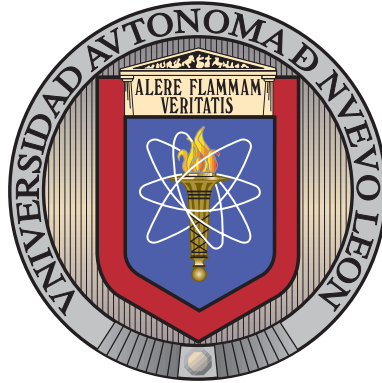


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN OPERANDO CON R-448A COMO  
SUSTITUTO DEL R-404A

POR

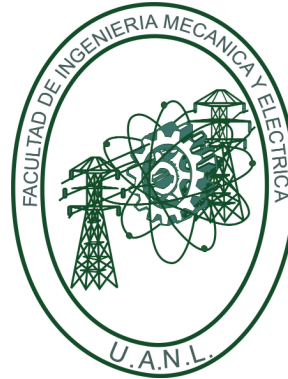
CÉSAR IRAK VILLANUEVA GARZA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN  
EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN OPERANDO CON R-448A COMO  
SUSTITUTO DEL R-404A

POR

CÉSAR IRAK VILLANUEVA GARZA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN  
EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2022

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Desempeño de un sistema de refrigeración operado con R-448A como sustituto del R-404A”, realizada por el estudiante César Irak Villanueva Garza, con número de matrícula 1581349, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

Dr. Arturo Morales Fuentes  
Director

Dr. Santos Méndez Díaz  
Co-Director

Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz  
Revisor

Dr. Hugo Guadalupe Ramírez Hernández  
Revisor

Dr. Rodrigo Salgado Ayala  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507 507

Acta Núm. 4159

Ciudad Universitaria, a 28 de abril de 2023.



# AGRADECIMIENTOS

---

Primeramente, agradecerles a mis padres, Irma Leticia Garza Gonzales y Florentino López Cortés por el apoyo que siempre me han brindado y motivarme para siempre salir adelante. Siempre buscando lo mejor para mí y mi hermano en los momentos difíciles.

A mi hermano, Martín Oswaldo Villanueva Garza por enseñarme a soñar, a tener una perspectiva crítica y ayudarme a expresar mis pensamientos.

A mis mejores amigos, Carlos Antonio Maldonado Muñoz y Luis Javier Treviño Valdez que me apoyaron en momentos de superación personal y siempre estaban al pendiente de mis emociones y mis actividades de formación. Un agradecimiento también a Rolando Vázquez Martínez. por brindarme sus enseñanzas, apoyo en momentos de reflexión y de superación personal.

A mi familia y amigos de manera general, que me apoyaron de alguna u otra forma y siempre estuvieron al pendiente de mí, siempre buscando ayudarme y darme un bien importante.

Un agradecimiento al Dr. Hugo Ramírez Hernández por su amistad y sus enseñanzas en la vida. Fue mucho más que un profesor, fue quien me inspiró a mucho más y me apoyó con sus conocimientos para mejorar mi proyecto de tesis.

Un agradecimiento también a mi asesor, el Dr. Arturo Morales Fuentes que me enseñó con paciencia formas para que entendiera y aprendiera, agradezco el tiempo que se tomó para guiarme en este proyecto de tesis y la confianza en mis habilidades,

le estoy agradecido.

Mis profesores, Dr. Simón Martínez, Dr. Fausto Sánchez, Dr. Héctor García, M.C. Miguel Yera, Ing. Guadalupe Cedillo, Dr. Daniel De la Rosa, Dr. Oscar De la Garza, por brindarme el intelecto y compartirme sus consejos para la mejora de mi proyecto. Un agradecimiento especial para el Dr. Santos Méndez que colaboró de manera directa en mi proyecto.

Mis compañeros de maestría, por el apoyo y por sacarme siempre una sonrisa en todo momento para disfrutar aún más mi estadía en la maestría, en especial a mis compañeros María José Carbajal y Luis Fernando Rúa, con quienes formé una amistad fuerte y estrecha.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de ingeniería Mecánica y Eléctrica, por la preparación profesional que he tenido a lo largo de los años.

Un agradecimiento especial al Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de la FIME-UANL, y a los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) por todo el apoyo, seguimiento y el uso de las instalaciones de los laboratorios para la realización de este trabajo.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado mediante la beca nacional número 1083517.

A la empresa Quimiobásicos S.A. de C.V. por la donación de los refrigerantes utilizados en este proyecto.

A la empresa Danfoss Industries S.A. de C.V. por el aporte del equipo e instrumentación para este proyecto.

# NOMECLATURA

---

$\Delta E$  - Cambio de energía [kJ]

$Q_H$  - Calor desechado por el condensador. [kJ]

$\dot{Q}_H$  - Calor desechado por el condensador respecto al tiempo. [kW]

$Q_L$  - Calor removido en el evaporador. [kJ]

$\dot{Q}_L$  - Calor removido en el evaporador respecto al tiempo. [kW]

$\dot{Q}_{evap}$  - Capacidad de enfriamiento. [kJ]

$m$  - Carga de refrigerante dentro del sistema. [kg]

$\dot{m}$  - Flujo másico. [kg/s]

$\dot{W}_{comp}$  - Consumo de energía eléctrica suministrada al compresor y demás componentes. [kJ]

$E_{an}$  - Consumo de energía por año. [kWh/años]

$E_{ent}$  - Energía agregada [kJ]

$E_{sal}$  - Energía removida [kJ]

$h_1$  - Entalpía con respecto a la masa en la entrada del compresor [kJ/kg]

$h_2$  - Entalpía con respecto a la masa en la salida del compresor [kJ/kg]

$h_3$  - Entalpía con respecto a la masa en la salida del condensador [kJ/kg]

$h_4$  - Entalpía con respecto a la masa en la entrada del evaporador [kJ/kg]

$H_1$  - Entalpía en la entrada del compresor [kJ]

$H_2$  - Entalpía en la salida del compresor [kJ]

$H_3$  - Entalpía en la salida del condensador [kJ]

$H_4$  - Entalpía en la entrada del evaporador [kJ]

$EN_P$  - Potencia eléctrica Neta promedio [kW]

$EE_P$  - Excedentes eléctricos promedio [kW]

$GEN_P$  - Generación eléctrica Neta promedio [kW]

$IE_P$  - Importaciones eléctricas promedio [kW]

$L_{an}$  - Tasa de fugas. [kg/s]

$W_{neto}$  - Potencia proporcionada por el compresor. [W]

$n$  - Vida útil de un sistema. [Años]

### **Letras griegas.**

$\alpha_r$  - Factor de recuperación/ reciclaje del gas refrigerante al final de vida útil.

$\Delta$  - Cambio de un estado a estado.

$\epsilon$  - Factor de emisión indirecta de kg de CO<sub>2</sub>.



**Abreviaciones.**

*COP* Coeficiente de desempeño

*EER* Razón de eficiencia energética

*GWP* Potencial de calentamiento global

*IHX* Intercambiador de calor interno

*ODP* Potencial de agotamiento del ozono

*TEWI* Impacto equivalente total de calentamiento

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Nomeclatura</b>	<b>VI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Estado del arte . . . . .	6
1.2.1. Historia de los refrigerantes . . . . .	6
1.2.2. Refrigerante de interés . . . . .	7
1.2.3. Refrigerante R-448A . . . . .	8
1.2.4. Opciones para el remplazo del refrigerante R-404A . . . . .	11
1.3. Hipótesis . . . . .	16
1.4. Objetivo General . . . . .	17
1.5. Objetivos específicos . . . . .	17
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>18</b>
2.1. Ciclo Termodinámico de refrigeración . . . . .	19

---

2.2. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor . . . . .	20
2.2.1. Válvula de expansión . . . . .	20
2.2.2. Intercambiadores de calor . . . . .	21
2.2.3. Elementos de una unidad condensadora . . . . .	25
2.2.4. Control de la válvula de expansión. . . . .	30
2.3. Gases refrigerantes . . . . .	31
2.3.1. Mezclas de refrigerantes . . . . .	32
2.4. Marco ambiental . . . . .	34
2.4.1. Capa de ozono . . . . .	34
2.4.2. Efecto invernadero . . . . .	35
2.4.3. Protocolos Ambientales . . . . .	36
2.4.4. Métricas ambientales . . . . .	39
2.4.5. Factor de emisiones indirectas . . . . .	43
<b>3. Metodología</b>	<b>45</b>
3.1. Metodología General . . . . .	46
3.2. Planificación del trabajo . . . . .	46
3.3. Instalación experimental . . . . .	47
3.4. Cámara de Ambiente Controlado . . . . .	50
3.5. Instrumentación . . . . .	51
3.5.1. Flujómetro . . . . .	51

---

3.5.2. Transductores de Presión . . . . .	52
3.5.3. Termopares y RTD . . . . .	53
3.6. Control de la válvula de expansión . . . . .	54
3.7. Estrategia de adquisición de datos y control . . . . .	56
3.7.1. Equipos e instrumentos para la adquisición de datos . . . . .	57
3.8. Método aplicado . . . . .	62
3.8.1. Evaluación de la carga de refrigerante . . . . .	63
3.8.2. Evaluación de la carga térmica . . . . .	63
3.8.3. Evaluación de la válvula de expansión . . . . .	65
3.8.4. Evaluación de temperatura ambiente de operación . . . . .	65
3.9. Coeficiente de desempeño (COP) . . . . .	67
3.10. Relación de eficiencia energética (EER) . . . . .	68
3.11. Impacto total de calentamiento equivalente TEWI . . . . .	69
3.12. Casos de estudio . . . . .	70
<b>4. Resultados</b>	<b>71</b>
4.1. Casos de estudio . . . . .	72
4.1.1. Condiciones experimentales . . . . .	72
4.1.2. Carga de refrigerante R-404A . . . . .	73
4.1.3. Carga de refrigerante R-448A . . . . .	78
4.2. Comparación de refrigerantes. . . . .	84

---

4.2.1. Evaluación de carga de refrigerante. . . . .	84
4.3. Estudio de Impacto Total de Calentamiento Equivalente TEWI . . .	95
<b>5. Conclusiones</b>	<b>98</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	99
5.2. Trabajos Futuros . . . . .	102
<b>Autobiografía</b>	<b>110</b>

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*En este capítulo se muestra el alcance del estudio que busca dar una dirección al actual uso de refrigerantes con una opción sustentable y responsable con el medio ambiente. Para seguir con el uso a corto plazo de equipos de refrigeración convencionales en procesos de la industria y procesos comerciales en el mundo, así como el estado del arte donde se presenta la evolución de los sistemas de refrigeración y gases refrigerantes.*

*A nivel mundial, se ha buscado que los refrigerantes de alto impacto ambiental, sean sustituidos por compuestos de generaciones recientes. El refrigerante R-404A es ampliamente utilizado en la refrigeración comercial, desafortunadamente está sujeto a regulaciones ambientales. Se cuentan con opciones de reemplazo, sin embargo, por cuestiones de compatibilidad se busca un gas refrigerante que pueda realizar una sustitución que no modifique o altere el equipo de refrigeración construido principalmente para trabajar con el R-404A.*

*Finalmente, se presenta el planteamiento de la investigación por medio de una hipótesis que busca tener una suposición clara para este trabajo y que dará inicio para esta investigación. El objetivo general y los objetivos específicos serán también parte de este capítulo para tener conciencia del orden y tener una trayectoria fija que se busca en este trabajo de investigación.*

## 1.1 MOTIVACIÓN

La refrigeración se ha vuelto una parte importante en la vida de las personas, esta importancia ha aumentado en aplicaciones como la conservación de los alimentos, en el aire acondicionado para el confort humano, el cuidado a la salud y la industria en general que requiere diversos procesos de enfriamiento.

La preservación de alimentos tiene un papel importante, una aplicación es mantener los alimentos frescos a una temperatura cercana a  $0^{\circ}\text{C}$ , mientras que la conservación que evita la generación de microorganismos, requiere temperaturas inferiores al punto de congelación del agua. Otras aplicaciones incluyen el acondicionamiento del aire para recintos donde la escala de esta temperatura es para el confort humano que logra ser mayor a los  $15^{\circ}\text{C}$  [1] [2].

En el campo del sector salud, algunos compuestos se mantienen en una temperatura fresca evitando la descomposición. Numerosos procesos industriales, también requieren de la refrigeración, donde se encuentran procesos químicos, o procesos mecánicos elaborado por maquinas por citar unos ejemplos. Esta importancia de la refrigeración ha logrado el aumento de hasta un 20 % del consumo eléctrico para la demanda mundial, que según el Instituto Internacional de la Refrigeración predice que puede llegar a duplicar el consumo para el 2050 [3].

El aumento del consumo eléctrico que satisface las necesidades humanas vista en los últimos años, no es la única preocupación, sino que la contaminación al medio ambiente es una problemática latente. Las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la refrigeración son alrededor de un 7.8 %, donde las fugas directas de refrigerante fluorados como los CFCs, HCFC y HFC cubren el 37 %, y las emisiones indirectas que se forman por la producción de electricidad necesaria para la alimentación de los sistemas relacionados a la refrigeración (producción y transporte de la energía eléctrica) abarcan el otro 63 % [4].

Hoy en día, varios sistemas de refrigeración comerciales operan con refrigerante R-404A. Este refrigerante está compuesto por una mezcla de refrigerantes, que son de diferentes volatilidades y en el proceso de condensación o de evaporación a través de un sistema de refrigeración, la composición y temperatura de saturación varía debido a los elementos más volátiles que se evaporan en una proporción mayor. El líquido faltante es de menor concentración a comparación del componente más volátil por lo que pasa a tener una mayor acumulación de los componentes de baja volatilidad. A las mezclas con estas características se les conoce como un refrigerante zeotrópico. El refrigerante R-404A, es utilizado principalmente para equipos de media/baja temperatura por su composición de varios refrigerantes que constituye el R-125/R-143a/R-134a (en porción de masa de 44/52/4 % respectivamente) donde los componentes son principalmente Hidrofluorocarbonos (HFCs). Esta combinación lo hace un remplazó al R-502, y a su vez a R-22.

Debido a sus características, el refrigerante R-404A es muy utilizado en la industria de la refrigeración. Los Hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) habían dominado en una generación debido a su forma de obtención, sin embargo, el protocolo de Montreal (1987) propone la reducción gradual del uso de los HCFCs ya que son catalogados como destructores de la capa de ozono [5]. El refrigerante R-404A es un refrigerante incoloro, no inflamable y de baja toxicidad que cuenta con una clasificación de seguridad ASHRAE A1. Tiene cero potencial de agotamiento del ozono (ODP) y según la literatura un potencial de calentamiento global (GWP) de 3943 [6] [7].

La preocupación por el calentamiento global y la reducción de la capa de ozono dieron origen al Protocolo de Montreal y tiempo después se concientizó el cuidado al medio ambiente donde se implementó el protocolo de Kyoto (1997), donde busca limitar y reducir las emisiones de efecto invernadero.



El remplazo del refrigerante R-404A es una posible solución para los equipos que fueron diseñados y que operan para el manejo de este refrigerante. Esta posible solución, ayudaría a que no se necesiten nuevos equipos de refrigeración para cumplir la reglamentación derivada de los protocolos internacionales. Estamos en un proceso de cambio para dar la bienvenida a las nuevas tecnologías en el área de la refrigeración, como puede ser la utilización del CO<sub>2</sub> como un refrigerante ya que cuenta con un panorama prometedor en la refrigeración [8], sin embargo, esta tecnología necesita de tiempo para su completo desarrollo y comercialización.

El uso de mezclas de refrigerantes ayuda a tener diversidad en las características de los refrigerantes, estas mezclas tienen que ser compatibles entre sí y no deben tener reacción química uno sobre el otro, ni al instante, ni tampoco en un tiempo prolongado. Respecto a los refrigerantes halogenados no se tienen estos problemas ya que por su naturaleza son de composiciones similares. En sistemas de refrigeración cerrados, las mezclas no deben tener ninguna consecuencia por el aislamiento eléctrico y debe ser estable para operar sin problema alguno.

El estudio de las mezclas de refrigerantes permite adecuar características de interés de los refrigerantes, aspectos de interés de los refrigerantes, tales como un GWP más amigable para el medio ambiente, una temperatura y presión crítica más manejables o que cumplan y se adapten en varias tecnologías del área de la refrigeración [9].

Un refrigerante de interés, usado como reemplazo del R-404A es el refrigerante R-448A que es una mezcla zeotrópica compuesta de R32/R125/R134a/R1234yf/R1234ze (26/26/20/21/7 en % de masa, respectivamente) resultando en un refrigerante no inflamable y de bajo GWP de 1205 [10]. El refrigerante R-448A puede ser un sustituto del R-404A en diversos sistemas centralizados como en baja y media temperatura [7]. Sin embargo, el R-448A al ser un refrigerante que opera en condiciones termodinámicas parecidas al R-404A no existe garantía de la completa sustitución ya que se han presentado estudios con otros refrigerantes donde tienen que realizar pequeñas

modificaciones en la válvula de expansión [11], o bien, de equipos de refrigeración que no se desempeñan de una manera adecuada en comparación del R-404A. En algunos casos puede tener efectos adversos como un mayor consumo eléctrico [12]. El aumento del consumo eléctrico podría ser una justificación válida por el cuidado de los efectos nocivos al medio ambiente que trae el refrigerante R-404A. También la construcción y modelado de nuevos sistemas de refrigeración diseñados enteramente para el mejor aprovechamiento del refrigerante R-448A podría también ser una idea válida. Algunas de las propiedades de interés en estos refrigerantes, se pueden ver en la Tabla 1.1

Tabla 1.1: Características de los refrigerantes R-404A y R-448A [10]

Propiedades	R-404A	R-448A
Tipo	HFC	HFC/HFO
Clasificación de seguridad ASHRAE	A1	A1
ODP	0	0
$GWP_{100años}$	3750	1390
Temperatura Crítica [°C]	72.14	83.7
Presión Crítica [kPa]	3,735	46.6

## 1.2 ESTADO DEL ARTE

### 1.2.1 HISTORIA DE LOS REFRIGERANTES

En la refrigeración que opera con el principio de compresión de vapor se opera con un fluido de trabajo, éste cuenta con propiedades que van ligadas a las diferencias de las temperaturas entre un recinto de interés a enfriar y la temperatura ambiente. La presión de este fluido de trabajo debe ser mayor a la atmosférica cuando se trata de un gas para evitar la infiltración de aire y debe tener una alta entalpia al momento de evaporarse [5].

Los primeros refrigerantes, fueron solventes y otros fluidos volátiles. Conocidos como la primera generación. Casi todos los primeros refrigerantes eran inflamables, tóxicos o ambos, y algunos también eran altamente reactivos con materiales utilizados en la construcción de equipos de refrigeración.

La segunda generación de los refrigerantes va ligada a la seguridad de las personas que utilizaban y daban mantenimiento a un sistema de refrigeración, tanto doméstico como industrial. Debido a problemas de salud y accidentes que ocurrían al trabajar con los sistemas de refrigeración se optaron por nuevos refrigerantes, los cuales no eran tóxicos para los seres humanos, tampoco eran corrosivos ni inflamables, un punto importante para frenar los accidentes relacionados con los sistemas de refrigeración. El desarrollo y el avance en el uso de los refrigerantes considerados sintéticos fueron cada vez más aceptados debido a que los refrigerantes buscan ser considerados químicamente estables para su uso. El deterioro de la capa de ozono y el efecto invernadero son una preocupación latente en todo el mundo que fueron originados por esta generación de refrigerantes, debido al interés de un mejor rendimiento en equipos de refrigeración.

La tercera generación de los refrigerantes se caracteriza por el uso de los refri-

gerantes sintéticos que no deterioran la capa de ozono y evitan el efecto invernadero, donde se tomaron acciones con el protocolo de Montreal (1987) y el protocolo de Kioto (1997) [5].

Actualmente nos encontramos en la cuarta generación de los refrigerantes, donde persiste el problema del calentamiento global, debido a este problema el protocolo de Montreal obtuvo una extensión llamada la enmienda de Kigali (2016).

Hoy en día se están haciendo esfuerzos para cumplir los protocolos y las enmiendas antes mencionadas. El Reino Unido emitió nuevas reglas para gases fluorados que prohíben el uso de los refrigerantes de alto nivel de GWP en sistemas de 40 toneladas a partir de enero del 2020 [13] quedará prohibido el uso de refrigerantes de HFCs con un GWP superior a los 2500 en sistemas de refrigeración o congelación [14].

### 1.2.2 REFRIGERANTE DE INTERÉS

En la actualidad, se han buscado refrigerantes sustitutos que tengan características en la operación similares y una reducción de los efectos adversos en el medio ambiente, como en el caso del refrigerante R-134a. El R-134a tiene características que lo hacen un refrigerante muy usado en equipos de refrigeración, como el caso de aplicaciones de alta, media y hasta bajas temperaturas con ayuda de componentes como la modificación de una válvula o la carga de refrigerante. El refrigerante R-134a es un refrigerante muy estudiado y de diversas aplicaciones, con la desventaja de un GWP de 1430 [10], valor que se encuentra por encima del acordado en los protocolos internacionales antes mencionados. Sin embargo, la introducción de refrigerantes como el R-1234yf son un sustituto viable para los equipos que operan originalmente con R-134a, con un GWP de 4 [15]. A pesar de ser un sustituto prometedor se requiere de más validaciones para los demás sistemas de refrigeración que operan con el R-134a, los cuales están diseñados con el R-134a, pero no significa

que puedan funcionar de manera adecuada con el cambio del refrigerante. Problemas como el aumento de consumo energético y un bajo rendimiento de desempeño (COP) pueden ser solucionados con un remplazo o rediseño de un componente que logren crear nuevos sistemas de refrigeración que logren operar de una manera más eficientes con el R-1234yf [16].

El refrigerante R-404A tiene una similitud con el refrigerante R-134a con respecto a la problemática medio ambiental. La mezcla del R-404A puede trabajar en temperaturas de evaporación que lo posicionan en refrigeración de media/baja temperatura debido a su composición. Con un valor de 0 de ODP, sin embargo, con un valor de GWP de 3800 [17] [18].

El interés por el medio ambiente ha llevado a investigaciones a encontrar un sustituto a corto plazo del R-134a, con el interés de disminuir el GWP. Esta clase de investigación también está pensada para el refrigerante R-404A, ya que en su composición se encuentra el refrigerante R-134a, siendo una adecuación para cubrir las necesidades de los equipos de refrigeración originalmente construidos con el R-404A. Uno de los sustitutos principales es el refrigerante R-448A.

### 1.2.3 REFRIGERANTE R-448A

El refrigerante R-448A es una mezcla zeotrópica no inflamable con bajo GWP, desarrollado para reemplazar el refrigerante R-404A. El R-448A tiene dos HFOs como reemplazos del R-134a, el R-1234yf y R-1234ze(E) que presentan ambos una baja inflamabilidad, no son tóxicos y sus valores de GWP son 4 y 6, respectivamente.

Existen trabajos en la literatura abierta donde un reemplazo del refrigerante R-404A por el R-448A, con un amplio rango de condiciones de evaporación y condensación en sistemas de compresión de vapor sin ninguna modificación en el equipo, con excepción en el ajuste de la válvula de expansión. Se encontró que el R-448A presentó un valor reducido de eficiencia volumétrica en el compresor, a su vez un

mayor flujo másico, más capacidad de enfriamiento y mayor consumo energético que el R-404A. Se encontró un coeficiente de desempeño COP mayor. Estos resultados sugieren que el desempeño del sistema de refrigeración es más adecuado si el diseño es acorde al refrigerante R-448A ya que debe tener su propio diseño para el sistema de refrigeración. Se encontró también que, en términos de capacidad de enfriamiento, el refrigerante R-448A puede ser una buena alternativa para aplicaciones de media temperatura (conservación de alimentos) y posiblemente no sea suficiente para aplicaciones de baja temperaturas (congelamiento) debido a la baja capacidad de enfriamiento. También el refrigerante R-448A es mejor que el R-404A por su gran temperatura de condensación que hace posible una mayor versatilidad de temperaturas en el condensador pudiendo liberar más energía debido a las diferencias de temperatura y puede ser considerado como una buena alternativa en países cálidos [6].

En otra investigación se encontró que el refrigerante R-448A puede operar de manera similar al R-404A hablando en términos de eficiencias energéticas en equipos de refrigeración. En un estudio teórico donde se evaluaban seis alternativas para el R-404A en cuatro configuraciones de compresión de vapor, se encontró que el R-448A resultó en la mejor eficiencia energética, evaluado en dos arquitecturas diferentes, con media y baja temperaturas de evaporación y en dos niveles de temperaturas de condensación diferentes [19].

En un sistema de refrigeración de supermercado a pequeña escala se trabajó la eficiencia energética combinada de temperatura baja y media del sistema con R-448A, donde se encontró que la eficiencia del refrigerante R-448A puede ser hasta un 11 % más alta que el R-404A [20]. Se llevaron a cabo pruebas con unidades de condensación de temperatura media y baja en condiciones de clasificación típicas y demostraron que el R-448A tiene un coeficiente de rendimiento hasta un 16 % más alto y casi igual a la capacidad de refrigeración del R-404A [21].

Se ha trabajado también con una máquina de hielo con un condensador remoto

donde se realizaron pruebas con el R-448A en un sistema diseñado para R-404A. Se encontró que el R-448A muestra alrededor de un 2 % más de capacidad de producción de hielo y un 3 % menos de consumo de energía que el R-404A [22].

En un trabajo donde se evaluó el comportamiento de un modelo de evaporador de micro canales en un modelo de aletas, se comparan los resultados del refrigerante R-448A y del R-404A. Dichos resultados presentan una gran diferencia en todos los parámetros estudiados, en este caso la presión de evaporación, el flujo másico y el sobrecalentamiento. Estos cambios fueron por los efectos de la diferencia de temperatura y de presión en la etapa de saturación de cada refrigerante, por lo que el cambio de fase puede llegar a tener un impacto importante al momento utilizar el refrigerante R-448A [7].

Respecto al comportamiento del condensador en un equipo de refrigeración usando el refrigerante R-448A, se encontró que los coeficientes de transferencia de calor del R-448A son más altos que los del R-404A, por lo que el flujo másico y las caídas de presión para el refrigerante R-448A, son alrededor de un 3.3 % mayores que el R-404A. Por otra parte, el calor latente de vaporización del R-448A es aproximadamente 24 % mayor que el R-404A a los  $0^{\circ}C$ , por lo que los sistemas de refrigeración que operan usando el refrigerante R-448A como sustituto del R-404A, podría tener un comportamiento diferente en el flujo másico [23].

En un estudio teórico donde se buscó un refrigerante sustituto del R-404A por un refrigerante de menor GWP, se encontró que el coeficiente de rendimiento COP más alto, resultó ser el R-448A a diferencia de otros refrigerantes de interés como el R-452A, R-449A y el R-404A. Aparte del estudio energético, se desarrolló un estudio exegético donde se encontró que el más eficiente fue el R-448A. De acuerdo a estos resultados se concluye que el R-448A y el R-449A son ambientalmente y exegéticamente buenos sustitutos para el R-404A [24].

## 1.2.4 OPCIONES PARA EL REMPLAZO DEL REFRIGERANTE

### R-404A

Debido a los protocolos y normativas puestas en Europa y en E.U., se han buscado alternativas de gas refrigerante que satisfagan los variados tipos de sistemas de refrigeración que existen en la actualidad en diferentes aplicaciones y en tecnologías de la refrigeración. La opción de la sustitución del refrigerante R-404A es una solución a corto plazo para poder satisfacer las normativas y los protocolos antes mencionados, y nos ayuda a entender mejor los refrigerantes sintéticos.

El refrigerante R-407H que corresponde a una mezcla no azeotrópica de R-32/R-125/R-134a (en porción de masa de 32.5/15.0/52.2%) diseñado para ser un sustituto del R-404A y del R-507A. El R-407H puede operar con lubricantes tipo POE (Aceite Polioléster). El refrigerante R-407H tiene un GWP de 1,378, que es un 65.8% menor que el GWP del R-404A. Otro aspecto importante del R-407H es su diferencia en el volumen específico de vapor, donde tiene un alto volumen específico a comparación del R-404A (76.3% a  $-30^{\circ}\text{C}$  de saturación), resultando en un refrigerante con menor flujo másico, y pudiera afectar en las válvulas de expansión del compresor diseñado para operar con R-404A, donde resulta en un tiempo prolongado en la operación para el ciclo de refrigeración con el refrigerante R-407H. En un aspecto teórico de evaluación del desempeño energético, el COP resultó ser alto en comparación del R-404A en diversas temperaturas de condensación, mostrando incrementos de 8.6% a  $25^{\circ}\text{C}$  hasta 21.7% a  $45^{\circ}\text{C}$ . Por lo que el R-407H puede ser un buen candidato al momento de compararlo contra el R-404A [25]. En otro estudio se encontró que los valores del coeficiente de rendimiento COP fueron un 15% más altos que los del R-404A y también se observó que el refrigerante R-407H tiene una mayor vida útil de trabajo a comparación del R-404A [26].

Otros refrigerantes similares al R-407H, pero en diferentes proporciones, podrían ser buenos candidatos para reemplazar el R-404A. Estos son R-407A y R-407F que tienen los mismos componentes R-32/R-125/R-134a (en porción de masa de 20/40/20%)



y 30/30/40 % respectivamente). El coeficiente de desempeño evaluado para el R-407A con respecto al R-404A tuvo una reducción del 12 %, mientras que del refrigerante R-407F se observó una reducción también del 16 %. Estos puntos positivos se pueden evaluar en los sistemas de refrigeración donde son descartados debido a los valores altos de GWP, estos valores fueron de 2,107 para el R-407A y 1,825 para el R-407F [27].

Otro refrigerante que ha sido estudiado como reemplazo del R-404A, es el refrigerante R-452A. Este refrigerante se conforma de R-32/R-125/R-134a (en porción de masa de 30/11/59 %), es una mezcla zeotrópica que tiene un GWP de 1950. La entalpía de evaporación del R-452A es aproximadamente equivalente al R-404A, sugiriendo un flujo másico similar a la capacidad de refrigeración. Por otra parte, la entalpía de vaporización del R-448A es un 38 % superior que la del R-404A, resultando en un efecto adverso en la transferencia de calor en el condensador [23].

La evaluación de los coeficientes de transferencia de calor y de la caída de presión del R-404A con los dos candidatos, el R-448A y el R-452A, fueron evaluados a tres condiciones de saturación de 40, 50 y 60 °C. Se encontró que los coeficientes de transferencia de calor del R-448A son más altos que los del R-404A y del R-452A en una misma condición de flujo másico. Para el mismo flujo másico, las caídas de presión del R-448A y del R-452A son predichas en promedio de un 81 % y son 3.3 % mayores que el del R-404A. El calor latente de vaporización del R-448A es aproximadamente 24 % mayor que el del R-452A y el R-404A a los 0°C, por lo que en un sistema de refrigeración usando estos refrigerantes van a operar de manera diferente por el flujo del refrigerante. El refrigerante R-448A y el R-452A son mezclas zeotrópicas, y la separación de los refrigerantes de la mezcla al cambiar de fase, perjudican la transferencia de masa ya que el cambio de fase de los diversos componentes que constituyen la mezcla zeotrópica pueden obstruir el flujo del refrigerante, y resultar en una degradación de la transferencia de calor en comparación con los refrigerantes puros [23].

Existe otro estudio donde se evaluó el refrigerante R-452A en un sistema de refrigeración de transporte. Se encontró que el refrigerante R-452A tiene una menor reducción de emisiones (5 - 15 %) para los sistemas de transporte de alimentos. También se hicieron comparaciones de presión - entalpia y temperatura - entropía para los fluidos de trabajo R-404A y R-452A. Según este mismo estudio, se observó que el R-452A es adecuado para el remplazo del R-404A, al igual que el R-448A [28].

En un estudio teórico se trabajó por medio de una simulación de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, y se observó el desempeño energético y exegético del sistema. En dicha simulación se encontró que el análisis con el mayor desempeño energético COP fue el R-448A a diferencia del otro refrigerante que se evaluó, donde estaba el R-452A y el R-404A [24].

Los refrigerantes R-448A y R-449A fueron evaluados y comparados en las características de transferencia de calor como sustitutos del R-404A en tubos de micro aletas de 9.5 mm, donde se observó que el R-448A y R-449A tienen unos coeficientes de transferencia de calor menores en comparación del R-404A. Debido a la diferencia de temperatura y presión en el punto de saturación de los refrigerantes, se encontró que los coeficientes de transferencia de calor del R-449A son mayores que el R-448A [29].

El refrigerante R-449A es una mezcla de R-32/R-125/R-134a/R-1234yf (en proporción de masa de 24.3/24.7/25.7/25.3 % respectivamente) desarrollada para ser un remplazo del R-404A en sistemas de refrigeración de supermercados. Al igual que el R-404A, el R-449A es un refrigerante no inflamable y no tóxico y tiene la clasificación del ANSI/ASHRAE de A1. Los productos de descomposición térmica peligrosos del R-449A pueden incluir óxidos de carbono, fluoruro de hidrógeno, fluorocarbonos y fluoruro de carbonilo [30], estos productos son similares a los producidos a partir del R-404A y otras alternativas sintéticas. Además, el R-449A es un refrigerante que no agota la capa de ozono y su GWP es casi tres veces menor que la del R-404A (GWP del R-449A de 1282), por lo que el impacto negativo del R-449A al cambio climático

---

bajo fuga de gas (emisión directa) es menor que la del R-404A. El R-449A es un fluido más viscoso que afectaría en un mayor consumo energético a comparación del refrigerante R-404A. Finalmente, el mayor calor latente de vaporización del R-449A puede compensar el menor caudal másico; por lo tanto, la capacidad de enfriamiento sería cercana a la del R-404A [29].

En un estudio donde se evaluó un sistema de refrigeración el R-449A como sustituto del R-404A se encontró que la principal diferencia en cuanto a las propiedades de los refrigerantes fue en el deslizamiento de temperatura (+4.9 K para R-449A a 0.1 MPa), la densidad de vapor y la conductividad térmica del líquido (-26 % y +26 %, respectivamente). El funcionamiento de ambos refrigerantes el R-404A y el R-449A en un sistema de refrigeración media no presentó diferencias significativas. El reemplazo del R-404A con el R-449A requirió de una modificación en el controlador de la válvula de expansión para su correcto control de puntos de saturación para el refrigerante y la carga de refrigerante. Los grados de subenfriamiento y sobrecalentamiento del R-449A fueron ligeramente más bajos, como también ocurrió para las temperaturas medidas de funcionamiento de los intercambiadores de calor [11]. La temperatura de descarga del R-449A fue superior a la del R-404A y alcanzó valores de hasta 91 °C. Por lo tanto, al adaptar los sistemas que trabajen con R-404A, se debe prestar atención a las temperaturas de descarga de compresor. Por lo que el uso del R-449A es un sistema de R-404A no da como resultado un mayor desempeño energético, existe un beneficio ambiental si se actualiza el R-449A que proviene de la reducción del CO<sub>2</sub>, emisiones debidas a fuga de gas y pérdidas por recuperación [11].

El interés de la evaluación de los coeficientes de desempeño y el coeficiente energético también fue importante para la evaluación del R-449A, donde también se encontró que era ambiental y exegéticamente buen sustituto para el R-404A [24].

### 1.3 HIPÓTESIS

El cambio de refrigerante de R-404A a R-448A en un sistema de refrigeración promete ser una buena opción con un desempeño similar, pero de menor impacto ambiental. El reemplazo del gas refrigerante R-404A por refrigerantes de bajo GWP evaluados como de cuarta generación es factible debido a la compatibilidad con el equipo de refrigeración y la similitud en las propiedades físicas. Sin embargo, el desempeño termodinámico se podría ver disminuido por las características termodinámicas, y condiciones de operación ambientales, esto podría también añadir efectos adversos. Se busca un desempeño adecuado del nuevo refrigerante R-448A con un menor impacto ambiental, en un equipo construido originalmente para contener R-404A.

La sustitución del refrigerante R-404A por un refrigerante de bajo GWP es una posibilidad debido a que existe la compatibilidad con el equipo de refrigeración debido a la similitud de las propiedades físicas. En la sustitución se esperan mejoras en el coeficiente de desempeño y en las características termodinámicas, esto podría implicar una sustitución completa de refrigerante sin la necesidad de alterar el equipo de refrigeración y con un menor impacto ambiental.

## 1.4 OBJETIVO GENERAL

Evaluación del desempeño de un sistema de refrigeración de media/baja temperatura, usando el refrigerante R-448A como sustituto de bajo GWP al R-404A.

## 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el sistema de refrigeración a estudiar, e instrumentación.
- Determinar carga de refrigerante, niveles de temperatura ambiente.
- Evaluación del sistema de refrigeración con cada refrigerante.
- Planteamiento de la metodología para la realización de evaluaciones que definan el desempeño.
- Realizar la comparación de resultados en la operación de un sistema de refrigeración con R-404A y R-448A.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

*Con el paso del tiempo, la refrigeración ha sido una tecnología en desarrollo donde las aplicaciones y técnicas han cambiado de diversas maneras. Debido a las necesidades de las personas, se van creando diversas funciones para satisfacer sus necesidades.*

*Las poblaciones de todos los países han mejorado su calidad de vida gracias a la contribución de la refrigeración. En los últimos años, los avances en la refrigeración han sido el efecto de grupos de técnicos, ingenieros y científicos, que han logrado unificar sus habilidades, conocimientos y experiencias.*

*En este capítulo, se hablará a detalle de fenómenos termodinámicos, los procesos de refrigeración, especialmente los equipos de refrigeración por compresión de vapor.*

## 2.1 CICLO TERMODINÁMICO DE REFRIGERACIÓN

La refrigeración se conoce comúnmente como un proceso de enfriamiento, este fenómeno donde existe una transferencia de calor de un espacio de temperatura baja hacia un espacio de mayor temperatura, la temperatura baja es una temperatura inferior a la temperatura ambiente. Dicho efecto necesita de un dispositivo que funcione de forma cíclica donde a su vez deba ser un sistema cerrado o aislado (refrigerador) y contar con un fluido que trabaje a la par con el equipo (refrigerante) para llevarlo a interactuar de diversas maneras para la absorción del calor, donde en el espacio frío del ciclo se extrae la carga de refrigeración y se ve liberado a la temperatura ambiente. Las paredes del recinto de estos sistemas de refrigeración normalmente se encuentran aisladas para delimitar el espacio a refrigerar. La refrigeración se clasifica de acuerdo con sus aplicaciones como el uso doméstico, comercial, industrial o de aire acondicionado. Se conocen muchos métodos para producir la refrigeración mecánica, sin embargo, el método más utilizado se le conoce como método de compresión de vapor [31] [32].

El objetivo del sistema de refrigeración por compresión de vapor es el mantener el espacio refrigerado a una temperatura baja al que se le extrae extrayendo el calor de un espacio aislado. La extracción de calor en este tipo de sistema, es por medio del cambio de fase que tiene el refrigerante al estarlo sometiendo lo a cambios de presión y de temperaturas, logrando así el efecto de refrigeración en el recinto y desechando el calor en el sumidero de calor. Los ciclos de refrigeración tienen términos que forman la expresión del coeficiente del desempeño (COP), por sus siglas en inglés son Coefficient of Performance [33].



## 2.2 CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Los refrigeradores trabajan por ciclos y utilizan un fluido de trabajo llamados refrigerantes [31]. El método más utilizado para enfriar o refrigerar por medio de ciclos, son los equipos de refrigeración por compresión de vapor. A continuación, se describen cada uno de los elementos.

Los cuatro componentes básicos del sistema de refrigeración por compresión de vapor son: el dispositivo de expansión, evaporador, compresor y condensador. En la Figura 2.1 se observa un diagrama del ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor. A continuación se describen cada uno de los elementos.

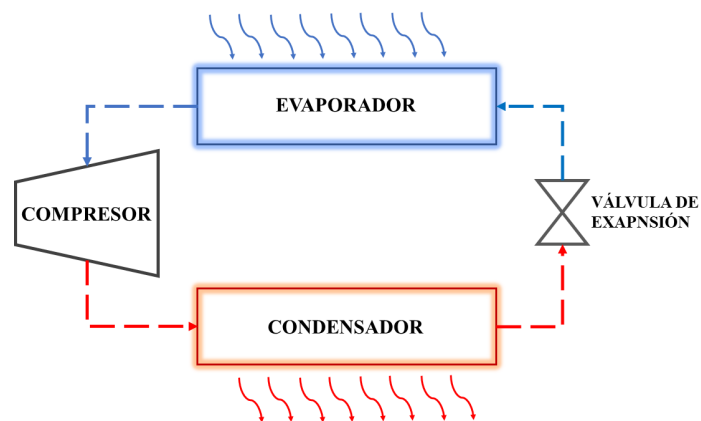


Figura 2.1: Diagrama del circuito básico de refrigeración por compresión de vapor

### 2.2.1 VÁLVULA DE EXPANSIÓN

Existen distintos mecanismos de expansión; la válvula de expansión y el tubo capilar son los más habituales. Los mecanismos son utilizados como dispositivos de control de temperatura y de presión, por lo que se ve una reducción en la presión del fluido refrigerante que pasa a través de éste. Si la presión es inferior a la presión de

saturación, la porción líquida del refrigerante comienza su proceso de evaporación. El líquido que se evapora procede a absorber el calor latente que es indispensable para su proceso de evaporación de la mezcla que fluye, dando un enfriamiento a través del flujo. El refrigerante pasa a fuera de la válvula como una mezcla de líquido y vapor a una temperatura significativamente menor.

Las válvulas de expansión electrónica son válvulas empleadas de manera frecuente, pueden usarse como válvulas de control de temperatura y de presión, entre otras aplicaciones. La válvula cuenta con un motor de pasos que hace girar un vástago que permite abrir y cerrar la válvula en respuesta a la variación de voltaje de una señal eléctrica. El uso de un controlador es indispensable para el uso de este tipo de válvulas donde se almacena las características de varios refrigerantes y por medio de la captura de parámetros, como la presión y la temperatura a la salida de un evaporador en funcionamiento, logra incrementar o reducir el voltaje de alimentación de la válvula, asimismo afectando el flujo del refrigerante. Cuando el controlador detecta la presencia de un gas sobrecalentado, tiende a abrirse, mientras que si carece de este sobrecalentamiento empieza a cerrarse. El uso de una válvula electrónica contribuye al ahorro de energía y a un uso eficiente de la misma.

### 2.2.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas, siempre que se tenga una diferencia de temperatura, entre varios cuerpos o en un cuerpo, existirá este fenómeno. Dicho fenómeno cuenta con diversos tipos de procesos, a los que se les llama modos. Detallando los tres tipos de modos en una condición de gradiente de temperatura en un medio estacionario, tenemos la conducción, convección y radiación [34] [31].

### **Conducción.**

Este modo se considera como la transferencia de energía debido a las partículas con mayor energía a las de menor energía en una sustancia u objeto, como consecuencia de las interacciones entre estos mismos. Tener en consideración, que la energía en partículas está relacionada con el movimiento traslacional aleatorio, esto provoca los movimientos internos de vibración y rotación de las moléculas. Mientras más alta sea la temperatura de la materia significa que posee una energía más alta en las moléculas, esta definición nos ayuda a entender, que las moléculas pueden empezar a chocar de una manera constante, dando a la acción de transferencia de energía de las moléculas de mayor a las moléculas de menor energía. Por esta definición se entiende que la energía pasa de estar en dirección de alta temperatura a la de menor temperatura. Esta forma de entender la energía se puede presentarse tanto en gases, líquidos o sólidos [34].

### **Convección.**

El desplazamiento de un fluido realiza en un número determinado de moléculas moverse de una forma colectiva, dicho movimiento al contar con un gradiente de temperatura puede contribuir en la transmisión de calor. El desplazamiento contribuye en el transporte de energía por el desplazamiento de un fluido y el desplazamiento aleatorio de las moléculas. Cuando este efecto se lleva a cabo, se le suele decir convección por la acumulación de moléculas mientras se desplaza. Una característica del efecto fluido-superficie es que cuenta con variaciones de velocidad que varía desde cero hasta un valor finito con relación al flujo, dicha característica posee el nombre de capa límite hidrodinámica. Si dicha característica, cuenta con una diferencia de temperatura en la placa y el fluido, se le conoce como capa límite térmica donde se producirá un efecto de transferencia de calor por convección entre el flujo y la superficie. Dicho efecto de la convección puede ser representada entre forzada causado por medio externos, por una velocidad del fluido producido por diversas causas. El efecto cuando no se producen desplazamientos por medio de fuentes externas y que

da una permanencia del fluido, se le conoce como convección natural, este efecto es gobernado únicamente por las fuerzas de empuje que sucede por medio de las diferencias de densidad del fluido, existiendo variaciones de temperatura en el fluido [34].

### Radiación.

La materia cuenta con una temperatura finita y posee energía, dicha energía es emitida por la radiación térmica del objeto. La energía es transportada por ondas electromagnéticas que logran formar un campo de radiación, la emisión se forma con la energía térmica por medio de la superficie y la velocidad a la que librea energía es por unidad de área, donde obtiene el nombre de potencia emisiva superficial. La propiedad de transferencia de calor consta de una propiedad radiativa en su superficie con el nombre de emisividad. La emisividad es una propiedad que obtiene por medio de la eficiencia de alguna superficie de emitir energía con relación de un cuerpo negro. Los cuerpos no solo emanan energía de esta forma, si no que pueden albergar una cantidad de energía e ir aumentando su temperatura [34]. En la Figura 2.3 es un ejemplo para mostrar los efectos de transferencia de calor.

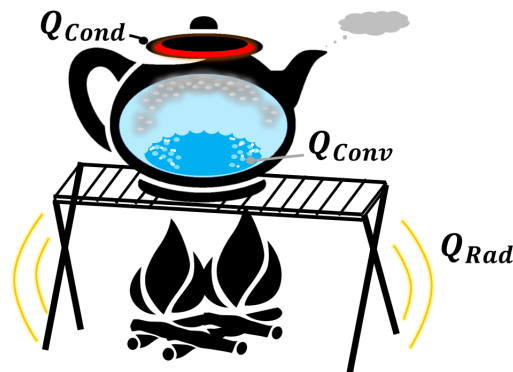


Figura 2.2: Ejemplo de los fenómenos de transferencia de calor conducción, convección y radiación.

La primera ley de la Termodinámica la cual establece que la energía no se crea ni se destruye, está presente en los sistemas de refrigeración, y se puede interpretar como el transporte de energía en forma de calor de un recinto de menor temperatura

a uno de mayor temperatura. Esta ley se puede ver en la ecuación 2.1. La energía fluye o se transfiere de un cuerpo a otro, debido a la diferencia de temperatura entre los mismos. La transferencia de calor es un procedimiento que se calcula con base a un régimen.

$$\Delta E = E_{Ent} - E_{Sal} \quad (2.1)$$

La conservación de energía en el evaporador se expresa mediante la Ecuación (2.2) donde  $\dot{Q}_L$  es el calor removido por todo el evaporador es la diferencia de entalpías en la entrada del evaporador, y se relaciona con  $h_4$  y la salida del evaporador que se interpreta como  $h_1$ .

$$\dot{Q}_L = H_3 - H_4 = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (2.2)$$

En el condensador, este fenómeno llega a comportarse con la entalpía  $h_3$  que es el valor de entalpía a la entrada del condensador y el  $h_2$  que es el valor a la salida del condensador, como se ve en la Ecuación (2.3)

$$\dot{Q}_H = H_1 - H_2 = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (2.3)$$

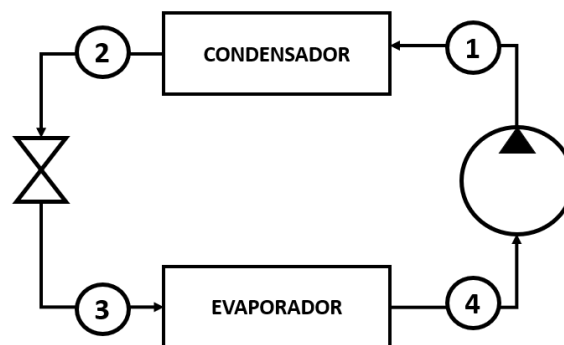


Figura 2.3: Diagrama de los puntos de interés de las entradas y salidas de los intercambiadores de calor en un sistema de refrigeración.

### 2.2.3 ELEMENTOS DE UNA UNIDAD CONDENSADORA

Las unidades condensadoras son equipos que unifican el compresor y condensador, estos dos equipos son importantes en un sistema de refrigeración. Se construyen pensando en una capacidad frigorífica propuesta, donde existen de diversas capacidades y necesidades. Dichos equipos necesitan de una válvula de expansión y de un evaporador que sean capaces de mantener la carga frigorífica de la unidad condensadora. Estos equipos están contruidos para tener una gran capacidad de enfriamiento, y se necesita de accesorios que ayudan a mantener ese correcto funcionamiento, estos accesorios se verán a continuación:

#### 2.2.3.1 RECIBIDOR DE LÍQUIDO.

El recibidor de líquido es un elemento utilizado para almacenar todo refrigerante en estado de líquido, normalmente utilizado en equipos de refrigeración para acumular el refrigerante sobrante y que no se encuentra circulando en el sistema. Puede estar localizado en la salida del condensador. No es indispensable este elemento en el sistema, puesto que algunos tipos de condensadores se pueden utilizar para almacenar el refrigerante. Un ejemplo de un recibidor de líquidos se puede observar en la siguiente Figura 2.4.



Figura 2.4: Imagen de un recibidor de líquidos.

### 2.2.3.2 SEPARADOR DE ACEITE.

Un separador de aceite es un elemento que divide el aceite que tiene del vapor caliente del refrigerante presurizado por la descarga del compresor. Esta función ayuda a prevenir la falta de aceite en el compresor, ya que la migración excesiva del aceite pudiera perjudicar el funcionamiento del compresor. En el acceso del separador de aceite, el aceite se aglomera en las paredes y cae al fondo del recipiente. Una vez pasando por el separador de aceite, se tiene un refrigerante en forma de vapor libre de aceite para el acceso al condensador. El aceite se regresa directamente por un espacio llamado cárter del compresor. Un ejemplo de un separador de aceite se puede ver en la Figura 2.5.



Figura 2.5: Imagen de un separador de aceite convencional para unidades condensadoras.

### 2.2.3.3 FILTRO SECADOR.

La admisión de humedad y de sustancias inadecuadas en el sistema son un riesgo para el funcionamiento de un equipo de refrigeración, es por eso por lo que se utiliza un dispositivo llamado filtro secador. Los filtros secadores son elementos que dependen del fluido de trabajo, normalmente se hacen selección de estos con base a su capacidad de refrigeración y el tipo de gas refrigerante. El uso de estos elementos, ayudan a tener un margen de seguridad ya que evitan la circulación de humedad al momento de cargar refrigerante dentro del sistema de refrigeración. Un ejemplo de un filtro secador se puede ver en la Figura 2.6.

El desecante es un material que cuenta con una alta afinidad por el agua y es necesario en el filtro secador. Aparte de la separación de humedad, también el filtro cuenta con una malla que separa las partículas sólidas. Se utilizan filtros adicionales antes de las válvulas automáticas y en la línea de succión ya que no poseen coladores integrales.



Figura 2.6: Imagen de un filtro secador, empleado en unidades condensadoras.



#### 2.2.3.4 PRESOSTATO DE ALTA Y BAJA PRESIÓN

Los presostatos son dispositivos que encienden un contactor eléctrico al medir una diferencia de presión seleccionado para cortar el suministro eléctrico al compresor. La función que tienen es el de proteger el equipo de refrigeración si se llegan a presiones elevadas. Normalmente se mide esta diferencia de presión en la entrada del compresor, ya que se debe evitar tener aceite en la medición. Pueden existir distintos tipos de presostatos, unos pueden ser de presión fija o ajustable y también pueden ser de función automática o manual. El presostato, debe ser instalado sobre un apoyo rígido para evitar efectos mecánicos no deseados, como la vibración que puede afectar su operación en el ajuste establecido. En la Figura 2.7 se puede observar un ejemplo de un presostato utilizado en las unidades condensadoras.

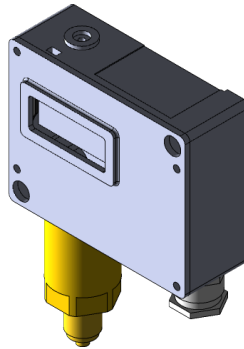


Figura 2.7: Imagen de un ejemplo de un presostato para unidades condensadoras.

### 2.2.3.5 VÁLVULAS SOLENOIDES.

Las válvulas solenoides son dispositivos utilizados en las líneas para cerrar el flujo cuando así lo disponga la operación. Son utilizados principalmente, para realizar sustituciones o cambios de algún equipo de refrigeración como un evaporador. El uso de bobinas eléctricas es necesario para el accionamiento de este tipo de válvulas. Se pueden colocar en la salida del condensador, ya que el refrigerante se mantiene en su estado de líquido y puede ser utilizado para acumular el refrigerante antes de pasar a la válvula de expansión, es aconsejable esta instalación ya que ayuda a poder hacer modificaciones al evaporador o a la válvula de expansión. Es aconsejable el uso de estas válvulas ya que se puede tener un control electrónico para el control inmediato y tener procedimientos, ya sea de encendido o de mantenimiento.

### 2.2.3.6 VISORES DE LÍQUIDO INDICADORES DE HUMEDAD.

Los visores de líquido son elementos que posibilita observar el estado de un fluido en el interior del sistema de refrigeración. Estos a su vez, pueden contar con un indicador de humedad en forma de disco colorimétrico sensible a la humedad que ayuda a evaluar la cantidad de humedad que pasa en el sistema. El disco al estar de color amarillo, indica que la humedad es mayor a lo aceptable. Estos visores o mirillas pueden instalarse en el sistema de refrigeración por medio de conexiones roscadas o bien pueden ser soldadas. Este elemento, se le puede encontrar antes o después de un filtro secador y se puede encontrar también en la entrada del compresor. Un ejemplo de un visor se ve en la Figura 2.8.

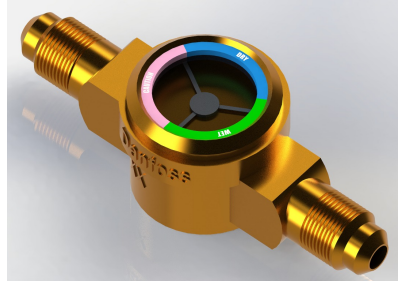


Figura 2.8: Imagen de un visor de líquido.

#### 2.2.4 CONTROL DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN.

El control de una válvula de expansión consiste en medir la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador y compararla con la temperatura de saturación a la presión de operación en ese punto, dicho valor se le conoce como sobrecalentamiento. El proceso se puede realizar mecánicamente por medio del efecto de dilatación por la diferencia de temperaturas que poseen ciertos materiales logrando una estrangulación en una válvula mecánica. Sin embargo, la aplicación de un control digital tiene una preparación con los datos de saturación de un refrigerante del equipo a controlar.

En el sistema digital va a estar dependiendo del valor propuesto de sobrecalentamiento, ya que, si el valor calculado supera el valor asignado por el control, la válvula se abrirá permitiendo el paso de una cantidad mayor de refrigerante y mayor carga térmica en el evaporador. Cuando la demanda térmica disminuye, el valor de sobrecalentamiento también se verá disminuido, mandando una señal a la válvula de expansión para restringir el paso de refrigerante. De esta forma, se mantienen una operación con un nivel de sobrecalentamiento que resulta en un desempeño adecuado del sistema. La evaluación es adecuada por medio de un manejo de refrigerante que esté por encima del punto de saturación, para tener un control de sobrecalentamiento [35] [36]. Se puede observar en la Figura 2.9 un ejemplo de un controlador.



Figura 2.9: Imagen de controlador marca Danfoss, modelo EKD 316

Esta operación es dinámica ya que conduce en la apertura y cierra de manera constante de la válvula de estrangulamiento para lograr un recalentamiento adecuado. En esta condición, existe la posibilidad de que la válvula pudiera no avanzar o no activarse en el proceso de apertura y cierra llevando a condiciones no deseada, este fenómeno se le conoce como “caza” (hunting) [37].

## 2.3 GASES REFRIGERANTES

Los refrigerantes son fluidos de trabajo que transportan la energía en forma de calor desde el nivel a baja temperatura (que se encuentra en el evaporador) hasta el nivel de alta temperatura (en el condensador), donde cede su calor al ambiente.

Las cualidades que deben considerarse de los gases refrigerantes en los equipos de compresión de vapor son:

- Una ebullición a los rangos de temperatura deseados que son por debajo de la temperatura ambiente.
- Una condensación en los rangos de temperatura más elevados que la temperatura ambiente.

Los dos puntos deben de estar a unas condiciones termodinámicas estables, seguras y

controladas. Otra característica que deben tener es un punto crítico alto, para poder tener un proceso de evaporación adecuado.

Las propiedades termodinámicas más importantes deseadas en los refrigerantes son [32]:

- Presiones de evaporación y condensación mayores a la presión atmosférica.
- Temperatura crítica elevada.
- Temperatura de congelamiento baja.
- Calor latente de evaporación elevada.
- Calor específico del vapor elevado.
- Baja viscosidad.
- Conductividad térmica elevada.

Otras propiedades que pueden ser deseables son las siguientes:

- Accesible económicamente.
- Inerte en operación.
- No explosivo.
- No tóxico.
- Compatible con el aceite mineral de los compresores.
- No dañino para el ambiente.

### 2.3.1 MEZCLAS DE REFRIGERANTES

El uso de refrigerantes mezclados ha sido de interés para diversos tipos de equipos de refrigeración y calorímetros. Las mezclas son un conjunto de dos o más

refrigerantes donde deben coincidir entre todos los elementos que la conforman, dicha compatibilidad no debe efectuar alguna reacción química.

Los aspectos benéficos pueden ser un mejor desempeño de absorción de calor, ser menos contaminante para el medio ambiente, mayor manejo de temperaturas en el evaporador o condensador, y aspectos que se adapten a las necesidades del mercado.

Las mezclas de refrigerantes pueden ser considerados de dos formas, zeotrópicas y azeotrópicas.

### **Mezclas zeotrópicas.**

Las mezclas zeotrópicas son compuestos de dos o más sustancias de las cuales dichas sustancias pueden ser simples y puras. Estas al ser mezcladas en concentraciones preestablecidas generan un gas refrigerante del cual cuenta con propiedades combinadas de sus compuestos, donde la temperatura de ebullición y de condensación pueden variar dependiendo de las cantidades de los componentes. Existen características de importancia a tomar en cuenta cuando se trabajan con mezclas, como el punto burbuja que se define como la temperatura a la cual se inicia la evaporación, otra característica de interés es el punto de rocío que se define como la temperatura a la cual se inicia el proceso de condensación. Otra característica que se cuenta es la fragmentación de la mezcla, que es la transformación de la mezcla cuando se encuentra en un proceso de líquido a vapor (evaporación) o bien, de vapor a líquido (condensación), dicha fragmentación interfiere dependiendo de los componentes y de los porcentajes que conforman la mezcla. Las mezclas también pueden tener un deslizamiento de temperatura, que es el cambio de temperatura durante la evaporación por el efecto del fraccionamiento de la mezcla.

Como dato adicional, las mezclas zeotrópicas deben de ser cargadas al equipo de refrigeración en su fase líquida, debido al fraccionamiento en su estado de reposo. Normalmente catalogan las mezclas zeotrópicas por la asociación ASHRAE por la norma ANSI/ASHRAE 34-2022 llamada "Designación y clasificación de seguridad

de refrigerantes con números de tres dígitos y que empieza con el dígito 4, después se utiliza una letra para diferenciar proporciones de masa de la mezcla. Algunos ejemplos pueden ser los siguientes: R-401A, R-401B [38].

### **Mezclas azeotrópicas.**

Las mezclas azeotrópicas están constituidas por dos o más sustancias, que pueden ser simples y puras. Estas mezclas, tienen un punto de ebullición constante que las hace comportarse como si fuera una sustancia pura, ya sea para el fenómeno de evaporación y condensación. Este tipo de mezcla combina todas las características de los refrigerantes que la componen, teniendo diferentes comportamientos dependiendo de la cantidad de masa que tienen los componentes. Las mezclas azeotrópicas se identifican con números de tres dígitos y que empieza con el dígito 5, como, por ejemplo: R-500, R-502 y R-503 [38].

## 2.4 MARCO AMBIENTAL

El cambio climático ha sido un tema de mucha importancia en los últimos años, se han visto efectos perjudiciales en diversos sectores del mundo, se han realizado proyectos e investigación de nuevas tecnologías para minimizar los efectos que son para la humanidad. Dentro del área de la refrigeración existen nuevas tecnologías para la mejora del rendimiento de equipos de refrigeración como el aprovechamiento de la energía empleada para estos sistemas, y la sustitución de gas refrigerante para una disminución de la contaminación ambiental.

### 2.4.1 CAPA DE OZONO

Se le conoce como capa de ozono al espacio en la estratósfera terrestre que contiene una manifestación relativamente alta de ozono. Esta capa, se extiende apro-

ximadamente desde los 15 km hasta los 40 km de altitud, reúne el 90 % del ozono presente en la atmósfera y absorbe del 97 % al 99 % de la radiación ultravioleta de alta frecuencia [9].

En la estratósfera, debido al oxígeno presente en el aire junto con la radiación ultravioleta forma el ozono, todo en un equilibrio dinámico. Siendo la formación más rápida que la destrucción, por lo cual el ozono tiende a acumularse, alcanzando concentraciones de hasta 10 ppm.

El planeta necesita de la capa de ozono para proteger la vida de la radiación ultravioleta emitida por el sol; la radiación no es visible debido a que tiene una longitud de onda menor que la luz, pero es mayor que la de los rayos X.

En 1985 se comprobó que la capa de ozono sobre la Antártida había desaparecido en más del 50 %. Asimismo, hacia finales de la década del 80 se había comprobado que efectivamente la destrucción de la capa de ozono se debía a la presencia en la estratósfera de CFC, HCFC y Halones, que liberan sus átomos de cloro y bromo por efecto de la radiación ultravioleta, estos átomos reaccionan con el ozono y lo destruyen, comprobándose totalmente la hipótesis de Molina y Rowland, que les hizo merecedores del Premio Nóbel de Química en 1995.

Este efecto devastador sobre la capa de ozono es causado por los CFC, tales como R-11, R-12 y R-502, por los Halones extintores de incendio y en menor grado por los HCFC como el R-22 y el R-123 [32].

#### 2.4.2 EFECTO INVERNADERO

El planeta tierra tiene la capacidad de reflejar la radiación emitida por el sol y otros fenómenos con un porcentaje alrededor de un 30 %. Debido a la dinámica de la atmósfera y los grandes océanos del planeta, logran repartir estas grandes cantidades de energía otorgadas por el sol. Sin embargo, cerca del 70 % de la radiación restante



es repartida y absorbida por la superficie de la tierra del planeta. Como consecuencia, se tienen efectos convectivos por corrientes térmicas, efectos de condensación y vaporización que logran aumentar la temperatura del planeta.

Las moléculas de gases presentes en la atmósfera almacenan la energía emitida por la radiación infrarroja. Gases como el oxígeno y el nitrógeno son transparentes, sin embargo, otros gases como el vapor de agua, el metano, el dióxido de carbono y el óxido de nitrógeno son transparentes a la radiación ultravioleta y radiación visible, pero absorben la radiación infrarroja. Se estima que la energía infrarroja que llega al nivel del mar es cercana a un 49 % de la superficie atmosférica. En resumen, cerca de la mitad de la energía emitida por el sol que entra en la superficie de la tierra. Mientras que el resto, es reflejado al exterior del planeta o es absorbido por los diversos tipos de gases que se encuentran en la atmósfera.

Se le conoce como efecto invernadero, a los gases en la atmósfera que almacena el calor, logrando elevar la temperatura de la superficie terrestre [9].

### 2.4.3 PROTOCOLOS AMBIENTALES

Los protocolos ambientales fueron hechos e implementados por el gran deterioro y el riesgo que presentaban en el planeta por el hombre. El constante crecimiento que ha tenido la población, el desarrollo que ha tenido la industria y la evolución de la tecnología, son los factores más importantes que lleva a la humanidad a buscar medidas para la reducción de efectos que perjudican al ambiente.

#### 2.4.3.1 PROTOCOLO DE MONTREAL

Las agencias estatales realizaron un acuerdo internacional conocido como el protocolo de Montreal, que tiene como objetivo la disminución dentro de la producción y el consumo de sustancias que perjudican la capa de ozono.

El protocolo de Montreal se planeó en el año de 1987 y empezó al inicio del año de 1989. Con anterioridad se había trabajado el convenio de Viena y este protocolo buscaba actualizar y reforzar las medidas para la protección de la capa de Ozono como continuación al convenio. La eliminación gradual y global de las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono, es el principal objetivo que tiene el protocolo de Montreal, entre los compuestos más importantes son los halocarbonos, que son compuestos químicos donde uno o más átomos de carbono están juntos a átomos de halógenos, como el cloro, el yodo o el flúor [39].

#### 2.4.3.2 PROTOCOLO DE KIOTO

Debido a la amenaza que abarca la alteración climática y los variados problemas que perjudicaban al medio ambiente por parte de las industrias alrededor del mundo, se decidió adoptar en diciembre de 1997 el protocolo de Kioto, que entraría en vigor hasta febrero del 2005. El protocolo fue una réplica a la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), y es un acuerdo internacional que tiene como objetivo la reducción de los gases que provocan el efecto invernadero y que son los responsables del calentamiento global, entre estos están los hexafluoruros de azufre ( $SF_6$ ), hidrofluorocarbonos (HFC) y perfluorocarbonos (PFC) como gases fluorados, y el óxido nitroso ( $N_2O$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el gas metano ( $CH_4$ ).

Cerca de 187 países en el año 2009, estuvieron de acuerdo con la propuesta del protocolo, y se firmaron acuerdos de forma particular de cada país para el cumplimiento de la reducción de los porcentajes de emisiones, con la finalidad de la reducción al medio ambiente. Este protocolo tomó gran relevancia en ser la única acción internacional para enfrentarse al cambio climático y reducir su impacto [40].

### 2.4.3.3 ENMIENDA DE KIGALI

Con el paso del tiempo, el protocolo de Montreal tuvo un agregado en el acuerdo que se dedica a las sustancias que deterioran la capa de ozono, es como se dio origen a la enmienda de Kigali, que entró en vigor en enero del 2019. El objetivo de esta enmienda es el aumento de los esfuerzos para minimizar de una forma importante los gases de efecto invernadero y así acortar el calentamiento global. La enmienda busca que durante los próximos 30 años, se reducirá en más de un 80 % el consumo y la producción de los gases hidrofluorocarbonos (HFC), así como los compuestos orgánicos frecuentemente utilizados en aires acondicionados, equipos de refrigeración y entre otros que en su funcionamiento trabajan y operan con sustancias que deterioran la capa de ozono.

Para la reducción de los HFC y realizar un reemplazo para los equipos de refrigeración entre otros, la enmienda propuso el incremento de las capacidades de los países en desarrollo, aumentar la fortaleza de las instituciones y la implementación junto con el aumento de estrategias para cumplir estos objetivos. Esta finalidad ayuda a abrir una oportunidad para el rediseño y el desarrollo de los equipos de refrigeración para el aprovechamiento de la energía.

### 2.4.3.4 ACUERDO DE PARIS

El acuerdo de Paris tiene como objetivo conservar el aumento de la temperatura global de bajo de los 2°C comparado con los inicios de la industrialización, y establece sostener los esfuerzos para reducir este aumento de la temperatura a 1.5°C. El acuerdo fue aprobado en diciembre del 2015, y busca dar frente al problema del cambio climático. Este acuerdo busca que los 195 países reorienten su desarrollo hacia un planeta más sostenible, esto implicaría una reducción en las emisiones y que cuenten con una capacidad de ajustarse a climas más extremos. El acuerdo de Paris entro en vigor a partir del año 2020.

El compromiso también apuntó en hacer énfasis en las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero acaben lo más pronto posible, tomando en cuenta que los países en desarrollo tendrían el inconveniente de tardar más en lograrlo, y desde ese momento reducir de forma rápida las emisiones de gases de efecto invernadero [41].

#### 2.4.4 MÉTRICAS AMBIENTALES

Las dos métricas ambientales habituales más usadas en los equipos de refrigeración que ayudan a señalar el impacto ambiental son: el potencial de calentamiento global (GWP), y el impacto de calentamiento total equivalente (TEWI).

##### 2.4.4.1 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (GWP)

El incremento a largo plazo de la temperatura promedio del sistema climático del planeta se le conoce como calentamiento global, y éste incremento de la temperatura da como resultado un aumento de nivel del mar por el derretimiento de los casquetes polares.

La energía proporcionada por el sol es absorbida por el planeta, el uso de productos que realizan un deterioro a la capa de ozono capturan rayos provenientes del sol, logrando un encierro en la superficie teniendo un retorno de calor, este efecto se mantiene debido a la liberación de los gases de efecto invernadero ya que se forma una capa que evita que los rayos solares sean reflejados a fuera del planeta. [42]. En el protocolo de Kioto en el marco de la convención de las Naciones Unidas se utilizó el potencial de calentamiento global (GWP) como una medición numérica que pondera el impacto de las emisiones de distintos gases de efecto invernadero.

Por medio de la comparación del impacto en el calentamiento global debido a un gas de efecto invernadero, en relación con el impacto de la emisión de una

porción parecida de  $\text{CO}_2$ , se obtiene el índice de GWP. El GWP se puede calcular para diversos periodos que van de 20, 100 o hasta 500 años, con el cual el periodo de 100 años es el más utilizado, donde se supone que no se proporciona información sobre el horizonte de tiempo. Mientras menor sea el GWP, la contribución de una sustancia al calentamiento global es menor [43].

El GWP de 20 años prioriza los gases con vidas más cortas, porque no considera los impactos que ocurren más de 20 años después de que ocurren las emisiones. Debido a que todos los GWP se calculan en relación con el  $\text{CO}_2$ , los GWP basados en un período de tiempo más corto serán mayores para los gases con una vida útil más corta que la del  $\text{CO}_2$  y menores para los gases con una vida útil más larga que la del  $\text{CO}_2$ . Por ejemplo, para el  $\text{CH}_4$ , que tiene una vida útil corta, el GWP de 100 años de 27–30 es mucho menor que el GWP de 20 años de 81–83. Para  $\text{CF}_4$ , con una vida útil de 50 000 años, el GWP de 100 años de 7380 es mayor que el GWP de 20 años de 5300 [44].

El efecto perjudicial de los refrigerantes se va sumando solo si se escapan de algún equipo de refrigeración y van dirigidos al medio ambiente. Algunos valores de GWP de los gases refrigerantes más comunes descritos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) especificados en los Informes de Evaluación (IE), se muestran en la Tabla 2.1 [44].

Valores de GWP para horizonte de tiempo de 100 años			
Nombre común	Fórmula química	IE2	IE5
Dióxido de carbono	$CO_2$	1	1
Metano	$CH_4$	21	28
Óxido nitroso	$N_2O$	310	265
CFC-11	$CCl_3F$	3800	4660
CFC-12	$CCl_2F_2$	8100	10200
CFC-13	$CClF_3$	-	13900
Halon-1301	$CBrF_3$	5400	6290
Halon-1211	$CBrClF_2$	-	1750
Halon-2402	$CBrF_2CBrF_2$	-	1470

Tabla 2.1: Algunos valores de potencial de calentamiento global (GWP) en relación al  $CO_2$  de los informes de evaluación (IE) [45].

#### 2.4.4.2 IMPACTO DE CALENTAMIENTO TOTAL EQUIVALENTE (TEWI)

El impacto de calentamiento total equivalente (TEWI, por sus siglas en inglés) es una medición que se calcula a partir del impacto del calentamiento global de los equipos de refrigeración, con base a las emisiones totales que van relacionadas de los diversos gases de efecto invernadero en el tiempo de funcionamiento de un equipo de refrigeración, junto con los fluidos que operan al final de la vida útil. El TEWI tiene en consideración tanto las emisiones directas como las indirectas que se producen alrededor de la energía suministrada del funcionamiento del equipo de refrigeración. El TEWI tiene unidades de masa en kg de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2$ -e) [46].

Para el cálculo del TEWI se suman dos porciones, que son:

1) Refrigerante que fugó durante el funcionamiento del equipo de refrigeración con relación a la vida útil, esto incluye las pérdidas no recuperadas al final de su

disposición.

2) El impacto de las emisiones de  $CO_2$  de los combustibles usados para la generación de energía eléctrica para el funcionamiento del equipo a lo largo de su vida útil.

Una de las limitaciones del TEWI es que depende de una serie de suposiciones sobre el rendimiento del equipo y los patrones de uso, las propiedades del refrigerante, y la generación eléctrica. Los valores utilizados están sujetos a una incertidumbre considerable. La metodología para el cálculo del TEWI utilizada para sistemas estacionarios de refrigeración y de aire acondicionado que funcionan por compresión de vapor utilizando una fuente eléctrica conectada a una red, se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$TEWI = GWP(\text{directa}; \text{fugas de refrigerante}) + GWP(\text{indirecto}; \text{operación}) \quad (2.4)$$

$$TEWI = (GWP \times m \times L_{an} \times n) + (GWP \times m \times (1 - \alpha_r)) + (E_{an} \times \beta \times n) \quad (2.5)$$

Las cuatro principales emisiones directas de los equipos de refrigeración y aire acondicionado son:

- Fugas pequeñas en el transcurso de la operación normal del sistema de refrigeración.
- Pérdidas desastrosas en el transcurso del funcionamiento normal.
- Pérdidas en el transcurso del mantenimiento y servicio del sistema de refrigeración.
- Pérdidas al término de la vida útil del equipo de refrigeración.

Tabla de combustibles			
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Carbón	94,600	1	1.5
Diésel	74,100	3	0.6
Combustóleo	77,400	3	0.6
Gas Natural	56,100	1	0.1

Tabla 2.2: Factores de emisión por tipo de combustible FEC [48]

### 2.4.5 FACTOR DE EMISIONES INDIRECTAS

El factor de emisiones indirectas de electricidad designado con la letra  $\epsilon$ , un valor importante para la medir la emisión de CO<sub>2</sub>, donde se busca la intensidad promedio de la generación total de la red eléctrica que es suministrada por el país. Normalmente, dicho valor es empleado para realizar estimaciones de emisiones indirectas que vienen del uso de la red eléctrica, lo cual puede variar dependiendo del año y de acuerdo con la combinación de diversos combustibles usados para la generación de la electricidad. En México se encuentra el programa GEI México, donde se puede tener el valor de  $\epsilon$  [47].

El cálculo para el factor de emisión eléctrica se obtiene mediante las emisiones totales del GEI entre la electricidad neta entregada por la red eléctrica, utilizando la Ecuación (2.6).

$$\epsilon = \frac{Emisiones[tCO_2e]}{Electricidad\ neta[MWh]} \quad (2.6)$$



Las emisiones totales del GEI se multiplican por el consumo neto obtenido de los combustibles  $i$  de cada central eléctrica  $p$  por el factor de emisión de cada carburante  $FEC_i$ , representan las *Emisiones* de la Ecuación (2.7).

$$Emisiones_{p,i} = \sum_{p,i} Consumo\ combustible_{p,i} \times FEC_i \quad (2.7)$$

Se dispone de un suministro constante de electricidad entregada por la red eléctrica, este suministro se le conoce como Electricidad neta, esta energía se obtiene por medio de una planta generadora que entrega la energía a la red y se transporta, esta se calcula como una generación bruta que debemos considerar para la energía utilizada en los usos propios de la central, junto con las importaciones de la electricidad, y agregar los excedentes que es vendidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) debido a los auto abastecedores eléctricos, esta unión de diversos parámetros se define en la Ecuación (2.8).

$$EN_P = \sum_p GEN_P + IE_P + EE_P \quad (2.8)$$

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

*El cumplimiento de los objetivos y la comprobación de la hipótesis de esta investigación se describe en el capítulo de la metodología.*

*Principalmente, se hablará de los métodos experimentales para llegar a los resultados deseados de este trabajo, y se definirán condiciones y características de los equipos evaluados.*

*Se hablará y describirá de manera detallada la instalación experimental, en donde se llevaron a cabo los experimentos, la organización de los instrumentos y el método de adquisición de datos.*

*Se detalla la ejecución y el análisis de los resultados de las evaluaciones, la generación y el estudio de los datos donde trabaja con una interpretación para esta investigación.*

## 3.1 METODOLOGÍA GENERAL

En el desarrollo de este trabajo de investigación se describe la metodología general por medio de la Figura 3.1:

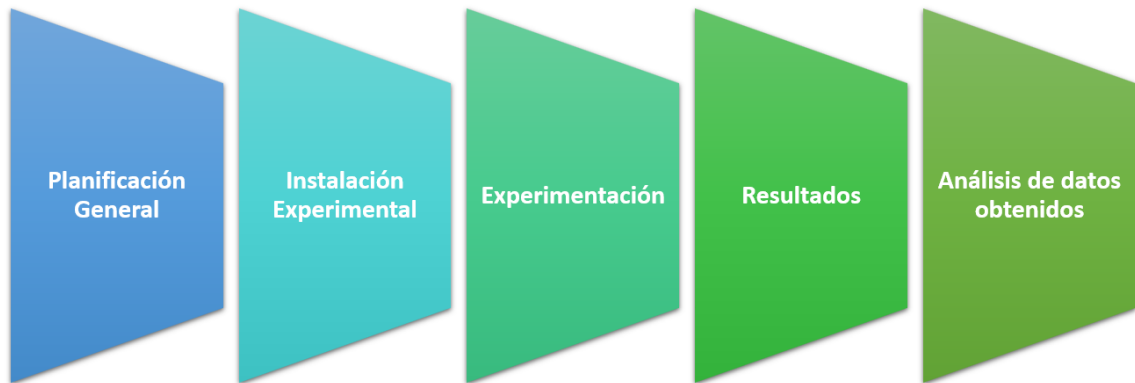


Figura 3.1: Metodología General

## 3.2 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

- Planificación general de la tesis.

A partir de una revisión detallada de la literatura, se identifican los refrigerantes que tienen las características más adecuadas para una sustitución del refrigerante R-404A. Después de la revisión se empieza a trabajar en la organización de los instrumentos y en la matriz de experimentos buscando desarrollar la hipótesis planteada.

- Instalación experimental.

Se construyó un equipo de refrigeración que opera en las capacidades de los refrigerantes y las condiciones a las que se pretende evaluar. Se encontraron y se definieron los diversos parámetros para las condiciones de operación como la carga de refrigerante, la carga térmica, y la temperatura ambiente, ya que cambios en estas características afectan el desempeño del sistema.

- Experimentación.

Definiendo los parámetros evaluados en la instalación experimental, se realizaron condiciones adecuadas para una carga de refrigerante adecuada, este parámetro es clave para el funcionamiento de la válvula de expansión que opera en las condiciones de carga térmica del evaporador.

- Resultados.

Se monitoreó la instalación experimental en funcionamiento para la obtención de los resultados, evaluando el sobrecalentamiento y la estabilidad del sistema para ambos refrigerantes de interés.

- Análisis de datos obtenidos.

Se calcularon los estados termodinámicos bajo las diferentes condiciones de operación, para presentarlos por medio de gráficos y diagramas para su fácil interpretación. Se busca contrastar los diferentes comportamientos de los refrigerantes de interés, el consumo energético y propiedades termofísicas son adecuadas para la interpretación de este estudio.

### 3.3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El evaporador a utilizar es el modelo LET120BCS como se muestra en la Figura 3.2. Se trata de un evaporador de 3 ventiladores con una capacidad de refrigeración presentada en la Tabla 3.1. En la ficha técnica se observó que la construcción del evaporador tiene como recomendación el uso de refrigerantes R-404A o R-507. Los ventiladores son energizados con un voltaje de 220 volts y están conectados en serie para la alimentación.



Figura 3.2: Evaporador seleccionado para la instalación experimental

Tabla 3.1: Características de los componentes principales del equipo de refrigeración.

Tabla de Componentes	
Componente	Características
Evaporador	Modelo LET120BCS. Capacidad 3.51 [kW], 3 Ventiladores, Flujo volumétrico de aire 3,568 [m <sup>3</sup> /h]
Unidad Condensadora	Modelo Compresor MTZ022. Velocidad 3500 [rpm] Capacidad de Refrigeración 3.65 [kW]. Potencia 1.785 [kW]
Válvula de expansión	Modelo ETS-6 Tipo motor a pasos. Capacidad 7.3 [kW]

Se realizó una caracterización de una unidad condensadora que es la unión de un compresor y un condensador. La ficha de operación de la unidad condensadora trabaja un margen de operación para las condiciones de interés, donde incluyen temperatura de condensación, temperatura de evaporación, consumo eléctrico y caudal másico por citar unos ejemplos, y que capacidad de refrigeración se podría esperar en su operación. El aceite del compresor de dicha unidad opera con el refrigerante R-404A debido a la compatibilidad que tienen entre estos dos.

El compresor modelo MTZ022 que se muestra en la Figura 3.3, tiene una capacidad de enfriamiento de 3.65 kW, como se muestra en la Tabla 3.1. Este valor es ligeramente superior al del evaporador y esto nos permite tener un margen de operación controlado para el evaporador. El compresor es de velocidad fija, tiene un aceite tipo POE 175 PZ que lo hace adecuado para operar con los refrigerantes de interés en este estudio.

La unidad condensadora cuenta con un presostato el cual cuida la alimentación del compresor evaluando la diferencia de presión y la temperatura en la salida del compresor, si detecta un cambio grande de presión o de temperatura corta el suministro eléctrico al compresor, logrando un control de seguridad para el funcionamiento de la unidad condensadora.



Figura 3.3: Unidad condensadora a utilizar en la instalación experimental

Por último, la válvula de expansión que en este caso se utilizó fue una de tipo motor de pasos, véase en la Figura 3.4, ya que una válvula electrónica ofrece un mayor control al evaluar el sobrecalentamiento. También puede ser utilizado para evaluar diversos tipos de refrigerantes puestos en su programación y puede mantener la apertura fija en la operación. Se realizaron pruebas para su funcionalidad junto con el controlador con el cual va a actuar, por otra parte, esta válvula puede trabajar en condiciones por encima del valor en el que se realiza la evaluación. Como se ve en la Tabla 3.1, sus capacidades llegan a operar en condiciones en las cuales se piensa operar el equipo de refrigeración.



Figura 3.4: Válvula de expansión electrónica marca Danfoss

### 3.4 CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO

El Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Universidad Autónoma de Nuevo León cuenta con una cámara de ambiente controlado donde se realizarán las pruebas de esta investigación. La cámara climática tiene dimensiones de 3.3 x 3.8 x 2.85 m, como se observa en la Figura 3.5.

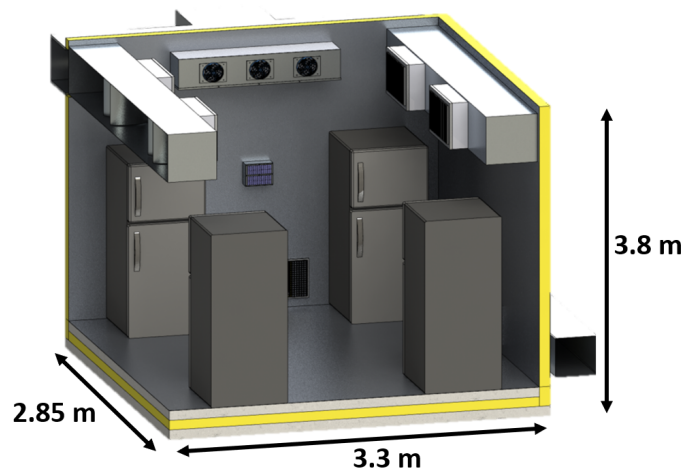


Figura 3.5: Modelo de la cámara climática del laboratorio de ambiente controlado del LIITE.

En el interior tiene una alimentación eléctrica de 110 y 220 VAC regulado y con un sistema de adquisición de datos de termopares tipo T. Esta instalación también tiene un sistema completo para el acondicionamiento de aire circundante por medio de un equipo de refrigeración, un equipo de calefacción, junto con un equipo de lectura de humedad.

La cámara climática tiene su propia unidad condensadora y cuenta con una capacidad de 6.0 kW. Esta unidad condensadora cuenta con un compresor de velocidad fija y con un consumo alrededor de los 2.92 kW. El rango de temperatura es de 0 a los 45 °C, y el rango de humedad esta entre los 30 y 95 %. El uso de la cámara ambiental ha sido dirigido para las evaluaciones de diversas unidades condensadoras, equipos de refrigeración doméstico y comercial para el cumplimiento de normás específicas.

## 3.5 INSTRUMENTACIÓN

Para el desarrollo experimental se utiliza una amplia gama de instrumentos de medición, estos fueron colocados en puntos de interés del ciclo de refrigeración, algunas como la temperatura en la entrada y salida del aire tanto del evaporador como del condensador para conocer la cantidad de energía de estos flujos de aire. Un aspecto importante para tener en cuenta es que estos sensores están conectados a un sistema de adquisición de datos, los cuales se describen a continuación.

### 3.5.1 FLUJÓMETRO

Se tiene instalado un medidor de flujo tipo Coriolis como se muestra en la Figura 3.6, este fue instalado en la salida del evaporador. En la Tabla 3.2 se presentan sus características.



Tabla 3.2: Instrumentos que involucran el equipo de refrigeración

Instrumentos circuito de refrigeración				
Variable	Instrumento	Cantidad	Precisión	Modelo
Presión	Transductor de presión	4	+/- 1 %	AKS 32
Temperatura	RTD PT1000	4	+/- 0.15 K	TM4101
Temperatura	Termopar tipo T	16	+/- 0.3 K	
Flujo másico	Flujómetro Coriolis	1	+/- 0.03 %	CMFS040

El funcionamiento del flujómetro radica en la vibración que producen los tubos dentro del sensor, en un caudal cero, los dos tubos vibran en fase entre sí, sin embargo, cuando se tiene un caudal diferente de cero, las fuerzas Coriolis hacen que los tubos se tuerzan produciendo un desplazamiento de la fase. Esta diferencia de tiempo entre las ondas que se producen es proporcional al caudal másico.

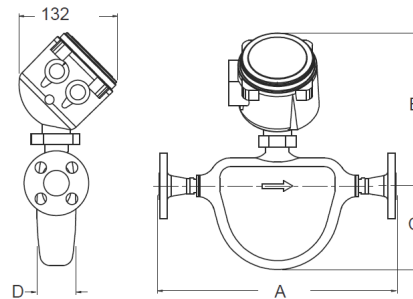


Figura 3.6: Flujómetro tipo Coriolis

### 3.5.2 TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

Para la medición de presión se utilizaron transductores de presión. La forma en la cual estos sensores funcionan es por medio de una señal de voltaje donde permiten la alimentación del instrumento y al existir una presión que censa el instrumento, este alterará el voltaje dando un valor que se interpreta en la computadora como un valor de presión.

Se puede ver un transductor de presión en la Figura 3.7. Las características principales se presentan en la Tabla 3.2.



Figura 3.7: Transductor de presión

### 3.5.3 TERMOPARES Y RTD

Para el monitoreo de las temperaturas se utilizaron dos instrumentos de medición, entre ellos están los termopares tipo T y los sensores RTD PT-1000. La diferencia de estos sensores es la exactitud que tienen. Los RTD PT-1000 son instrumentos más exactos debido a que tiene una resistencia nominal a una temperatura de 0° es de 1000 Ohms, y los termopares tipo T, son utilizados para la medición de temperatura estables y sin cambios.

Los sensores RTD PT-1000 fueron utilizados para la medición directa de la temperatura del refrigerante, se colocaron en la salida del compresor, salida del condensador, entrada del evaporador y salida del evaporador.

Los termopares tipo T se utilizaron para la medición de la temperatura del aire en la cámara y la entrada de aire, tanto del evaporador como del condensador, y después al exterior de estos equipos. Se pueden ver los dos instrumentos en la Figura 3.8.

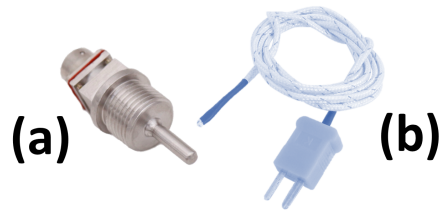


Figura 3.8: (a) Sensor RTD PT-1000 tipo rosca (b) Termopar tipo T

### 3.6 CONTROL DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN

Para el control de la válvula de expansión se utiliza un controlador de sobrecalentamiento. Con el uso de un monitor de comandos, se logra acceder al menú donde se pueden operar parámetros y funciones fuera de su operación original, como modificar los rangos de sobrecalentamientos, cambio de refrigerante a evaluar, y fijar la apertura de la válvula de expansión, entre otros. Los parámetros al momento de evaluar la apertura de la válvula de expansión son por medio de un sensor de temperatura puesto en la salida del evaporador, y otro sensor en la salida del aire; estos sensores son de tipo RTD PT-1000, y un sensor de presión tipo AKS 32 puesto en la salida del evaporador. En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros más importantes de los instrumentos antes mencionados. El sensor de temperatura y presión son utilizados para la comparación del sobrecalentamiento, con base en el refrigerante seleccionado, el controlador evalúa el sobrecalentamiento por medio de la tabla de saturación del refrigerante, y este sobrecalentamiento ayuda a determinar la aper-

Tabla 3.3: Instrumentos para el funcionamiento de la válvula de expansión

Instrumentos para válvula de expansión				
Variable	Instrumento	Cantidad	Precisión	Modelo
Presión	Transductor de presión	1	+/- 1 %	AKS 32
Temperatura	RTD PT1000	2	+/- 0.15 K	TM4101

tura de la válvula más adecuada. El control también cuenta con un control manual que mantiene un porcentaje de apertura establecido por el usuario.

El controlador de sobrecalentamiento junto con su fuente de alimentación, y otros accesorios eléctricos para el encendido de la unidad condensadora, y de los ventiladores, están colocados en la instalación experimental. Se presenta en la Figura 3.9 el diagrama eléctrico que alimenta al sistema de control y otras operaciones del equipo, como el uso de una válvula solenoide para auxiliar el encendido de la unidad condensadora.

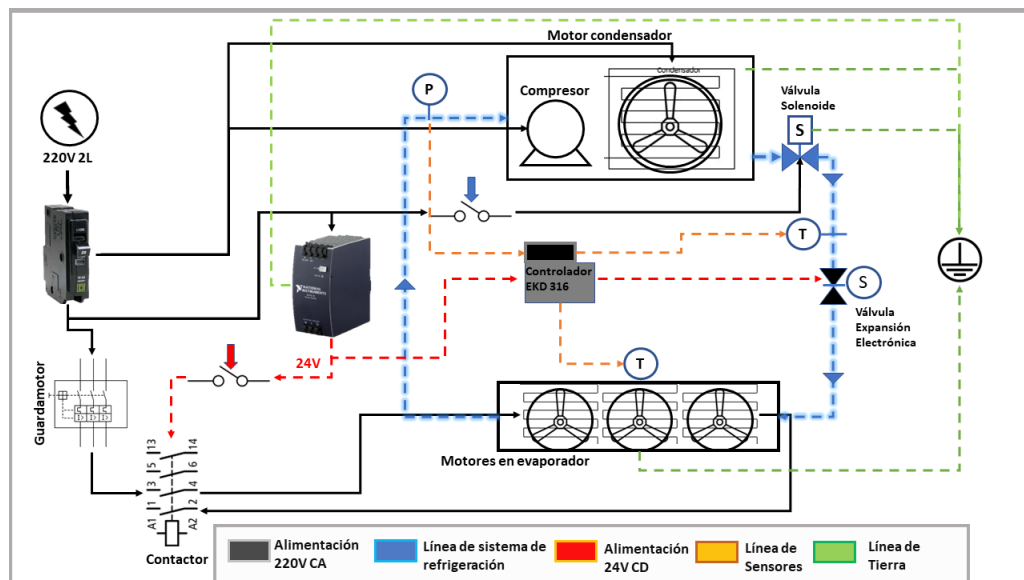


Figura 3.9: Diagrama de la instalación y alimentación de los equipos eléctricos.

### 3.7 ESTRATEGIA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL

En este segmento se realiza una descripción de los instrumentos y equipos de control, así como el sistema de adquisición de datos y el procesamiento de datos. Se elaboró una plataforma por medio de National Instruments (NI) con la finalidad de monitorear, controlar, medir y guardar condiciones experimentales para esta investigación. Principalmente, los componentes utilizados en la adquisición de datos son la medición de presión, temperatura, flujo másico, corriente y voltaje de la alimentación de la unidad condensadora, donde para su lectura y almacenaje se elaboró en un código en la plataforma LabVIEW. Posteriormente los datos se analizaron y evaluaron en una plataforma en Microsoft Excel que está enlazado al sistema REFPROP v.10 [10], donde se podrán evaluar datos termodinámicos de interés, como la entalpía, entropía, volumen específico, entre otros. También se tendrá en la plataforma Microsoft Excel, la evaluación del consumo eléctrico en la operación del equipo de refrigeración. En la Figura 3.10, se muestra un esquema del procedimiento anterior mencionado, donde se vincula la adquisición de datos y el procesamiento que éstos tendrán.

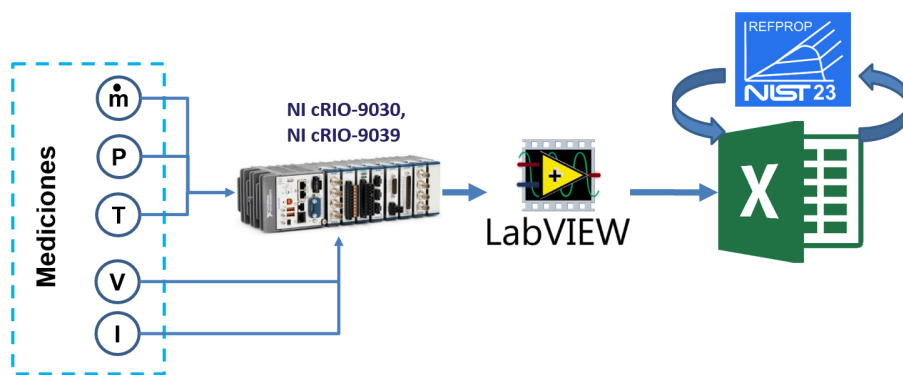


Figura 3.10: Diagrama de procesamiento de datos para su posterior tratamiento.

### 3.7.1 EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

#### Controladores

Se trabajó con la plataforma de National Instruments (NI) para la realización del sistema de adquisición y el control de los datos de interés. El trabajar con esta plataforma nos permite utilizar el controlador (cRIO-9030), como se muestra en la Figura 3.11. Al utilizar la plataforma NI, vincula medidas del proceso de adquisición de datos de diversas variables, esto gracias a la utilización de diversos módulos intercambiables para los diversos tipos de instrumentos de medición



Figura 3.11: Imagen del controlador cRIO 9030.

El cRio-9030 es un controlador usado para aplicaciones avanzadas de control y monitoreo. La medición de corriente y voltaje de la alimentación de la unidad condensadora se utilizó el NI-9201, y en la medición de presión se utilizó el NI-9208.

El cRio-9039 fue utilizado para la medición del flujo másico con el NI-9203, y la toma de temperaturas de los sensores tipo RTD se utilizó el NI-9205.

A su vez, se utilizó el cRIO-9024 para la medición de termopares por medio del modulo NI-9213. Los módulos que se tienen se explicarán a continuación.

El módulo NI-9201 es un receptor de señal de hasta 10 volts. Al recibir un

voltaje en sus conectores este envía una señal al programa de LabVIEW, donde se interpreta la cantidad de voltaje recibido.

En este caso la medición de voltaje y corriente se obtiene por la interpretación de la señal RMS que es una señal que se encuentra cuando se tratan corriente alterna. Se toma en cuenta el valor efectivo de la señal eléctrica senoidal puesta en la alimentación de la unidad condensadora. Al estar midiendo variaciones en la señal en la corriente, se envían por una lectura de voltaje a corriente directa para la interpretación por medio del módulo NI-9201.



Figura 3.12: Módulo NI-9201 para la medición de la señal de corriente y voltaje.

NI-9203 es un modulo utilizado para la medición de corriente de hasta 20 mA. Al tratarse de una medición de corriente, esta requiere de un voltaje controlado. Normalmente, este voltaje es suministrado paralelamente. En este caso, es utilizado para la medición de flujo másico del equipo de refrigeración. La señal que este recibe es suministrada por medio del medidor de flujo en señal de corriente directa, y el módulo recibe esta señal. Posterior a esta señal en el programa de LabVIEW, se interpreta dicha señal a una escala de unidad, y puede estar constantemente recibiendo la señal de corriente.

El módulo NI-9205 emplea una entrada analógica diferencial o de una sola terminal de un voltaje de 10 V, en corriente directa. En este caso, el módulo especifica que es para el uso de RTD de 1000 Ohms. La temperatura varía esta resistencia



Figura 3.13: Módulo NI-9203 para la medición del flujo másico.

eléctrica y estas perturbaciones se interpretan por el programa de LabVIEW como una temperatura en varias escalas.



Figura 3.14: Módulo NI-9205 para la medición de temperatura de los RTD PT-1000.

NI-9208 es un módulo de señal de corriente de  $\pm 22\text{mA}$  de corriente directa. Este módulo es utilizado para la medición de los instrumentos de presión del equipo de refrigeración. Para la conexión de los instrumentos a los módulos, se necesitó una alimentación de 24 VCD.

Para la conexión de los termopares se utilizó el módulo NI-9213 que es propio para la lectura de las señales de los termopares. En este caso el modulo cuenta con alimentación de voltaje de hasta una tensión de  $\pm 78\text{ mV}$ . Este voltaje pasa hasta las puntas de los termopares y por la diferencia de temperatura, obtiene una señal de corriente que va de regreso al módulo y se evalúa la diferencia de voltaje, y se interpreta la señal que es interpretada en el programa LabVIEW.





Figura 3.15: Módulo NI-9208 para la medición de los instrumentos de presión.



Figura 3.16: Módulo NI-9213 para la medición de los termopares tipo K.

En la Figura 3.17, se muestra el diagrama de las conexiones para el sistema de adquisición de datos para la medición de voltaje, corriente y medición de presiones. En la Figura 3.18, se tiene el diagrama de conexiones para el sistema de adquisición de datos para la medición del flujo másico y los sensores de temperatura.

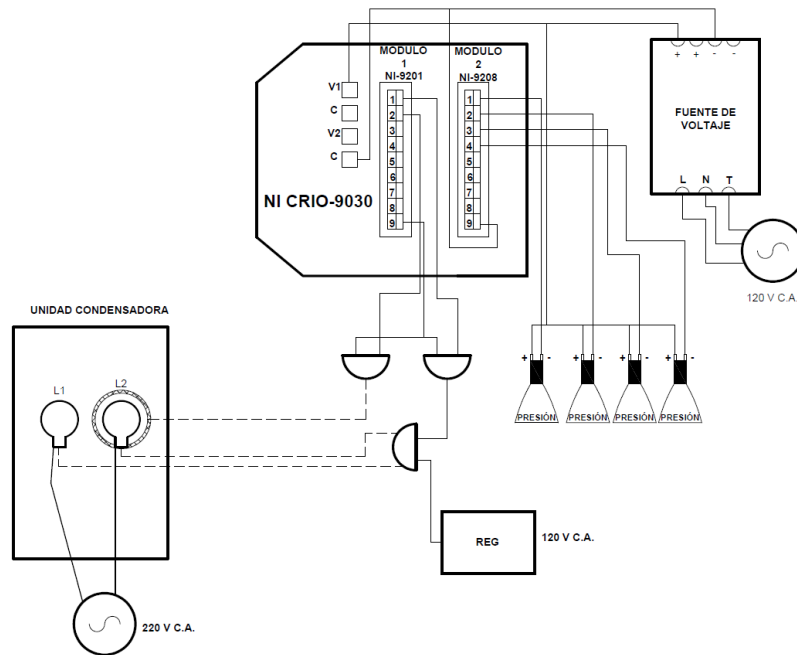


Figura 3.17: Diagrama de conexiones para el sistema de adquisición de datos para la medición del voltaje, corriente y mediciones de presiones

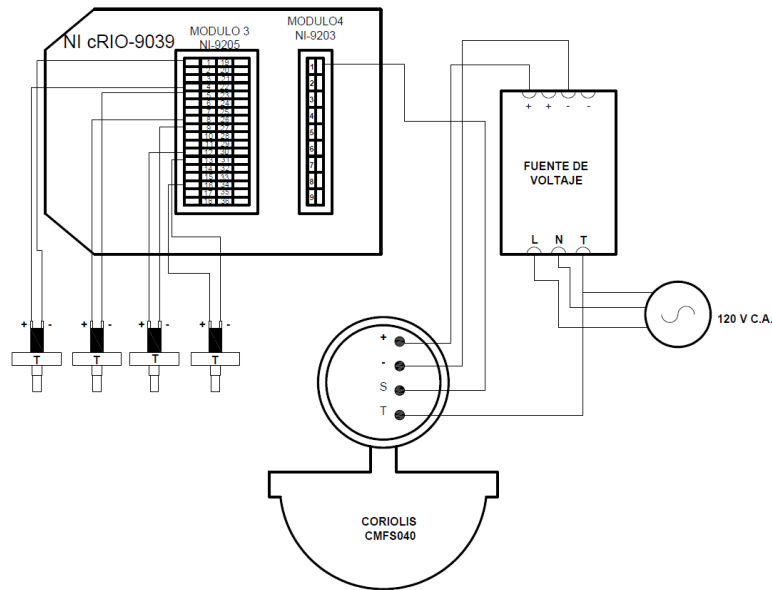


Figura 3.18: Diagrama de conexiones para el sistema de adquisición de datos para la medición del flujo másico y los sensores de temperatura.

### 3.8 MÉTODO APLICADO

Un equipo de refrigeración se puede evaluar de diversas maneras, resulta conveniente el uso de normas para considerar aspectos y parámetros que son de importancia para el arranque del equipo, conocer pruebas importantes y recomendaciones de instrumentos de medición a tratar. Una de las normas utilizadas en México para los equipos de refrigeración tipo unidades condensadoras y evaporadoras es la NOM-012-ENER-2017. La norma ayuda a delimitar los límites de operación, los métodos de prueba e incluso a tener un acomodo con el etiquetado de los equipos que conforman una unidad condensadora [49].

La finalidad del método aquí aplicado no es seguir la normativa antes mencionada, ya que su finalidad es el poder evaluar un equipo de refrigeración comercial para el aprovechamiento energético y operación acorde a diversos parámetros. Sin embargo, la utilización de la norma nos guía para la lectura de datos y parámetros que podrían ser de interés para este estudio, variables como la medición de la

temperatura, tiempos de operación, entre otros. Es posible realizar una evaluación objetiva, con las características para el análisis de sustitución de refrigerante del sistema de refrigeración que se estudia en este trabajo.

### 3.8.1 EVALUACIÓN DE LA CARGA DE REFRIGERANTE

Para sistemas de refrigeración comercial, es conveniente contar con manómetros para evaluar la presión a la salida y en el retorno del compresor, que corresponden a las presión más alta y baja del sistema. Antes de realizar una carga de refrigerante, se realiza un vacío de 66 Pa de presión absoluta para evitar las impurezas y la humedad del aire [32]. Se realiza una carga de refrigerante, por la línea de salida del evaporador, de manera controlada y registrando la masa de refrigerante. Una vez que el compresor arranca y tiene un funcionamiento constante, se evalúan las presiones de alta y de baja del equipo que se miden en la salida y en el retorno del compresor respectivamente. Donde se le suministrara refrigerante hasta que las presiones estén en los rangos de operación establecidos por el fabricante. En este punto significa que el equipo tiene el refrigerante suficiente, y en la unidad condensadora lo estará almacenando en el recibidor de líquidos. La carga de refrigerante varía, dependiendo de la longitud del equipo de refrigeración, el volumen del compresor y los intercambiadores de calor. Con la finalidad de determinar la carga adecuada, se realizan varias cargas y se evalúa el desempeño del sistema.

### 3.8.2 EVALUACIÓN DE LA CARGA TÉRMICA

El equipo de refrigeración para esta prueba fue construido para enfriar una carga térmica de un cuarto de temperatura controlada.

La evaluación es referente a la carga térmica se considera de una manera estable y no cambiará con el paso del tiempo y para esto se sustentará por medio de la

adquisición de datos de temperatura en la entrada y salida de aire del evaporador, teniendo así la carga térmica del evaporador, y en el caso del condensador, es por medio de la entrada y salida de aire del condensador. La medición en el aire de entrada y salida debe tomar en cuenta un promedio del área de dicho paso de aire.

En la Figura 3.19, se tiene una imagen referente a la instalación experimental, se ilustra el comportamiento que se tiene con las temperaturas de aire en la entrada y salida de los componentes de refrigeración.

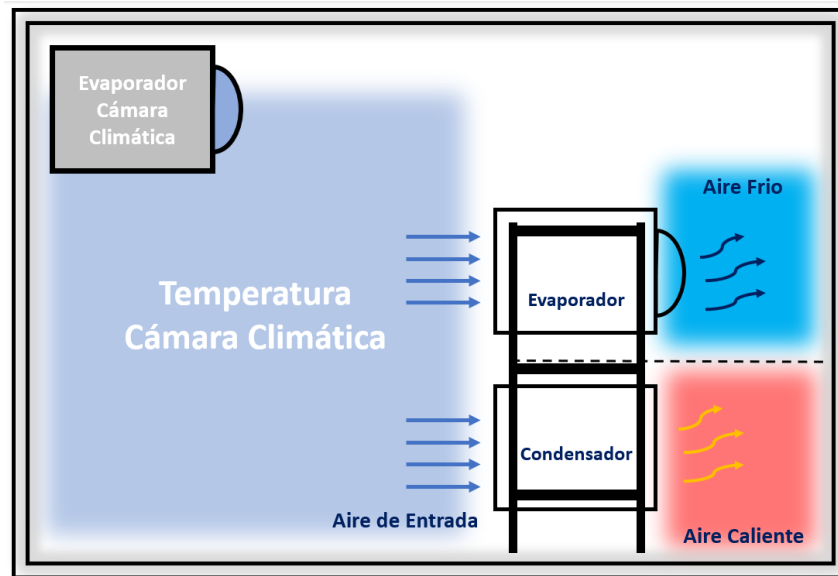


Figura 3.19: Comportamiento de temperaturas con el funcionamiento de la instalación experimental en una cámara climática.

### 3.8.3 EVALUACIÓN DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN

El comportamiento normalmente se evalúa por medio de sensores de temperatura y presión para evaluar el sobrecalentamiento. Cuando se trata de una válvula electrónica, asigna una apertura adecuada por medio de su algoritmo donde tiene la información de los puntos de saturación de diversos refrigerantes. Normalmente, una apertura adecuada ronda los valores entre los 60 a 80 % y ésta es reducida o aumentada dependiendo del comportamiento del sobrecalentamiento.

Una vez teniendo un funcionamiento estable de un equipo de refrigeración, se decide buscar el impacto que tendrán los efectos de la apertura en el comportamiento del equipo de refrigeración. Con la finalidad de analizar el efecto del estrangulamiento en el sistema de refrigeración, se modifica de manera manual la apertura de la válvula en un  $\pm 10\%$  de su valor asignado por el control. En este caso, el efecto del flujo másico se vería afectado, dando una reducción en el caudal y podría resultar en una carga térmica menor en el evaporador.

Debido al control de la válvula de expansión, se puede obtener los niveles de sobrecalentamiento del refrigerante junto al porcentaje de apertura de la válvula de expansión con la toma de temperatura y presión a la salida del evaporador.

### 3.8.4 EVALUACIÓN DE TEMPERATURA AMBIENTE DE OPERACIÓN

Al contar con un sistema de refrigeración no convencional, debido a que el condensador y el evaporador se encuentran en una misma instalación para una evaluación en un funcionamiento fijo, nos permite obtener el comportamiento de los diferentes refrigerantes de interés en condiciones de temperatura estables.

La temperatura ambiente juega un papel importante en la operación de un sistema de refrigeración ya que la transferencia de calor que rechaza el condensador puede favorecerlo o perjudicarlo dependiendo del caso [50]. En este proyecto pudiera

tener efectos contraproducentes al tener una temperatura ambiente elevada, ya que nunca llegaría el evaporador a una condición adecuada para que el control de la válvula de expansión por lo que la temperatura ambiente es un parámetro importante para este estudio. La temperatura ambiente se mantiene una temperatura del aire constante. Tanto para el condensador como evaporador estarán sujetos a esta temperatura y llegarán a un estado estacionario de operación.

Según la norma NOM-012-ENER-2019, una propuesta para el estudio energético es tener la temperatura de la cámara climática a  $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, esta propuesta toma en cuenta el evaporador y condensador en recintos separados. Esto pudiera ser un problema para la instalación propuesta en este trabajo, ya que previamente esta instalación para observar el funcionamiento a una temperatura superior a  $30^{\circ}\text{C}$  no lograba tener un comportamiento deseable en un equipo de refrigeración. La propuesta es el mantener una temperatura ambiente de  $24^{\circ}\text{C}$ . Se buscaría mantener la temperatura de aire en la entrada del evaporador y del condensador, para poder mantener una condición que logre ser favorable con la operación del equipo de refrigeración.

### 3.9 COEFICIENTE DE DESEMPEÑO (COP)

Una manera de evaluar el desempeño energético de un sistema de refrigeración es por medio del Coeficiente de desempeño (COP, coefficient of performance por sus siglas en inglés). El objetivo es remover el calor ( $Q_L$ ) de un recinto que va a ser refrigerado, y para este objetivo se requiere de una entrada de trabajo por el compresor ( $W_{neto}$ ), por lo que el COP de un sistema de refrigeración se puede expresar como la siguiente ecuación [33]:

$$COP = \frac{\textit{Salida deseada}}{\textit{Entrada requerida}} = \frac{Q_L}{W_{neto}} \quad (3.1)$$

donde:

La conservación de energía utilizada para un sistema cíclico donde el balance de energía se conserva es:

$$W_{neto} = Q_H - Q_L \quad (3.2)$$

De esta forma, la Ecuación 3.1 se puede escribir de la siguiente forma:

$$COP = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \quad (3.3)$$



### 3.10 RELACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (EER)

La relación de la tasa de remoción de la energía en forma de calor de un espacio enfriado por el equipo de enfriamiento con respecto a la tasa de consumo eléctrico en operación constante y uniforme se le conoce como relación de eficiencia energética (EER, por sus siglas en inglés) [33].

$$EER = \frac{\text{Capacidad de enfriamiento}}{\text{Potencia eléctrica consumida}} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} \quad (3.4)$$

Para la obtención del consumo eléctrico es necesario evaluar directamente el voltaje y consumo de corriente en las líneas que alimentan al compresor. Esto significa, que la EER es una relación donde cuenta la energía térmica en kW, que es capaz de enfriar por la entrega del equipo por cada kW consumida de energía eléctrica.

Se puede determinar el EER de otra manera, que es mediante la siguiente ecuación:

$$EER = 3.412 \times COP \quad (3.5)$$

Esto solo si se considera que  $1 \text{ kWh} = 3412 \text{ BTU}$ , y claro que  $1 \text{ Wh} = 3.412 \text{ BTU}$ ; una unidad que elimina 1 kWh de calor del espacio refrigerado por cada kWh de electricidad consumida [33].

### 3.11 IMPACTO TOTAL DE CALENTAMIENTO EQUIVALENTE TEWI

El TEWI es una medida de las emisiones de gases de efecto invernadero, ésta representa el impacto del calentamiento global de las emisiones directas e indirectas y se calcula como la suma de ambos: el resultado directo del refrigerante que fugó durante la vida útil del equipo, y el efecto indirecto de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los combustibles fósiles utilizados para la generación de la energía que opera el equipo a lo largo de su vida útil [43].

Los sistemas estacionarios de refrigeración y de aire acondicionado cuentan con una metodología propia para el cálculo del TEWI, estos trabajan con el principio de compresión de vapor y logran funcionar con electricidad conectada a la red eléctrica. Esta metodología se ve reflejada mediante la siguiente ecuación:

$$TEWI = GWP(\text{directa}; \text{fugas de refrigerante}) + GWP(\text{indirecto}; \text{operación}) \quad (3.6)$$

La Ecuación (3.6), se puede representar también de una manera matemática con los siguientes parametros:  $m$  que es la masa de refrigerante (kg),  $L_{an}$  la tasa de fugas (kg),  $n$  vida útil del sistema de refrigeración (años),  $\alpha_r$  factor de recuperación,  $E_{an}$  consumo energético por año (kW/Años),  $\epsilon$  factor de emisión indirecta de CO<sub>2</sub>.

$$TEWI = (GWP \times m \times L_{an} \times n) + (GWP \times m \times (1 - \alpha_r)) + (E_{an} \times \epsilon \times n) \quad (3.7)$$

### 3.12 CASOS DE ESTUDIO

La evaluación del sistema de refrigeración involucra las siguientes pruebas para el análisis de los refrigerante R-404A Y R-448A, a condición ambiental de 24°C en la entrada de aire en el evaporador y condensador, según la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Distribución de experimentos

Matriz experimental	
R-404A	R-448A
Carga Refrigerante [kg]	Carga Refrigerante [kg]
2.0	2.0
2.3	2.3
2.6	2.6
2.9	2.9

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS

---

*En este capítulo se presentarán los resultados del desempeño del sistema de refrigeración que opera con diferentes refrigerantes. Como primer punto se evalúa la carga de refrigerante adecuada para su operación. Después se presentan los resultados y observaciones que se tiene en el sistema de refrigeración que opera con R-404A. Posteriormente se tratan los resultados del refrigerante R-448A que se propuso para ser un sustituto viable de bajo GWP.*

*El uso de gráficos ayudará a la interpretación de estos resultados para una mejor comparación en las pruebas de los refrigerantes de interés. Se utilizan los datos de voltaje y corriente con respecto al tiempo para evaluar el consumo eléctrico de cada refrigerante, y se muestran por medio de un diagrama de Mollier. Se reportan con estudios de EER y con el TEWI de cada caso para comparar el sistema de refrigeración. Posteriormente se compararán estos resultados para determinar el comportamiento de cada caso de estudio.*

## 4.1 CASOS DE ESTUDIO

### 4.1.1 CONDICIONES EXPERIMENTALES

#### **Cámara climática.**

La condición a la que estará la cámara climática será para mantener una temperatura global del aire constante en  $24^{\circ}\text{C}$  con una variación de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  en la entrada de aire del evaporador y condensador. Gracias al control y la efectividad de la cámara climática, se pudo evaluar la temperatura en la entrada del aire al evaporador con la temperatura deseada de  $24^{\circ}\text{C}$ .

#### **Válvula de expansión.**

El funcionamiento de la válvula de expansión se realiza de forma automática a partir de la lectura de presión y temperatura a la salida del evaporador que determina el sobrecalentamiento, y éste a su vez determina la apertura adecuada para satisfacer la demanda térmica necesaria del evaporador. En el sistema de control, se selecciona el tipo de refrigerante, y de esta manera, la condición de apertura se ajusta acorde a la base de datos incluida por el fabricante.

La válvula de expansión opera bajo un sobrecalentamiento máximo y un sobrecalentamiento mínimo; se buscará controlar el sobrecalentamiento bajo estos límites. En este caso, se dejó un sobrecalentamiento máximo de 5 K y de un 4.5 K de sobrecalentamiento mínimo en el control de la válvula de expansión, para un funcionamiento adecuado según la recomendación de la NOM-012-ENER-2019 [49]

#### **Toma de mediciones.**

La adquisición de datos se realiza cada 3 segundos. Esta frecuencia es mayor al número de muestras mínimo que dicta la norma NOM-012-ENER-2019 [49], que es de 30 muestras por hora. La norma NOM-012-ENER-2019 recomienda tomar

muestras al llegar a una condición de equilibrio no mayores de 1 hora antes de ser registrados y guardados. Los resultados preliminares, mostraron que esta frecuencia resultó en condiciones de equilibrio acorde a la norma para la recolección de datos.

#### 4.1.2 CARGA DE REFRIGERANTE R-404A

Se suministró refrigerante de manera controlada por medio de pequeñas cargas de refrigerante. Con una carga de 1.6 kg, la presión del refrigerante en el sistema es la mínima con la que el presostato permite arrancar el equipo. Para abatir la carga térmica y operar dentro de los rangos de sobrecalentamiento requirió una carga mayor. Se observó que, con una carga de 2 kg, la válvula de estrangulamiento empieza a restringir el flujo de refrigerante indicando una operación dentro de las capacidades del equipo. Se considera entonces a esta carga como el caso inicial, ya que el comportamiento de la válvula de expansión era una apertura alta (sin llegar al 100 % de apertura) sin embargo era una condición no adecuada. Se aumentó la carga de refrigerante con cargas de 0.3 kg, donde tuvimos valores de 2, 2.3, 2.6 y 2.9 kg, que corresponden al 15 % de la carga inicial, rango en el que se espera apreciar cambios en la operación del sistema. En la Figura 4.1, se muestra la carga térmica en el evaporador, observada para las diferentes cargas de refrigerante. Se tiene una carga térmica reducida que se transfiere en el evaporador, cuando la carga es de 2 kg, indicando que la mayor restricción a la transferencia de calor, está dada por el refrigerante.

La carga térmica en el evaporador del equipo de refrigeración aumentó conforme más refrigerante se le estaba suministrando hasta llegar a una carga donde se mantiene alrededor de 4 kW. La temperatura de saturación cambió en el trayecto de 2 kg a 2.3 kg, dando lugar a una disminución de temperatura de saturación como se ve en la Figura 4.1. Este comportamiento refleja que el equipo de refrigeración llegó a un punto donde la carga de refrigerante dejó de afectar en el calor absorbido por el evaporador, manteniéndolo y almacenando el refrigerante suministrado para

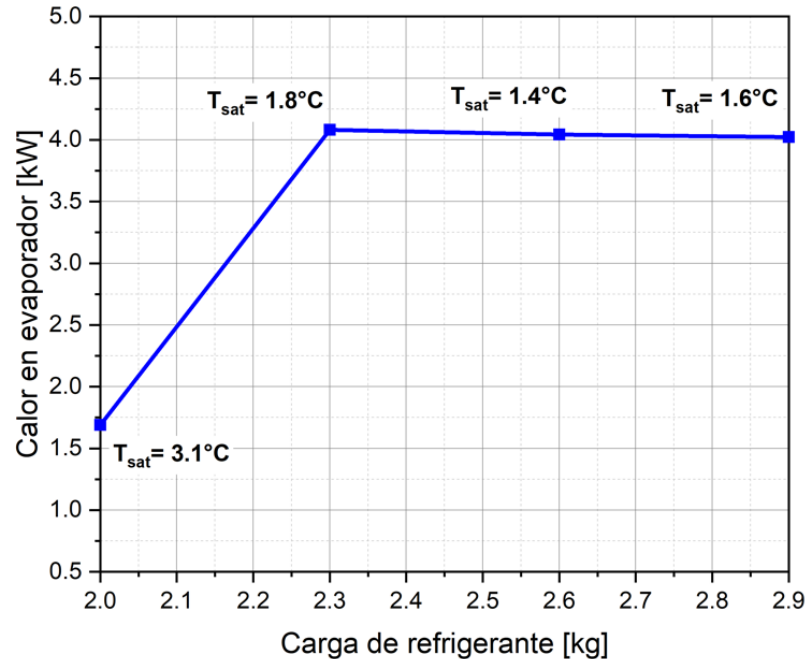


Figura 4.1: Gráfica de calor en el evaporador con respecto a las cargas de refrigerante con R-404A.

mantener el funcionamiento en el cual trabaja.

El consumo eléctrico neto, aumenta a medida que la carga de refrigerante se incrementa como se muestra en la Figura 4.2, donde su punto más alto se ve al llegar a 2.6 kg de refrigerante y posterior a ese punto se ve una disminución, esto se debe a que llegó a una condición adecuada donde la carga de refrigerante ya no afecta el consumo eléctrico. Se puede corroborar esta información con la Figura 4.3, donde tenemos la carga de refrigerante con respecto al coeficiente de desempeño y se observa que para una mayor carga de refrigerante, el COP incrementa, teniendo un valor máximo para una carga de 2.6 kg. Por otro lado, el valor de la relación de eficiencia energética es menor al COP ya que la alimentación eléctrica incluye la alimentación de los ventiladores y del control.

En la Figura 4.4 se observa el flujo másico promedio del refrigerante en el sistema bajo condición de estado estacionario, para las diferentes cargas de refrigerante. Para un mayor aumento en la carga de refrigerante, la válvula de expansión (EER)

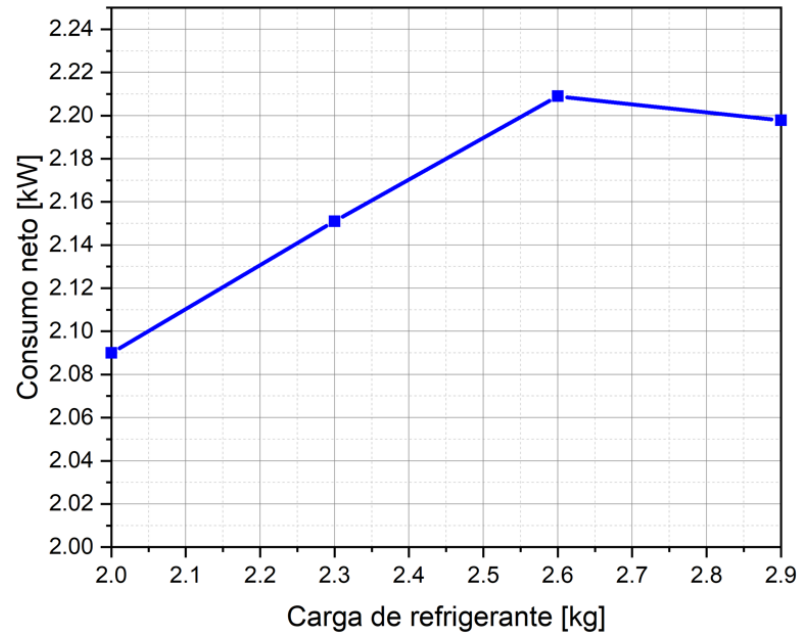


Figura 4.2: Gráfica de consumo eléctrico neto con respecto a las cargas de refrigerante R-404A.

se empezará a cerrar, reduciendo el flujo de refrigerante. Una reducción de la válvula podría implicar una reducción en la carga térmica transferida en el evaporador. Para el rango de carga de refrigerante entre 2.6 - 2.9 kg no se observa un cambio en el flujo másico. Lo que sugiere que el refrigerante adicional se almacena en el recibidor de líquidos para mantener una condición de operación sin cambios para este rango de carga.



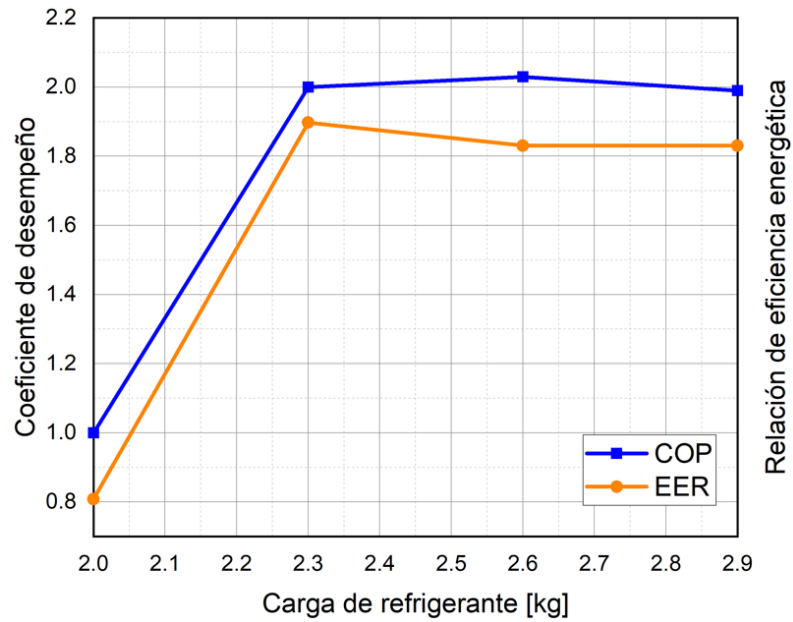


Figura 4.3: Gráfica de consumo eléctrico neto con respecto a las cargas de refrigerante R-404A.

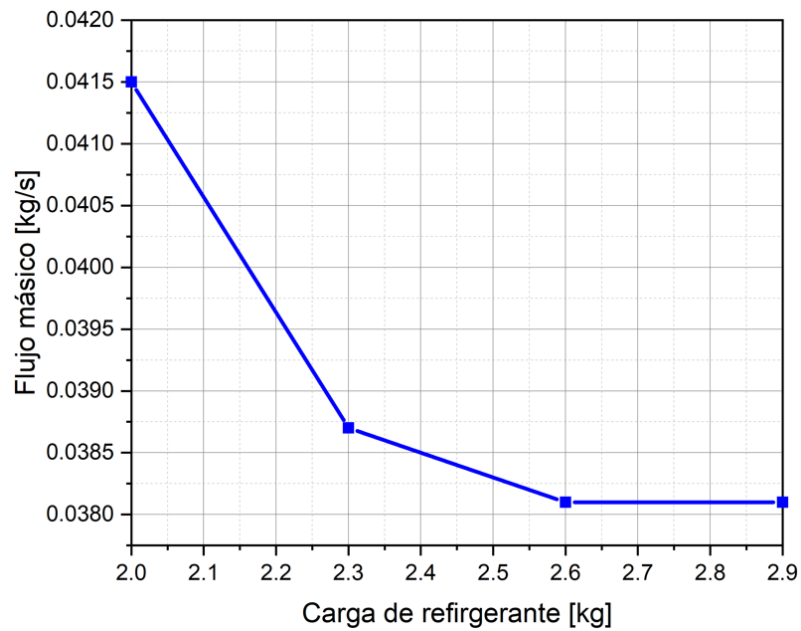


Figura 4.4: Gráfica del flujo másico con respecto a las cargas de refrigerante R-404A.

Los estados termodinámicos de las condiciones de operación para las diferentes cargas de refrigerante se muestran en el diagrama de Mollier entalpía-presión en la Figura 4.5. Como se puede observar, la presión de operación aumenta a medida que

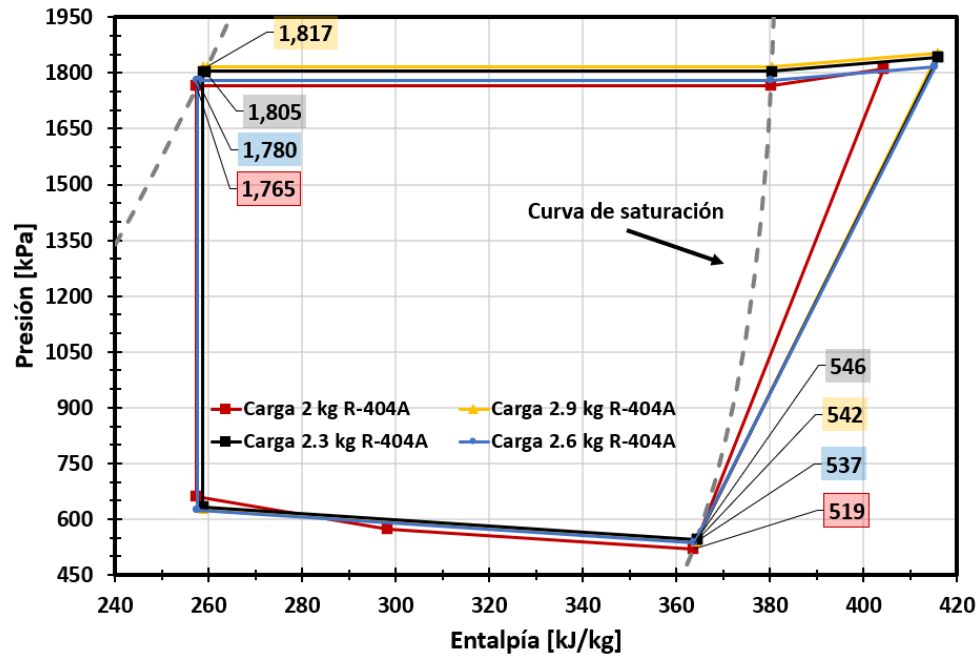


Figura 4.5: Diagrama de Mollier P-h para las diferentes cargas de refrigerante R-404A.

la carga de refrigerante aumenta. En el condensador tiene una presión de 1765 kPa para la carga de 2 kg, y tuvo un aumento a 1817 kPa para 2.9 kg. En el condensador se observó un aumento donde pasa de 519 para la carga de 2 kg y a 542 kPa en la carga de 2.9 kg.

### 4.1.3 CARGA DE REFRIGERANTE R-448A

Para esta prueba se contemplaron las cargas utilizadas en el refrigerante R-404A, ya que nos permite comparar el desempeño bajo las mismas condiciones con el refrigerante de interés. De igual manera, se buscará una carga adecuada con el nuevo refrigerante. Para este cambio de refrigerante, se cambió la configuración de la válvula de expansión para trabajar ahora con el refrigerante R-448A. Se espera un funcionamiento de la válvula de expansión parecida al refrigerante R-404A debido a la similitud de los refrigerantes. En la Figura 4.6 se ve el comportamiento de la carga térmica en el evaporador, con respecto a las cargas de refrigerantes.

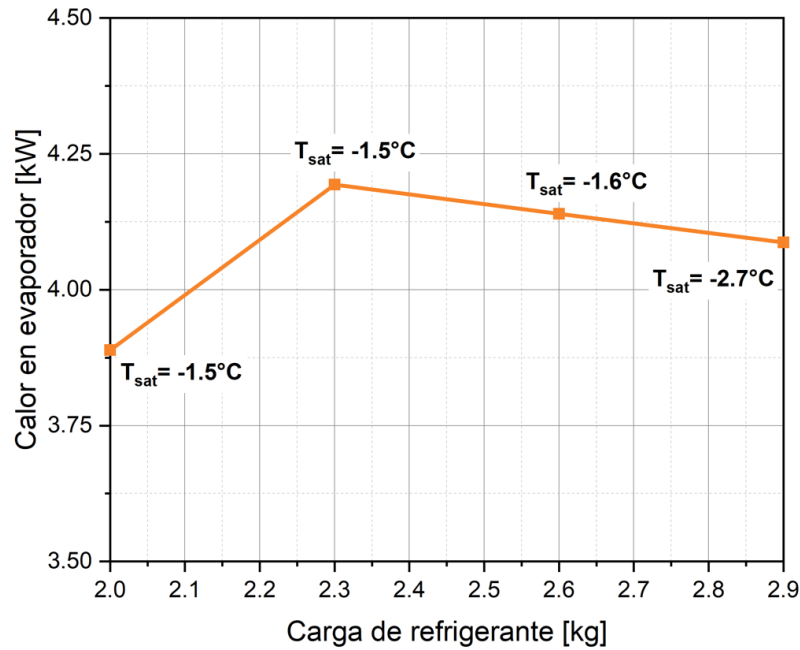


Figura 4.6: Gráfica de calor en el evaporador con respecto a las cargas de refrigerante R-448A, a su vez se tienen las temperaturas de saturación en el evaporador.

Para una carga de refrigerante de 2 kg, se observa una carga térmica en el evaporador reducida comparada con las demás cargas. Se observa un aumento de 2 a 2.3 kg, mostrando que el aumento de carga de refrigerante aumentó la carga térmica en el evaporador al igual que se observó con el refrigerante R-404A. La carga térmica en el evaporador utilizando R-448A, disminuye a medida que se carga

más refrigerante. Un punto importante a notar en la Figura 4.6 es que la temperatura de saturación disminuyó al operar con una carga de 2.9 kg, como consecuencia de que la presión en el evaporador también disminuyó, esto se debe a que la válvula de expansión estranguló más por estar sobrepasando la carga térmica en el evaporador.

En la Figura 4.7, se observa el consumo eléctrico neto con las cargas de refrigerante R-448A. Se puede observar un comportamiento casi constante en 2.16 kW para 2 kg, y hasta 2.6 kg. Con este comportamiento da a entender que el consumo eléctrico es el mismo en estas cargas, y se comporta de una manera adecuada en las cargas térmicas en el evaporador vistos en la Figura 4.7. Entonces al suministrarle más refrigerante este empezará a acumularse en el recibidor de líquidos. El comportamiento se puede corroborar al ver la Figura 4.6, donde se ve el comportamiento que se mantiene en los valores de 2, 2.3 y 2.6 kg. Se observa en la última carga de 2.9 kg, la disminución del consumo eléctrico neto de manera importante, donde si se observa la carga térmica en el evaporador (Figura 4.6), la carga térmica se mantiene a pesar de esta disminución de la temperatura de saturación en el evaporador. En [23] [7] se reporta que la temperatura de saturación tiene un efecto importante debido a la composición zeotrópica del refrigerante. Con la disminución de temperatura se observó en la válvula de expansión una estrangulación mayor.

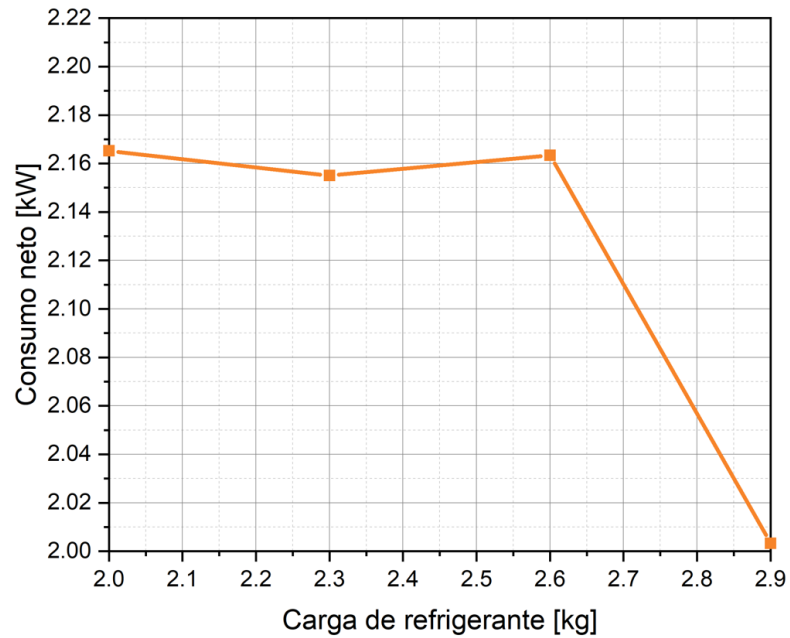


Figura 4.7: Gráfica de consumo neto con respecto a las cargas de refrigerante R-448A.

En la Figura 4.8, se presenta el comportamiento del coeficiente de desempeño del equipo de refrigeración donde junta el comportamiento visto en las gráficas de la cargas térmicas y del consumo eléctrico neto. Como se vio en la Figura 4.6 el comportamiento de la carga térmica del evaporador se mantiene con respecto a las cargas de 2.3 hasta 2.9 kg, y conociendo el consumo eléctrico neto de la Figura 4.7 se observa un impacto importante tanto en el coeficiente de desempeño como en la relación de eficiencia energética, donde aumentaron estos valores en la carga de 2.9 kg. En la Figura 4.8, se observa que el comportamiento fue diferente a lo visto en el R-404A, por lo que quizás se necesita una carga mayor para conocer la carga adecuada de refrigerante R-448A.

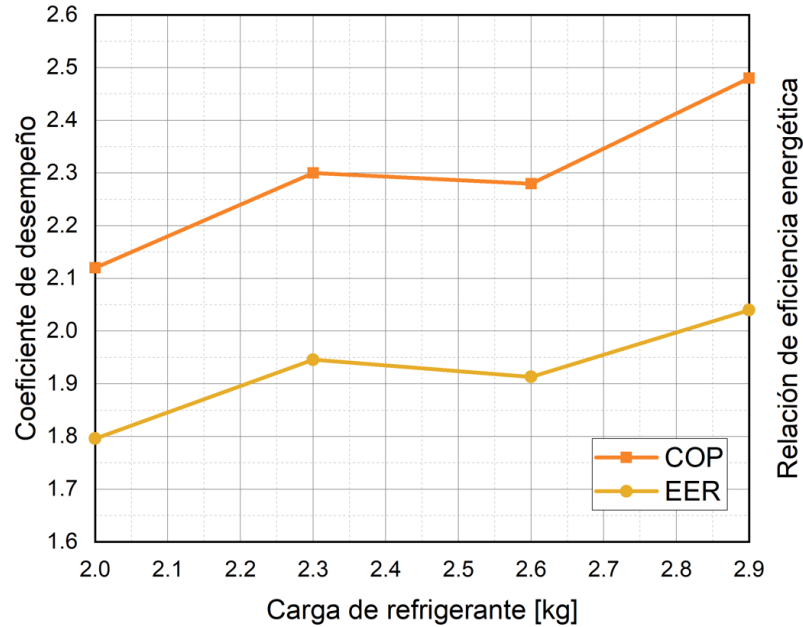


Figura 4.8: Gráfica de coeficiente de desempeño y relación de eficiencia energética con respecto a las cargas de refrigerante R-448A.

En la Figura 4.9, se tiene el flujo másico con respecto a las cargas de refrigerante R-448A, donde se observa un decremento del flujo másico conforme se aumenta la carga de refrigerante dando como resultado un flujo másico de 27.49 g/s en carga de 2.9 kg. Este comportamiento se debe a el efecto de la válvula de expansión, ya que controla un comportamiento a una determinada carga térmica en el evaporador para el sistema de refrigeración. Al llegar a 2.9 kg se tiene una importante reducción del flujo másico que se debe al resultado de un excedente de refrigerante.

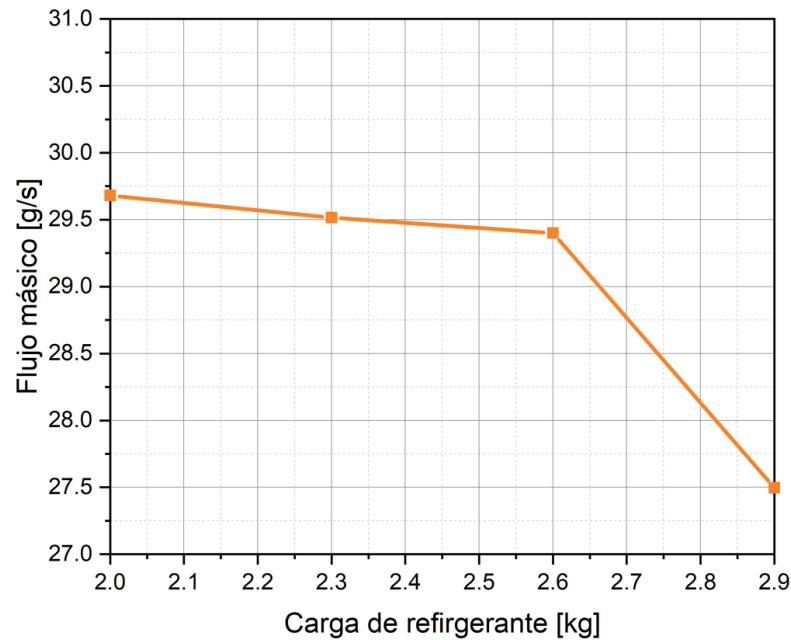


Figura 4.9: Gráfica de flujo másico con respecto a la carga de refrigerante R-448A.

El comportamiento del refrigerante R-448A en los estados termodinámicos de condición de operación, para las diversas cargas, se puede ver en el diagrama de Mollier entalpía-presión de la Figura 4.10. Se observa que la presión de operación con las cargas de refrigerante de 2.3 kg y 2.6 kg son de 1,839 kPa y 1,834 kPa, respectivamente. Al momento de agregar más carga de refrigerante, la presión se ve disminuida posterior a la carga de 2.6 kg, con una presión de 1,799 kPa en 2.9 kg. Este efecto se ve de igual manera en la salida del evaporador, donde la presión es la más baja llegando a 468 kPa para la carga 2.9 kg.

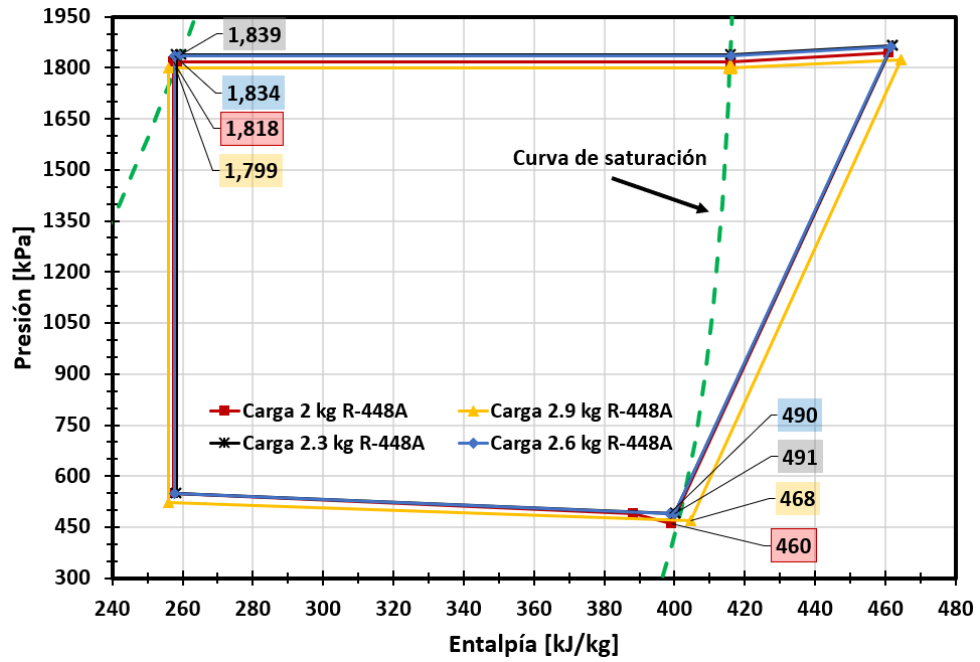


Figura 4.10: Diagrama de Mollier P-h para las diferentes cargas de refrigerante R-448A.



## 4.2 COMPARACIÓN DE REFRIGERANTES.

La comparación será referente a la carga de refrigerante y el comportamiento en un tiempo de operación donde no exista cambios en los parámetros termodinámicos del funcionamiento del equipo de refrigeración.

### 4.2.1 EVALUACIÓN DE CARGA DE REFRIGERANTE.

La Figura 4.11 presenta el calor absorbido por el evaporador teniendo una carga térmica que no cambia para varias cargas de refrigerante. Se observa que existe un déficit de refrigerante para la carga de 2 kg para ambos refrigerantes. El refrigerante R-448A presentó una carga térmica adecuada en el evaporador, debido al funcionamiento de la válvula de expansión. La carga térmica máxima es observada para la carga de 2.3 kg con 4.19 kW para el caso del R-448A, siendo el punto más alto al que llega para ambos refrigerantes. El refrigerante R-404A es su punto máximo antes de llegar a un comportamiento adecuado de la válvula de expansión. En los puntos de 2.6 y 2.9 kg para ambos refrigerantes, se ve un comportamiento donde se mantiene una operación adecuada, permitiendo tener una carga térmica cercana para ambos casos.

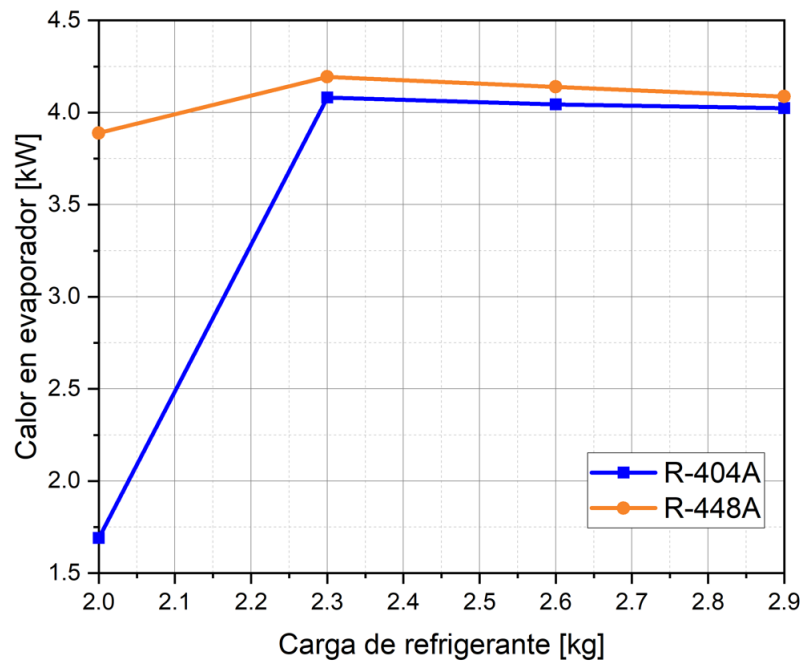


Figura 4.11: Comparación de carga térmica en el evaporador a diferentes cargas de refrigerante R-404A y R-448A

Los resultados reportados en [6] notaron que la capacidad de enfriamiento del R-448A en una instalación de baja temperatura resultó ser menor que el del refrigerante R-404A. El funcionamiento o la instalación podría ser una razón por la cual se tuvo un comportamiento diferente al que se ve en la Figura 4.11 ya que se evaluó en capacidades más grandes.

El consumo eléctrico neto suministrado al sistema de refrigeración con cada carga de refrigerante, se puede ver en la Figura 4.12. El comportamiento es diferente entre los dos refrigerantes, donde se observa que con una carga de 2 kg existe una diferencia entre estos, esto supone que el R-448A consume más potencia en esa condición de deficiencia de refrigerante. En la carga de 2.3 kg llegan a comportarse casi con el mismo consumo eléctrico neto estos dos refrigerantes. El comportamiento del R-404A es diferente ya que al suministrar más carga de refrigerante aumenta el consumo eléctrico neto, en el caso del refrigerante R-448A se mantiene en un comportamiento similar a pesar de su aumento en la carga de refrigerante.

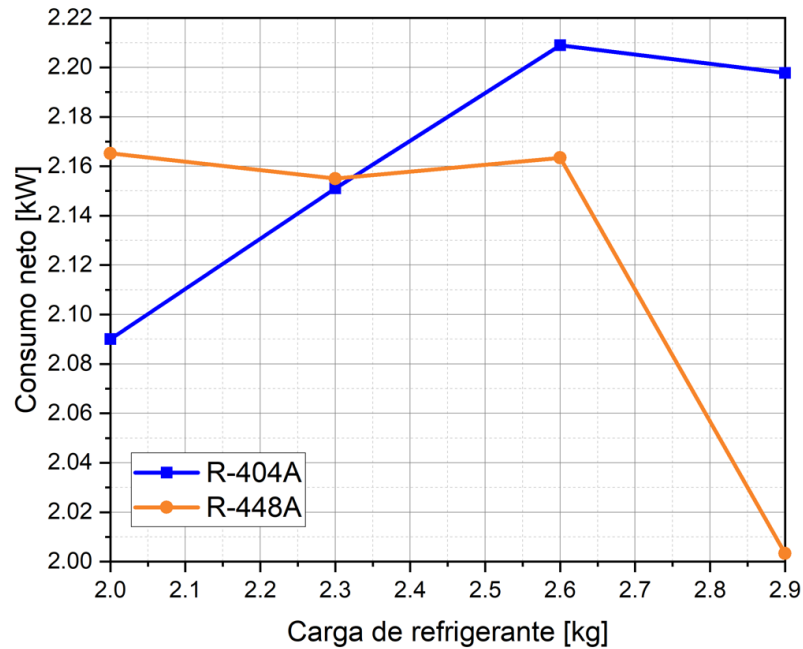


Figura 4.12: Comparación del consumo eléctrico neto a diferentes cargas de refrigerante R-404A y R-448A.

El flujo másico contribuye en el análisis de energía, se observa un comportamiento diferente para cada refrigerante, como se ve en la Figura 4.13. Esto se debe principalmente al funcionamiento de la válvula de expansión.

En el caso del refrigerante R-404A se observó que al aumentar la carga de refrigerante, este comportamiento empieza a mantenerse en una condición de operación donde satisface la condición ambiente al que está siendo operado el equipo de refrigeración, y el refrigerante pudiera ser acumulado en equipos de almacenamiento de refrigerante, como el recipiente de líquidos. En el caso del R-448A, se observa que el caudal va disminuyendo, representando que cada carga suministrada implicaba una apertura menor debido a la entalpía de evaporación. Para la carga de 2.9 kg, se observó una disminución debido a que cumple enteramente la capacidad del evaporador. Se había comentado en el análisis individual del R-448A que la temperatura de saturación había disminuido de manera importante y que por esa razón pudiera ser que en esta condición se esté comportando con una mayor apertura en la válvula de expansión.

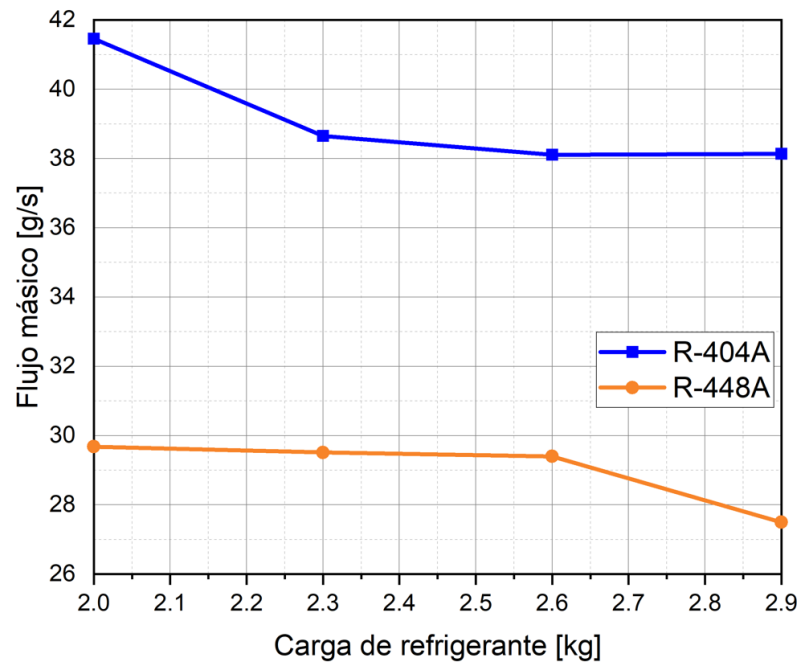


Figura 4.13: Comparación del flujo másico a diferentes cargas de refrigerante R-404A y R-448A.

En varios estudios experimentales [7] [23] del R-448A como sustituto del R-404A, se encontró que el flujo másico del R-448A resultaba ser mayor que el R-404A debido al efecto de cambio de fase que aumentará la apertura de la válvula de expansión y por ende un mayor flujo de refrigerante, en este caso como se ve en la Figura 4.13, se tiene un comportamiento diferente al reportado, y esto se debe a que la válvula de expansión tuvo una menor apertura usando el refrigerante R-448A que el del R-404A.

El funcionamiento de la apertura de la válvula de expansión se puede observar por medio del parámetro del flujo másico en el equipo de refrigeración. Analizando el flujo másico, se evalúa el comportamiento del calor en el evaporador como se ve en la Figura 4.14. Observando el comportamiento del refrigerante R-404A en la gráfica A de la Figura 4.14, se observa como los puntos del flujo másico  $c$  y  $d$  tienen una diferencia de un 0.5%. Al tener un mayor flujo másico, se observa un aumento de la carga térmica del evaporador en  $b$ , el aumento llega a ser de 0.93% mayor del punto  $c$ . El punto  $b$  es el punto de mayor calor en el evaporador usando el refrigerante R-404A. El punto  $a$  fue el más bajo, llegando al valor de 1.69 kW. Estos puntos se pueden observar en la Tabla 4.1 para representar la carga de refrigerante utilizada.

Tabla 4.1: Nombre de puntos de cargas.

Puntos de refrigerante		
Refrigerante	Letra	Carga de refrigerante [kg]
R-404A	$a$	2.0
	$b$	2.3
	$c$	2.6
	$b$	2.9
R-448A	$w$	2.0
	$x$	2.3
	$y$	2.6
	$z$	2.9

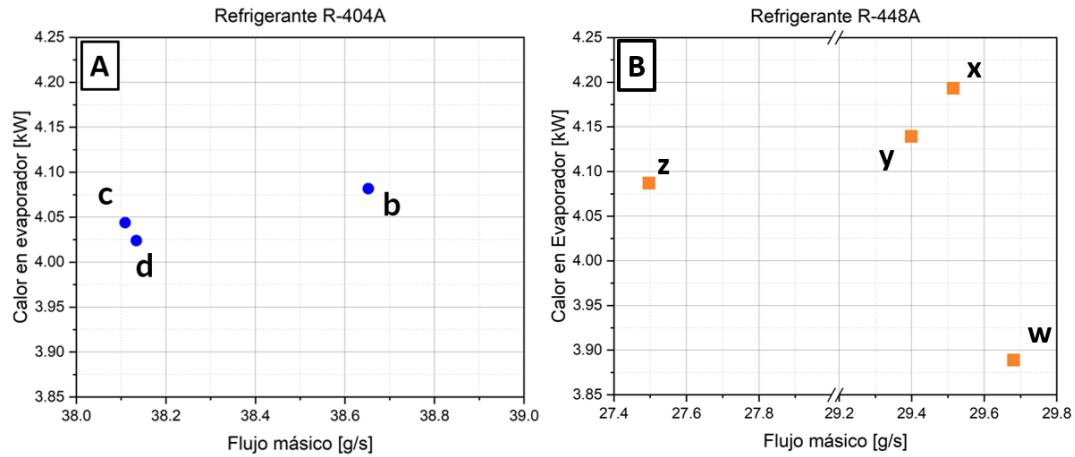


Figura 4.14: Gráfica de flujo másico contra el calor en el evaporador empleando los refrigerantes de interés. En la gráfica A tiene el comportamiento del refrigerante R-404A y en la gráfica B el comportamiento del refrigerante R-448A.

El comportamiento del R-448A se observa en la Figura 4.14 en la gráfica B, y el comportamiento del rango de operación, que es de menos de 9 g/s en promedio a comparación de los valores de la grafica A. Esta disminución del flujo másico nos da a entender una importante reducción en la apertura de la válvula de expansión, logrando un comportamiento adecuado. El comportamiento empieza en el punto *y*, donde la disminución del flujo másico tiene una alta carga térmica en el evaporador, siendo más elevado que los puntos de la gráfica A. El punto *x* es el de más carga térmica en el evaporador de las gráficas A y B, y supera al punto *b* en un 2.73%. Con una carga menor representado con *w*, tiene una mayor apertura y un mayor flujo másico, e impacta de forma importante en la carga térmica en el evaporador, con una reducción del 7.47% con respecto al punto *x*, siendo el punto más bajo de las gráficas A y B. El punto *x* es el punto de mayor carga térmica en el evaporador usando R-448A. El punto *z* tiene una carga térmica de 4.087 kW que es un valor similar a los vistos en la gráfica B, sin embargo, no se encuentra en la gráfica ya que tiene un flujo másico bajo de 27.49 g/s, notando una estrangulación mayor en la válvula de expansión.

El consumo eléctrico neto se puede analizar también en función del flujo másico

en la Figura 4.15, donde en la gráfica A de la Figura 4.15, el punto *c* tiene un consumo neto elevado, este valor es el más alto para graficas A y B. Conforme aumenta del flujo másico, el consumo eléctrico neto disminuye, hasta llegar al punto *b*, esta disminución es de 2.62 % y va de la carga de 2.6 kg hasta 2.3 kg. El punto *b* resulta ser el de menor consumo eléctrico neto para las gráficas A y B vistas en la Figura 4.15. El punto *a*, tiene 2.0903 kW de consumo eléctrico neto, siendo un 2.85 % menor al punto *b* y un 7.51 % mayor al punto *b*.

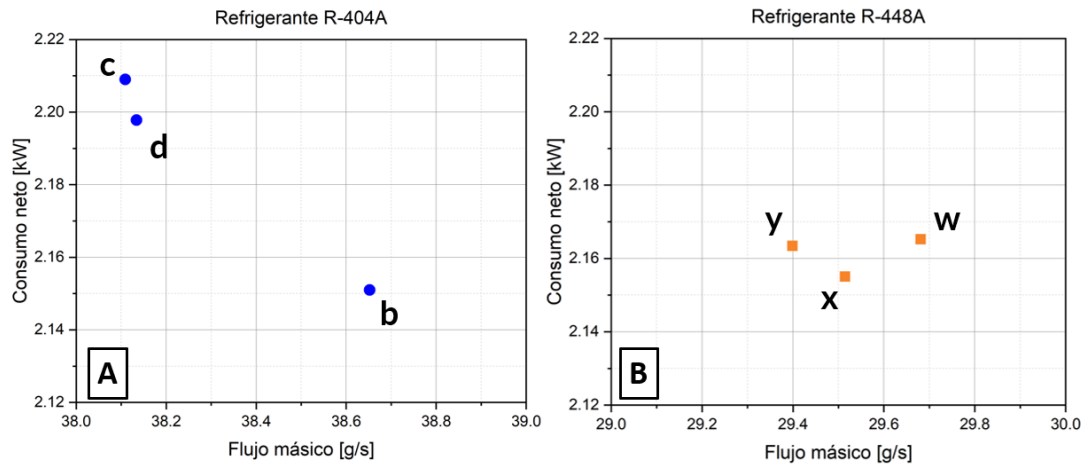


Figura 4.15: Grafica de flujo másico contra el consumo eléctrico neto de los refrigerantes de interés.

En la gráfica B de la Figura 4.15, se observa un comportamiento similar entre los puntos *w*, *x* y *y*. Al tener un flujo másico similar podríamos decir que la apertura de la válvula de expansión se mantiene en dichos puntos. Los puntos tienen un valor promedio de 2.16 kW manteniendo una condición adecuada. El punto *x* es el de menor consumo en la gráfica B, siendo un valor de 2.155 kW con la carga de 2.3 kg. En el punto *z*, tiene un consumo eléctrico neto de 2 kW siendo un 7.63 % menor al punto *w* de mayor consumo eléctrico neto.

Los estados termodinámicos de las condiciones con diferentes refrigerantes y con la misma carga de 2.6 kg se puede observar en el diagrama de Mollier, entalpía-presión, de la Figura 4.16. Esta comparación se hace teniendo en cuenta la carga de refrigerante adecuada del R-404A de 2.6 kg, ya que se observó que su comportamiento era el que tenía el COP más alto junto con la temperatura y presiones de operación más adecuadas. En el caso del refrigerante R-448A, se busca un comportamiento adecuado con la misma carga de refrigerante de 2.6 kg para poder evaluarlos en esa misma condición.

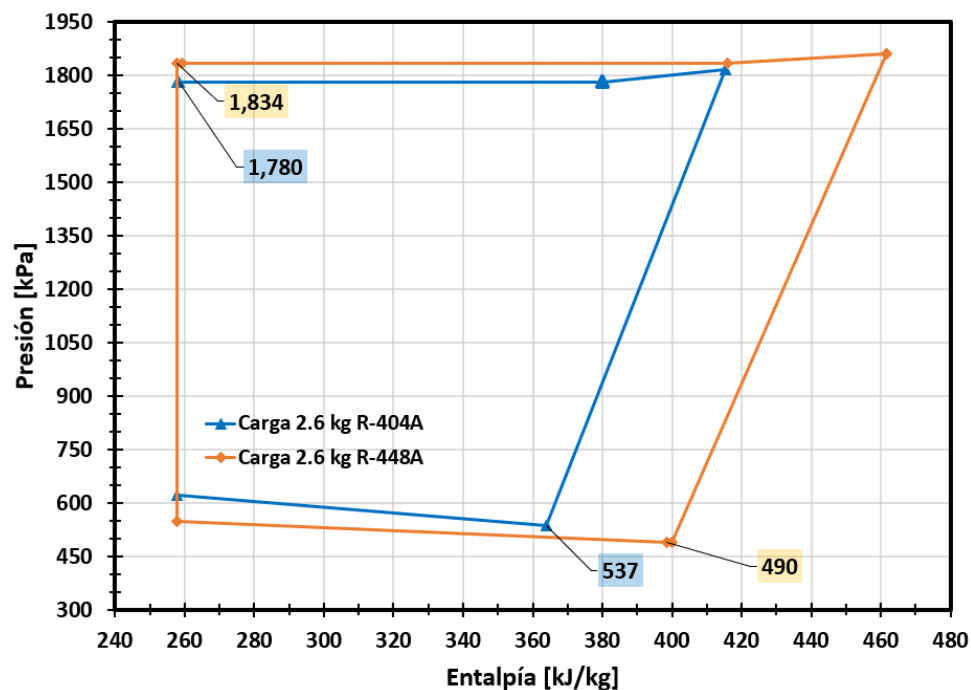


Figura 4.16: Diagrama de Mollier P-h de los refrigerante R-404A y R-448A con cargas similares de 2.6 kg.

Se puede observar en la Figura 4.16, que cuando se trata del refrigerante R-448A tiene una gran cantidad de calor, tanto el absorbido por el evaporador como el desechado por el condensador, en comparación con el R-404A. También se puede observar el gran espaciamiento que tienen las gráficas de los refrigerantes de interés, esto tiene mucho que ver con la gran cantidad de energía que se necesita para el cambio de fase en el caso del refrigerante R-448A. El refrigerante R-448A, opera



presiones que superan el funcionamiento del R-404A en el caso del condensador, y también tiene presiones que van por debajo de lo que maneja en el evaporador. La presión en la salida del condensador del R-448A es de 1834 kPa, y del R-404A de 1780 kPa. En el caso de la presión en la salida del evaporador es más alta para el R-404A (537 kPa) que para el R-448A (490 kPa). Esto debido a los puntos de saturación del refrigerante R-448A, que en este caso no afectó el funcionamiento del equipo de refrigeración.

La eficiencia energética involucra muchos aspectos importantes de un sistema de refrigeración, ya que es el trabajo realizado por el compresor y el calor que extrae el evaporador del sistema.

En la Figura 4.17, se observa el coeficiente de desempeño respecto a la carga de refrigerante, donde se encuentra un incremento al inicio de la carga en ambos casos, también se puede observar cómo posterior a la carga de 2.3 kg para ambos casos, se tiene un comportamiento donde se mantiene el coeficiente de desempeño, y que el aumento de carga de refrigerante no afectó como al principio.

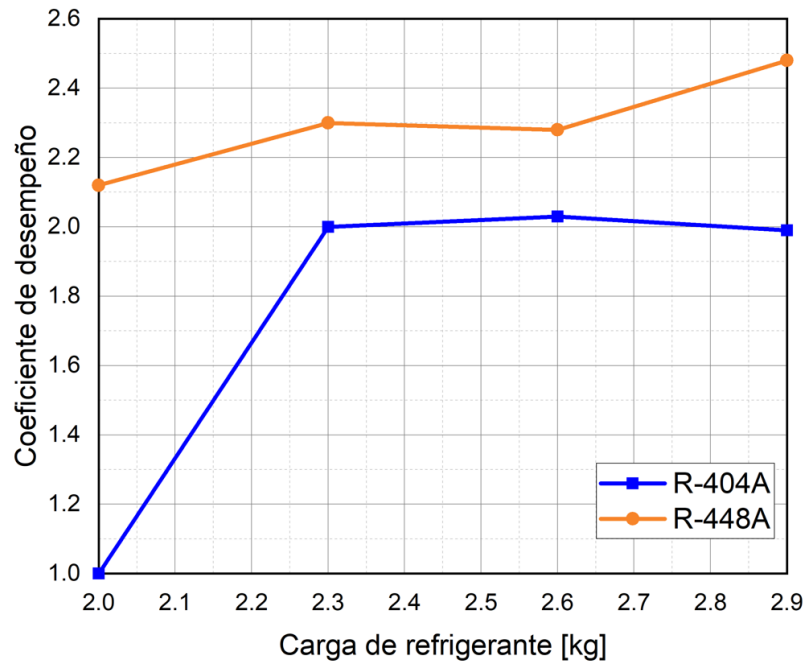


Figura 4.17: Comparación del coeficiente de desempeño a diferentes cargas de refrigerante con los refrigerantes R-404A y R-448A.

Esto se debe a que la carga de 2.3 kg es una carga que permite realizar el ciclo de refrigeración en las condiciones a las que está siendo sometido en la prueba, logrando acumular el refrigerante innecesario en el receptor de líquidos que se encuentra antes de la entrada del compresor. En la carga de 2 kg, se ve un aumento del COP de un 112 % mayor para el R-448A, respecto al R-404A, es por esa razón que se observa una gran diferencia en estos resultados. Para las cargas de 2.3 y 2.6 kg, se observan un aumento en ambas cargas térmicas, de 15 % y de 12 % respectivamente, y para la carga de 2.9 kg, el aumento llegó a ser de 25 %. La evaluación del R-448A pudiera realizarse para mayores cargas, para poder observar el fenómeno visto con la evaluación del refrigerante R-404A, donde se almacena el refrigerante que no necesita el sistema y lo utiliza cuando las condiciones ambientales lo requieran.

El comportamiento del coeficiente de desempeño se complementa con la Figura 4.18, que muestra el comportamiento del COP con respecto al flujo másico. El comportamiento que se observa en la gráfica A, muestra que el aumento del flujo

másico no aumenta el COP gracias al efecto de la válvula de expansión. El punto más alto de COP que se observa en la gráfica A, es el correspondiente al punto *c* con un flujo másico de 38.1 g/s. El punto que no se ve en la gráfica A corresponde al punto *a*, dando un valor de COP de 1 y un valor de flujo másico de 41.4 g/s, que es un valor 8.78% mayor que el flujo másico de mayor COP, mismo que resulta en una apertura más grande de su funcionamiento adecuado.

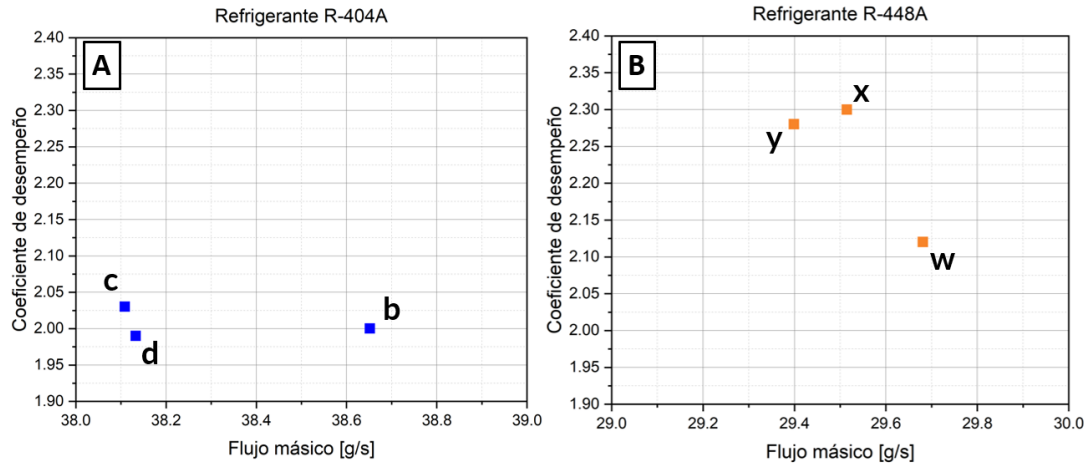


Figura 4.18: Comparativa de flujo másico contra el coeficiente de desempeño de los refrigerantes de interés.

En la misma Figura 4.18, en la gráfica B, se tiene el comportamiento con el refrigerante R-448A. Se observa que el punto de mayor eficiencia es el que le corresponde al punto *x* con valor de 29.39 g/s. El punto que no se ve en la gráfica B corresponde al punto *z*, dando un valor de COP de 2.48, siendo un valor alto, y un valor de flujo másico de 27.49 g/s, que es un valor 6.85% menor que el flujo másico del punto *x*, entendiéndose una mayor estrangulación en la válvula de expansión.

La comparación del COP entre estos refrigerantes de interés es diferente al estudio de Mehmet Altinkaynak [24], donde realizaron pruebas teóricas del comportamiento del COP para sustitutos del refrigerante R-404A, encontrándose que el R-448A, tenía un comportamiento similar al R-404A. En este experimento se observó que existe una diferencia entre estos dos refrigerantes con respecto al COP.

En estudio experimental hecho por Qingging D.[12], el COP del R-448A fue mayor en comparación con el R-404A, y a su vez, el refrigerante R-448A requirió más carga de refrigerante para el desempeño adecuado. Esto se observa en la Figura 4.17, donde efectivamente se tiene un COP del R-448A más elevado que el correspondiente al R-404A como se puede ver con la comparación entre la carga de 2.3 y 2.6 kg, sin embargo la carga de refrigerante tienen una condición donde pudieran ser comparables entre sí, esta carga es de 2.6 kg. El comportamiento del R-448A, como se ve en la Figura 4.17, tiene un gran potencial de ser un refrigerante de un elevado coeficiente de desempeño.

### 4.3 ESTUDIO DE IMPACTO TOTAL DE CALENTAMIENTO EQUIVALENTE TEWI

Para este estudio se tomaron en cuenta valores utilizados en la literatura, para comparar el comportamiento que tienen los refrigerantes de interés de esta investigación. Los datos que se pueden ver en la Tabla 4.2, son datos relevantes para el estudio. Puntos importantes por comentar en la Tabla 4.2, es que la tasa de fuga anual es un valor que depende de la cantidad de refrigerante, en este caso se presenta el valor de porcentaje que se supone podría fugar. La vida útil del equipo toma en cuenta que son equipos de gama comercial y están diseñados para el uso prolongado, en la literatura y en trabajos se han visto tiempos de 8, 10, y hasta 15 años de vida útil para diversos equipos de refrigeración [9][12].

El estudio requiere el análisis de los resultados de la evaluación, y el estudio de un equipo de refrigeración con el refrigerante elevado. En esta investigación se trabajaron con diversas cargas de los refrigerantes para conocer la carga adecuada y analizar un comportamiento apropiado para el equipo de refrigeración. Es por este punto, que se decidió el análisis del impacto total de calentamiento equivalente, tomando en cuenta las cargas que se presentaron con anterioridad.

Tabla 4.2: Parámetros para la evaluación del TEWI para los diferentes refrigerantes [12][51].

Parámetros	R-404A	R-448A
Tasa de fuga anual	10 %	10 %
$GWP_{100años}$	3750	1390
Vida útil [años]	15	15
Emisión de CO <sub>2</sub> (€)	0.578	0.578

Parámetros como la carga de refrigerante y consumo anual son importantes para el estudio del TEWI, estos son calculados de manera independiente considerando un funcionamiento constante promedio, evaluado en un periodo anual considerando cada carga de refrigerante. El equipo de refrigeración utilizado para esta prueba no cuenta con deshielo o un tiempo de suspensión, como otros equipos de refrigeración, por lo que pudiera ser que el consumo anual resulte más alto que otros estudios TEWI.

En la Figura 4.19 se tiene los resultados del estudio TEWI con los refrigerantes de interés. Se puede observar que para la carga de 2 kg, el refrigerante R-404A tiene un TEWI mayor en 1.0% con respecto al R-448A. En la carga de 2.3 kg, el refrigerante R-404A fue mayor que la carga de 2 kg, teniendo un valor de 1.10% superior respecto al refrigerante R-448A. El aumento en la carga a 2.6 kg, conduce a un valor de 1.15% para el refrigerante R-404A en comparación con el R-448A. En la carga de 2.9 kg, se tuvo una diferencia de 1.32% entre estos dos valores de TEWI mostrando que el refrigerante R-404A tiene un aumento, pero se presenta una disminución para el R-448A.

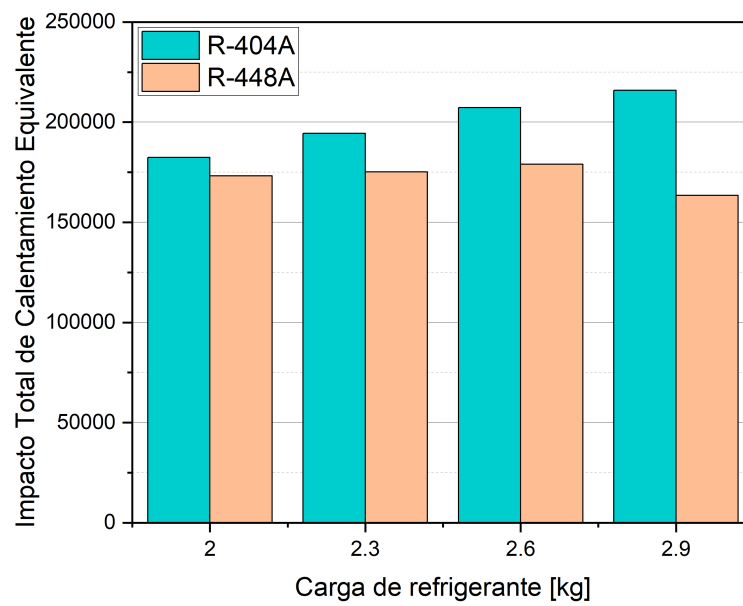


Figura 4.19: Comparación de TEWI para diferentes cargas de los refrigerantes R-404A y R-448A.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

*Con los resultados y las interpretaciones se lograron observar relaciones y efectos de importancia que enriquecen la investigación del desempeño energético en sistemas de refrigeración que emplean los refrigerantes de interés. Por lo que las conclusiones más importantes de este estudio se van a presentar en este capítulo.*

*En este apartado se hablará también de los trabajos futuros que enriquecerán varias investigaciones posteriores y facilitar la investigación de los equipos de refrigeración comerciales.*

## 5.1 CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo de investigación es la evaluación de un sistema de refrigeración de media/baja temperatura, utilizando el refrigerante R-448A como sustituto de bajo GWP al R-404A.

Para el desarrollo de este trabajo se seleccionó un evaporador, una unidad condensadora y una válvula de expansión para la construcción de un sistema de refrigeración. Tomando en cuenta características como la capacidad de refrigeración, consumo eléctrico, y presiones de operación, se realizó la selección adecuada de estos componentes. Además de la selección de los equipos, se realizó una instalación eléctrica para el consumo y la puesta en marcha de todo el equipo de refrigeración. Se seleccionó y se instrumentaron diversos medidores para el registro de los parámetros de importancia para un equipo de refrigeración. Se implementó un control de inicio de operación del equipo de refrigeración, que puso en marcha el equipo de refrigeración. También se preparó un sistema de control para el funcionamiento de la válvula de expansión tipo EEV.

Se preparó además un sistema de adquisición de datos empleado el programa LabVIEW para la lectura y la interpretación de los diversos sensores utilizados en las pruebas.

Se utilizó un cuarto de ambiente controlado para la ejecución de las pruebas del equipo de refrigeración, misma que está ubicada en el Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Universidad Autónoma de Nuevo León.



Una vez revisados los resultados experimentales de esta investigación y las comparaciones de los refrigerantes de interés, se pueden generar las conclusiones que se verán a continuación:

1. Se encontró un aumento del COP para las diversas cargas evaluadas del refrigerante R-448A. El aumento del COP fue de un 112/15/12/24.6 %, con respecto al refrigerante R-404A, para las cargas de refrigerante de 2, 2.3, 2.6 y 2.9 kg, respectivamente.
2. La carga adecuada para el equipo de refrigeración es de 2.6 kg tanto para el R-404A, como para el R-448A, ya que con esta carga se encontró un desempeño elevado y una operación adecuada para el equipo de refrigeración.
3. Se encontró un rango de carga de refrigerante donde la carga térmica es similar. A partir de la carga de 2.3 kg, los refrigerantes de interés se comportaron de una manera similar para cargas de refrigerante superiores. La carga de 2.3 kg para ambos refrigerantes produce la más alta carga térmica del evaporador. El flujo másico más grande del R-404A demostró tener la mayor carga térmica, mientras que también se puede observar el mismo efecto para el R-448A.
4. El consumo eléctrico neto del equipo de refrigeración con el uso del refrigerante R-404A, mostró un aumento mientras se le suministraba una mayor carga de refrigerante hasta llegar a 2.6 kg, cuando el refrigerante empezó a almacenarse en el receptor de líquidos de la unidad condensadora. En el caso del R-448A, se observó que a partir de la carga hasta de 2.6 kg se mantuvo en una condición promedio de 2.16 kW. Al agregar más refrigerante, su consumo disminuyó de manera importante. Este efecto no es benéfico para el equipo de refrigeración, ya que observó que el flujo másico para la carga de 2.9 kg disminuyó de una manera importante, implicando una estrangulación mayor, afectando la operación del equipo de refrigeración.
5. El flujo másico para el R-404A disminuyó conforme más carga de refrigerante se suministró, hasta llegar a una condición termodinámica a la salida del

evaporador para mantener la apertura de la válvula de expansión, logrando también mantener el flujo másico. En el caso del refrigerante R-448A, se observó un comportamiento que no se vio afectado por la carga de refrigerante, pero si se vio afectado por la carga térmica en el evaporador. Para una carga de 2.9 kg de refrigerante, se observó una reducción en el flujo másico, lo cual conduce a una operación poco favorable para el sistema de refrigeración.

6. En la carga de 2.6 kg de ambos refrigerantes se observó que el R-448A tiene una mayor presión en el condensador, sin embargo, tiene una menor presión en el evaporador en comparación con el refrigerante R-404A. El refrigerante R-448A tiene desplazamiento de entalpías en el desempeño del compresor respecto al refrigerante R-404A, según los resultados.
7. En el estudio TEWI se observó que el R-448A tiene un valor menor que el R-404A, con diferencias de 10/15/32 % para las cargas de 2.3, 2.6 y 2.9 kg. Este efecto se observa en el trabajo de Qingqing Deng [12] donde en la sustitución del R-404A por el R-448A se encuentra un 33 % menor en el valor del TEWI. Esto muestra un efecto positivo para el medio ambiente.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS

A partir de este estudio y los resultados obtenidos en este trabajo de tesis surgieron algunas propuestas con la finalidad de aprovechar aún más el análisis realizado.

Como trabajos futuros se plantean las siguientes actividades:

- Evaluación de otros refrigerantes de bajo GWP para la sustitución del R-404A, como el refrigerante R-449A que es un refrigerante parecido al R-448A en su composición química.
- Evaluación con condiciones ambientales independientes para el evaporador y condensador para el equipo de refrigeración.
- Evaluar el equipo de refrigeración a varias cargas térmicas, estudiar además el comportamiento que tiene con el control de flujo de aire suministrado para el condensador y el evaporador.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Roberto Ricardo Aguiló. *Refrigeración y Aire acondicionado su importancia e impacto en el medio ambiente*. Termosistemas, "http://www.termosistemas.com.ar/sitio/vernota.php?nota=197", 1 edition, 2021.
- [2] Antonio Nieto. *El frío en la conservación de alimentos*. Mundo HVACR, "https://www.mundohvacr.com.mx/2008/05/el-frio-en-la-conservacion-de-alimentos/ ", 1 edition, 2008.
- [3] IEA. *The Future of Cooling, Opportunities for energy-efficient air conditioning*. paris, France: IEA, <https://www.iea.org/futureofcooling>, 1 edition, 2018.
- [4] LEBRUN P. ZIEGLER F. DUPONT J.L., DOMANSKI P. The role of refrigeration in the global economy. *International Institute of Refrigeration*, 32:1–13, 2019.
- [5] James M. Calm. The next generation of refrigerants – historical review, considerations, and outlook. *International Journal of Refrigeration*, 31(7):1123 – 1133, 2008.
- [6] Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Bernardo Peris, Francisco Molés, and Gumersindo Verdú. Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, 105:756–762, 2015.

- 
- [7] Juan Manuel Mendoza-Miranda, Adrián Mota-Babiloni, and Joaquín Navarro-Esbrí. Evaluation of R448A and R450A as low-GWP alternatives for R404A and R134a using a micro-fin tube evaporator model. *Applied Thermal Engineering*, 98:330–339, 2016.
- [8] K. Zolcer Skačánová and M. Battesti. Global market and policy trends for CO<sub>2</sub> in refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 107:98–104, 2019.
- [9] Juan P. Plazas Monroy. *Los refrigerantes y el medio ambiente*. Universidad Politécnica de Catalunya, PhD thesis, 1 edition, 2012.
- [10] I.H. Bell M.L. Huber Lemmon, E.W. and M.O. McLinden. NIST standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP. *Gaithersburg, MD, USA., National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program*, 1:Version 10.0, 2018.
- [11] Pavel Makhnatch, Adrián Mota-Babiloni, Jörgen Rogstam, and Rahmatollah Khodabandeh. Retrofit of lower GWP alternative R449A into an existing R404a indirect supermarket refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 76:184–192, 2017.
- [12] Qingqing Deng, Zhongbin Zhang, and Xinhao Hu. Thermoeconomic and environmental analysis of an inverter cold storage unit charged R448A. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45:101159, 2021.
- [13] Food Rural Affairs Department for Environment. *Details of bans on the use of fluorinated greenhouse gases (F gases) in new equipment like refrigeration systems*. GOV.UK, "https://www.gov.uk/guidance/bans-on-f-gas-in-new-equipment", 1 edition, 2014.
- [14] Energy Industrial Strategy Department for Business. Conversion factors 2020: condensed set. *GOV.UK*, 1, 07 2020.
- [15] J.M. Belman-Flores, A.P. Rodríguez-Muñoz, C. Gutiérrez Pérez-Reguera, and A. Mota-Babiloni. Experimental study of R1234yf as a drop-in replacement for

- R134a in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 81:1 – 11, 2017.
- [16] Samaneh Daviran, Alibakhsh Kasaeian, Soudabeh Golzari, Omid Mahian, Shahin Nasirivatan, and Somchai Wongwises. A comparative study on the performance of HFO-R1234yf and HFC-R134a as an alternative in automotive air conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 110:1091–1100, 2017.
- [17] Vedat Oruc, Atilla Devecioğlu, and Sertaç Ender. Improvement of energy parameters using R442A and R453A in a refrigeration system operating with R404A. *Applied Thermal Engineering*, 129:243–249, 01 2018.
- [18] Xiao-hong Han, Yu Qiu, Yingjie Xu, Men-yuan Zhao, Qin Wang, and Guangming Chen. Cycle performance studies on a new HFC-161/125/143a mixture as an alternative refrigerant to R404A. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13, 02 2012.
- [19] Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Ángel Barragán, Francisco Molés, and Bernardo Peris. Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline. *International Journal of Refrigeration*, 44:81–90, 2014.
- [20] O. Abdelaziz and B.Fricke. Working fluids: Low global warming potential refrigerants, building technologies office peer review. *Arlington, VA: US Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory*, pages 1–10, 01 2014.
- [21] Baba A. and H. Yamaguchi. Performance evaluation of condensing unit using low GWP refrigerants. *The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRAIA). Proceedings of The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology. Kobe, Japan*, pages 20–21, 11 2014.
- [22] H. Urbieta. System drop-in tests of refrigerants N-40 and L-20 in a R-404a ice machine, air-conditioning, heating, and refrigeration institute (AHRI) low-gwp

- alternative refrigerants evaluation program (low-GWP AREP) test Report 48. *Arlington, VA: AHRI.*, 2015.
- [23] Tabeel A. Jacob, Ethan P. Matty, and Brian M. Fronk. Comparison of R404A condensation heat transfer and pressure drop with low global warming potential replacement candidates R448A and R452A. *International Journal of Refrigeration*, 116:9–22, 2020.
- [24] Mehmet Altinkaynak. Exergetic performance analysis of low GWP alternative refrigerants for R404A in a refrigeration system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3):842–850, 02 2021.
- [25] Rodrigo Doménech, Daniel Sánchez, Ramon Cabello, Laura Nebot Andres, and Jesús Catalán Gil. R-407H as drop-in of R-404A. experimental analysis in a low temperature direct expansion commercial refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 80:11–23, 08 2017.
- [26] Bruno J. Cardoso, Francisco B. Lamas, Adélio R. Gaspar, and José B. Ribeiro. Refrigerants used in the portuguese food industry: Current status. *International Journal of Refrigeration*, 83:60–74, 2017.
- [27] Liutauras Vaitkus and Vytautas Dagilis. Analysis of alternatives to high GWP refrigerants for eutectic refrigerating systems. *International Journal of Refrigeration*, 76, 01 2017.
- [28] Gang Li. Comprehensive investigation of transport refrigeration life cycle climate performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21:33–49, 04 2017.
- [29] Mark Kedzierski and Dong gyu Kang. Horizontal convective boiling of R448A, R449A, and R452B within a micro-fin tube. *Science and Technology for the Built Environment*, 22:00–00, 06 2016.
- [30] The Chemours Company. Refrigerant safety data sheet, version 3.1. *Opteon XP40*, 2015.

- [31] YUNUS A. ÇENGEL and AFSHIN J. GHAJAR. *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. The McGraw-Hill, 4 edition, 2011.
- [32] Jorge Alberto Puebla. *Manual de Buenas Prácticas en Refrigeración*. Fondo de Reconversión Industrial, FONDOIN, Av. Libertador, C.C. Los Cedros, Piso 5, La Florida, Caracas 1050, Venezuela, 1 edition, 2007.
- [33] YUNUS A. ÇENGEL MICHAEL A. BOLES. *Termodinámica*. The McGraw-Hill, 7 edition, 2011.
- [34] Frank P. Incropera and David P. DeWitt. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall, 4 edition, 1999.
- [35] W.-D. Gruhle and R. Isermann. Modeling and Control of a Refrigerant Evaporator. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(4):235–240, 12 1985.
- [36] D. P. Finn and C. J. Doyle. Control and optimization issues associated with algorithm-controlled refrigerant throttling devices. *Univ. Coll. of Dublin (IE)*, 106(1), 7 2000.
- [37] G. L. Wedekind. Transient response of the mixture-vapor transition point in two-phase horizontal evaporating flow. *University of Illinois at Urbana-Champaign*, 1(1), 1965.
- [38] ASHRAE. Ashrae standard 34. <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/ashrae-refrigerant-designations>, 1, 2022.
- [39] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, 2000.
- [40] Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Protocolo de kyoto, 61702:20, 1998.
- [41] Naciones Unidas. Convención marco sobre el cambio climático. page 40, 12 2015.



- [42] G.F. Hundy, A.R. Trott, and T.C. Welch. Chapter 3 - refrigerants. In G.F. Hundy, A.R. Trott, and T.C. Welch, editors, *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps (Fifth Edition)*, pages 41–58. Butterworth-Heinemann, fifth edition edition, 2016.
- [43] Pavel Makhnatch and Rahmatollah Khodabandeh. The role of environmental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant. *Energy Procedia*, 61:2460–2463, 2014. International Conference on Applied Energy, ICAE2014.
- [44] United States Environmental Protection Agency EPA. Understanding global warming potentials.
- [45] The intergovernmental panel on climate change. Climate changes 2014 - synthesis report.
- [46] The australian institute of refrigeration air conditioning and heating. *Methods of calculating total equivalent warming impact (TEWI)*. 1 edition, 2012.
- [47] Secretaría de Gobierno Mexicano. *Registro nacional de emisiones*. 1 edition, 2018.
- [48] IPCC. Energy. *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*. 2 edition, 2006.
- [49] Secretaría de Gobernación de México SEGOB. Proyecto de norma oficial mexicana proy-nom-012-ener-2017 - eficiencia energetica de unidades condensadoras y evaporadoras para refrigeración-limites-métodos de prueba y etiquetado. *Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE)*, 3:1, 2017.
- [50] A. Morales-Fuentes, H.G. Ramírez-Hernández, S. Méndez-Díaz, S. Martínez-Martínez, F.A. Sánchez-Cruz, J.C. Silva-Romero, and H.D. García-Lara. Experimental study on the operating characteristics of a display refrigerator phasing

- 
- out R134a to R1234yf. *International Journal of Refrigeration*, 130:317–329, 2021.
- [51] M.Zhang. Energy analysis of various supermarket refrigeration systems. *International refrigeration and air conditioning conference at purdue*, 1, July 17-20 2006.

# AUTOBIOGRAFIA

---

Mi nombre es César Irak Villanueva Garza nací el 25 de noviembre de 1994 en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. El gran apoyo de mi madre Irma Leticia Garza Gonzáles me ha ayudado mucho en mi formación. Siempre había sido muy bueno en la clase de matemáticas, mientras que tenía mucha dificultad en las otras materias del gran grupo de colegios a los que he sido estudiante. Mi mama, siempre le ha preocupado mi educación y quiso hacer todo lo posible por que yo tenga un excelente futuro pese a las adversidades que pasaba la familia. Con el apoyo de mi hermano Martin que me ayudaba a soñar y a sobrellevar las adversidades de la familia, logre llenarme de inspiración y de querer ser cada vez mejor.

En los tiempos de secundaria, siempre me preguntaba qué era lo que quería hacer en mi vida, como me veía siendo un adulto. En aquellos tiempos, solo podía soñar con ser un artista o un diseñador o un investigador, pero viendo mis terribles calificaciones la parte de ser un investigador lo veía muy difícil. Todo cambio cuando conocí al que ahora admiro y respeto como mi papa Florentino López Cortez, que logro ayudarme con varias fallas que tenía y a desarrollar mi potencial para el pensamiento lógico y matemático, junto a él la clase de física lograba entenderse de una manera clara. Él fue influyéndome cada vez más en la idea de estudiar una carrera donde gobernaban estas materias que muchos temían. Gracias a mi mamá y a mi papá, logre ingresar a la ingeniería.

Al entrar a la ingeniería me llenaba de miedos e inseguridades, tenía la idea de cambiarme de carrera o de facultad en sus inicios, veía que dejaba materias y solo

me ayudaban a considerar mi estadía en la facultad de ingeniería. Pero pensando y planeando una estrategia se pudo facilitar el estudio de la ingeniería, la clave fue el enfoque de las materias y la reducción de estas. La carga de materias por semestre en mi parecer las sentía muy abrumadoras y en lugar de avanzar solo me fatigaban más y no lograba prestar atención a estas, es por lo que la reducción de horas a una cantidad más manejable me ayudo a canalizar mejor el estudio y poder avanzar lento, pero seguro.

En mi trayectoria en la universidad conocí al profesor Hugo Ramírez Hernández, que me impartió la clase de Refrigeración HVAC. Realmente su forma de ser fue muy amigüera pero responsable con los alumnos hizo que la enseñanza fuera mejor que con otros maestros y nos había hecho la invitación a todo el grupo a ver los laboratorios donde él trabajaba como investigador, algo en mí me hizo tener ganas de trabajar con él, en el laboratorio de ambiente controlado. Es por esta razón que al principio le comenté que quería ser becario en el laboratorio para apoyar en las actividades del laboratorio, donde fue el inicio de la estadía en los laboratorios LIITE donde pude desarrollar de una excelente manera mis conocimientos de refrigeración en teoría y en la práctica. El trabajar con proyectos de tesis, proyectos de empresas, trabajar con artículos de investigación y con normativas enfocadas a la refrigeración me ayudaron a darme un enfoque en mi vida y a querer más trabajos así. Con el paso del tiempo logré inspirarme y ser una mejor persona. Con el avance del tiempo, siempre era un semestre para estar en el laboratorio de ambiente controlado, ya sea para mi proyecto de carrera de ingeniería o para hacer mi servicio social, como también querer hacer una tesis para la licenciatura que para mí desgracia no se pudo concluir. Con el paso del tiempo, recibí también la confianza del Dr. Fausto Sánchez Cruz que fue testigo de mis aportes en el laboratorio pudiéndome ofrecer un trabajo como becario colaborador del laboratorio de ambiente controlado. No podía estar más feliz que me pagaran por lo que hacía de gratis, realmente me lleno con muchas ganas de salir adelante y querer trabajar con este grupo de investigación del que le fui agarrando cariño.

Acabando la licenciatura en ingeniería, estaba convencido en querer entrar a la maestría en ciencias del grupo al que apoyaba mucho, es por esa razón que después de un semestre, pude ingresar a la maestría en ciencias con orientación en energías térmicas y renovables. No cabe duda de que fue una de las mejores decisiones que tome, ya que había trabajado con personas que estudiaban la maestría, yo me veía como ellos y quería ser como ellos, siempre innovando y mejorando las tecnologías del frío.

Para mi desgracia la pandemia del 2020 atenuó el movimiento de la universidad entera, sin embargo, nunca fue un descanso para el grupo de investigación porque seguían en movimiento, ya sea con proyectos de la industria como proyectos de maestría, ellos seguían adelante. Con el paso del tiempo en la maestría, pude avanzar y mejorar aún más mis habilidades como investigador, pude tener una mejor crítica y una forma diferente de ver las cosas gracias al apoyo del grupo de investigación al que pertenecía y a mi asesor el Dr. Arturo Morales Fuentes.

Ahora solo tengo un sentimiento de querer ser el mejor en un área de mi interés, la refrigeración con  $CO_2$ . Sé que puedo ser de lo mejor si me lo propongo y le hecho todas las ganas del mundo. Yo siento que esto es solo es el inicio, el inicio de mi vida donde tengo una decisión y unas grandes ganas de ser el mejor.



Figura 1: Fotografía tomada en la conferencia anual de la SOMIM del 2021.