



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO
MEDIANTE REFRIGERANTE R-22 CON REFRIGERANTES ECOLÓGICOS**

Mauro Fernando Santizo Hernández

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Muñoz Paz

Guatemala, noviembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO
MEDIANTE REFRIGERANTE R-22 CON REFRIGERANTES ECOLÓGICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MAURO FERNANDO SANTIZO HERNÁNDEZ
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO MUÑOZ PAZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Christian Moisés de la Cruz Leal |
| VOCAL V | Br. Kevin Armando Cruz Lorente |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. Víctor Manuel Ruíz Hernández |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez |
| EXAMINADOR | Ing. Roberto Guzmán Ortiz. |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO MEDIANTE REFRIGERANTE R-22 CON REFRIGERANTES ECOLÓGICOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 13 de junio de 2016.

Mauro Fernando Santizo Hernández

Guatemala. 17 de agosto del 2020.

Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Morales:

Por este medio me dirijo a usted, para informarle que he procedido a revisar y aprobar el trabajo de graduación elaborado por la estudiante **Mauro Fernando Santizo Hernández** con No. de carné 201122754, trabajo titulado **“COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO MEDIANTE REFRIGERANTE R-22 CON REFRIGERANTES ECOLÓGICOS”**.

Considero que el trabajo presentado por la estudiante ha sido desarrollado cumpliendo con los reglamentos y siguiendo las recomendaciones de la asesoría, por lo que doy mi aprobación y solicito autorizar el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me suscribo de usted, respetuosamente,

Ing. Jorge Mario Muñoz Paz
Colegiado 5396
Asesor

Jorge Mario Muñoz Paz
Ing. Mecánico Industrial
Col. 5396

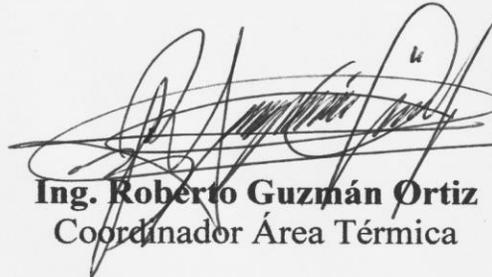


USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen favorable del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **“COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO MEDIANTE REFRIGERANTE R-22 CON REFRIGERANTES ECOLÓGICOS”** desarrollado por el estudiante **Mauro Fernando Santizo Hernández**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Coordinador Área Térmica

Roberto Guzmán Ortiz
INGENIERO MECANICO
COLEGIADO No. 4465

Guatemala, agosto del 2,020

RGO/



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.150.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica al trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO MEDIANTE REFRIGERANTE R-22 CON REFRIGERANTES ECOLÓGICOS** del estudiante **Mauro Fernando Santizo Hernández**, DPI **2178074450301**, Reg. Académico **201122754** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, noviembre de 2020

/aej

DTG. 372.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO MEDIANTE REFRIGERANTE R-22 CON REFRIGERANTES ECOLÓGICOS**, presentado por el estudiante universitario: **Mauro Fernando Santizo Hernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|----------------------|--|
| Dios | Padre de los cielos, sin su voluntad no podría llegar a culminar esta meta y en sus manos encomiendo mi camino. |
| Mis padres | Mauro Ernesto Santizo y Haydeé Hernández, por apoyarme siempre, creer en mí, ser mis guías y acompañarme siempre. |
| Mi hermana | Karina Santizo, por estar siempre apoyándome y por ser otro ejemplo para seguir, por enseñarme a culminar las metas cuando se proponen. |
| Mis abuelas | Berta Silva y Adelfa Catalán, por creer en mí, por ser siempre ejemplos de superación y apoyarme incondicionalmente no importando la circunstancia o la distancia. |
| Mis abuelitos | Juan Hernández y Mauro Santizo, hasta el cielo, por enseñarme desde pequeño la grandeza de los sueños. |
| Mi familia | Christy y Ana Hernández, Ingrid, Lilian y Rudy Santizo siempre sé que puedo contar con mis tíos porque son de gran ayuda. |

Ella

La mujer que ha estado a mi lado apoyándome.

Mis amigos

Mi segunda familia, compañeros de batalla,
colegas.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---------------------------------------|--|
| Ing. Jorge Mario Muñoz | Por su asesoría, disponibilidad y paciencia para permitirme culminar este trabajo de graduación. |
| Ing. Carlos Pérez | Por su atención, seguimiento y palabras de apoyo, ser un ejemplo de disciplina. |
| Ing. Werner Morales | Ser un ejemplo de perseverancia, orden y disciplina en el trabajo. |
| Gerson Morales | Por su apoyo para el desarrollo de este trabajo de graduación. |
| Facultad de Ingeniería | Base de tantos conocimientos, lugar de inspiración para el desarrollo e investigación. |
| Escuela de Ingeniería Mecánica | Por permitirme afinar conocimientos, desarrollar diferentes habilidades y completar un sueño. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | VII |
| GLOSARIO..... | IX |
| RESUMEN..... | XIII |
| OBJETIVOS | XV |
| INTRODUCCIÓN..... | XVII |
| | |
| 1. REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO..... | 1 |
| 1.1. Principios de refrigeración | 1 |
| 1.2. Refrigerante..... | 2 |
| 1.2.1. Selección de refrigerantes | 2 |
| 1.2.2. Relación de refrigerantes y aceites lubricantes | 3 |
| 1.3. Capa de ozono | 4 |
| 1.3.1. Agotamiento de la capa de ozono..... | 5 |
| 1.4. Ciclo de refrigeración..... | 5 |
| 1.4.1. Elementos de ciclo de refrigeración por compresión | 9 |
| 1.4.2. Componentes mecánicos de sistema de refrigeración..... | 9 |
| 1.5. Diagrama de Mollier..... | 10 |
| | |
| 2. CLASIFICACIÓN, FACTORES Y PROPIEDADES DE LOS GASES REFRIGERANTES..... | 13 |
| 2.1. Clasificación basada en composición química..... | 13 |
| 2.1.1. CFC | 13 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.1.2. | HFC..... | 14 |
| 2.1.3. | HFC..... | 14 |
| 2.1.4. | Compuestos inorgánicos y HC | 14 |
| 2.2. | Mezclas..... | 15 |
| 2.2.1. | Refrigerantes puros | 15 |
| 2.2.2. | Mezcla zeotrópica..... | 16 |
| 2.2.3. | Mezcla azeotrópica..... | 16 |
| 2.3. | Deslizamiento de temperatura..... | 16 |
| 2.4. | Factores de seguridad..... | 17 |
| 2.4.1. | Toxicidad y flamabilidad | 17 |
| 2.4.2. | Factores de desempeño | 19 |
| 2.4.3. | Propiedades físicas y químicas | 19 |
| 2.5. | Factores de seguridad..... | 20 |
| 2.6. | Propiedades termodinámicas | 20 |
| 2.6.1. | Presión | 20 |
| 2.6.2. | Temperatura..... | 21 |
| 2.6.3. | Volumen específico | 21 |
| 2.6.4. | Entalpía | 21 |
| 2.6.5. | Densidad | 22 |
| 2.6.6. | Entropía y calor latente..... | 22 |
| 2.7. | Coeficiente de desempeño..... | 22 |
| 2.8. | Recuperación, reciclaje y regeneración de los refrigerantes como medidas ambientales..... | 23 |
| 2.8.1. | Reciclaje del refrigerante | 24 |
| 2.8.2. | Regeneración de refrigerante | 24 |
| 3. | NORMATIVAS AMBIENTALES | 25 |
| 3.1. | Leyes ambientales aplicadas en Guatemala | 25 |
| 3.2. | Convenio de Viena..... | 28 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.3. | Protocolo de Montreal..... | 29 |
| 3.4. | Protocolo de Kyoto | 30 |
| 3.5. | Norma ISO 14001 | 31 |
| 3.6. | Análisis de relación de tratados internacionales con legislación guatemalteca..... | 31 |
| 3.7. | ASHRAE 34..... | 32 |
| 4. | PROPIEDADES DE REFRIGERANTES ANALIZADOS | 33 |
| 4.1. | Refrigerante R-22 propiedades | 33 |
| 4.2. | Refrigerante R-407C propiedades | 34 |
| 4.3. | Refrigerante R-422D propiedades | 35 |
| 4.4. | Estudio de campo | 36 |
| 5. | COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE GASES REFRIGERANTES | 41 |
| 5.1. | Datos aplicación de gases refrigerantes | 44 |
| 5.2. | Punto normal de ebullición..... | 44 |
| 5.3. | Presión de saturación | 45 |
| 5.4. | Calor latente de vaporación | 45 |
| 5.5. | Densidad del líquido | 46 |
| 5.6. | Cálculos..... | 46 |
| 5.7. | Aplicación de refrigerantes | 47 |
| 5.7.1. | Refrigerante R-22 | 47 |
| 5.7.2. | Refrigerante R407C | 48 |
| 5.7.3. | Refrigerante R422D | 48 |
| 5.8. | Resultados | 49 |
| 6. | COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO..... | 55 |
| 6.1. | Comparación económica gases refrigerantes | 55 |

CONCLUSIONES 57
RECOMENDACIONES 61
BIBLIOGRAFÍA 63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Ciclo de refrigeración | 6 |
| 2. | Ciclo de refrigeración, diagrama de Mollier | 7 |
| 3. | Puntos de análisis ciclo de refrigeración diagrama de Mollier..... | 11 |
| 4. | Calendario para eliminación gradual CFC | 28 |
| 5. | Manómetros empleados para experimentación | 41 |
| 6. | Recuperadora de gas refrigerante empleada en el presente estudio ... | 42 |
| 7. | Cilindros para recuperación de gases refrigerantes, equipo empleado en la experimentación del presente estudio | 42 |
| 8. | Bomba de vacío, equipo utilizado para la experimentación del presente estudio..... | 43 |
| 9. | Equipo de prueba..... | 44 |
| 10. | Ciclo frigorífico diagrama Mollier gas R22 | 51 |
| 11. | Ciclo frigorífico diagrama Mollier gas R407C..... | 52 |
| 12. | Ciclo frigorífico diagrama Mollier gas R422D. Carta gas SERVEI | 53 |

TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| I. | Clasificación de seguridad de refrigerantes..... | 19 |
| II. | Propiedades físicas y químicas gas refrigerante R-22..... | 33 |
| III. | Componentes R-407C | 34 |
| IV. | Propiedades físicas y químicas gas refrigerante R-407C | 34 |
| V. | Componentes R-422D | 35 |
| VI. | Propiedades físicas y químicas gas refrigerante R-422D | 35 |

| | | |
|--------|---|----|
| VII. | Información de campo recarga de gas refrigerante..... | 36 |
| VIII. | Descripción de equipos analizados. Septiembre 2018..... | 37 |
| IX. | Comparativa de costos de gas refrigerante. Septiembre 2019..... | 38 |
| X. | Gas refrigerante necesario para reemplazarlo en equipos de diferentes empresas | 38 |
| XI. | Costo total de sustitución de refrigerante por empresa | 39 |
| XII. | Comparación punto normal de ebullición | 45 |
| XIII. | Comparación presión de saturación | 45 |
| XIV. | Comparación calor latente de vaporación | 45 |
| XV. | Comparación densidad del líquido..... | 46 |
| XVI. | Aplicación R-22 | 47 |
| XVII. | Aplicación R407C | 48 |
| XVIII. | Aplicación R422D | 48 |
| XIX. | Resultado entalpías | 49 |
| XX. | Resultados análisis gases refrigerantes..... | 49 |
| XXI. | Costo mensual de operación por equipo..... | 49 |
| XXII. | Inversión inicial proyectada por tipo de gas. Equipo 1 tonelada..... | 50 |
| XXIII. | XXIII. Costo mensual operación equipos analizados en campo | 55 |
| XXIV. | Comparación costo anual de operación e inversión..... | 56 |
| XXV. | Comparación anual de operación e inversión R422D | 56 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-------------------------|--|
| h | Entalpía específica |
| S | Entropía total |
| °F | Grados Fahrenheit |
| P | Presión |
| TWA | Tiempo promedio ponderado |
| TRF | Tonelada de refrigeración |
| Bar | Unidad de presión |
| TLU | Valor límite umbral de una sustancia química |
| V_c | Volumen específico |

GLOSARIO

| | |
|------------------------------|--|
| Aceite alquibencénico | Utilizado en sistemas frigoríficos cuyas características son las siguientes: estabilidad térmica, alta calidad con ceras insolubles y azufre, genera poca ceniza. |
| Aceite tipo poliéster | Aceite utilizado en sistemas frigoríficos, cuyas características son las siguientes: altamente soluble en refrigerantes sin cloro, excelente estabilidad química y térmica. |
| Calor específico | Cantidad de calor que una sustancia o sistema termodinámico es capaz de absorber antes de incrementar su temperatura en una unidad. |
| Calor latente | Energía requerida por una unidad de sustancia para cambiar de fase, ya sea de líquido a sólido, de sólido a líquido, de líquido a gaseoso. Esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura. |
| Calor sensible | Cantidad de calor que absorbe o libera un cuerpo sin que le ocurran cambios en su estado físico, cuando a un cuerpo se le suministra calor sensible este aumenta la temperatura. |

| | |
|----------------------------|--|
| Calor termodinámica | Energía transferida de un sistema a otro debido a un cambio de temperatura. |
| Fase termodinámica | Cada una de las zonas de un sistema homogéneo en cuanto a las propiedades físicas que lo forman. |
| GWP | Absorción por gas causante de efecto invernadero. |
| Higroscopicidad | Capacidad de los materiales de absorber humedad ambiental. |
| Isobárico | Proceso de compresión mediante el cual el volumen y la temperatura de un gas varían mientras que la presión se mantiene constante. |
| Isoterma | Línea de gráfica de presión volumen, que representa puntos cuyas temperaturas son las mismas y una unidad de tiempo considerada. |
| Líquido saturado | Zona gráfica de propiedades del líquido, que da las condiciones a las que se somete un líquido cuando se agrega calor. Da como resultado cambio de fase líquida a vapor. |
| Potencia efectiva | Rendimiento real del equipo. |

| | |
|--------------------------|---|
| Potencia indicada | Potencia desarrollada por un fluido de trabajo en el interior de un cilindro, es la desarrollada en un proceso de compresión, se determina por la altura del rectángulo equivalente a la del ciclo. |
| PPM | Partícula por millón. |
| ODP | Potencial de agotamiento de ozono. |
| Temperatura | Propiedad física que permite medir el sentido del flujo de calor en nivel térmico de un cuerpo. |
| Vapor saturado | También llamado vapor seco. Cuando el agua es calentada al punto de ebullición y después evaporada con calor adicional. |

RESUMEN

El presente trabajo demuestra el correcto funcionamiento de equipos de aire acondicionado mediante la sustitución de gas refrigerante ecológico a una unidad mini Split de capacidad de una tonelada de refrigeración que fue diseñada para operar con R-22, y con características de operación de ambiente similares para diferentes empresas que han sido sujeto de estudio. El objetivo es determinar la factibilidad de realizar el cambio en todos los sistemas que cumplan con los requisitos mínimos de operación y que permita ser funcionales para la empresa.

Para ello se han clasificado los equipos según capacidad de carga, y dado que son equipos con una cantidad considerable de operación, la investigación se apoya en la experiencia del equipo que realiza el mantenimiento de estos, buscando con ello proyectar el costo necesario para el cambio de refrigerante. Los refrigerantes sustitutos que se analizan en el presente estudio no solo tienen como objetivo ser funcionales desde el punto de vista operacional y económico, sino que también desde el ámbito legal, ya que se debe cumplir con las normativas y legislación pertinente de nuestro país, y tratados que se han firmado con otros.

OBJETIVOS

General

Comparar el funcionamiento de un sistema de aire acondicionado utilizando como punto de partida gas R-22, introduciendo al sistema refrigerantes ecológicos.

Específicos

1. Recabar información acerca de los nuevos refrigerantes que son sustitutos de los refrigerantes no amigables con el medio ambiente, describiendo la necesidad de las nuevas alternativas para ser utilizados de manera satisfactoria en la industria.
2. Analizar las ventajas y desventajas en la utilización de refrigerantes ecológicos.
3. Realizar una proyección de costo empleando como base los resultados de eficiencia del equipo modelo.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los procesos industriales de diferentes sectores necesitan de un control en la temperatura de los ambientes en los que se realizan dichos procedimientos de transformación de materia prima. La refrigeración es el acondicionamiento de ambientes, para lograr la refrigeración es necesario contar con un sistema que, por medio de un refrigerante, permita enfriar el aire.

Estos refrigerantes tienen diferentes composiciones químicas, con ello se subdividen en refrigerantes puros, mezclas azeotrópicas, mezclas zeotrópicas, variando también su grado de flamabilidad, toxicidad, y las eficiencias que se pueden obtener. Por ello para la elección de refrigerante es necesario tomar en cuenta diferentes factores que inciden en el desempeño del sistema, y que determinan el grado de seguridad que se puede manejar con los refrigerantes ya que puede existir riesgo de fuga.

Un factor fundamental para la selección de gases refrigerantes es su composición química y el impacto que causa al ambiente, ya que tomando en cuenta estos antecedentes se han creado diferentes normativas que engloban, tanto eficiencias del gas como el grado de contaminación que conlleva, firmando tratados para la conversión gradual de los equipos refrigerantes a tecnologías ambientales.

Para la presente investigación se realizará una comparación teórica y experimental para la sustitución de refrigerante tipo R-22 con refrigerantes ecológicos, realizando primero la comparación teórica a base de documentos y diferentes bibliografías digitales, buscando que cumplan los requerimientos

ambientales y económicos del sector industrial. A partir de dicha investigación se procederá a realizar la experimentación real buscando la mejor opción para la sustitución de refrigerante estudiado.

1. REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO

Es el proceso de acondicionamiento de ambientes, variando según la temperatura se puede dividir en refrigeración, concepto utilizado con frecuencia para la congelación de alimentos y ambientes; aire acondicionado es la adaptación de ambientes para tener un estado de confort en lugares donde se requiera.

1.1. Principios de refrigeración

Son los fenómenos físicos que permiten realizar un cambio de temperatura en el gas refrigerante, según el *Manual técnico de refrigerantes* de Ángel Luis Miranda Barrera son los siguientes:

Efecto de elevación de temperatura: implica la capacidad de una sustancia que se encuentra a una temperatura determinada de enfriar aumentando su temperatura, para ello se utiliza aire frío o agua.

Efecto latente: es la absorción de calor por medio del cambio de fase, sublimación de sólido a gas, fusión de sólido a líquido, evaporación de líquido a gas, estos se utilizan para enfriar una carga y el efecto frigorífico consiguiente se llama latente. El calor por unidad de masa absorbido para producir el cambio de estado se llama calor latente de evaporación, fusión o sublimación.

Efecto Joule-Thomson: enfriamiento de gas por medio de su expansión, dicho efecto permite licuar tanto gases presentes como el mismo aire, manteniendo su entalpía constante. Este efecto puede ya que si se fija una presión constante al comprimirse el gas aumentará su temperatura.

Refrigeración termoeléctrica: variación de temperatura basada en el Efecto de Peltier, esta se da cuando existe una aplicación de voltaje eléctrico a dos metales o semiconductores conectados entre sí, la variación de corriente da como resultado una transferencia de calor, enfriando un extremo y calentando el otro.

Refrigeración Paramagnética: es el método que permite aproximarnos al cero absoluto, es decir 0K. Las sustancias que son atraídas por un imán se llaman paramagnéticas. Cuando una sal paramagnética se somete a un campo magnético

sus moléculas se orientan en él como si fuesen pequeños imanes. Se trata de enfriar la sal por procedimientos convencionales hasta una temperatura de 1 K aproximadamente.¹

1.2. Refrigerante

“Fluido encargado de realizar la absorción y entrega de calor de un equipo con un ciclo cerrado termodinámico de refrigeración. Estos absorben calor en la fuente fría a abaja presión y temperatura, para cederlo a la fuente caliente a alta presión y temperatura. Todo ello con cambio de estado de líquido a vapor y viceversa”.²

1.2.1. Selección de refrigerantes

Los gases refrigerantes deben cumplir con ciertas condiciones para su desarrollo y futura aplicación, basándonos en el tema central de esta investigación en la que se buscan refrigerantes sustitutos del R-22, se busca que los sustitutos satisfagan las siguientes características

- Mayor calor latente de evaporación.
- Alta conductividad y facilidad de ceder calor.
- Su volumen específico en estado gaseoso deberá ser lo más bajo posible para obtener así el mínimo dimensionado de evaporador, condensador y tuberías del circuito.
- La presión de condensación será la más baja posible.
- La temperatura de evaporación deberá ser siempre inferior a la temperatura de régimen del espacio a acondicionar o refrigerar.
- Deberá tener el calor específico más bajo posible en estado líquido.
- Punto crítico alto para condiciones extremas de condensación.
- El refrigerante no deberá afectar el lubricante.
- No debe ser inflamable, tóxico explosivo.

¹ MIRANDA BARRERA, Ángel Luis. *Manual técnico de refrigerantes*. p. 1.

² REY MARTÍNEZ, Francisco Javier. *Bombas de calor y energías renovables en edificios*. p. 2.

- Deberá tener un ODP igual a cero.
- El GWP o TEWI será el más bajo posible.
- COP alto.³

1.2.2. Relación de refrigerantes y aceites lubricantes

En los sistemas de refrigeración por compresión, el compresor es elemento que posee elementos mecánicos que necesitan de lubricación, razón por la cual es necesario optar por lubricantes óptimos, ya que en el ciclo de refrigeración se necesita que el lubricante soporte las temperaturas bajas cuando circule por el evaporador y soportar las altas temperaturas del compresor, ya que el lubricante se mezcla con el refrigerante.⁴

Para que sean efectivos, los lubricantes deben cumplir con las siguientes características:

El grado de viscosidad, ya que la función del lubricante es formar una capa de lubricante entre los componentes mecánicos en movimiento, el grado de viscosidad es muy importante ya que varía con la temperatura, aumentando y disminuyendo según sea el caso.

Miscibilidad, es la capacidad que tiene el lubricante de formar una fase líquida homogénea, siendo una característica muy importante ya que el aceite deberá mezclarse de manera correcta con el lubricante para completar los ciclos de refrigeración sin ningún inconveniente.

Higroscopicidad, es la característica del lubricante en la que este absorbe la humedad atmosférica, todos los refrigerantes cuentan con esa característica, aunque un problema que muchas veces se da es que, debido a los cambios de temperatura repentinos, dicha combinación tiende a formar ácidos en el circuito, provocando corrosión en el sistema. Es recomendable mantener la temperatura del aceite con un mínimo de 40 °C.⁵

³ URREGO RODRÍGUEZ, Carlos. *Metodología de selección de refrigerantes alternativas ecológicas y eficientes energéticamente.* <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/download/180/178/>.

⁴ Ibid.

⁵ MAGÍN LAPUERTA, Amigo y ARMAS, Octavio. *Frío industrial y aire acondicionado.* p. 5.

- **Lubricantes**

Los aceites deben ser miscibles con el refrigerante y por ello se han clasificado en:

- Aceites minerales: se utilizan con refrigerantes tipo CFC, siendo el refrigerante de análisis para esta investigación R-22 de esta clasificación.
- Aceite alquibencénicos: estos lubricantes tienen buena miscibilidad a bajas temperaturas, pero no son compatibles con refrigerantes HCF.
- Aceite tipo poliéster (POE): estos aceites son de gran interés para la industria ya que han sido modificados para que sean compatibles con los refrigerantes ecológicos, utilizándolos en sistemas que emplean refrigerante R-407C, entre otros.⁶

1.3. Capa de ozono

La capa de ozono es la barrera de protección que posee el planeta Tierra contra los rayos ultravioleta que provienen del sol, dicha capa está compuesta como su nombre lo indica de ozono, el cual es una mezcla de tres átomos de oxígeno. La concentración del ozono puede variar según la altura a la que se encuentre y constituye una mínima parte de la atmósfera. Se encuentra ubicada entre 15 y 45 kilómetros por encima de la superficie de la Tierra.

“Como esta capa es el escudo de protección contra la radiación ultravioleta proveniente del espacio exterior, se debe tomar en cuenta para el análisis y conservación de esta, ya que es un gas inestable y vulnerable a compuestos que contengan nitrógeno, hidrógeno y cloro”⁷.

Debido a ello se han realizado estudios para determinar el daño causado a la capa de ozono a lo largo de nuestra historia, desde la revolución industrial, dado el hecho de que la contaminación se ha incrementado a una escala sin precedentes en todo

⁶ FERNÁNDEZ, Encarnación. *Solquimia*. http://www.solquimia.com/wp-content/uploads/2011/05/Aceites_para_compresores_frigorificos.pdf.

⁷ PUEBLA, Jorge Alberto. *Manual de buenas prácticas en refrigeración*. https://www.academia.edu/30793598/Manual_de_Buenas_Practicas_en_Refrigeracion.

el mundo. Dada esta problemática en 1974, Sherwood Rowland, Paul Crutzen y Mario Molina, advirtieron los daños causados por el hombre. Razón por la cual se han implementado diferentes tratados firmados por los países industrializados que producen mayor daño a la capa de ozono, en los cuales se busca la erradicación de los gases que contengan los compuestos dañinos para la misma.⁸

1.3.1. Agotamiento de la capa de ozono

El cloro liberado de las moléculas de compuestos estables que “es atacado por la intensa radiación ultravioleta, puede despojar a la molécula de ozono de un átomo, dando lugar al ClO o monóxido de cloro y al oxígeno normal, cada molécula de CFC destruye miles y miles de moléculas de ozono, alternando el equilibrio natural.”⁹

Entre los compuestos que dañan la capa de ozono encontramos el nitrógeno, hidrógeno, cloro y flúor, estos cuando se sintetizan y se combinan producen ácido nítrico y clorhídrico. Otro compuesto que es perjudicial para esta son los clorofluoroalcanos, que son alcanos parcial o totalmente clorados y se empezaron a usar como refrigerantes que no fueran volátiles ni tóxicos.

Entre los efectos que encontramos por el agotamiento de la capa de ozono y el contacto directo de los rayos ultravioleta tenemos daños a la piel del ser humano por medio de diferentes tipos de cáncer de piel. Sin contar los efectos en las plantas interfiriendo con la fotosíntesis de éstas. Calentamiento de aguas de mar, provocando la muerte de diferentes ecosistemas marinos, y el aumento de la temperatura general del planeta y sus efectos.¹⁰

1.4. Ciclo de refrigeración

Es la serie de pasos o etapas en la que ocurre el cambio de temperatura del gas refrigerante, por medio del uso de las propiedades del calor latente del mismo, en dicho proceso ocurre un cambio de presiones en la que se inicia desde un punto de presión baja, y continúa el ciclo hasta que se llega al lado de alta presión. En este ciclo ocurre también un cambio de entalpías, el cual es proporcional al cambio de temperatura. Entre los elementos mecánicos empleados para la realización de este ciclo encontramos: compresor, evaporador, condensador, y el dispositivo de

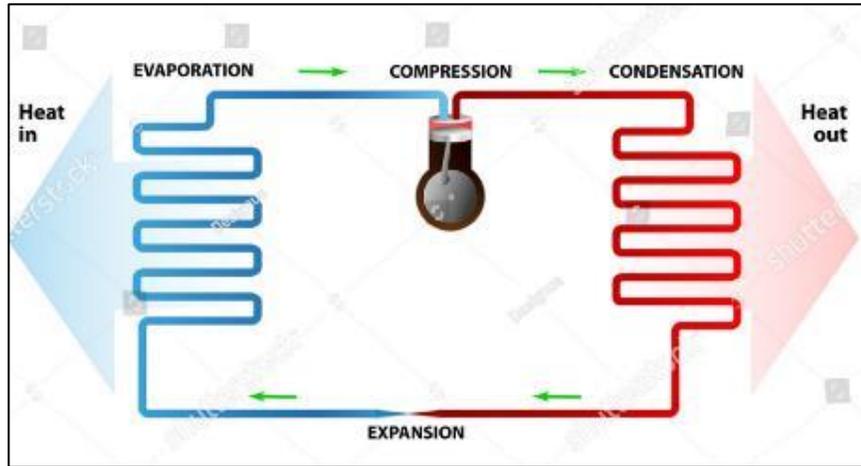
⁸ MIRANDA BARRERA, Ángel Luis. *Manual técnico de refrigerantes*. p. 5.

⁹ YAMADA, Luis. *El futuro de la capa de ozono*.
https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/hidraulica_mecanica/1999_n1/futuro.htm.

¹⁰ FLORES VÉLEZ, Luisa María; HEYDRICH, Silke Cram y COLSA GÓMEZ, María Eugenia.
Causas y efectos de la destrucción de la capa de ozono.
<http://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/66956>.

expansión, existiendo otros elementos adicionales que se pueden implementar para lograr tomas de datos más precisos.¹¹

Figura 1. **Ciclo de refrigeración**



Fuente: Aire acondicionado. *El ciclo de refrigeración – cómo funciona.*

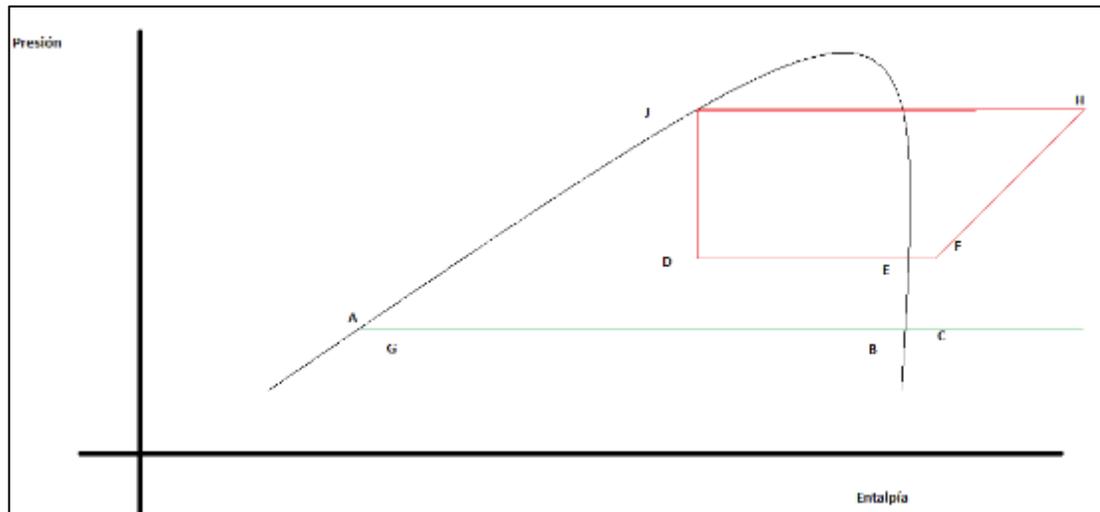
<https://tuaireacondicionado.net/el-ciclo-de-refrigeracion-como-funciona/>. Consulta: 16 de mayo de 2016.

“Dado el hecho de que el ciclo de refrigeración es el método por el cual se da el traslado de calor de un medio frío y se expulsa a otro con diferente temperatura. Este ciclo se representa por medio del diagrama de Mollier, el cual se representa a continuación y se explicará de manera detallada más adelante.”¹²

¹¹ GARCÍA ALMIÑANA, Daniel. *Instalaciones de refrigeración y aire acondicionado*. p. 18.

¹² *Ibíd.*

Figura 2. **Ciclo de refrigeración, diagrama de Mollier**



Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el trazado del diagrama es posible entender el ciclo de refrigeración analizando los puntos señalados en el diagrama, en el cual el refrigerante en el punto A absorbe calor a presión constante, y este comenzará a elevar su temperatura hasta llegar al punto de ebullición y convertirse en vapor. Llegado este punto, donde la evaporación se da sin que existan cambios de temperatura.

“Con la adición de calor, la entalpía aumenta y la mezcla se convierte en vapor líquido. En el punto B, esta mezcla pasa a convertirse en vapor saturado, para luego pasar a la región sobrecalentada en el punto C”.¹³

¹³ VILLAMIL SALCEDO, Herwin Marcos y PIAMBA TULCÁN, Oscar Edwin. *Estudio y aplicación de ciclos de refrigeración -Refrigerantes alternativos.* <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117496005.pdf>.

En la evaporación, el refrigerante pasa al evaporador como una mezcla de vapor líquido en el punto D, entra en el evaporador para luego pasar a la válvula de expansión termostática, que disminuye su presión y su temperatura del punto J al D. En este punto ocurre una absorción del calor del refrigerante que inicia el proceso de ebullición hasta llegar al punto F, después de este, el vapor sobrecalentado se comprime y aumenta su presión, mediante este proceso el refrigerante absorbe calor para llegar a la entalpía y presión del punto H.

Posterior a esto el refrigerante circula por el condensador donde se retira el calor absorbido en la etapa de compresión y es expulsado al medio ambiente. La condensación ocurre a temperatura constante del punto H al punto J, que es la etapa donde es condensado el refrigerante y pasa a ser líquido en su totalidad y permanece a presión constante. Luego de esto se continúa con el ciclo hasta la válvula de expansión para dar inicio al ciclo de nuevo.¹⁴

Existen diferentes elementos adicionales que se pueden instalar en el sistema para optimizarlo, y tener un mejor control siendo uno de ellos el filtro secador. Este es el dispositivo encargado de retener la humedad que pueda encontrarse dentro del sistema, otro elemento adicional al sistema es la Mirilla o visor de líquido, que es una herramienta que brinda una visión interior del sistema frigorífico, con la cual se puede observar la existencia de refrigerante en estado líquido o vapor en el lugar en el que se ubique.

Estos dispositivos se pueden ubicar en la salida del condensador, y en lugares donde no debería de observarse burbujas de vapor de líquido. Las mirillas o visores son de importancia en equipos con válvula de expansión termostática. Otro elemento adicional es el tanque acumulador de líquido, siendo de los más utilizados el acumulador de succión, el cual es un recipiente diseñado para trabajar a presión y su principal función es evitar daños al compresor por una sobrecarga de refrigerante o mezcla de aceite líquido, el cual puede llegar por la línea de succión hacia el compresor.¹⁵

¹⁴ VILLAMIL SALCEDO, Herwin Marcos y PIAMBA TULCÁN, Oscar Edwin. *Estudio y aplicación de ciclos de refrigeración -Refrigerantes alternativos.*
<https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117496005.pdf>.

¹⁵ *Ibíd.*

1.4.1. Elementos de ciclo de refrigeración por compresión

Para el estudio de este trabajo de investigación se hace referencia al ciclo de refrigeración por compresión, basándose en la presión de operación se divide en dos áreas o lados:

Lado de alta presión: en este punto el fluido refrigerante en el ciclo se encuentra bajo la presión del condensador.

Lado de baja presión: es la parte del sistema del ciclo de refrigeración que se encuentra bajo la presión del evaporador.

1.4.2. Componentes mecánicos de sistema de refrigeración

Compresor: equipo cuya finalidad es comprimir el refrigerante de forma de gas sobrecalentado a entropía constante para llevarlo a presión de succión, permitiendo su condensación por enfriamiento.

Existe una variedad de clasificaciones de los compresores en la industria de refrigeración, siendo los de mayor uso son los compresores de tipo hermético, los cuales se pueden encontrar en cualquier refrigeradora de uso doméstico, haciendo referencia a la hermeticidad y la nula accesibilidad de los elementos de este dentro de una carcasa. También encontramos los semiherméticos, siendo su característica principal que el eje del motor es una prolongación del cigüeñal del compresor y están en una misma carcasa, tiene aplicación para lugares que se presten para mantenimiento frecuente. Para uso industrial se tiene el compresor abierto el cual es accionado por movimientos externos al mismo.¹⁶

Condensador: tiene como función enfriar el refrigerante, esto lo realiza de manera natural simplemente con aire, o de manera artificial forzando el enfriamiento por medio de ventiladores o agua que pasan por tubos.

Dispositivos de expansión: elemento del sistema de ciclo de refrigeración cuya principal función es la estrangulación del flujo, realizando dicha tarea por medio de la disminución de la presión del fluido, llevándolo de un estado de más alta presión

¹⁶ WIRZ, Dick. *Refrigeración comercial para técnicos de aire Acondicionado*. p. 8.

y temperatura a uno de menor presión y temperatura. También regula el caudal de refrigerante. Existiendo diferentes tipos para sistemas de refrigeración y aire acondicionado, teniendo en la industria los de mayor utilización los de tubo capilar, el cual es usado en refrigeradores domésticos y sistemas de menor envergadura. Otro de extensa demanda son las válvulas de expansión, que puede ser: manual, termostática (VET), electromecánica y automática.

Evaporador: elemento que suministra calor al vapor de refrigerante que se encuentra en condiciones de cambio de estado de líquido a gas.¹⁷

1.5. Diagrama de Mollier

Como se mencionó anteriormente, el diagrama de Mollier es la representación gráfica del ciclo de refrigeración, en él se trazan los puntos de alta y baja presión para realizar el análisis correspondiente respecto de eficiencias del ciclo, temperaturas, y diferentes puntos de análisis que brindarán información concreta para comparación.

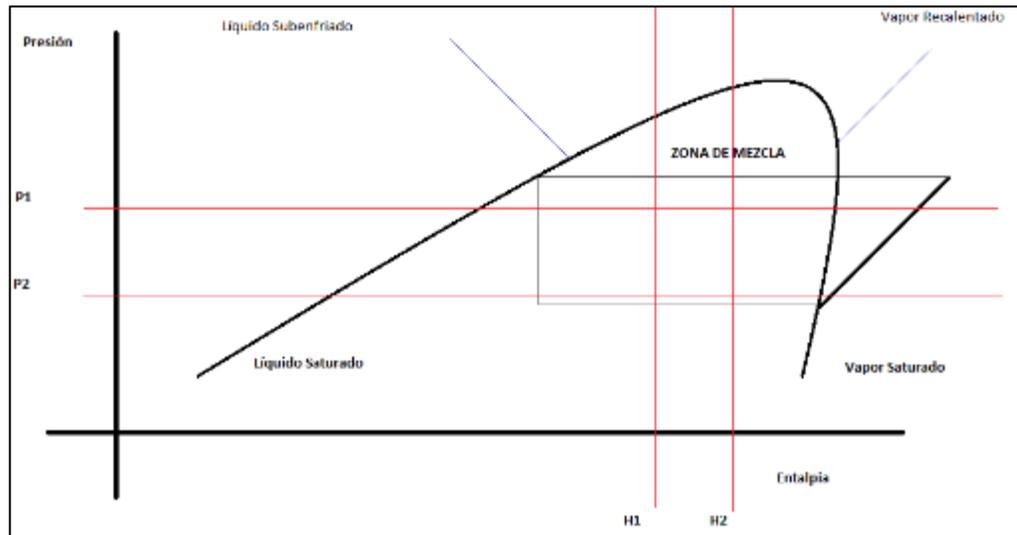
Por ello el diagrama de Mollier es muy importante para realizar un análisis del ciclo de refrigeración, sirve para calcular potencias, o determinar cualquier anomalía en el ciclo. El diagrama de presión entalpía (p-h) es el más utilizado para la representación del ciclo. Cada fluido refrigerante tiene el suyo propio, con lo que no se puede utilizar el diagrama de un fluido para otro distinto. Existen diagramas en los diferentes sistemas de mediciones utilizados en el mundo. Para este estudio se analizarán datos en el sistema inglés.¹⁸

Para la mayor comprensión del uso de este diagrama se analizarán las siguientes imágenes en las cuales se representan cada uno de los puntos de análisis.

¹⁷ FRANCO LIJO, Juan Manuel. *Manual de refrigeración*. p. 15.

¹⁸ *Ibíd.*

Figura 3. **Puntos de análisis ciclo de refrigeración diagrama de Mollier**



Fuente: elaboración propia.

En la representación del diagrama de Mollier, se puede apreciar que en el eje vertical "Y" se tiene la escala de presión absoluta "psia".

Mientras que en el eje horizontal "X" se tiene la escala de entalpia BTU/lb.

También observamos las diferentes zonas que se tiene:

- Línea de líquido saturado y línea de vapor saturado
- Zona de líquido subenfriado
- Zona de mezcla
- Zona de vapor recalentado

El punto crítico, PC, representa el punto en el que no puede existir un cambio de estado de vapor a líquido.

También se observan diferentes líneas que brindan los parámetros para la interpretación de datos:

- Líneas de temperatura, expresadas en °F
- Líneas de presión (P)
- Líneas de entalpía (h)
- Línea de volumen específico V_c
- Líneas de entropía (S)
- Líneas de calidad de mezcla (x)

2. CLASIFICACIÓN, FACTORES Y PROPIEDADES DE LOS GASES REFRIGERANTES

Existen diferentes clasificaciones para los gases refrigerantes, ya que se pueden agrupar según sus propiedades físicas como la temperatura, presiones de trabajo. También se pueden clasificar según sus propiedades termodinámicas como su punto de ebullición, punto de congelación, su relación de potencia de caudal entre otras.

2.1. Clasificación basada en composición química

La presente clasificación se basa en refrigerantes llamados también refrigerantes halogenados, ya que su composición se basa en cloro y flúor, entre sus características encontramos que cumplen con el requerimiento de ser estables químicamente, de baja toxicidad, y con buena capacidad térmica, son designados con la letra "R" y seguidos de tres números y en ocasiones una letra, la cual nos muestra la disposición de los átomos.

2.1.1. CFC

Clorofluorocarbonos, son gases con estabilidad alta, ya que son bajos en toxicidad, no son corrosivos, y son compatibles con otros materiales, su composición está basada en cloro, flúor y carbono, fueron diseñados a finales de la década de 1920, por científicos de la industria automotriz. Entre esta clasificación se puede mencionar al R-11, R-12, R-114, R-500, entre otros.

También usados como espumantes, limpiadores de electricidad, teniendo varias aplicaciones.

Los CFC's se cree que son los mayores causantes del deterioro del ozono. Por acuerdo internacional, no se fabrican desde 1995, sin embargo, son utilizados en equipos residenciales. Debido a las leyes que prohíben la ventilación de los CFC's

a la atmósfera, nuevos procedimientos y equipos han sido desarrollados para recuperar, reciclar y restituir los refrigerantes que contienen CFC's.¹⁹

2.1.2. HFC

Hidroclorofluorocarbonos, son compuestos similares a los CFC', constituidos por una combinación ya sea de metano o etano con halógeno, contienen menos cloro, razón por la cual son de menor impacto en el agotamiento de la capa de ozono. El inicio de su fabricación fue en 1936, contienen un ODP de 0,055. También son utilizados como espumantes para fabricar poliuretano y propelentes en la industria del aerosol. Se dejaron de fabricar en países europeos en 2014.²⁰

2.1.3. HFC

Hidroclorofluorocarbonados, no contienen cloro y son considerados como no perjudiciales para el ambiente, creado inicialmente como sustituto para los refrigerantes contaminantes de la capa de ozono, pero resultan no ser compatibles con los lubricantes de los sistemas que utilizan otro tipo de gas refrigerante.²¹

2.1.4. Compuestos Inorgánicos y HC

Son los elementos basados en hidrocarburos, pueden ser empleados en como refrigerantes, aunque tienen un elevado grado de flamabilidad, también son

¹⁹ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Acuerdo Ministerial Número 413-2006*.
http://cretec.org.gt/wp-content/files_mf/acuerdoministerial4132006.pdf.

²⁰ *Ibíd.*

²¹ ERREA AMÓSTEGUI, Juan. *Estudio comparativo entre los refrigerantes CFC-12, HFC-134 y HC-600a en un refrigerador-congelador doméstico de última generación*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=145804>.

utilizados para mezclas de refrigerantes. Entre estos podemos encontrar el etano, propano, isobutano, y otras sustancias inorgánicas naturales.

Los HC han sido utilizados en la industria por años, ya que son compatibles con el cobre y aceites minerales. También tienen propiedades como refrigerantes, siendo un calor latente de vaporización mayor, densidad menor y aunque no se han desarrollado por parte de la industria por el riesgo que se tiene en su transporte y almacenamiento, lo que requiere de altas medidas de seguridad.

“Los compuestos inorgánicos son gases simples como el oxígeno y el nitrógeno, esta clasificación incluye compuestos como el anhídrido carbónico o dióxido de carbono, agua, amoníaco entre otros”.²²

2.2. Mezclas

Serán consideradas todas las sustancias compuestas por dos o más componentes de refrigerantes puros.

2.2.1. Refrigerantes puros

Son los refrigerantes que se componen solo de un elemento químico, basando su comportamiento en las propiedades que están dadas por el refrigerante, ejemplos de este tipo de refrigerante son el R-12, el R-11, el propano entre otros.

²² ERREA AMÓSTEGUI, Juan. *Estudio comparativo entre los refrigerantes CFC-12, HFC-134 y HC-600a en un refrigerador-congelador doméstico de última generación.*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=145804>.

2.2.2. Mezcla zeotrópica

En este tipo el líquido vapor tiene distinta concentración de componentes cuando se condensa o evapora. A presión constante, la temperatura de evaporación y condensación cambian con la concentración de cada uno de los componentes, teniendo lugar el fenómeno llamado deslizamiento y este tipo de mezcla se da debido a que se tienen refrigerantes de composición con diferente volatilidad de sus componentes.

Durante el cambio de fase a presión constante, varía su composición en la fase líquida, a medida que cambia el proceso, por tal motivo, a la salida de la válvula de laminación, la fase de vapor será más rica en el componente más volátil, ya que la fase líquida se merma, elevándose el punto de ebullición. Durante el proceso de evaporación, la composición del fluido irá cambiando hasta conseguir que toda la masa se evapore.²³

2.2.3. Mezcla azeotrópica

En ella la mezcla de sustancias químicas que mantienen algunas propiedades de los componentes originales, se identifican por número de tres cifras que comienzan por 4. En ella los compuestos formados por varios refrigerantes actúan de manera similar al comportamiento de refrigerante de origen puro, las diferentes sustancias que lo componen son totalmente miscibles entre sí, comportándose durante la evaporación y la condensación como una sustancia pura. Al ser azeotrópicos mantienen la misma composición en la fase de vapor y en la fase de líquido y en sus cambios de estado.²⁴

2.3. Deslizamiento de temperatura

Se da en los dispositivos de expansión, tal como en las válvulas de expansión termostáticas. Para el estudio del deslizamiento de temperatura en los refrigerantes es necesario conocer la naturaleza dada la clasificación de su

²³ CORONAS, Alberto, BRUNO, Joan Carles. *Avances en Ciencias y Técnicas del Frío VII: Actas del VII Congreso Ibérico y V Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío-CYTEF 2014 celebrado del 18 al 20 de junio de 2014 en Tarragona (España)*. <https://docplayer.es/70663310-Avances-en-ciencias-y-tecnicas-del-frio-vii.html>.

²⁴ *Ibíd.*

pureza, ya sean puros o mezclas, para dicho estudio según Juan Manuel Franco Lijó en *Prácticas de refrigeración y aire acondicionado* se estudian ambos casos por separado siendo:

Para fluidos refrigerantes puros se tiene una evaporación y condensación se realizan a una presión y temperatura dadas, esto significa que los cambios de estado se realizan de manera adiabática e isotérmica. Caso contrario de los refrigerantes que son mezclas, ya que para ellos la temperatura de saturación del líquido es distinta de la saturación del vapor de una presión determinada, siendo constante la presión. A este comportamiento se le conoce como deslizamiento de temperatura o GLIDE.

En resumen, el deslizamiento de temperatura es la diferencia de temperaturas a las que el refrigerante realiza el cambio de estado, temperatura de inicio de cambio menos temperatura de cambio final de fase, se expresa en °C.²⁵

2.4. Factores de seguridad

Los gases refrigerantes o frigorífero que dependen de su composición química suelen ser tóxicos o pueden ser volátiles. Estas dos características son de mucha relevancia para el estudio de estos, ya que en la industria se requiere de altas medias de seguridad dentro de las instalaciones de las empresas, evitando así accidentes de intoxicación por fugas de los colaboradores, así como en casos de alto riesgo, explosiones o incendios por la fuga de estos.²⁶

2.4.1. Toxicidad y flamabilidad

El peligro de los gases refrigerantes por toxicidad es de gran relevancia, ya que el ser humano puede soportar ciertas concentraciones de bióxido de carbono u otras mezclas químicas, presentadas en los gases refrigerantes, así como su flamabilidad.

²⁵ FRANCO LIJO, Juan Manuel. *Manual de refrigeración*. p. 18.

²⁶ PITA, Edward; GONZÁLEZ POZO, Virgilio; SÁNCHEZ CIFUENTES Augusto. *Acondicionamiento de aire: principios y sistemas: un enfoque energético*. p. 10.

Para el presente estudio se analizarán estas características mediante la normativa 34 de ASHRAE, la cual indica que los límites de presencia de estos gases en el medio ambiente para seguridad de los trabajadores son dados por índices de valor de límite permisible de concentración máxima, al cual puede estar expuesto un trabajador en jornadas diarias de 8 horas por cinco días a la semana y en un tiempo de 40 años de trabajo.

Otro índice por analizar será el TWA, el cual es según el *Manual del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales*, es el “valor ponderado de concentración en el tiempo expresada en horas por día.”²⁷

Según la norma ASHRAE, los clasifica de manera ascendente en grados de inflamabilidad y toxicidad según la gráfica presentada a continuación:

Dichos grados son expresados según la dirección de las flechas tal como se indica por A1-A3-B1-B3, siendo A1 el gas refrigerante que no representa peligro alguno de toxicidad y flamabilidad.

²⁷ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Acuerdo Ministerial Número 413-2006*.
http://cretec.org.gt/wp-content/files_mf/acuerdoministerial4132006.pdf..

Tabla I. **Clasificación de seguridad de refrigerantes**

| | GRUPO DE SEGURIDAD | |
|---------------------------|--------------------|-----------------|
| MAYOR INFLAMABILIDAD | A3 | B3 |
| MENOR INFLAMABILIDAD | A2 | B2 |
| PROPAGACIÓN NULA DE LLAMA | A1 | B1 |
| | MENOR TOXICIDAD | MAYOR TOXICIDAD |

Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Acuerdo Ministerial Número 413-2006*. http://cretec.org.gt/wp-content/files_mf/acuerdoministerial4132006.pdf. Consulta: 18 de julio del 2018.

Como cualquier equipo mecánico, aún con un plan adecuado de mantenimiento, este sufre desgaste con el uso a lo largo del tiempo, por lo mismo, es necesario que el gas refrigerante empleado tenga la cualidad de ser localizado fácilmente en caso de que existieran fugas.

2.4.2. Factores de desempeño

Son los factores que inciden en las eficiencias del sistema de refrigeración, se comparan los resultados de los refrigerantes estudiados con los esperados de un refrigerante ideal.

2.4.3. Propiedades físicas y químicas

Las propiedades químicas se analizan con base en las reacciones que se dan y elementos del ambiente con los que el refrigerante se relaciona. Para este análisis, como se había indicado anteriormente los gases estudiados son R-22, R407C y R422D.

2.5. Factores de seguridad

- Punto de ebullición: a las temperaturas de evaporación, las presiones deben ser mayores a la atmósfera, para impedir la entrada de aire al sistema.
- Miscibilidad con el aceite: es la capacidad de mezclarse que tiene el refrigerante con aceites dependiendo del tipo que se utilice tanto sintéticos como minerales, esta propiedad determina la facilidad que pueda tener el aceite para regresar al compresor.
- Compatibilidad con otros materiales. No debe tener efectos principalmente sobre metales: más que todo se refiere a efectos corrosivos sobre algunos metales, o producir algún tipo de reacción química. Algunas excepciones son los refrigerantes halogenados que en condiciones de operación críticas de operación pueden reaccionar con los metales, o el amoníaco que no se debe utilizar con cobre, zinc, o estaño debido a que puede ocurrir corrosión de los metales. Elastómeros, para juntas, empaques, sellos, hules utilizados en los sistemas debido a la composición química que poseen. No debe ser tóxico, ni venenoso, No debe ser explosivo, fugas fáciles de detectar. Compuesto estable.²⁸

2.6. Propiedades termodinámicas

Se define como propiedad termodinámica a las características que permitirán un cambio de estado de la sustancia por tratar o analizar.

2.6.1. Presión

“Se debe operar con presiones en condensador y evaporador superior a la presión atmosférica, se debe tener una presión de evaporación en un rango menor a la de condensación, y siempre superior a la atmosférica.”²⁹

²⁸ MIRANDA BARRERA, Ángel Luis. *Manual técnico de refrigerantes*. p. 7.

²⁹ CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. *Termodinámica*. p. 23.

2.6.2. Temperatura

En el uso de refrigerante se tienen tres temperaturas que son de suma importancia para el análisis de refrigerantes, estas son:

- Temperatura de ebullición: temperatura en la que el líquido ebulle, esto se da cuando la presión del vapor de gas que se escapa del líquido es igual a la presión ejercida sobre el por sus las paredes y factores que lo rodean. De esto se obtiene que la presión y la temperatura deben ser menores que los críticos (puntos críticos) ya que no son válidos para un ciclo simple de compresión, dado que no se daría la condensación.
- Temperatura crítica: relacionada directamente con el diseño y uso de condensador empleado en el sistema, ya que ningún vapor se condensa a una temperatura mayor de la crítica.
- Temperatura de congelación: esta debe ser más baja que la temperatura del evaporador.
- Temperaturas y presiones de condensación: temperatura mayor a la del medio condensante y la presión no mayor a 15 bar.³⁰

2.6.3. Volumen específico

“Volumen específico del refrigerante evaporado, la cantidad empleada está relacionada directamente con el tamaño del equipo que se empleará.”³¹

2.6.4. Entalpía

Representa la cantidad total de calor en un fluido.

- Entalpía de líquido saturado: cantidad de energía en Joules por kilogramo de refrigerante líquido saturado. Se representa por “ h_f ”.
- Entalpía de evaporación: cantidad de calor que requiere un kilogramo de líquido para cambiar a un kilogramo de vapor a temperatura constante. Se

³⁰ PITA, Edward; GONZÁLEZ POZO, Virgilio y SÁNCHEZ CIFUENTES Augusto. *Acondicionamiento de aire: principios y sistemas: un enfoque energético*. p. 11.

³¹ CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. *Termodinámica*. p. 142.

representa por " h_{fg} ". En refrigeración este cambio se da en el evaporador. El cambio de calor o entalpía resultante se puede denominar el trabajo teórico que realiza el refrigerante.

- Entalpía de vapor saturado: es el resultado de la suma de entalpía de evaporación y entalpía de líquido saturado, representa el contenido de calor de vapor saturado en el evaporador, antes de ser calentado arriba de la temperatura de este. Se representa por " h_g ".³²

2.6.5. Densidad

"Normalmente se define en fluidos como el peso del fluido por unidad de volumen se expresa en kg/ m³ o también en kg/l, la mayoría de los refrigerantes tienen una densidad mayor que la del agua y varía con la temperatura."³³

2.6.6. Entropía y calor latente

"Entropía es el término aplicado al proceso de compresión ideal, generalmente se analiza el desorden molecular de las partículas de un fluido. Calor latente de evaporación, cuánto más grande sea menor cantidad de refrigerante se necesitará para realizar el proceso."³⁴

2.7. Coeficiente de desempeño

La eficiencia de un equipo de refrigeración y aire acondicionado se denomina coeficiente de desempeño, COP traducido de inglés (*Coefficient Of Performance*), siendo el objetivo de estos eliminar el calor del lugar acondicionado, este valor puede ser mayor a la unidad. (COP_R). Índice de eficiencia de la energía (*Energy Efficiency Rattin*) es la cantidad de calor eliminado del espacio enfriado, se cuantifica en BTU/W-h Para refrigeración se tiene la relación de: $EER = 3.412COP_R$.³⁵

³² CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. *Termodinámica*. p.114.

³³ *Ibíd.* p. 13.

³⁴ *Ibíd.* p. 331.

³⁵ *Ibíd.* p. 288.

2.8. Recuperación, reciclaje y regeneración de los refrigerantes como medidas ambientales

Debido a los efectos causados por la emisión de gases refrigerantes al ambiente sin tratamiento previo, se ha provocado un deterioro a la capa de ozono, razón por la cual es necesario tener en claro que No es correcto dejar fugas, descargar o liberar voluntariamente gases refrigerantes al ambiente.

Existe una prohibición emitida por EPA en 1990, que entró en vigor a partir de julio de 1992. La cual determina cuándo se requiere la extracción de refrigerante de los equipos:

- Se ha quemado el motor del compresor.
- Se ha de desmontar el sistema para cambiarlo. No se puede dejar en un patio con el refrigerante en el sistema.
- Cuando ha de efectuarse una reparación en el sistema y el refrigerante no puede bombearse al condensador o al recipiente empleando el compresor.
- Recuperación del refrigerante.

Para cualquiera de los casos en los que fuera necesario la recuperación del refrigerante es necesario depositarlo en un recipiente adecuado, que cumpla todas las normativas relacionadas con la recuperación del refrigerante, ya que puede estar contaminado con nitrógeno, ácidos, agua o cualquier sustancia que provenga de un motor quemado, y no se puede emplear el mismo refrigerante en otro sistema, con la salvedad de que el refrigerante se haya descontaminado.³⁶

³⁶ GUTIÉRREZ, Roberto. *Mantenimiento en sistemas de refrigeración herméticos*. p. 57.

2.8.1. Reciclaje del refrigerante

Para la limpieza del refrigerante es posible usar un separador de aceite de paso simple o múltiple, el cual se limpiará por medio de filtros, cuya función es reducir la humedad, la acidez y otras partículas ajenas al refrigerante, este tipo de reciclaje se puede dar en talleres que tengan los elementos necesarios y que se encuentren en óptimas condiciones. Por medio de los filtros deshidratadores se pueden absorber ácidos, humedad y cualquier otra sustancia o partícula, y se puede filtrar varias veces hasta llegar a la pureza deseada.³⁷

2.8.2. Regeneración de refrigerante

“Proceso de adaptar el refrigerante a las especificaciones de nuevas normas por medios como destilación del producto, análisis y químicos, que certifiquen el cumplimiento de los estándares establecidos, tanto medio ambientales como de operación, y uso de los equipos.”³⁸

³⁷ GUTIÉRREZ, Roberto. *Mantenimiento en sistemas de refrigeración herméticos*. p. 57.

³⁸ *Ibíd.*

3. NORMATIVAS AMBIENTALES

3.1. Leyes ambientales aplicadas en Guatemala

Como nación el sector industrial de Guatemala busca adaptarse a las nuevas disposiciones y reglamentos que se desarrollan a nivel mundial, buscando siempre estar compitiendo en los mejores escenarios de campos aplicados para cada sector, siendo la industria de refrigeración un campo de mucho énfasis para la generación de leyes que lo permitan.

En Guatemala es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), la entidad del Estado dedicada al estudio y protección de sistemas naturales, desarrollando políticas y estrategias que se adapten de manera sostenible al sistema cambiante de la protección ambiental a nivel mundial y, a su vez, creen una unidad técnica especializada en Ozono. Según Acuerdo Ministerial 218-2006, esta unidad es la encargada de impulsar el planeamiento y programación de actividades cuyos objetivos sean en pro del cumplimiento del Convenio de Viena y el Protocolo de Montreal.

En cuanto a temas relativos a protección de la capa de Ozono, verificando también el cumplimiento de las fechas programadas según el orden previamente consensuado por dichos tratados.

Dicha unidad técnica que era financiada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), ha cumplido su tiempo de vigencia, el cual estaba programado hasta 2015. La caducidad de esta unidad protectora del ambiente es un tema preocupante ya que entre sus atribuciones se encontraban:

elaboración de informes conforme a datos de importación y consumo de SAO en Guatemala, con lo cual se llevaba el control de la circulación de estos en el país.

Otra de sus funciones era la de gestionar convenios de cooperación interinstitucional en Guatemala, tales como Ministerio Público de Guatemala, Superintendencia de Administración Tributaria (SAT), Ministerio de Salud entre otros cuyas finalidades sean competentes dentro del campo de prevención.

Ley de protección y mejoramiento del ambiente, decreto 68-86, indica que la protección y mejoramiento de los recursos naturales van de la mano con los culturales, ya que Guatemala es un país con raíces indígenas donde se veneraban a los diferentes elementos de la naturaleza para el desarrollo sostenido. Guatemala se integró a los principios de las resoluciones de las conferencias de la ONU en Estocolmo, Suecia en 1972.

Como parte del compromiso de los distintos gobiernos para la sostenibilidad ambiental se han ratificado diferentes tratados o convenios internacionales mediante distintos decretos: En marzo de 1985, el gobierno de Guatemala ratifica el Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono.

El decreto es el 110-97, el ratifica que Guatemala es parte del convenio de Viena, Decreto 39-97, del protocolo de Montreal, y 34-89 ambos buscan moderar el uso de sustancias dañinas para la capa de Ozono. Estos presentan una introducción de los clorofluorocarbonos, sustancias utilizadas en equipos de enfriamiento y refrigeración doméstica e industrial, y sus diferentes usos ya sea en productos medicinales o productos contra incendios, indiferentemente son considerados sustancias perjudiciales en el ambiente. A partir de dichos decretos se ha establecido un cronograma con fechas de eliminación gradual de estos elementos, tal como lo establecían los diferentes convenios y tratados firmados internacionalmente. Dando las siguientes fechas como límites de uso de las sustancias mencionadas.³⁹

³⁹ El Congreso de la República de Guatemala. *Decreto número 110-97*. http://cretec.org.gt/wp-content/files_mf/decretodelcongreso11097.pdf.

- 2006, eliminación de los clorofluorocarbonos halógenos, CFC
- 2015, eliminación de hidroclorofluorocarbonos HCFC

El Acuerdo Gubernativo 791-2003, busca concientizar la gestión sostenible y la protección para el desarrollo, teniendo como objetivo fortalecer la calidad ambiental mediante la recuperación de áreas naturales y recursos perdidos por la contaminación y el mal manejo de estos.

Este Acuerdo se basa en diferentes ejes, los cuales son de prevención ambiental, restauración ambiental, evaluación, control y seguimiento ambiental. Con ello, a partir del Congreso de la República de Guatemala se han decretado distintas leyes que permiten seguir el paso de los países desarrollados y ratificar convenios internacionales de protección ambiental, partiendo desde los requisitos para la importación, exportación, y uso de dichas sustancias dañinas para el ozono.

Normalizando el manejo, entrada y salida de estos por medio de: requisitos aplicables a la importación, comercialización, uso y exportación de sustancias agotadoras del ozono e importación de equipo y artículos que contengan clorofluorocarbonos (Acuerdo Ministerial 413-2006), el cual busca descontinuar la comercialización de gases no amigables para el planeta mediante un Calendario Nacional de Reducción y Eliminación Gradual de Colorofluorocarbonos en Guatemala.⁴⁰

⁴⁰ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Acuerdo gubernativo No. 791-2003*. <http://recursos.segeplan.gob.gt/CAPP/documentos/32/AG%20791%202003%20P%20Marco%20Gesti%C3%B3n%20Ambiental.pdf>.

Figura 4. **Calendario para eliminación gradual CFC**

| Calendario Nacional definido de reducción y eliminación gradual de CFC | | |
|--|--------------------------------------|---|
| Años | Consumo máximo Toneladas Métricas | Consumo máximo Toneladas PAO Potencial de Agotamiento del Ozono |
| 2002 | 239.6 | 239.6 |
| 2003 | 180.5 | 180.5 |
| 2004 | 120 | 120 |
| 2005 | 85 | 85 50% de Reducción |
| 2006 | 50 | 50 |
| 2007 | 20 | 20 |
| Eliminación Total de uso de CFC, antes del 01 de Enero de 2,010, según lo establecido por el Protocolo de MONTREAL | | |

*Reformado por el Artículo 1. del Acuerdo Ministerial Número 369-2007 el 20-09-2007

Fuente: Superintendencia de Administración Tributaria. *Sistema de licencias de importación de sustancias químicas SAO, calendarios de eliminación y alternativas en Guatemala.*

http://www.ozonactionmeetings.org/system/files/sistema_de_licencias_de_importacion_de_sustancias_quimicas_sao_guatemala.pdf. Consulta: 11 de junio del 2017.

Dicho acuerdo fortalece la unidad técnica de ozono, mediante el registro de importadores y comercializadores de sustancias agotadoras del ozono, así como la prohibición para la importación o producción nacional de equipo de artículos que contengan o utilicen en sus procesos de fabricación sustancias agotadoras del ozono, con las sanciones establecidas.

3.2. **Convenio de Viena**

Entre los convenios internacionales podemos encontrar el convenio de Viena y sus diferentes actualizaciones, así como otros convenios influenciados y con una finalidad en común, encontramos: Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono, 19 de julio de 1988. Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono, del 11 de enero de 1989. Enmienda de Londres al Protocolo de Montreal, Extraordinario del 21 de mayo de 1993. Enmienda de Copenhague al Protocolo de Montreal, Extraordinario del 4 de noviembre de 1997. Enmienda de Montreal al Protocolo de Montreal del 12 de junio de 2001. Enmienda de Beijing. Convenio de Cambios Climáticos Globales, del 27 de diciembre de 1994. Protocolo de Kyoto.

En 1985 se acuerda el Convenio de Viena, en el cual se busca la protección de la capa de ozono, estableciendo una guía de compromiso en la que se busca analizar y por medio de estudios dar soluciones a la problemática que ocasiona el uso de estos productos, actualmente 190 países han ratificado dicho convenio. Este convenio no incluye los objetivos de reducción en base al consenso de leyes de los países integrantes para el uso de CFC. Las cuales se establecerán en el Protocolo de Montreal.

El preámbulo para llegar a este acuerdo fueron los estudios realizados por científicos publicados en 1974, de los cuales se formularon hipótesis de que los productos químicos que producen los CFC son perjudiciales para la capa de ozono, dejando desprotegida a la Tierra de la radiación ultravioleta, causando daños a los habitantes del planeta, así como a cualquier ser orgánico con vida dentro del mismo.⁴¹

3.3. Protocolo de Montreal

Acordado en septiembre de 1987, en él se establece que las principales sustancias que agotan el ozono en la atmósfera son el CF11, CF12, CFC13, CFC114, CFC115, así como tres halones. Definiendo los límites de uso, el proceso de reducción en la producción y el consumo de dichas sustancias dañinas. Estableciendo moratorias para los países en desarrollo en relación con el cumplimiento del calendario de reducción de las sustancias dañinas para el ozono, obligando a todos los países pertenecientes a dar informes anuales tanto de la producción como del uso, así como del desecho o reutilización de este. 189 países han aceptado estas condicionantes y han ratificado dicho convenio.

Dados los avances en la tecnología, así como el interés que ha tomado la población mundial en esta problemática se han desarrollado diferentes estudios que han demostrado que la situación es preocupante y que a través de los años han surgido diferentes condicionantes que, ya sean para un avance o un retroceso en materia ambiental, modifican los acuerdos internacionales, resultando enmiendas a estos.

⁴¹ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Protocolo de Montreal*. <https://www.marn.gob.gt/s/viena-montreal>.

Enmienda de Londres, en ella se modifican los tiempos de reducción y se acuerda que el consumo y la producción de las sustancias dañinas deben ser eliminados antes de 1996, continuando con una moratoria para países en desarrollo, y se establece el Fondo Multilateral para la Aplicación del Protocolo de Montreal en países en desarrollo.

Enmienda de Copenhague, 1992, en ella se extiende la lista de sustancias controladas y se perfecciona el calendario de eliminación.

Enmienda de Montreal, 1997, establece la obligación de contar con un sistema de licencias para controlar el manejo de dichas sustancias.

Enmienda de Beijing, 1999, se perfecciona el calendario de eliminación de HCFC, y del Boruro de Metilio.

3.4. Protocolo de Kyoto

En 1997 se hizo de nuevo un consenso a nivel mundial sobre la problemática que se está afrontando y se firmó un nuevo tratado, el Protocolo de Kyoto, el cual fija un calendario para reducir de manera gradual las emisiones de gases efecto invernadero, estableciendo obligaciones para diferentes naciones desarrolladas y en vías de desarrollo.

Dentro de sus intereses abarca no solo los gases CFC y HCFC, sino que también los HFC, los cuales son conocidos como los sustitutos. En él se pacta reducir en 5 % las emisiones contaminantes en el período de 2008 a 2012. Aplicándose a las emisiones de seis gases de efecto invernadero: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos,

hexafluoruro de azufre. Su objetivo es reducir el cambio climático reduciendo el efecto invernadero.

3.5. Norma ISO 14001

Gestión del impacto de una compañía sobre el medio ambiente, consiste en la búsqueda de una mejora gradual e interminable. A través del tiempo se ha buscado normalizar todos los requerimientos necesarios para tener un desarrollo sostenible que no sea dañino para el ambiente.

¿Qué es la ISO 14000?

La ISO 14000 es una serie de normas internacionales para los sistemas de gestión medioambiental, mientras que la ISO 9000 es una serie de normas para los sistemas de gestión de la calidad. La ISO 9000 es anterior a la serie 14000 e igualmente fue publicada por la *International Organization for Standardization (ISO)* en Ginebra. La ISO 14000 tiene la intención de servir como herramienta de ayuda para que las compañías mejoren continuamente su actuación medioambiental, mediante el control y la reducción de impactos medioambientales identificados de sus operadores. Teniendo una estructura similar a la ISO 9000, en la que disponen de políticas, formación, control operativo, control de documentación, auditorías, incumplimientos, corrección y prevención. Ambas deben considerarse como parte de la estructura global de una organización y fomentarse la integración de todo tipo de gestión, siempre que sea posible.⁴²

3.6. Análisis de relación de tratados internacionales con legislación guatemalteca

A través del estudio de las diferentes leyes que engloban el sector medioambiental de Guatemala se puede observar que el país está actualizado en dicho campo. Dadas las tendencias variantes a lo largo del tiempo, y como el país tan vulnerable al cambio climático se puede decir que tiene una legislación exitosa para la supervisión de los problemas ambientales y su prevención.

⁴² HEWITT, Gary. *Manual de sistema de gestión medioambiental*. p. 1.

Se ha logrado, a través del Congreso de la República, la aprobación de diferentes acuerdos en los que se creó una unidad específica para el ozono, y también se le dio seguimiento y se apoyó por medio de instituciones como el MAGA. Adoptando diferentes tratados a la vida cotidiana del sector industrial.

Es importante recalcar que no solamente es un proyecto temporal, que se puede dejar de lado, sino que al contrario, con el mismo ímpetu con el que se inició el proceso de firma de acuerdos internacionales, creación de acuerdos ministeriales, fomento de y apoyo de los mismos a través de entes ya sean nacionales o extranjeros, estos deben seguir y ser estrictos en el cumplimiento de las regulaciones y en la búsqueda de diferentes soluciones a las problemáticas que se presenten por medio de estudios de la mano de las diferentes casas de estudios u organizaciones que le competen al tema.

3.7. ASHRAE 34

Es un sistema numérico para clasificar los gases normalizado a nivel industrial conocido como Standard 34, cuya finalidad es clasificar los gases refrigerantes, basándose en la toxicidad y la inflamabilidad del gas.

Basándose en índices de TLV (*Threshold Limit Value*), “concentración máxima permisible, según la exposición del gas en horas al día, durante 40 años. TWA (*Time-Weighted Average*), concentración ponderada en el tiempo, cuantificada en horas por día. clasificándola por el tiempo en que una persona puede estar expuesta”⁴³.

⁴³ WILSON, David. *Determination of refrigerant lower flammability in compliance with proposed addendum p to standard 34*.
https://www.researchgate.net/publication/285982050_Determination_of_refrigerant_lower_flammability_limits_in_compliance_with_proposed_addendum_p_to_standard_34.

4. PROPIEDADES DE REFRIGERANTES ANALIZADOS

A continuación, se detallan las propiedades de los refrigerantes sujetos de este estudio.

4.1. Refrigerante R-22

Gas incoloro de uso común en los equipos de aire acondicionado de los ambientes analizados.

Tabla II. **Propiedades físicas y químicas gas refrigerante R-22**

| FÓRMULA QUÍMICA | UNIDAD | R-22 |
|---|--------|---------|
| Peso molecular | | 86,47 |
| Temperatura de ebullición | °C | -40,8 |
| Temperatura de congelación | °C | -160 |
| Temperatura crítica | °C | 96,15 |
| Presión crítica | bar | 49,88 |
| Densidad crítica | Kg/l | 0,513 |
| Densidad del líquido (25°C) | Kg/l | 1,19 |
| Presión de vapor (25°C) | bar | 10,44 |
| Conductividad térmica del líquido (25°C) | W/m. K | 0,068 |
| Conductividad térmica del vapor (25°C, 1.13bar) | W/m. K | 0,0113 |
| Solubilidad en agua (25°C, 1.13bar) | % | 0,3 |
| Viscosidad del líquido (25°C) | mPas | 0,178 |
| Viscosidad del vapor (25°C) | mPas | 0,0127 |
| Límite de Inflamabilidad en el aire | % vol | ninguno |

Fuente: Gas Servei. *Ficha de datos de seguridad R-422D*. <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-seguridad-R422D-I29-.pdf>. Consulta: 30 de septiembre del 2018.

4.2. Refrigerante R-407C

Mezcla de refrigerantes que sustituyen al R-22, es una mezcla ternaria no azeotrópica.

Tabla III. **Componentes R-407C**

| Nombre | % en peso | N° CAS | N°_CE |
|---------------------------|-----------|----------|-----------|
| Tetrafluoroetano (R-134a) | 52 | 811-97-2 | 212-377-0 |
| Pentafluoroetano (R-125) | 25 | 354-33-6 | 206-557-8 |
| Difluorometano (R-32) | 23 | 75-10-5 | 200-839-4 |

Fuente: Gas Servei. *Ficha técnica R-407C*. <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R407C.pdf>. Consulta: 30 de septiembre del 2018.

Tabla IV. **Propiedades físicas y químicas gas refrigerante R-407C**

| PROPIEDADES FISICAS | UNIDADES | R-407C |
|---|----------|--------------|
| Punto molecular | g/mol | 86,2 |
| Temperatura ebullición a (1,013 bar) | °C | -43,5 |
| Temperatura crítica | °C | 86,74 |
| Deslizamiento temperatura de ebullición (1,013 bar) | K | 7,2 |
| Presión Crítica | bar abs | 46,2 |
| Densidad Crítica | kg/l | 527 |
| Densidad del líquido (25°C) | kg/l | 1 134 |
| Densidad del líquido (-25°C) | kg/l | 1325 |
| Densidad del vapor saturado (1,013 bar) | kg/l | 4,6 |
| Presión del vapor (25°C) | bar abs | 11,74 |
| Presión del vapor (-25°C) | bar abs | 2,23 |
| Calor de vaporización a punto de ebullición | KJ/Kg | 245 |
| Calor específico del líquido (25°C, 1,013 bar) | KJ/Kg K | 1,54 |
| Calor específico del vapor (25°C, 1,013 bar) | KJ/Kg K | 0,83 |
| Conductibilidad térmica del líquido (25°C) | W/mk | 0,082 |
| Conductibilidad térmica del vapor (1 atm) | W/mk | 0,0131 |
| Solubilidad con el agua | ppm | Despreciable |
| Límite de inflamabilidad en aire a 1 atm | % vol | Ninguna |
| Toxicidad (AEL) | ppm | 1 000 |
| ODP | - | 0 |
| PCA (GWP) | - | 1 774* |

Fuente: Gas Servei. *Ficha técnica R-407C*. <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R407C.pdf>. Consulta: 30 de septiembre del 2018.

4.3. Refrigerante R-422D

Diseñado para sustituir al gas refrigerante R-22, su grado de toxicidad es uno de los elementos claves para sustituirlo.

Tabla V. Componentes R-422D

| Nombre | % en peso | N° CAS | N°_CE |
|---------------------------|-----------|----------|-----------|
| Tetrafluoroetano (R-134a) | 31,5 | 811-97-2 | 212-377-0 |
| Pentafluoroetano (R-125) | 65,1 | 354-33-6 | 206-557-8 |
| Isobutano | 3,4 | 75-28-5 | 200-857-2 |

Fuente: Gas Servei. *Ficha técnica R-22*. http://www.gas-servei.com/images/FICHA_T_CNICA_R422D_I29_.pdf. Consulta:30 de septiembre del 2018.

Tabla VI. Propiedades físicas y químicas gas refrigerante R-422D

| PROPIEDADES FÍSICAS | UNIDADES | R-422D |
|---|----------|--------|
| Peso molecular | Kg/kmol | 109,94 |
| Temperatura ebullición a (1,013 bar) | °C | -43,2 |
| Temperatura crítica | °C | 79,56 |
| Deslizamiento temperatura de ebullición (1,013 bar) | K | 4,5 |
| Presión crítica | bar abs | 39,03 |
| Densidad del líquido (25°C) | kg/l | 1 143 |
| Densidad del vapor saturado (1,013 bar) | kg/l | 5,9 |
| Presión del vapor (25°C) | bar abs | 11,13 |
| Calor específico del líquido (25°C, 1,013 bar) | KJ/Kg K | 1,44 |
| Calor específico del vapor (25°C, 1,013 bar) | KJ/Kg K | 0,84 |
| Toxicidad (AEL) | ppm | 1 000 |
| ODP | - | 0 |
| PCA (GWP) | - | 2 729* |
| Inflamabilidad | | No |

Fuente: Gas Servei. *Ficha técnica R-22*. http://www.gas-servei.com/images/FICHA_T_CNICA_R422D_I29_.pdf. Consulta: 30 de septiembre del 2018.

4.4. Estudio de campo

Según experiencia de diferentes técnicos en refrigeración y aire acondicionado para el llenado de equipos de aire acondicionado de expansión directa se utilizan las siguientes cantidades de gas refrigerante, estos para equipos a los que se les ha realizado vacío en el sistema.

Tabla VII. **Información de campo recarga de gas refrigerante**

| Capacidad Toneladas | Refrigerante utilizado (lb) |
|---------------------|-----------------------------|
| 1 | 3,3 |
| 2 | 4,2 |
| 5 | 9,5 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior muestra la cantidad de gas refrigerante empleado para recarga de equipos, siendo los datos un promedio empleado en recarga desde cero en condiciones ideales de instalación, refiriéndonos a estas como las distancias entre equipos de evaporación-condensación. Cabe resaltar que los datos presentados son en base a experiencia de técnicos en refrigeración y son un promedio de diferentes equipos de las marcas presentadas anteriormente, estos pueden sufrir cambios. (Se realiza a partir de equipos con una cantidad considerable de años de operación, el objetivo del presente trabajo es demostrar su correcto funcionamiento en condiciones de campo).

Según estudios realizados en diferentes empresas se observó que se utiliza equipo tipo mini Split para acondicionar áreas pequeñas, como por ejemplo cuartos de servidores, o ambientes donde solamente existe una persona en

supervisión, control de calidad, entre otros. En el presente estudio se ha realizado un sondeo con 4 empresas, cuyos nombres no se pueden brindar por confidencialidad, por lo mismo se clasificará de la siguiente manera.

Tabla VIII. **Descripción de equipos analizados. Septiembre 2018**

| <i>Empresa</i> | <i>1 TON</i> | <i>2 TON</i> | <i>5 TON</i> | <i>TON > 5</i> | <i>Clasificación</i> |
|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|----------------------|
| A | 17 | 6 | 0 | 0 | Oficinas |
| B | 3 | 0 | 0 | 0 | Oficinas |
| C | 1 | 3 | 0 | 0 | Oficinas |
| D | 31 | 28 | 2 | 2 | Industria |

Fuente: elaboración propia.

Representando la cantidad de equipos y clasificándolos según su capacidad en toneladas BTU, así como la utilización de las instalaciones, este dato servirá para proyectar un costo de reconversión de gas refrigerante R-22 comparándolas con los que son objeto de estudio.

- Cotizaciones de gas refrigerante: a continuación, se presenta una tabla de costo promedio de cilindro de gas refrigerante de 30 libras, el proceso de cotización se realizó durante marzo y abril de 2018, y se pudo constatar que existe un desabastecimiento de gas refrigerante R-22, y este seguirá escaseando a lo largo del tiempo debido a que, según normativas internacionales, se irá descontinuando su producción. Por otro lado, se pudo observar que actualmente en el mercado guatemalteco no todas las empresas que se encargan de comercializarlos no cuentan con gas R-442D. Por lo mismo se puede observar que el precio es elevado en comparación del gas refrigerante R-22.

Tabla IX. **Comparativa de costos de gas refrigerante. Septiembre 2019**

| | | |
|--------------|------|----------|
| Refrigerante | 30lb | |
| R-22 | Q | 850,00 |
| R-407C | Q | 975,00 |
| R-422D | Q | 1 303,00 |

Fuente: elaboración propia.

A partir de la tabla anterior se puede hacer una simulación del costo que tendría hacer la sustitución de gas refrigerante para cada caso de las empresas analizadas en tabla VIII y con el cálculo promediado de gas empleado para recarga de gas refrigerante tabla VII.

Tabla X. **Gas refrigerante necesario para reemplazarlo en equipos de diferentes empresas**

| <i>Empresa</i> | <i>1 TON</i> | <i>2 TON</i> | <i>5 TON</i> | <i>TON > 5</i> | Totales |
|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|---------|
| A | 56,1 | 25,2 | 0 | 0 | 81,3 |
| B | 9,9 | 0 | 0 | 0 | 9,9 |
| C | 13,2 | 0 | 0 | 38 | 51,2 |
| D | 102,3 | 117,6 | 19 | 60 | 298,9 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Costo total de sustitución de refrigerante por empresa**

| <i>Empresa</i> | <i>Costo R407C</i> | <i>Costo R422D</i> |
|----------------|--------------------|--------------------|
| A | Q 2 642,25 | Q 3 531,13 |
| B | Q 321,75 | Q 429,99 |
| C | Q 1 664,00 | Q 2,223,79 |
| D | Q 9 714,25 | Q 12 982,22 |

Fuente: elaboración propia.

Los datos presentados en tabla XI, son un estimado inicial, dado que no se ha tomado en cuenta el costo de mano de obra por recarga de gas.

5. COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE GASES REFRIGERANTES

Para la realización de este trabajo se ha utilizado un equipo de aire acondicionado ubicado en oficinas de una empresa de servicios, la carga habitacional es de 5 personas y su equipo de cómputo, con horario laboral de 8 horas y una antigüedad del equipo de 8 años. Es el punto de partida para realizar la proyección de consumo que se tendría en las diferentes empresas mencionadas anteriormente.

Iniciamos con la utilización de gas refrigerante R-22 en equipos de aire acondicionado tipo mini Split, y paquetes tipo ventana, por ello se realizará la descarga del gas utilizado, empleando:

- Manómetros de presión: juego de dos manómetros de presión que manejan según su color ya sea de alta o de baja presión, existe variedad en cuanto a escalas, según los gases más empleados en la industria.

Figura 5. **Manómetros empleados para experimentación**



Fuente: elaboración propia.

- Recuperadora de gas refrigerante: dispositivo encargado de trasladar el gas refrigerante desde el equipo a un cilindro empleado para almacenaje del gas refrigerante.

Figura 6. **Recuperadora de gas refrigerante empleada en el presente estudio**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Cilindros para recuperación de gases refrigerantes, equipo empleado en la experimentación del presente estudio**



Fuente: elaboración propia.

- Bomba de vacío: dispositivos mecánicos, cuya función es extraer moléculas de un gas en espacios sellados por lo que se forma un vacío parcial, teniendo dos características siendo la presión límite y el tiempo necesario para alcanzar dicha presión, los cuales son proporcionales al volumen que se está trabajando.

Figura 8. **Bomba de vacío, equipo utilizado para la experimentación del presente estudio**



Fuente: elaboración propia.

- Equipo Mini Split: equipo en el que se realizará la prueba, simula el funcionamiento de un ciclo de aire acondicionado en que se pueden observar los elementos que trabajan, compresor, condensador, tuberías, válvula de expansión evaporador. La finalidad de este equipo es simular el proceso por medio del cual trabajan los equipos de aire acondicionado. A partir del mismo, se pueden crear proyecciones para equipos más grandes,

siempre que se analicen las diferencias en cuanto a distancias de tuberías, capacidad de los equipos, y condiciones del ambiente.

Figura 9. **Equipo de prueba**



Fuente: elaboración propia.

5.1. Datos aplicación de gases refrigerantes

Los datos siguientes son considerados en condiciones ideales de fabricación de gases refrigerantes:

5.2. Punto normal de ebullición

A continuación, se presentan los puntos de ebullición.

Tabla XII. **Comparación punto normal de ebullición**

| Descripción | R-22 | R-407C | R-422D |
|-------------------------------|-------|--------|--------|
| Punto normal de ebullición °C | -40,8 | -43,5 | -43,2 |

Fuente: elaboración propia.

5.3. Presión de saturación

Presión obtenida de fichas de gases refrigerantes empleados.

Tabla XIII. **Comparación presión de saturación**

| Descripción | R-22 | R-407C | R-422D |
|-----------------------------|-------|--------|--------|
| Presión de Saturación (Bar) | 49,88 | 46,2 | 39,03 |

Fuente: elaboración propia.

5.4. Calor latente de vaporación

Calor latente obtenido de fichas técnicas de gases refrigerantes analizados.

Tabla XIV. **Comparación calor latente de vaporación**

| Descripción | R-22 | R-407C | R-422D |
|---|------|--------|--------|
| Calor latente de vaporización (25°C, 1013bar) | 0,68 | 0,83 | 0,84 |

Fuente: elaboración propia.

5.5. Densidad del líquido

Densidad obtenida de fichas técnicas de gases refrigerantes analizados.

Tabla XV. **Comparación densidad del líquido**

| Descripción | R-22 | R-407C | R-422D |
|-----------------------------|------|--------|--------|
| Densidad del líquido (25°C) | 1193 | 1134 | 1143 |

Fuente: elaboración propia.

5.6. Cálculos

A continuación, se presenta la lista de fórmulas empleadas para la obtención de resultados.

$$\text{Potencia (Kw): } P = \frac{\text{Voltaje de Trabajo} \times \text{Consumo Energético}}{1000}$$

Expansión isoentálpica:

$$h_1 = h_2 \text{ (KJ|Kg)}$$

Efecto refrigerante:

$$h_3 - h_1 = Q_e \text{ (KJ|Kg)}$$

Calor de compresión:

$$h_4 - h_3 = Q_w \text{ (KJ|Kg)}$$

Condensación isobárica:

$$h_4 - h_1 = Q_c \text{ (KJ/Kg)}$$

Coeficiente de rendimiento:

$$COP = \frac{h_3 - h_1}{h_4 - h_3}$$

5.7. Aplicación de refrigerantes

Se presentan los resultados de la aplicación de gas refrigerante en el equipo sujeto de estudio.

5.7.1. Refrigerante R-22

Se parte del análisis del comportamiento actual del equipo funcionando con gas refrigerante R-22.

Tabla XVI. **Aplicación R-22**

| Condiciones de inicio | |
|--|------------|
| Equipo | Mini Split |
| Capacidad | 12000BTU/H |
| Refrigerante | R-22 |
| Temperatura de evaporación (°C) | 23 °C |
| Presión de evaporación (PSI) | 74 |
| Presión de condensación (PSI) | 268 |
| Temperatura salida de condensador (°C) | 58°C |
| Voltaje de trabajo (V) | 218 |
| Consumo energético (A) | 5,4 |

Fuente: elaboración propia.

5.7.2. Refrigerante R407C

Posterior a realizar el procedimiento de retiro y vacío del equipo, se recarga con gas refrigerante R407C.

Tabla XVII. **Aplicación R407C**

| Condiciones de inicio | |
|--|------------|
| Equipo | Mini Split |
| Capacidad | 12000BTU/H |
| Refrigerante | R-407C |
| Temperatura de evaporación (°C) | 21 °C |
| Presión absoluta de evaporación (Bar) | 77 |
| Presión absoluta de condensación (Bar) | 274 |
| Temperatura salida de condensador (°C) | 42 °C |
| Voltaje de trabajo (V) | 210 |
| Consumo energético (A) | 4,8 |

Fuente: elaboración propia.

5.7.3. Refrigerante R422D

Ahora se retira el gas R407C, y cargar con gas refrigerante R422D.

Tabla XVIII. **Aplicación R422D**

| Condiciones de inicio | |
|--|------------|
| Equipo | Mini Split |
| Capacidad | 12000BTU/H |
| Refrigerante | R-407C |
| Temperatura de evaporación (°C) | 18 °C |
| Presión absoluta de evaporación (Bar) | 71 |
| Presión de condensación (PSI) | 252 |
| Temperatura salida de condensador (°C) | 39 °C |
| Voltaje de trabajo (V) | 212 |
| Consumo energético (A) | 4,9 |

Fuente: elaboración propia.

5.8. Resultados

Se presentan los datos obtenidos del resultado de realizar la prueba con los equipos de gas refrigerante.

Tabla XIX. **Resultado entalpías**

| Ref. | h_1 | h_2 | h_3 | h_4 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| R22 | 274,41 | 274,41 | 412,39 | 433,99 |
| R407C | 255,39 | 255,39 | 428,56 | 439,36 |
| R422D | 251,30 | 251,30 | 374,89 | 391,20 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados análisis gases refrigerantes**

| Ref. | P (Kw) | Q_e (KJ Kg) | Q_w (KJ Kg) | Q_c (KJ Kg) | COP |
|-------|--------|---------------|---------------|---------------|------|
| R22 | 1,18 | 274,41 | 21,64 | 159,58 | 6,39 |
| R407C | 1,01 | 255,39 | 20,80 | 183,97 | 7,84 |
| R422D | 1,04 | 251,30 | 16,31 | 139,90 | 7,58 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Costo mensual de operación por equipo**

| Refrigerante | Kw-H | Costo funcionamiento | Operación diaria | Operación mensual por equipo |
|--------------|--------|----------------------|------------------|------------------------------|
| R22 | Q 1,25 | Q 1,47 | Q 11,78 | Q 282,67 |
| R407C | Q 1,25 | Q 1,26 | Q 10,09 | Q 242,04 |
| R422D | Q 1,25 | Q 1,30 | Q 10,39 | Q 249,44 |

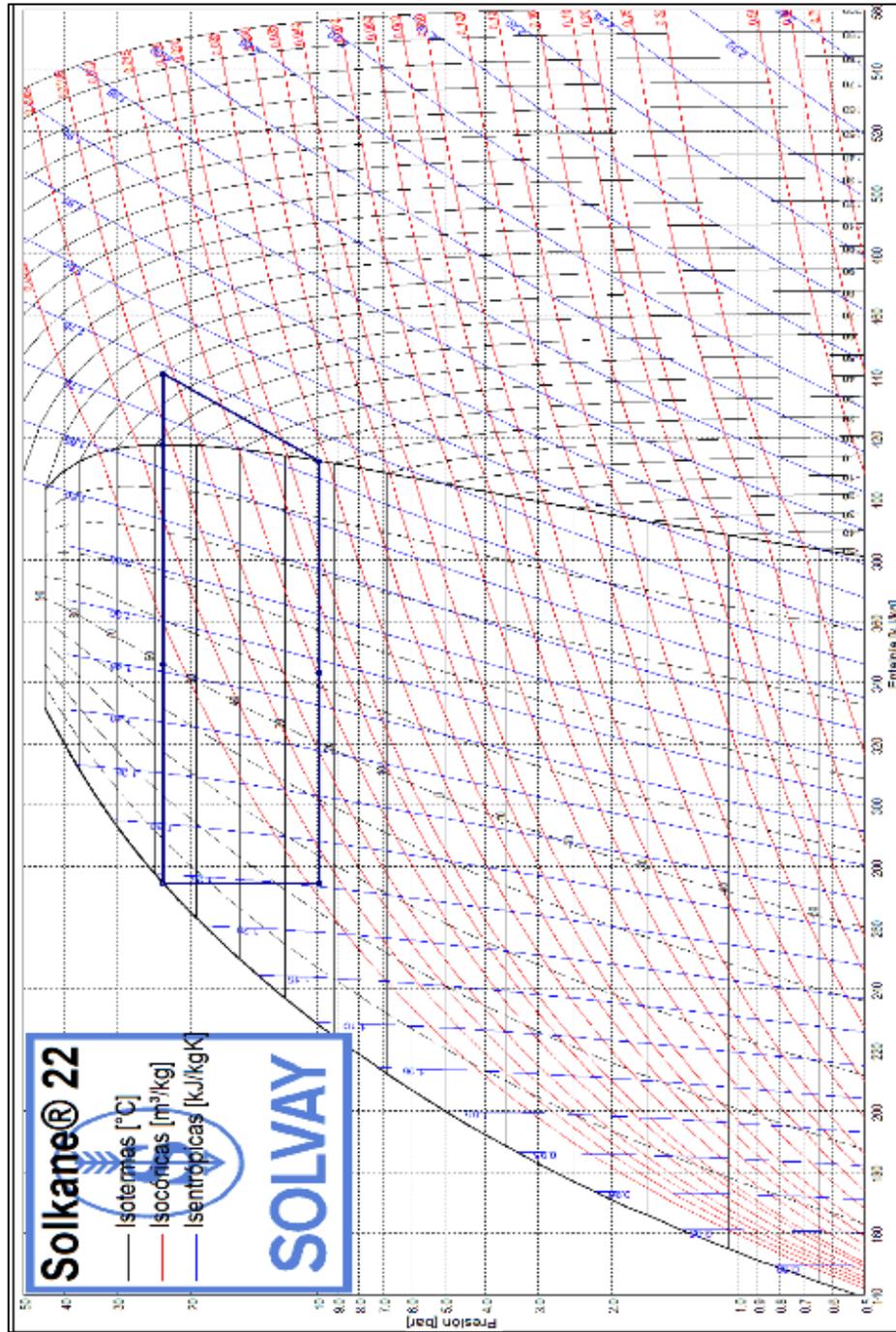
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Inversión inicial proyectada por tipo de gas. Equipo 1
tonelada**

| Inversión inicial R407C/ equipo | | Inversión inicial R407C/ equipo | |
|---------------------------------|----------|---------------------------------|------------|
| 30LB R407C | Q 975,00 | 30LB R422D | Q, 1303,00 |
| Ref. Empleado | 3,3 | Ref, Empleado | 3,3 |
| Gas refrigerante | Q 107,25 | Gas refrigerante | Q 162,88 |
| Mano de obra | Q 200,00 | Mano de obra | Q 200,00 |
| Total | Q 307,25 | Total | Q 362,88 |

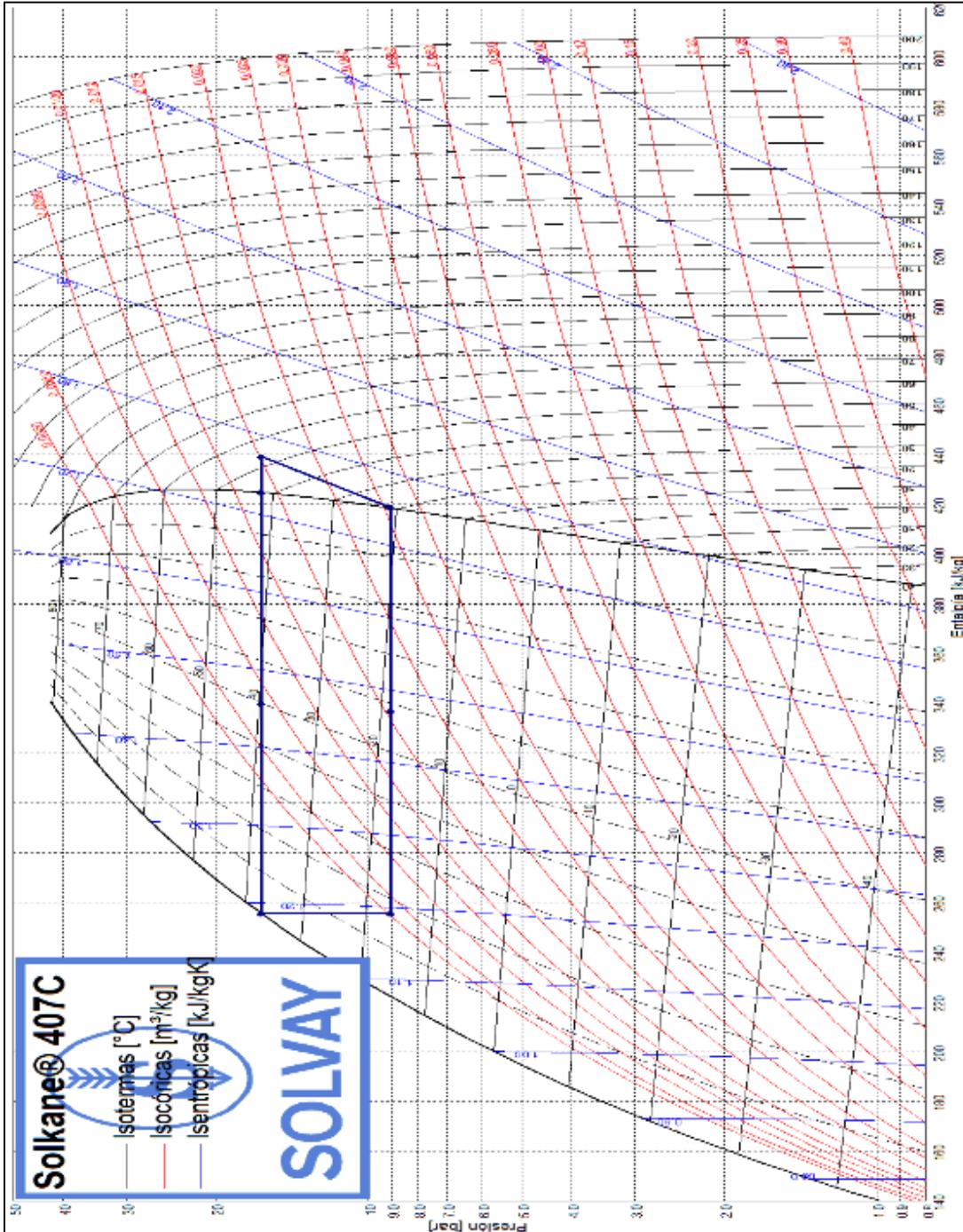
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Ciclo frigorífico diagrama Mollier gas R22



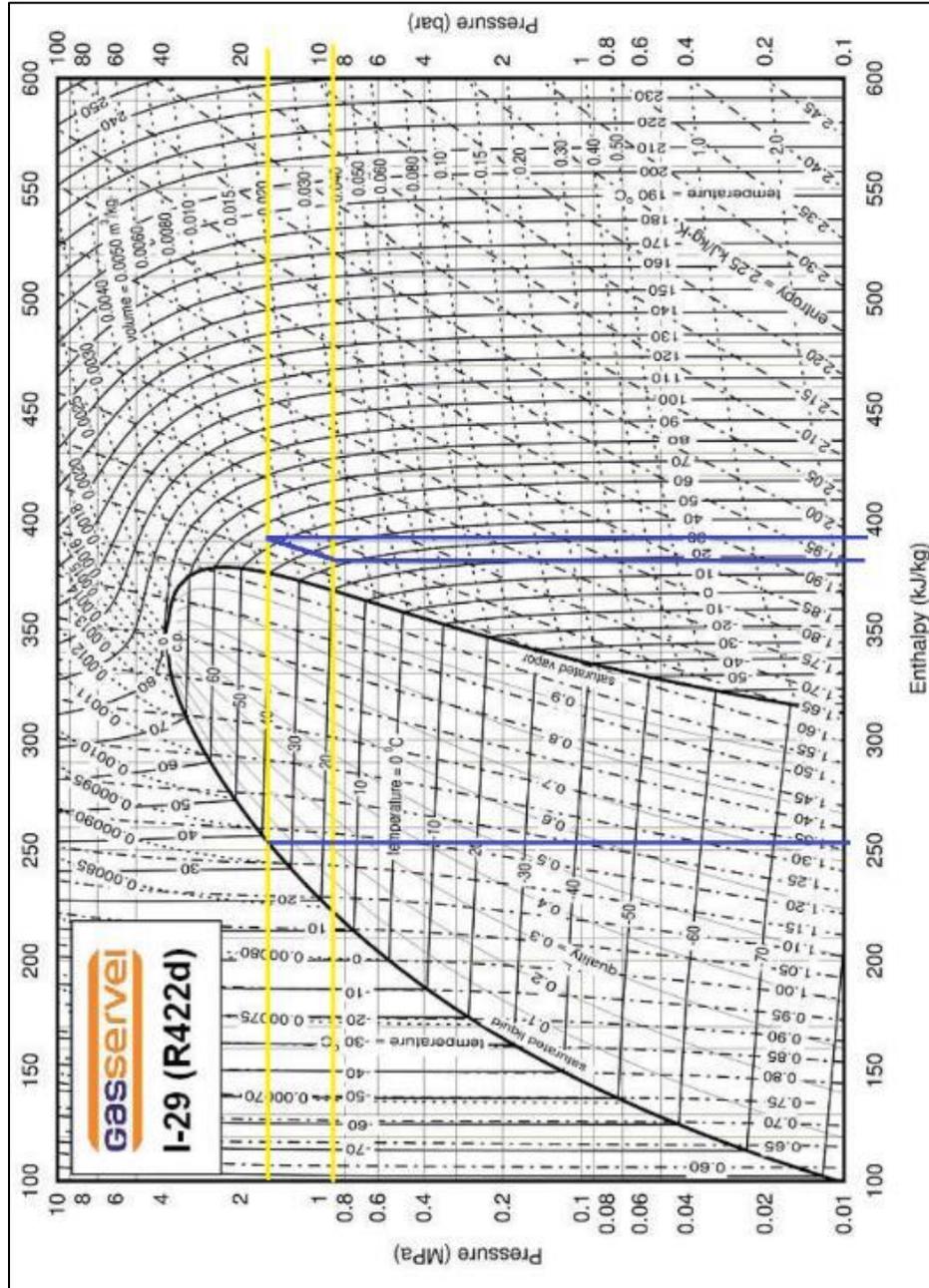
Fuente: elaboración propia, empleando SOLKANE V8.0.

Figura 11. Ciclo frigorífico diagrama Mollier gas R407C



Fuente: elaboración propia, empleando SOLKANE V8.0.

Figura 12. **Ciclo frigorífico diagrama Mollier gas R422D. Carta gas SERVEI**



Fuente: Gas Servei. *Ficha técnica R-22*. http://www.gas-servei.com/images/FICHA_T_CNICA_R422D_I29_.pdf. Consulta: 30 de septiembre del 2018.

6. COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO

6.1. Comparación económica gases refrigerantes

A continuación, se presenta una comparación del costo de operación de los diferentes tipos de gas refrigerante analizados, como se puede observar la cantidad de equipos varía según la empresa.

Tabla XXIII. Costo mensual operación equipos analizados en campo

| Empresa | 1 Ton | Costo mensual operación R-22 | Costo mensual operación R-407C | Costo mensual operación R-422D |
|---------|-------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| A | 17 | Q 4 805,44 | Q 4 114,75 | Q 4 240,47 |
| B | 3 | Q 848,02 | Q 726,13 | Q 748,32 |
| C | 1 | Q 282,67 | Q 242,04 | Q 249,44 |
| D | 31 | Q 8 762,85 | Q 7 503,36 | Q 7 732,63 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXIV, se desarrolla el análisis anual de costo inversión comparado con el ahorro que representa el cambio de gas refrigerante R407C, dando como resultado el tiempo de recuperación de este.

Tabla XXIV. **Comparación costo anual de operación e inversión**

| Análisis R407C | | | |
|----------------------|-------------------------|--|--------------|
| Ahorro mensual R407C | Inversión inicial R407C | Tiempo de recuperación inversión (mes) | Ahorro anual |
| Q 690,69 | Q 5 223,25 | 8 | Q 2 762,76 |
| Q 121,89 | Q 921,75 | 8 | Q 487,55 |
| Q 40,63 | Q 307,25 | 8 | Q 162,52 |
| Q 1 259,49 | Q 9 524,75 | 8 | Q 5 037,97 |

Fuente: elaboración propia.

Mientras que para la tabla XXV, se representa el análisis anterior con gas refrigerante R422D, como se puede observar el tiempo de recuperación aumenta y el ahorro por año disminuye.

Tabla XXV. **Comparación anual de operación e inversión R422D**

| Análisis R422D | | | |
|----------------------|-------------------------|--|--------------|
| Ahorro mensual R422D | Inversión inicial R407C | Tiempo de recuperación inversión (mes) | Ahorro anual |
| Q 564,96 | Q 6 168,96 | 11 | Q 564,96 |
| Q 99,70 | Q 1 088,64 | 11 | Q 99,70 |
| Q 33,23 | Q 362,88 | 11 | Q 33,23 |
| Q 1 030,22 | Q 11 249,28 | 11 | Q 1 030,22 |

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El objetivo principal de este estudio es demostrar que el funcionamiento de un equipo de una tonelada de refrigeración sería similar con cualquiera de los gases analizados, simulando el ambiente que se tiene en cualquier industria donde la optimización de recursos es esencial para la continuidad del negocio y un programa de mantenimiento permite alargar su vida útil. Por ello, el equipo sujeto de análisis tiene una antigüedad de 8 años y se encuentra operando en una oficina con horario laboral de 8 horas. El resultado fue excelente, ya que cumplía su cometido y lograba llevar la temperatura al punto denominado “confort”. No existen problemas de fugas, sobrepresión en el sistema, fallas en el compresor, necesidad de realizar cambio de aceite en el compresor, o que el equipo no realizara transferencia de calor por medio del refrigerante.
2. La necesidad de realizar cambios a favor del ambiente no siempre es vista de buena manera, sin embargo, es de carácter obligatorio cumplirlos, para lograr la certificación ambiental. Cumplir con los requisitos mínimos establecidos en ley demanda demostrar que se trabaja para el cuidado del ambiente sin dejar de lado el factor de productividad de la empresa o las finanzas. Entre las condiciones del gas refrigerante se busca demostrar que se tienen condiciones similares con la aplicación de cualquiera de ellos, y los resultados demostraron que en condiciones ideales el punto de ebullición del gas es similar, siendo mayor el de los ecológicos al R22, situación contraria a la presión de saturación en la que el R22 es mayor que la de los ecológicos, el calor latente de evaporación también cumple

esta última premisa. Mientras que los coeficientes, según tabla número XX, demuestran mayor eficiencia en los ecológicos.

3. Como parte de las ventajas que se tienen en la utilización de gases ecológicos tenemos: reducción en el consumo de energía y, por consiguiente, que el costo de operación disminuye a pesar de la inversión inicial que se debe realizar. En la tabla XXIII se demuestra la operación en condiciones de ahorro de energía para los gases R407C y R422D, mientras que en tablas XXIV y XXV se analiza la inversión inicial y el ahorro anual que se tendría al momento de aplicarlos en nuestros equipos. En este tipo de equipos no es necesario realizar cambio de componentes como válvula de expansión o aceite de compresor, la calidad de absorción de calor es mejor que la del gas base. Otra ventaja del uso de estos gases es que contribuimos con el ambiente ya que su GWP será inferior al R22. La fabricación y comercialización del R22 ha disminuido y, por lo mismo, el precio de mercado mostrará una tendencia al alza, siendo una desventaja para mantenimiento y recarga de equipos que lo usen. Así mismo, dependiendo de la antigüedad de los equipos que se tiene, existen compresores que utilizan aceite Capella, el cual no es compatible con los gases ecológicos estudiados y para hacer el Retrofit de estos se deberá realizar el cambio de aceite; también dependiendo del equipo, se necesitará realizar el cambio de válvula de expansión. El uso de R407C en equipos que presentan fugas no es viable ya que por las fugas se pierde la capacidad de absorción.
4. La proyección de costos, según tabla XXIV y XXV, demuestra que es viable realizar el retrofit de estos refrigerantes demostrando una mayor eficiencia y un mejor costo de inversión para el gas R407C ya que esta se

recupera en aproximadamente 8 meses, mientras que para el R422D la inversión se recuperará en 11 meses.

5. En nuestro país se tiene como condición general la poca inversión en mantenimiento y renovación de equipos de aire acondicionado, por lo que este tipo de prácticas son viables para la continuidad de operación de estos.
6. El retrofit a R407C es la mejor opción según la investigación realizada, los datos obtenidos mediante la aplicación de gases refrigerantes al equipo, las condiciones generales del sector, el uso de equipos de esta capacidad, las condiciones de mantenimiento, la inversión en cuanto a confort del trabajador y el resultado de la proyección económica del uso de los refrigerantes analizados.

RECOMENDACIONES

1. Realizar mantenimiento continuo a los equipos de aire acondicionado llevando un registro de las fallas presentadas, así como la empresa o el encargado y responsable de realizar dicha tarea.
2. Previo a realizar retrofit de equipos se debe programar prueba de vacío para asegurarse que no se tienen fugas en tuberías. También se debe analizar el aceite que se utiliza en el compresor, debido a que dependiendo de la antigüedad de los equipos unos utilizan aceite tipo Capella y este no es compatible con R407C.
3. Si existieran fugas en tuberías no es aconsejable aplicar R407C ya que pierde sus propiedades de conducción de calor. Previo a presentar una propuesta de cambio de refrigerante es importante analizar el tiempo de vida útil que le queda al equipo, ya que según datos presentados anteriormente la inversión se recupera antes de un año de uso.
4. Posterior a realizar el cambio de refrigerante se recomienda programar una inspección mensual de fugas y del equipo en general.

BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Yunus; BOLES, Michael. *Termodinámica*. 6a ed. México D.F.: Editorial McGraw-Hill. 2009. 988 p.
2. Congreso de la República de Guatemala. *Decreto número 110-97*. [en línea]. <http://cretec.org.gt/wp-content/files_mf/decretodelcongreso11097.pdf>. [Consulta: 14 de mayo del 2016].
3. CORONAS, Alberto; BRUNO, Joan Carles. *Avances en ciencias y técnicas del frío VII: Actas del VII Congreso Ibérico y V Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío-CYTEF 2014 celebrado del 18 al 20 de junio de 2014 en Tarragona (España)*. [en línea]. <<https://docplayer.es/70663310-Avances-en-ciencias-y-tecnicas-del-frio-vii.html>>. [Consulta: 14 de mayo del 2016].
4. ERREA AMÓSTEGUI, Juan. *Estudio comparativo entre los refrigerantes CFC-12, HFC-134 y HC-600a en un refrigerador-congelador doméstico de última generación*. [en línea]. <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=145804>>. [Consulta: 16 de mayo del 2016].
5. FERNÁNDEZ, Encarnación. *Solquimia*. [en línea]. <http://www.solquimia.com/wpcontent/uploads/2011/05/Aceites_para_compresores_frigorificos.pdf>. [Consulta: 16 de mayo del 2016].

6. FLORES VÉLEZ, Luisa María; HEYDRICH, Silke Cram y COLSA GÓMEZ, María Eugenia. *Causas y efectos de la destrucción de la capa de ozono*. [en línea]. <<http://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/66956>>. [Consulta: 16 de mayo del 2016].
7. FRANCO LIJO, Juan Manuel. *Manual de refrigeración*. Barcelona, España: Reverté. 2010. 230 p.
8. GARCÍA ALMIÑANA, Daniel. *Instalaciones de refrigeración y aire acondicionado*. México D.F.: Editorial UOC. 2008. 162 p.
9. Gas Servei. *Ficha de datos de seguridad R-422D*. [en línea]. <<http://www.gas-servei.com/images/Ficha-seguridad-R422D-I29-.pdf>>. [Consulta:20 de mayo del 2016].
10. _____. *Ficha técnica R-22*. [en línea]. <http://www.gas-servei.com/images/FICHA_T_CNICA_R422D_I29_.pdf>. [Consulta: 30 de septiembre del 2018].
11. _____. *Ficha técnica R-407C*. [en línea]. <<http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R407C.pdf>>. [Consulta:30 de septiembre del 2018].
12. HEWITT, Gary. *Manual de sistema de gestión medioambiental*. Madrid, España: Editorial Paraninfo. 1999. 19 p.

13. MAGÍN LAPUERTA, Amigo y ARMAS, Octavio. *Frío industrial y aire acondicionado*. España: Ediciones de la Universidad Castilla-La Mancha. 2012. 308 p.
14. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Acuerdo gubernativo No. 791-2003*. [en línea]. <<http://ecursos.segeplan.gob.gt/CAPP/documentos/32/AG%20791%202003%20P%20Marco%20Gesti%C3%B3n%20Ambiental.pdf>> [Consulta: 28 de mayo del 2016].
15. _____. *Acuerdo Ministerial Número 413-2006*. [en línea]. <http://cretec.org.gt/wpcontent/files_mf/acuerdoministerial4132006.pdf>. [Consulta: 18 de julio del 2018].
16. MIRANDA BARRERA, Ángel Luis. *Manual técnico de refrigerantes*. Barcelona, España: Marcombo. 2011. 248 p.
17. PITA, Edward; GONZÁLEZ POZO, Virgilio; SÁNCHEZ CIFUENTES Augusto. *Acondicionamiento de aire: principios y sistemas: un enfoque energético*. New York, Estados Unidos: Editorial Limusa. 2010. 548 p.
18. PUEBLA, Jorge Alberto. *Manual de buenas prácticas en refrigeración*. [en línea]. <https://www.academia.edu/30793598/Manual_de_Buenas_Practicas_en_Refrigeracion>. [Consulta: 18 de julio del 2018].
19. REY MARTÍNEZ, Francisco Javier. *Bombas de calor y energías renovables en edificios*. Madrid, España: Paraninfo. 2005. 192 p.

20. Superintendencia de Administración Tributaria. <*Sistema de licencias de importación de sustancias químicas SAO, calendarios de eliminación y alternativas en Guatemala.* [en línea]. http://www.ozonactionmeetings.org/system/files/sistema_de_licencias_de_importacion_desustancias_quimicas_sao_guatemala.pdf>. [Consulta: 11 de junio del 2017].
21. URREGO RODRÍGUEZ, Carlos. *Metodología de selección de refrigerantes alternativos ecológicos y eficientes energéticamente.* [en línea]. <<https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/download/180/178/>>. [Consulta: 11 de junio del 2016].
22. VILLAMIL SALCEDO, Herwin Marcos y PIAMBA TULCÁN, Oscar Edwin. *Estudio y aplicación de ciclos de refrigeración -Refrigerantes alternativos.* [en línea]. <<https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117496005.pdf>>. [Consulta: 18 de julio del 2018].
23. WILSON, David. *Determination of refrigerant lower flammability in compliance with proposed addendum p to standard 34.* [en línea]. <https://www.researchgate.net/publication/285982050_Determination_of_refrigerant_lower_flammability_limits_in_compliance_with_proposed_addendum_p_to_standard_34>.[Consulta: 18 de julio del 2018].
24. WIRZ, Dick. *Refrigeración comercial para técnicos de aire acondicionado.* Madrid, España: Editorial Paraninfo. 2017.316 p.

25. YAMADA, Luis. *El futuro de la capa de ozono*. [en línea]. <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/hidraulica_mecanica/1999_n1/futuro.htm>. [Consulta: 20 de julio del 2018].

