su configuración y visualización de las temperaturas de:

- La leche
- Aire al interior de la cámara

El controlador puede percibir e indicar la señal de dos sensores, pero el control se lo realiza con la señal del sensor número 1.



Figura 3.20. Controlador y contactor.  
Fuente propia.

En la Figura 3.21 se observa ambos instrumentos de medición dentro del sistema, a la entrada del compresor se encuentra el manómetro de baja con el color azul y de color rojo el manómetro de alta a la salida del compresor.



Figura 3.21. Manómetros de alta y baja.  
Fuente propia.

### 3.5 Construcción de la cámara

La construcción de la cámara, estructura interna y soporte se los realiza en base a los planos presentados en el Anexo A, los cuales fueron diseñados con la ayuda del software de diseño AutoCAD.

Los materiales de construcción son: tol galvanizado para las paredes internas, externas y la puerta, tubo cuadrado para la estructura interna de la cámara y ángulo para el soporte de todo el sistema.

La cámara se fabricó a partir de un refrigerador reciclado y se acoplo a las dimensiones necesarias para 5 litros de leche. En la Figura 3.22 se observa la estructura interna (izquierda) y el soporte de la cámara (derecha), la estructura interna de la cámara soporta el peso de la cámara y la leche que se encontrara dentro de la misma, el soporte es para la cámara y el circuito de refrigeración.



Figura 3.22. Estructura interna y soporte de la cámara.  
Fuente propia.

Para la construcción de la estructura interna y el soporte de la cámara, primero se corta el material según las medidas especificadas en los planos. Luego se procede a unir las piezas mediante el proceso de soldadura manual de metal por arco (SMAW), utilizando electrodos E-6011 los cuales son utilizados para soldar aceros al carbono y presentan mayor dureza.

En la Figura 3.23 se observa el proceso de soldadura SMAW del soporte, este proceso se realizó mediante la creación de arco eléctrico el cual funde el material base (soporte) y el material de aporte (electrodo). [22]



Figura 3.23. Proceso de suelda eléctrica.  
Fuente propia.

La Figura 3.24 muestra el acoplamiento de la estructura interna con las paredes internas y externas de la cámara, para su posterior aislamiento con poliuretano. Las paredes son de tol galvanizado, la interna de 0,90 [mm] y la externa de 1,40 [mm] de espesor.



Figura 3.24. Estructura de la cámara.  
Fuente propia.

Para el aislamiento de las paredes, puerta, techo y piso se utiliza poliuretano de 4 [cm] de espesor, esto para evitar que ingrese calor al interior de la cámara. La Figura 3.25 muestra la estructura interior de las paredes, siendo la primera capa la pared interna, seguida del aislante (poliuretano) y la capa final es la pared externa, en la Figura 3.9 se observa y explica los fenómenos de convección y conducción existentes en las paredes de la cámara.



Figura 3.25. Vista interna de las paredes, puerta, techo y suelo.  
Fuente propia.

Una vez aisladas las paredes, piso y techo de la cámara se ensamblaron con remaches esto para compactarla. En la Figura 3.26 se observa el frente de la cámara ensamblada con remaches.



Figura 3.26. Cámara ensamblada vista frontal.  
Fuente propia.

La puerta de la cámara es construida de tol galvanizado de 0,90 [mm], asilada con poliuretano y la pared interna es de material reciclado. En la Figura 3.27 se observa la puerta con el material aislante (izquierda) y con la cubierta del material reciclado (derecha).



Figura 3.27. Puerta de la cámara.  
Fuente propia.

En la Figura 3.28 se observa la cámara ensamblada en su totalidad, lista para el montaje del circuito de refrigeración.



Figura 3.28. Cámara frigorífica.  
Fuente propia.

### 3.6 Montaje del circuito de refrigeración

Una vez ensamblada la cámara se procede al montaje del circuito de refrigeración, se debe acoplar todos los componentes del circuito: evaporador, compresor, condensador, tubo capilar, filtro e instrumentos de medida y control; la unión de todos los componente y tuberías se realiza mediante el proceso de soldadura autógena con varillas de plata al 5 %.

El proceso de soldadura oxiacetilénica o autógena permite unir materiales, utilizando el calor producido por la combustión de los gases oxígeno y acetileno. En este proceso se puede soldar con o sin material de aporte, debido a que para unir los materiales se los calienta hasta el punto de fusión. En la Figura 3.29 se observa el equipo para realizar la soldadura oxiacetilénica y sus componentes. [23]

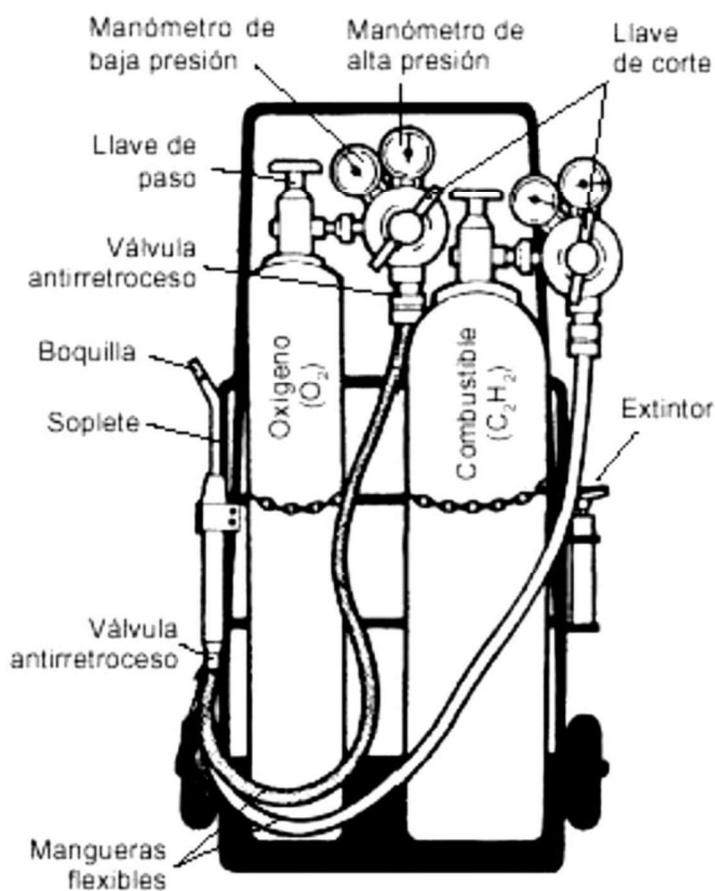


Figura 3.29. Equipo de suelda oxiacetilénica y sus componentes.  
Fuente. [23]

En la Figura 3.30 se observa el proceso de soldadura autógena para la unión de todos los elementos del sistema de refrigeración, esta unión se lo realiza con material de aporte, con varillas de plata al 5 %. Este material de aporte se utiliza para soldar cobre y sus aleaciones. [24]



Figura 3.30. Proceso de suelda autógena.  
Fuente propia.

- **Sistema de refrigeración**

En la Figura 3.31 se observa el sistema de refrigeración con sus elementos:



Figura 3.31. Sistema de refrigeración.  
Fuente propia.

- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| 1. Cámara       | 6. Filtro      |
| 2. Compresor    | 7. Manómetros  |
| 3. Evaporador   | 8. Sensor      |
| 4. Condensador  | 9. Controlador |
| 5. Tubo capilar |                |

Previo a la puesta en marcha del equipo se realizaron procedimientos para dejar listo todo el sistema, a continuación, se detallan los procedimientos realizados. Para el estudio y realización de estos se toma de referencia el libro de Buenas prácticas en sistemas de refrigeración y aire acondicionado. [25]

- **Detección de fugas: presurización de nitrógeno**

Una vez acoplado todo el sistema de refrigeración se verificó si existen fugas, para esto se presurizó el sistema con nitrógeno y también se utilizó agua con jabón.

Se coloca la espuma producida por la mezcla en las soldaduras y se observa si existen burbujas, en la Figura 3.32, se observa el uso de espuma en las uniones para detectar las fugas.



Figura 3.32. Detección de fugas en las uniones con espuma.  
Fuente propia.

Para realizar la presurización de nitrógeno se utilizó un juego de manómetros, este procedimiento se realiza con el compresor apagado, por lo que la presión de alta y baja del sistema son iguales. Con el sistema presurizado se escucha si existen fugas de nitrógeno, en la Figura 3.33 se muestra el juego de manómetros cuando se carga nitrógeno, en el manómetro de alta se observa como sube la presión al ingresar el nitrógeno al sistema.

El tanque de nitrógeno se conecta al juego de manómetros por medio de la manguera azul, sale y se conecta al compresor con la manguera roja, la perilla del lado del manómetro de alta regula la entrada de nitrógeno al sistema.



Figura 3.33. Juego de manómetros en presurización de nitrógeno.  
Fuente propia

Una vez identificadas y selladas las fugas se presurizó de nuevo el sistema hasta una presión de 174 [PSI], dejándolo así por 2 horas, esto para ver si aún existen fugas mediante la caída de presión. La presurización del sistema se la realizó en un intervalo de presiones de 120 a 180 [PSI].

En la Figura 3.34 se observa que la presión de alta y baja son iguales verificando que no exista caídas de presión mientras se encuentra presurizado con nitrógeno el sistema.



Figura 3.34. Presión de alta y baja iguales en la presurización de nitrógeno.  
Fuente propia.

- **Prueba de vacío**

La prueba de vacío se la realiza para eliminar el aire y la humedad existente dentro del sistema, para este procedimiento se utilizó una bomba de vacío y un juego de manómetros.

La cámara al ser un equipo pequeño, se realizó la prueba de vacío durante 30 minutos, en la Figura 3.35 se observa la bomba de vacío conectada al juego de manómetros y posteriormente al compresor para realizar la prueba. La bomba de vacío se conecta al manómetro de baja del juego de manómetros, para luego conectar del juego de manómetros al compresor.



Figura 3.35. Prueba de vacío.  
Fuente propia.

Este procedimiento se lo realiza con el sistema apagado y una vez finalizado la prueba de vacío se procede a cargar el refrigerante.

- **Carga del refrigerante al sistema**

El refrigerante que se utilizó es el R-413A, que es un reemplazo del R-12. Para cargarlo en el sistema se utilizó el juego de manómetros, el refrigerante se conecta al manómetro de baja del juego de manómetros, para luego conectarse al compresor. Con la perilla del lado del manómetro de baja se reguló la entrada del refrigerante al sistema.

En la Figura 3.36 se observa el procedimiento de carga del refrigerante al sistema, también se observa la conexión del juego de manómetros con el refrigerante y el compresor.



Figura 3.36. Carga del refrigerante R-413A al sistema.  
Fuente propia.

La cantidad de refrigerante que se suministra está relacionada con la presión de retorno del sistema, por lo que se enciende el compresor para observar la presión en el manómetro de baja del sistema. En la Figura 3.37 se observa una presión de retorno de 22 [PSI], en las tablas de las propiedades termodinámicas del refrigerante R-413A del Anexo C se comprueba que con la presión de 22 [PSI] se tiene una temperatura en el evaporador de aproximadamente  $-18$  [°C] lo cual cumple con los datos de diseño.



Figura 3.37. Presión de retorno.  
Fuente propia.

### 3.7 Pruebas de funcionamiento

En primer lugar, se verificó el funcionamiento del sistema hasta que se estabilice, se verificó las presiones de entrada y salida del compresor, las temperaturas en cada punto del sistema y se realizaron pruebas de funcionamiento cuando la cámara está vacía y cuando se encuentra 5 litros de leche dentro de la cámara.

- **Verificación de las presiones de trabajo**

En la Figura 3.38 se observa los manómetros marcando las presiones a la entrada y salida del compresor cuando el sistema se encuentra trabajando:

- Presión a la entrada del compresor (baja) = 22 [PSI]
- Presión a la salida del compresor (alta) = 200 [PSI]



Figura 3.38. Presiones de alta y baja con el sistema encendido.  
Fuente propia.

A partir de las presiones que marcan los manómetros, se obtienen las temperaturas de evaporización y condensación, ya que corresponden a las temperaturas de saturación del refrigerante, en la Tabla 3.9 se muestran los valores de las presiones a la entrada y salida del compresor obtenidas de los manómetros; y las temperaturas en el evaporador y condensador obtenidas de las tablas del refrigerante R-413A del Anexo C de acuerdo con las presiones.

Tabla 3.9.  
Verificación de las presiones y temperaturas.

ON/OFF	Presión de baja [PSI]	Temperatura evaporador [°C]	Presión de alta [PSI]	Temperatura condensador [°C]
ON 1	28	- 13	225	54
ON 2	22	-19	200	49
OFF 1	38	-5	145	37
OFF 2	46	0	45	0

Fuente propia.

En los estados ON 1 y ON 2 se observan los valores máximos y mínimos de las presiones y temperaturas que el sistema alcanzó cuando estuvo trabajando.

En el estado OFF 1 se observa los valores registrados al instante en que el sistema se apaga, la presión de alta y la temperatura del evaporador comienzan a bajar, mientras que la presión de baja y la temperatura del evaporador comienzan a subir.

En el estado OFF 2 el sistema se encuentra apagado y en equilibrio, las presiones y temperaturas son iguales.

- **Verificación de las temperaturas del sistema**

Los valores de las temperaturas en cada punto del sistema se las registra con la ayuda de un termómetro, en la Figura 3.39 se observa cómo se conecta el termopar y el valor de la temperatura a la entrada del compresor que es igual a 15,9 [°C]. El termopar se conecta en contacto directo con la tubería evitando así lecturas del medio ambiente.



Figura 3.39. Temperatura a la entrada del compresor.  
Fuente propia.

En la Tabla 3.10 se observa los valores de las temperaturas a la entrada y salida del compresor y condensador. Los valores del tubo capilar y evaporador no se presentan debido a que no se tiene acceso directo a ellos.

Tabla 3.10.  
*Temperaturas del sistema.*

<b>Temperatura</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
	<b>[°C]</b>	<b>[°C]</b>
<b>Compresor</b>	15,9	82,2
<b>Condensador</b>	74,5	48,6

Fuente propia.

Las temperaturas a la salida de un elemento y a la entrada de otro no son iguales, esto se observa en los elementos que se encuentran visibles y de fácil acceso: compresor y condensador. Estos elementos se encuentran conectados por lo que se observa como la temperatura desciende al pasar de uno a otro, la temperatura a la salida del compresor es de 82,2 [°C] y a la entrada del condensador de 74,5 [°C].

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con:

- Cámara vacía
  - Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en la leche (primer ciclo encendido/apagado)
  - Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en la leche (luego de la estabilización)
  - Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en aire de la cámara (primer ciclo encendido/apagado)
  - Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en el aire de la cámara (luego de la estabilización)
- **Cámara vacía**

Las variables utilizadas para el análisis son: tiempo, temperatura de la cámara, presión de alta y baja. En la Figura 3.40 se observa el comportamiento de la temperatura en función del tiempo hasta que el equipo se establezca, también se observa como el compresor se enciende y se apaga.

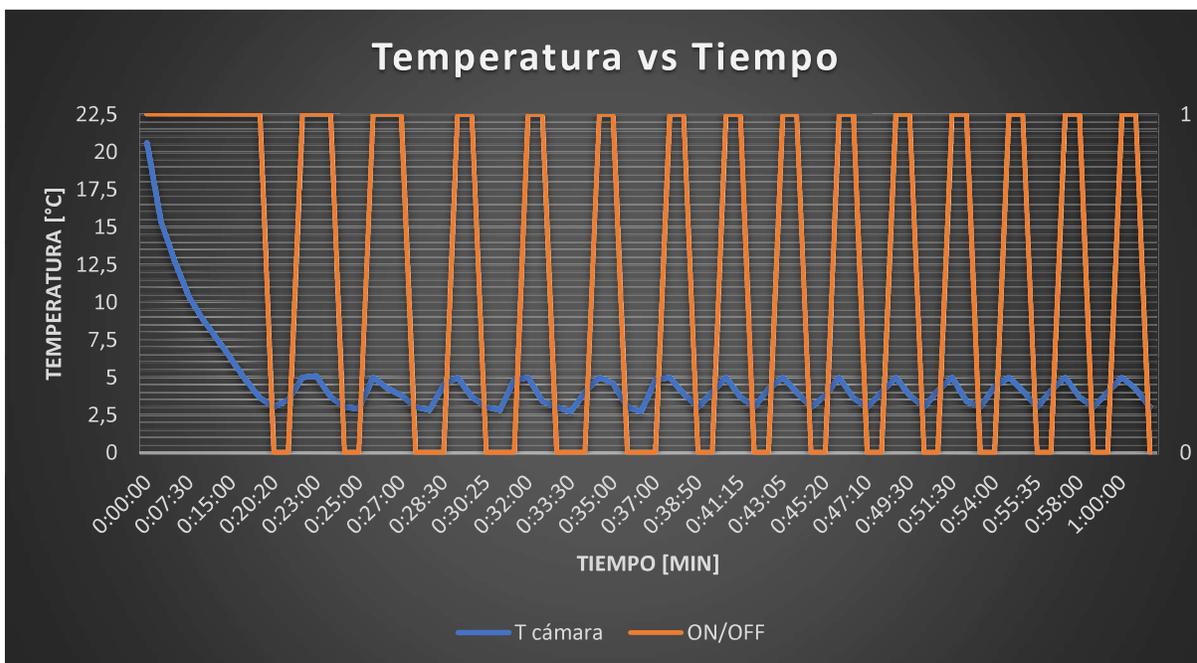


Figura 3.40. Gráfica temperatura en función del tiempo con la cámara vacía.  
Fuente propia.

La Figura 3.41 muestra las presiones en función del tiempo y cómo se comportan cuando el compresor se enciende y se apaga. Se puede observar cuando el compresor se encuentra apagado las presiones son iguales.

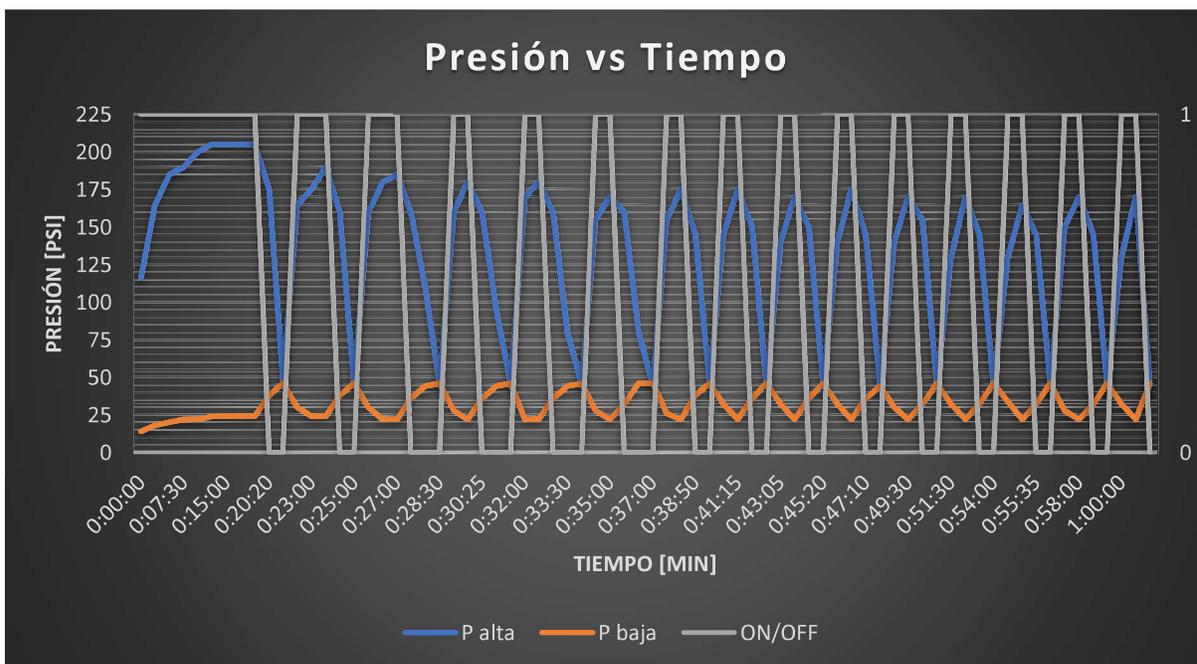


Figura 3.41. Gráfica presión en función del tiempo con la cámara vacía.  
Fuente propia.

En la Figura 3.40 y Figura 3.41 se observa como la temperatura de la cámara desciende y al llegar a 3 [°C] el equipo se apaga por lo cual las presiones de alta y baja se igualan, también se observa que la temperatura de la cámara comienza a subir hasta 5 [°C] y cuando llega el equipo se vuelve encender, obteniendo así un control ON/OFF.

La cámara llega a 3 [°C] en 21 minutos, a partir de ahí permanece encendido por un tiempo promedio de 2 minutos y de igual manera cuando se encuentra apagado.

- **Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en la leche (primer ciclo encendido/apagado)**

El equipo está diseñado para enfriar y conservar leche a una temperatura de la cámara de 3 [°C]. Se realizan pruebas deseando que la temperatura de la leche sea igual a 3 [°C], por lo que el control se realiza con la temperatura de la leche. En la Figura 3.42 se observa como la temperatura de la leche desciende en función del tiempo, así mismo se observa la temperatura de la cámara, existiendo una diferencia de temperatura entre la cámara y la leche.

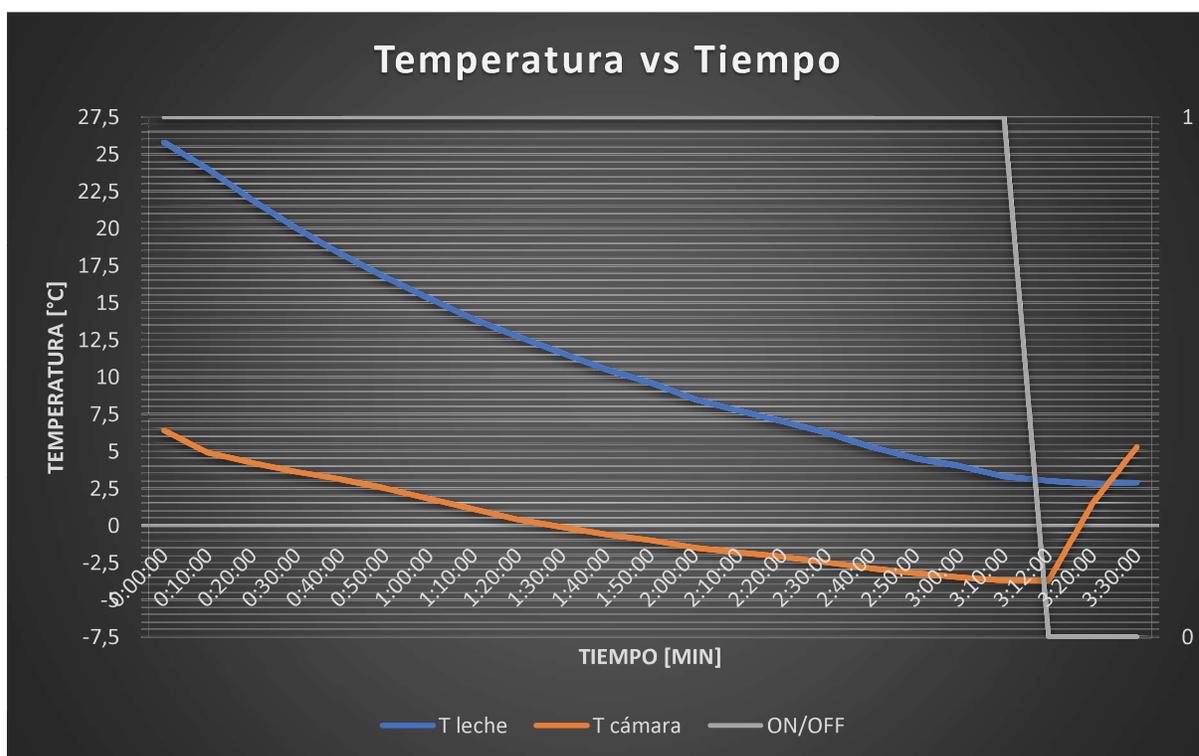


Figura 3.42. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la leche.  
Fuente propia.

En la Figura 3.43 observa el comportamiento de las presiones de alta y baja del sistema en función del tiempo, se observa y comprueba como las presiones se igualan cuando el equipo se encuentra apagado.

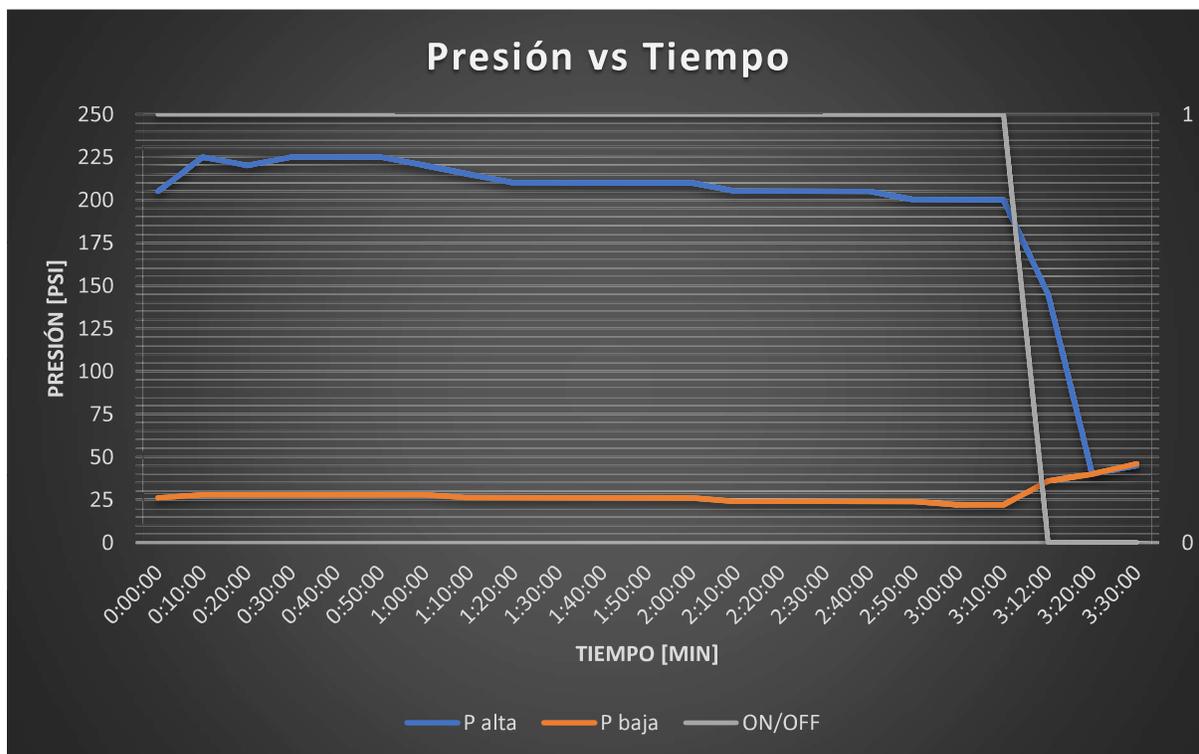


Figura 3.43. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la leche.  
Fuente propia.

En la Figura 3.42 y Figura 3.43 se observa el primer ciclo de encendido y apagado del equipo, desde que ingresa la leche a 26 [°C] hasta que su temperatura llega a 3 [°C]. Se observa como la temperatura de la cámara llega hasta temperaturas bajo cero y cuando se apaga el equipo comienza a subir, también se observa como desciende la temperatura de la leche y cuando esta llega a 3 [°C] se apaga el sistema.

El sistema se demoró 3 horas con 12 minutos en enfriar la leche a 3 [°C], las presiones se mantienen constantes mientras el equipo este encendido, cuando el equipo se encuentra apagado las presiones son iguales hasta cuando el sistema se vuelva a encender, debido a que el sistema tiende a estabilizarse cuando se encuentra apagado.

- **Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en la leche (luego de la estabilización)**

En la Figura 3.44 se observa como la temperatura de la leche y de la cámara descienden en función del tiempo, y como el sistema controla la temperatura luego de que se estabilice.

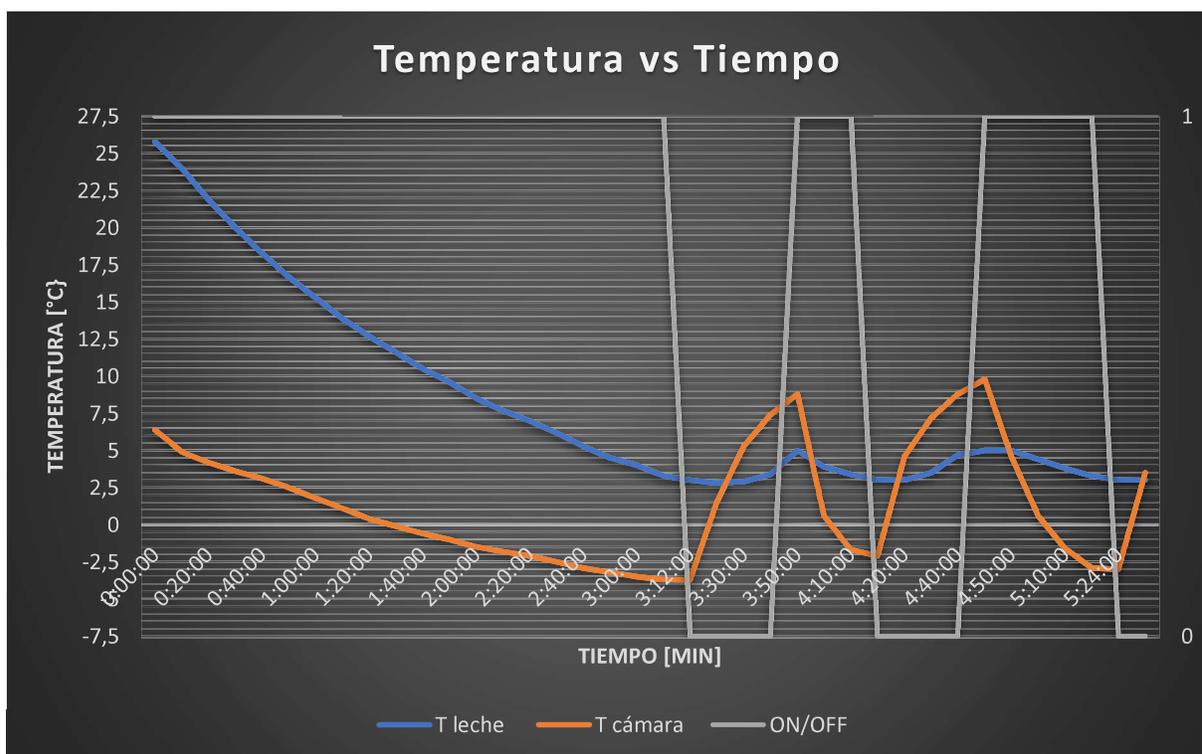


Figura 3.44. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la leche (estabilización). Fuente propia.

En la Figura 3.45 se observan las presiones del evaporador y condensador en función del tiempo, también se observa que sucede cuando el equipo se encuentra encendido o apagado luego de que se estabilice.

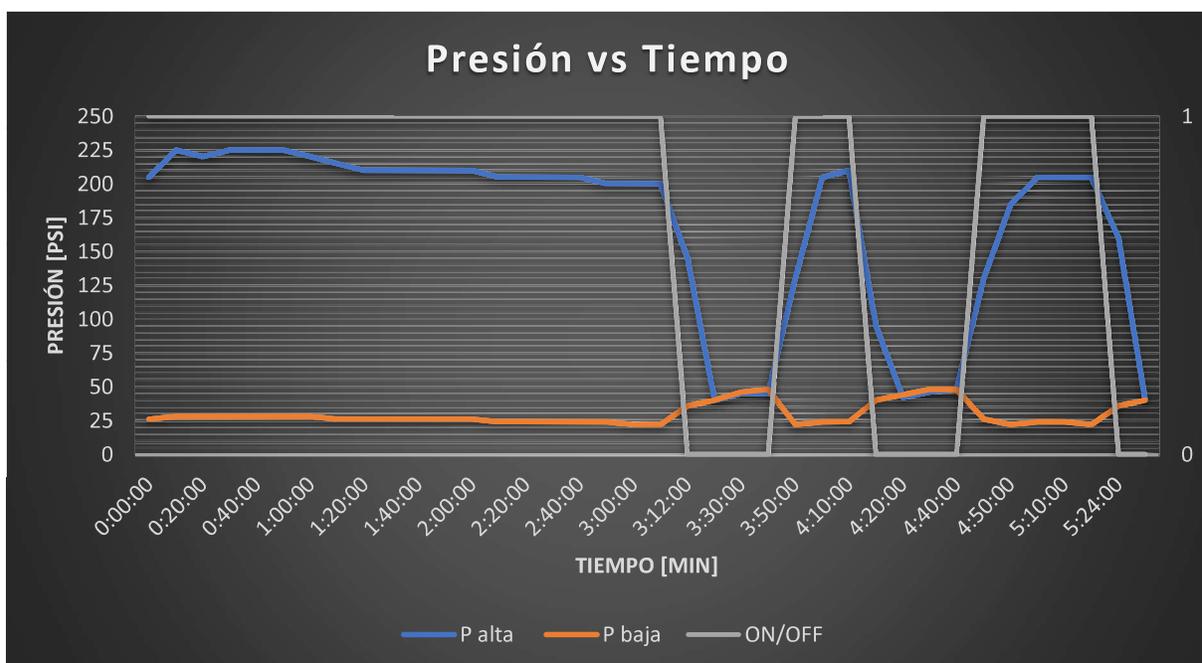


Figura 3.45. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la leche (estabilización).  
Fuente propia.

En la Figura 3.44 y Figura 3.45 se observa el comportamiento de las temperaturas y presiones en función del tiempo luego de su estabilización. La temperatura de la cámara alcanza temperaturas bajo cero cuando el equipo se encuentra encendido y cuando se encuentra apagado sube hasta casi 10 [°C].

La temperatura de la leche cuando el equipo se encuentra apagado sube lentamente hasta 5 [°C], lo cual hace que el equipo se vuelva a encender. La presión del condensador varía cuando el equipo se encuentra funcionando, teniendo un valor máximo de 225 [PSI] y un mínimo de 200 [PSI], la presión del evaporador se mantiene constante cuando el equipo se encuentra encendido, cuando el equipo se encuentra apagado las presiones son iguales.

Después de que el sistema se estabilice el tiempo promedio que permanece encendido el equipo es de 30 minutos y el tiempo promedio que permanece apagado es de 37 minutos.

- **Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en aire de la cámara (primer ciclo encendido/apagado)**

En la Figura 3.46 se observa el primer ciclo de encendido y apagado del sistema con el sensor en el aire de la cámara, también se observa como varía la temperatura de la cámara y la leche en función del tiempo.

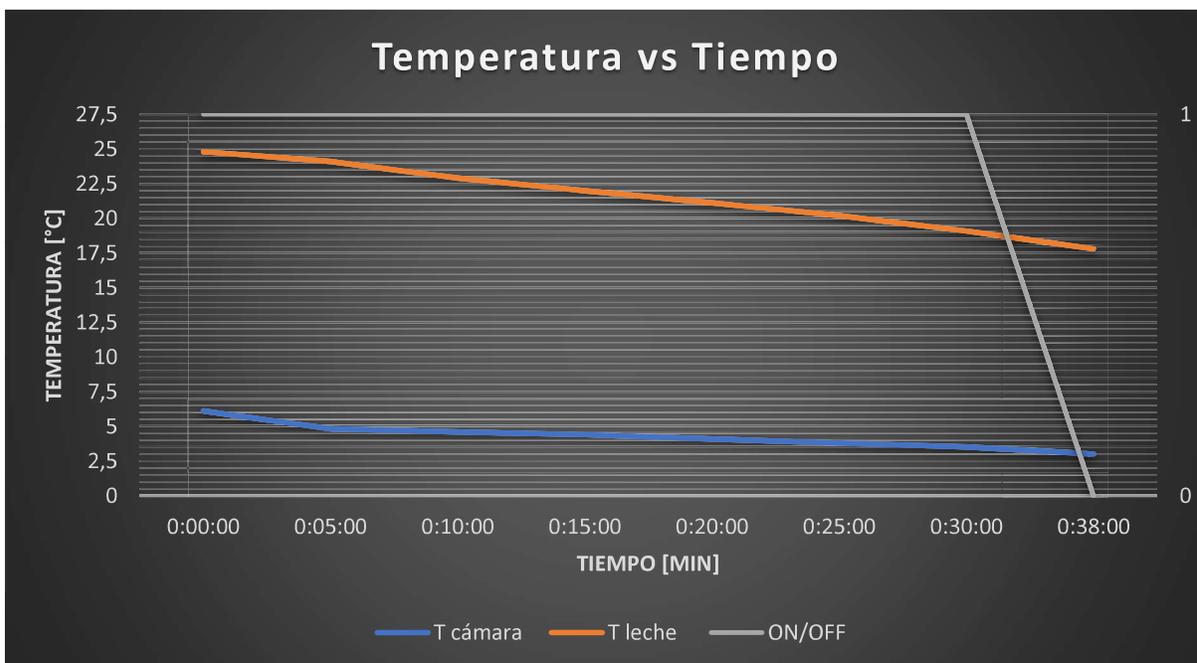


Figura 3.46. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la cámara.  
Fuente propia.

En la Figura 3.47 se observa cómo se comportan las presiones de alta y baja del sistema en función del tiempo, cuando el equipo cumple un ciclo de encendido y apagado.

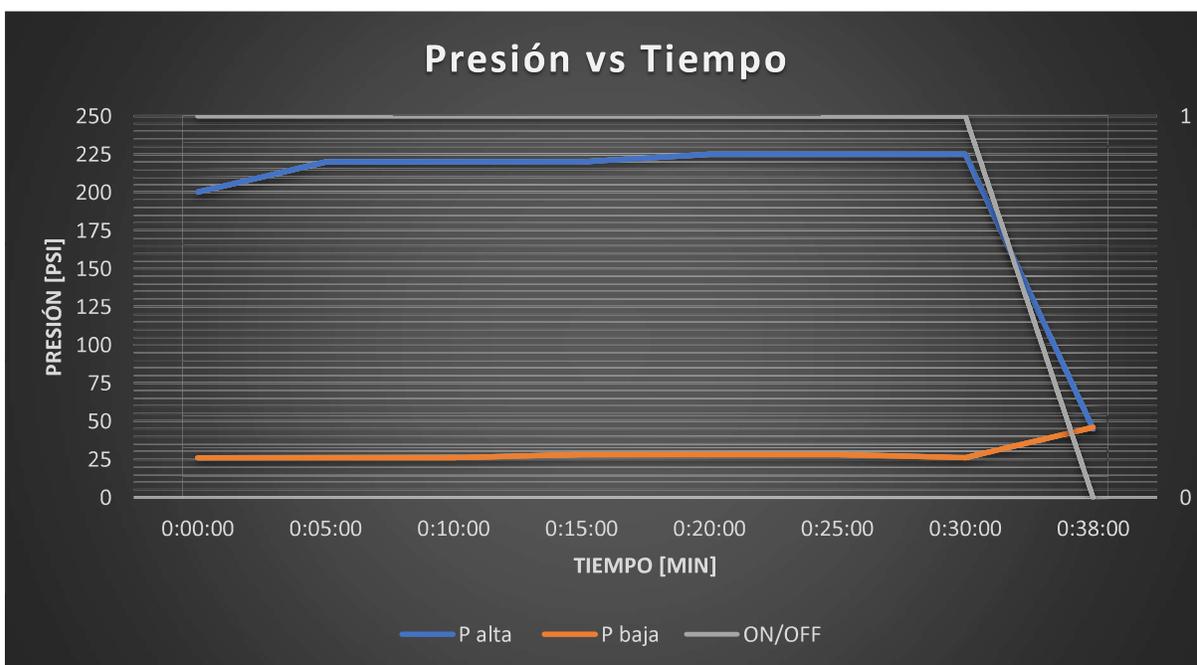


Figura 3.47. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la cámara.  
Fuente propia.

En la Figura 3.46 y Figura 3.47 se observa que cuando el sensor se encuentra en el aire de la cámara la temperatura de esta llega a 3 [°C] en 38 minutos, la temperatura de la leche desciende de forma continua y lentamente. Las presiones de alta y baja son constantes cuando el sistema se encuentra encendido, cuando el sistema se encuentra apagado las presiones son iguales.

- **Cámara con leche cuando el sensor del control se encuentra en el aire de la cámara (luego de la estabilización)**

En la Figura 3.48 se observa la variación de la temperatura de la cámara y la leche en función del tiempo, además del encendido y apagado del sistema.

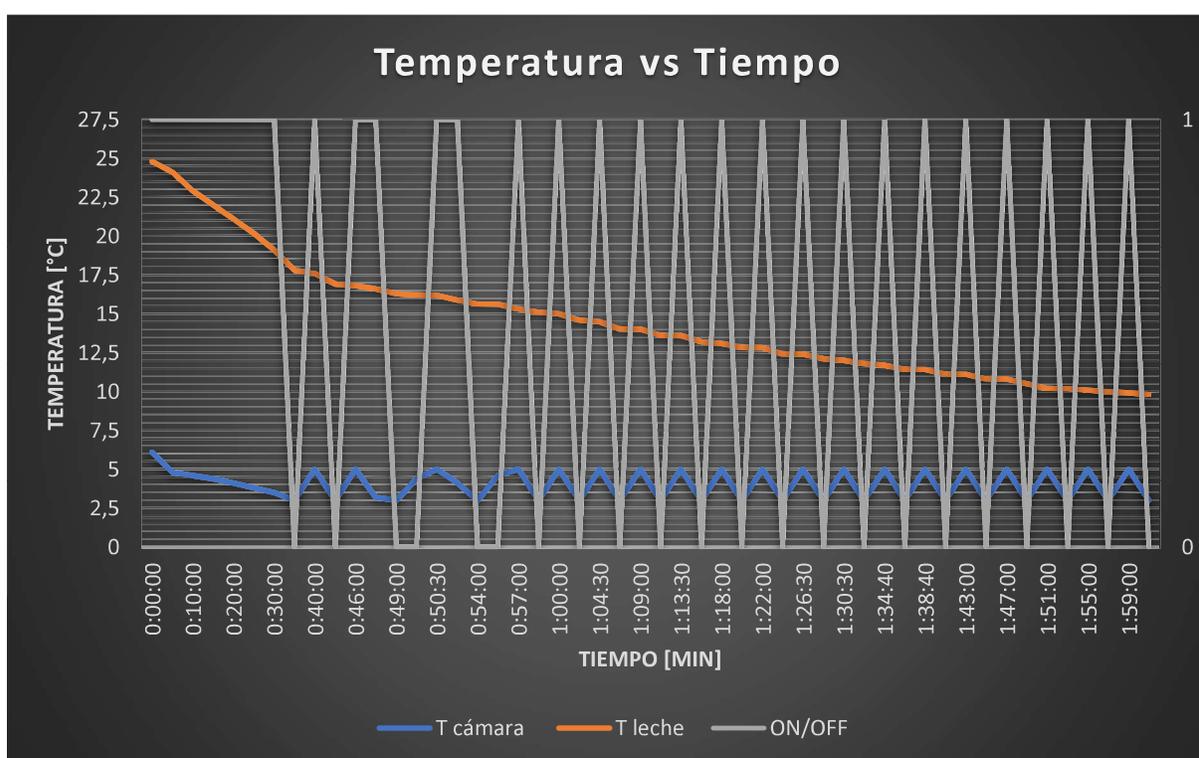


Figura 3.48. Gráfica temperatura en función del tiempo con el sensor en la cámara (estabilización).  
Fuente propia.

En la Figura 3.49 se observa el comportamiento de las presiones de alta y baja en función del tiempo.

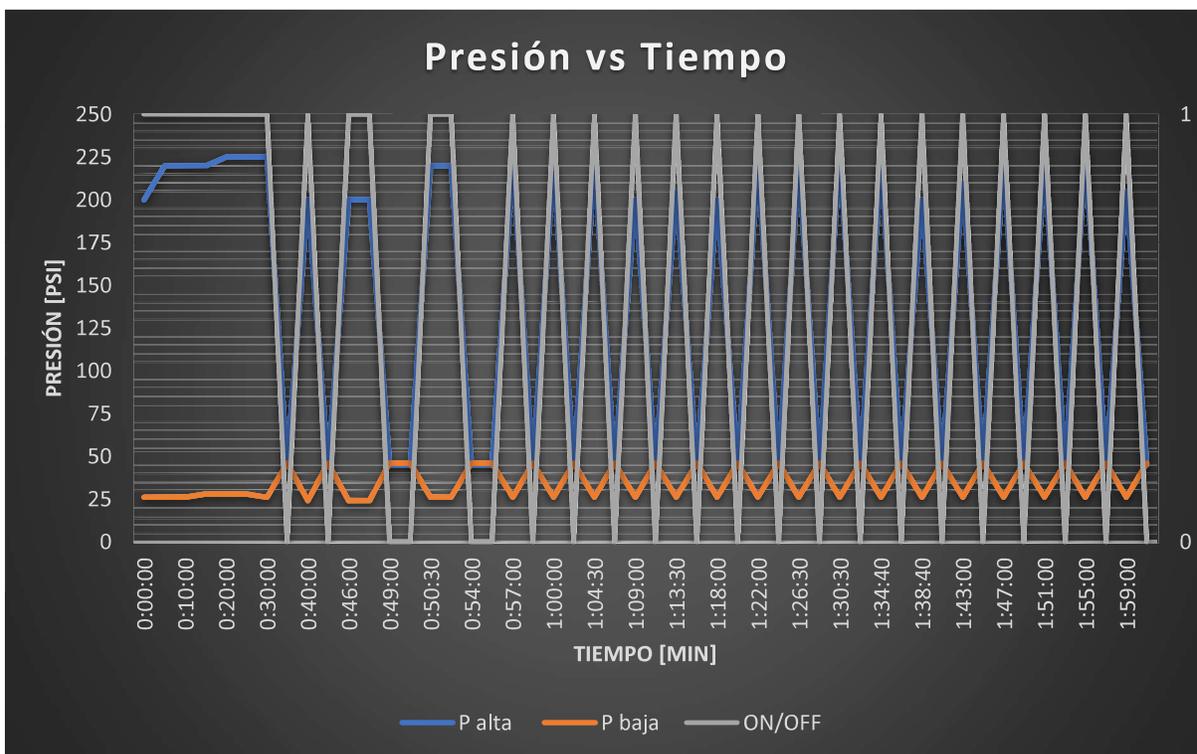


Figura 3.49. Gráfica presión en función del tiempo con el sensor en la cámara (estabilización). Fuente propia.

En la Figura 3.48 y Figura 3.49 se observa como varía la temperatura de la leche en función del tiempo, cuando el sensor de control se encuentra en el aire de la cámara, se observa que la temperatura de la leche desciende lentamente y de forma continua. La temperatura de la cámara llega a 3 [°C] en 38 minutos y se estabiliza, lo que resulta en ciclos continuos de encendido y apagado del sistema.

El tiempo promedio que permanece encendido el equipo es de 1 minuto y 40 segundos y el tiempo promedio que permanece apagado es de 1 minuto 30 segundos.

Las presiones varían en función del tiempo y del estado del equipo, sea encendido o apagado. Al tener ciclos continuos de en encendido y apagado la temperatura de la leche desciende lentamente.

### 3.8 Costos, operación y mantenimiento

- **Costos**

El proyecto se desarrolla a partir de componentes antiguos de equipos en desuso, por lo cual se verifica el estado de los componentes que resultaron factibles de reutilizarlos ya que se encuentran en

óptimas condiciones, debido a que la cámara es un prototipo para los productores de la parroquia de Lloa, por lo cual se busca tener un costo de inversión bajo.

Además de los componentes reutilizados, se gastó 300 dólares estadounidenses, el detalle se observa en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11.  
*Costos de la cámara*

Descripción	Costo [\\$]
Materiales de la cámara, soporte y estructura interna (tol galvanizado, ángulo y tubo cuadrado)	80
Evaporador con el ventilador y carcasa	90
Controlador, contactor	50
Pruebas realizadas (presurización con nitrógeno, vacío, carga del refrigerante)	45
Materiales para la unión de todo el sistema	35

Fuente propia

- **Operación**

Es muy importante antes de utilizar el sistema se revise el manual de operación y mantenimiento del equipo, detallado en el Anexo E. También revisar el manual de usuario del controlador OSAKA F10 que se encuentran en el Anexo F.

En el manual de operación se detalla cómo manipular, configurar y poner en marcha el equipo. Además de consideraciones que se deben realizar al usar el equipo.

- **Mantenimiento**

Dentro del manual de mantenimiento se detalla las actividades y con qué frecuencia se las debe realizar, se debe cumplir con las actividades de mantenimiento para así evitar fallas dentro del sistema.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El refrigerante R-413A es un buen remplazo actual del R-12, debido a que la diferencia de presiones es 18,7 % por lo cual al trabajar con el nuevo refrigerante no existe inconvenientes, además el calor latente de cambio de fase es mayor por lo cual si se trabaja con el mismo flujo másico se tiene una mayor capacidad de refrigeración en el evaporador y en el condensador el calor rechazado es mayor.
- Cuando el sensor de control se encuentra dentro de la leche el sistema se tarda más de 3 horas en estabilizarse, luego de estabilizarse los periodos de encendido y apagado son de aproximadamente 35 minutos cada uno. Por otro lado, cuando el sensor de control se encuentra en el aire de la cámara el sistema se demora 40 minutos en estabilizarse, y presenta periodos de encendido y apagado de aproximadamente 2 minutos cada uno.
- Cuando se utiliza un evaporador sobre dimensionado, se debe cargar una cantidad mayor de refrigerante para evitar que el refrigerante se evapore por completo sin haber recorrido por todo el evaporador, lo que provocaría un sobrecalentamiento en el compresor y fallas en el sistema. Por esta razón, se carga el refrigerante con el sistema encendido y se verifica la presión de retorno.
- Es muy importante comprobar el estado de los equipos que se han reutilizado. Dentro del sistema de refrigeración se reutiliza el compresor y condensador, posteriormente se analizó la opción de remplazar el refrigerante con una sustancia más amigable con el ambiente
- Se utiliza un sistema de control moderno, que permite configurar la temperatura de encendido y apagado. Para el control del sistema utiliza la temperatura del interior de la cámara.
- Se diseñó el equipo para mantener la leche conservada a una temperatura de 3 [°C], en función de la variable se controla el encendido y apagado del compresor. Dentro de las pruebas realizadas se coloca el sensor de control dentro de la leche, y se observa como el equipo enfría la leche a 3 [°C] por lo que el control se lo realiza con la temperatura de la leche y la temperatura del aire de la cámara llega a valores menores que cero.
- El sistema servirá de refuerzo académico para los estudiantes de la carrera de Tecnología Electromecánica, especialmente para la asignatura de Sistemas de Refrigeración y Aire Acondicionado.

- La carga de refrigeración considera la carga por transmisión de paredes, por producto, por infiltración a través de la puerta y se considera un factor de seguridad. Este valor es el calor que debe remover el evaporador. La carga total fue de  $0,1781 \text{ [kW]} = 608,02 \text{ [BTU/h]}$ , teniendo la carga del producto igual a  $0,061 \text{ [kW]}$ .
- Para el dimensionamiento y selección del compresor se relaciona el cálculo de la carga de refrigeración y el análisis del ciclo termodinámico, obteniendo la potencia requerida por el sistema  $0,08686 \text{ [kW]} = 0,1164 \text{ [HP]}$ . Se comprueba que el compresor reciclado de  $1/8 \text{ [HP]} = 0,125 \text{ [kW]}$  cubre con la demanda del sistema.
- Uno de los principales problemas dentro de los sistemas de refrigeración son las fugas de refrigerante, para detectarlas se utilizó agua con jabón y nitrógeno. Se colocó la mezcla en las uniones y se observó si existen burbujas, además se presurizó el sistema con nitrógeno a una presión de  $174 \text{ [PSI]}$  dejándolo presurizado por 2 horas y se observó que no existan caídas de presión.
- Es importante eliminar el aire y la humedad del sistema, por lo cual se realizó una prueba de vacío, este procedimiento se realizó con una bomba de vacío durante 30 minutos, se realizó durante este tiempo al ser un equipo pequeño.
- Con el sistema encendido se verifican las presiones de trabajo a la entrada y salida del compresor, obteniendo valores de  $22 \text{ PSI}$  a la entrada y  $200 \text{ PSI}$  a la salida. Estos valores son similares a los datos de diseño, como se observa en la sección "Verificación de las presiones de trabajo", además se observa que las temperaturas de evaporación y condensación son próximas a las utilizadas para el diseño.
- El equipo es un prototipo y se puede fabricar en serie para reducir los costos, obteniendo así un precio accesible para los productores de Lloa y sea accesible adquirir una cámara enfriadora para la conservación de la leche.
- El equipo servirá como ayuda práctica; se podría implementar como trabajo futuro termómetros a la entrada y salida de cada elemento, esto para observar las medidas de temperaturas. Estos termómetros deben ser instaladas en las tuberías y de contacto directo como se indica en la sección "Verificación de las temperaturas del sistema".
- El control ON/OFF se lo realiza con la señal que envía el termistor NTC al controlador, esta señal puede ser de la temperatura de la cámara o de la leche. El controlador OSAKA F10 es uno sencillo, el cual permite controlar la temperatura de la cámara, observar la temperatura de la leche y además modificar el Set Point y el diferencial de temperatura.

## 4.2 Recomendaciones

- Para tener un mejor enfriamiento y conservación de la leche se recomienda un enfriador de contacto directo de la leche con la tubería del evaporador, así se reducirá con mayor rapidez la temperatura de la leche y también permitirá tener un mayor alcance. Para cumplir con este procedimiento se debería utilizar acero inoxidable en la tubería y aletas del evaporador, el material debe ser escogido en base a las diferentes normas de manipulación y transformación de alimentos.
- En la construcción de cámaras enfriadoras se recomienda utilizar poliuretano como material aislante, debido a sus propiedades: mayor durabilidad, facilidad de corte y manipulación, es uno de los aislantes térmicos con menor coeficiente de conductividad  $0,026 \text{ [W/mK]}$ , son impermeables.
- Al momento de soldar las tuberías, verificar que se encuentren bien acopladas, evitando así el ingreso de material de aporte al interior de la tubería y ocasione obstrucciones.
- Realizar los procedimientos previos a la puesta en marcha del equipo es importante, para evitar fallas en el sistema y daños de los equipos.
- Durante la comprobación de fugas mediante la presurización de nitrógeno al sistema, se recomienda cargar el nitrógeno a una presión máxima de  $180 \text{ [PSI]}$ , para evitar daños en los equipos. El sistema se debe mantener presurizado por un tiempo de 2 horas por ser un equipo pequeño.
- Antes de encender el equipo se recomienda leer y realizar las actividades que se detallan en el manual de operación y mantenimiento del Anexo E, para un correcto uso y funcionamiento de la cámara enfriadora.
- Para el control, configuración y manipulación del controlador se recomienda leer el manual de usuario del controlador OSAKA F10 que se encuentra en el Anexo F.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. j. Dossat, "Principios de Refrigeración." 2009.
- [2] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, Séptima ed. 2012.
- [3] Y. A. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, Tercera Ed., vol. 18, no. 12. 2007.
- [4] R. Torres, "Principios de refrigeracion," 2011.
- [5] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Transferencia de calor," *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 2011.
- [6] Danfoss, "Thermodynamic limitations and opportunities," 2010.
- [7] "Instalaciones frigoríficas."
- [8] P. Fernández, "Compresores."
- [9] Dirección de Estadísticas Agropecuarias y Ambientales, "Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua," 2017.
- [10] Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, "REGLAMENTO DE CONTROL Y REGULACION DE CADENA DE PRODUCCIÓN DE LECHE," 2018.
- [11] ASHRAE, "ASHRAE Refrigeration Handbook (SI)," no. CHAPTER 8, 2014.
- [12] ASHRAE, "ASHRAE Refrigeration Handbook (SI)," no. CHAPTER 12, 2014.
- [13] Inamhi, *Boletín Climatológico Decadal*. 2017.
- [14] ASHRAE, *ASHRAE Handbook Fundamentals*. 2017.
- [15] DuPont, "Propiedades Termodinámicas R-413A," vol. 17, no. 2, 2005.
- [16] H. Zúñiga and B. Erazo, "Estudio del Empleo de Hidrocarburos como Refrigerantes Ecológicos en Refrigeración Doméstica," 2012.
- [17] DuPont, "DuPont® ISCEON®," vol. 49, 2005.
- [18] Embraco, "Manual de aplicación de compresores," 2009.
- [19] A. Cuenca, "Capítulo 1: Medición y control de procesos industriales," p. 19, 2017.

- [20] A. Cuenca, "Capítulo 2: Sistemas de control," vol. 53, no. 9, 2017.
- [21] A. Cuenca, "Capítulo 3: Medición y control de temperatura," *J. Chem. Inf. Model.*, no. 9, 2017.
- [22] S. A. Indura, "Electrodos Para Aceros Al Carbono," 2014.
- [23] J. Alberto, "Soldadura Oxiacetileno."
- [24] S. A. Indura, "Sistema de Materiales y Soldadura," 2007.
- [25] Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, "Buenas Prácticas en Sistemas de Refrigeración y Aire Acondicionado," 2006.

## 6. ANEXOS

**ANEXO A:** Planos de la cámara enfriadora de leche.

**ANEXO B:** Tablas de las propiedades termodinámicas del refrigerante R-12.

**ANEXO C:** Tablas de las propiedades termodinámicas del refrigerante R-413A.

**ANEXO D:** Diagrama P&ID del sistema de refrigeración.

**ANEXO E:** Manual de operación y mantenimiento del equipo.

**ANEXO F:** Manual de usuario del controlador OSAKA F10.