

EVALUACIÓN DE LOS CICLOS DE REFRIGERACIÓN CONVENCIONALES CON
SUSTANCIAS REFRIGERANTES NATURALES, UTILIZANDO LA SIMULACIÓN
COMPUTACIONAL

LAURA ROCIO SÁNCHEZ CALDERÓN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2019

EVALUACIÓN DE LOS CICLOS DE REFRIGERACIÓN CONVENCIONALES CON
SUSTANCIAS REFRIGERANTES NATURALES UTILIZANDO LA SIMULACIÓN
COMPUTACIONAL

LAURA ROCIO SÁNCHEZ CALDERÓN

Proyecto integral de grado para optar el título de:
Ingeniero Químico

Director
Jaime Eduardo Arturo Calvache
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota De Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, D.C. Febrero, 2019.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director de General de Investigación y Proyección Social

Dr. MANUEL CANCELADO JIMÉNEZ

Director Programa Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a Jesús, mi Señor y salvador, por darme las capacidades para
la elaboración de este proyecto.*

A mi Mama y Papa por su apoyo incondicional en este proyecto de vida.

*A Manuel, Rochi y Camila por darme nuevos aires en los momentos que más lo
necesitaba.*

A todas las personas que me acompañaron a lo largo de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los ingenieros Jaime Arturo Calvache y Carlos Urrego Rodríguez por permitirme desarrollar este proyecto de investigación, por guiarme y ayudarme en el correcto desarrollo de este proyecto. Por brindarme su experiencia, conocimiento y tiempo que me permitió terminar satisfactoriamente este proyecto, adquiriendo nuevos conocimientos y experiencias.

A la Fundación Universidad de América por brindarme las herramientas necesarias para formarme como profesional integra.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	19
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	20
1.1 REFRIGERANTES	20
1.2 REFRIGERANTES NATURALES	21
1.3 CICLOS DE REFRIGERACIÓN	24
1.3.1 Refrigeración por compresión de vapor	24
1.3.2 Refrigeración por absorción	27
1.4 EFICIENCIAS DE PRIMERA Y SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA	28
1.4.1 Coeficiente de Desempeño	28
1.4.2 Consumo Energético	29
1.4.3 Eficiencia Exergética	29
1.5 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DE CONGELACIÓN	30
1.6 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	33
1.6.1 Aspen HYSYS	33
1.6.2 Winsim II	34
1.6.3 Frigosim	34
1.7 MÉTODO DE PONDERACIÓN LINEAL SCORING	35
2. SIMULACIÓN CICLOS DE REFRIGERACIÓN	36
2.1 SELECCIÓN REFRIGERANTES	36
2.1.1 Propiedades refrigerantes	37
2.1.2 Preselección refrigerante	39
2.1.3 Cálculo cargas térmicas	41
2.2 MODELOS TERMODINÁMICOS PARA LOS REFRIGERANTES SELECCIONADOS	43
2.3 SIMULACIÓN CICLOS DE REFRIGERACIÓN	47
2.3.1 Amoniaco (R-717)	48
2.3.2 Propano (R-290)	49
2.3.3 Isobutano (R-600a)	50
3. ANÁLISIS CICLOS DE REFRIGERACIÓN	51
3.1 ANÁLISIS PRIMERA LEY	52

3.1.1 Consumo energético	52
3.1.2 Coeficiente de desempeño (COP)	53
3.2 ANÁLISIS SEGUNDA LEY	54
3.2.1 Eficiencia exergética	54
4. CONCLUSIONES	59
5. RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	67

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ciclo de Refrigeración Por Compresión de Vapor	25
Figura 2. Diagrama P-H De un Ciclo de Refrigeración Por Compresión	26
Figura 3. Ciclo de Refrigeración por Absorción	27
Figura 4. Exergía de un Ciclo de Refrigeración	30
Figura 5. Curva de Congelamiento	32
Figura 6. Ciclo de Refrigeración utilizando Amoniaco como refrigerante	48
Figura 7. Ciclo de Refrigeración utilizando Propano Como refrigerante	49
Figura 8. Ciclo de Refrigeración utilizando Isobutano Como refrigerante	50

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Refrigerantes	37
Tabla 2. Aspectos Ambientales	37
Tabla 3. Aspectos Fisicoquímicos Parte 1	38
Tabla 4. Aspectos Fisicoquímicos Parte 2	38
Tabla 5. Aspectos Seguridad	38
Tabla 6. Consumo Energético Ciclos de Refrigeración	52
Tabla 7. Coeficiente de Desempeño	53
Tabla 8. Eficiencias Segunda Ley Calculado con el COP	55
Tabla 9. Eficiencias Segunda Ley Calculado con el Segundo Método	56

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Ventajas, Desventajas y Aplicaciones de Los Refrigerantes CFC, HCFC y HFC	23
Cuadro 2. Puntajes Refrigerantes	40
Cuadro 3. Calculo Cargas Térmicas	42

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Equilibrio Liquido-Vapor Amoniaco (R-717)	44
Gráfica 2. Equilibrio Liquido-Vapor Propano (R-290)	45
Gráfica 3. Equilibrio Liquido-Vapor Isobutano(R-600a)	46
Gráfica 4. Consumo Energético Ciclos de Refrigeración	52
Gráfica 5. Coeficientes de Desempeño	54
Gráfica 6. Eficiencia Exergética De Los Ciclos	56

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Tabla Potencial Calentamiento Global Refrigerantes	68
Anexo B. Potencial De Agotamiento De La Capa De Ozono Y Potencial Calentamiento Global De Los Refrigerantes Parte 1	68
Anexo C. Potencial De Agotamiento De La Capa De Ozono Y Potencial Calentamiento Global De Los Refrigerantes Parte 2	69
Anexo D. Propiedades Termodinámicas Refrigerantes Parte 1	70
Anexo E. Propiedades Termodinámicas Refrigerantes Parte 2	70
Anexo F. Propiedades Físicas Refrigerantes	71
Anexo G. Aspectos de Seguridad AHSRAE	72
Anexo H. Potencia liberada por persona	73
Anexo I. Propiedades Alimentos	73
Anexo J. Renovación de aire por abertura de las puertas	73
Anexo K. Tabla T – P Amoniaco (R-717), Propano (R-209) e Isobutano (R-600a)	74
Anexo L. Diagrama De Mollier Amoniaco (R-717)	75
Anexo M. Diagrama de Mollier Isobutano (R-600a)	75
Anexo N. Ficha Técnica Nevera Mabe	76
Anexo O. Ficha Técnica Nevera LG	76

NOMENCLATURA

A	Área superficial cámara de congelación
Q_{Paredes}	Carga térmica por transmisión de paredes
K	Coefficiente de transmisión de calor
T_{Exterior}	Temperatura exterior
T_{Camara}	Temperatura de la cámara de congelación
$Q_{\text{Renovación}}$	Carga térmica por renovación
V	Volumen de la cámara de congelación
ΔH	Calor Latente
$Q_{\text{Motor, Luz}}$	Carga de motores y alumbrado
Q_{Camara}	Vatios al interior de la cama de congelación
t_{Trabajo}	Tiempo de trabajo
$Q_{\text{Motor evaporación}}$	Vatios motores del evaporador
$t_{\text{Enfriamiento}}$	Tiempo de enfriamiento
Q_{Personas}	Carga térmica por personas
Q_{Persona}	Calor emitido por persona
$Q_{\text{Térmica}}$	Carga Térmica
P	Presión
T	Temperatura
η	Eficiencia exergética
T_H	Temperatura alta del ciclo de refrigeración
T_L	Temperatura baja del ciclo de refrigeración
Q_L	Calor requerido por el evaporador
Q_H	Calor emitido por el condensador
W_{Entrada}	Trabajo que entra al ciclo
X_{QI}	Flujo de exergía en el medio de baja temperatura

RESUMEN

El presente trabajo presenta la evaluación de ciclos de refrigeración convencionales (compresión mecánica de vapor) para el funcionamiento de tres refrigerantes naturales utilizados para la congelación de alimentos. Para esto se realizó inicialmente una preselección de los refrigerantes naturales más comunes donde se tienen en cuenta los aspectos ambientales, fisicoquímicos y de seguridad de las sustancias refrigerantes naturales analizadas. Luego, para la selección final de los refrigerantes preseleccionados inicialmente se realizó un análisis de las cargas térmicas para definir cuales trabajan de manera más eficiente en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, aplicado a la industria de congelación de alimentos.

Finalmente, se llevó a cabo una evaluación de los ciclos de refrigeración utilizando refrigerantes naturales mediante una simulación computacional, utilizando un simulador de procesos para los tres refrigerantes naturales seleccionados, donde las temperaturas al interior y exterior de la cámara de congelación tienen el mismo valor en las tres simulaciones. Según el refrigerante utilizado cambian las presiones de operación y la energía térmica requerida por los equipos; el análisis realizado incluye el cálculo del consumo energético de los tres ciclos de refrigeración, el coeficiente de desempeño y el análisis de la eficiencia exergética, el cual indica la cantidad de energía aprovechable que tiene el ciclo.

PALABRAS CLAVE: Refrigerantes Naturales, Simulación, Ciclos de Refrigeración, Climatización, Eficiencia Energética.

INTRODUCCIÓN

Mucho se ha investigado sobre los refrigerantes en las últimas décadas y la inminente necesidad de implementación de sustancias que no deterioren la capa de ozono y que tengan un bajo potencial de calentamiento global. La refrigeración es una parte importante de la vida moderna debido a que se utiliza para: sistemas de acondicionamiento de aire para el confort humano, ya sea en el hogar, la oficina o en el carro, la conservación de alimentos, como neveras o cuartos fríos y congelación, usado en congeladores y en cámaras. Estas aplicaciones de la refrigeración han mejorado la calidad de vida de los seres humanos¹. Además de esto se utiliza ampliamente en los procesos industriales².

Los refrigerantes se han venido usando desde la antigüedad, evolucionando a medida que cambian las necesidades de los seres humanos. En el siglo XIX se comenzó a desarrollar la refrigeración moderna, donde se utilizaban refrigerantes naturales como el dióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃), dióxido de azufre (SO₂), entre otros. Desde 1930 cambió el uso de los refrigerantes debido a la introducción de los sistemas de acondicionamiento de aire, obligando a la industria a cambiar a un refrigerante con una menor toxicidad y una mayor estabilidad; desarrollando los refrigerantes clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC).

En el Protocolo de Montreal, firmado en 1987, se estableció que para inicios del año 2010 debía estar eliminado en su totalidad el uso de los clorofluorocarbonos (CFC) por su alto potencial de degradación de la capa de ozono. En la enmienda de Copenhague de 1992 se incluyeron los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y otras sustancias agotadoras de la capa de ozono al Protocolo de Montreal, eliminando por completo su uso a partir del año 2040. Esto dio inicio al desarrollo y uso de los hidrofluorocarbonos (HFC).

La mayoría de los refrigerantes utilizados en la actualidad son hidrofluorocarbonos (HFC), los cuales no degradan la capa de ozono, pero representan un problema de calentamiento global porque se comportan como un gas de efecto invernadero, razón por la cual se está buscando un reemplazo el cual debe ser estable,

¹ Mead, G.C. (2004). *Poultry Meat Processing and Quality - 8.2 The Effects of Refrigeration on Product Quality*. Woodhead Publishing.

² American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 46.8 Refrigeration Systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

económico y que se pueda implementar fácilmente a los sistemas de refrigeración utilizados actualmente, sin afectar la capa de ozono.

Una de las soluciones propuestas es volver a utilizar refrigerantes naturales, motivo por el cual se están estudiando sus propiedades y comportamientos, viendo cómo se pueden solucionar las fallas por las cuales se dejaron de utilizar en un principio.

El objetivo principal de este proyecto de investigación es evaluar los ciclos de refrigeración convencionales utilizando sustancias refrigerantes naturales, utilizando la simulación computacional.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los ciclos de refrigeración convencionales con sustancias refrigerantes naturales, utilizando la simulación computacional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar las sustancias naturales a estudiar con suficiencia de parámetros termodinámicos.
- Implementar en el simulador de procesos los ciclos de refrigeración desarrollados.
- Evaluar el consumo energético y la eficiencia exergética de los ciclos de refrigeración implementados.

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Los refrigerantes naturales son de gran importancia para la refrigeración moderna debido a que estos no degradan la capa de ozono y no tienen un alto potencial de calentamiento global. La importancia de la implementación de un refrigerante natural a un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, aplicado a la industria de alimentos, viene dada por la necesidad de reemplazar los refrigerantes hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC)³. Los ciclos de refrigeración por compresión de vapor cuentan con un compresor, un condensador, un mecanismo de expansión y un evaporador; por estos cuatro equipos circula un refrigerante.

1.1 REFRIGERANTES

Con el paso del tiempo ha aumentado el uso de los sistemas de refrigeración, ya sea en procesos industriales o uso doméstico; esto ha causado un gran impacto ambiental debido a que los refrigerantes más utilizados en los últimos años, como los clorofluorocarbonos (CFC), los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC), degradan de manera significativa la capa de ozono o contribuyen al calentamiento global. En el Protocolo de Montreal se prohibió el uso de los refrigerantes CFC debido a su alto potencial de agotamiento de la capa de ozono y en la segunda etapa del Protocolo de Montreal se dio un plazo máximo para eliminar las HCFC hasta el año 2040 y en la enmienda de Kigali se incluyeron los HFC, su uso también debe estar eliminado completamente para el año 2040. Los refrigerantes HFC fueron creados para sustituir los CFC y HCFC por no agotar la capa de ozono, pero años después se vio que el flúor al ser emitido a la atmósfera se comporta como un gas de efecto invernadero.

Los refrigerantes que se están estudiando para reemplazar los HFC son las hidrofluoroolefinas (HFO), formados por átomos de hidrógeno, fluorina y carbono, estos son conocidos como refrigerantes de cuarta generación teniendo un potencial de agotamiento del ozono casi nulo y un bajo potencial de calentamiento global⁴. Estos no se consideran refrigerantes naturales ya que no provienen de un proceso bioquímico de la naturaleza.

³ BOLAJI, B., & HUAN, Z. (2013). *Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 18, pp. 49-54

⁴ CALM, J. (2008). *The Next Generation of Refrigerants - Historical Review, Considerations, and Outlook*. International Journal of Refrigeration.

La mayoría de las investigaciones actuales se realizan comparando el comportamiento de los refrigerantes HFO y los refrigerantes naturales como el dióxido de carbono, mostrando las ventajas que trae utilizar estos refrigerantes en los ciclos de refrigeración convencionales como la refrigeración por compresión de vapor. Este tipo de refrigeración se basa en una circulación mecánica forzada de un refrigerante en un circuito cerrado de una zona de alta presión a una de baja presión.

Actualmente se sigue buscando una manera óptima de aplicar los refrigerantes naturales a los ciclos de refrigeración convencionales sin que afecte la salud de los seres humanos, que además vigile aspectos de seguridad para prevenir igniciones.

A través de los años, distintos investigadores han escrito artículos sobre, cuáles son los refrigerantes que se pueden utilizar para reemplazar los HFC. Gran parte de los artículos escritos, sobre refrigerantes, desde el 2008 hasta el día de hoy mencionan que los refrigerantes naturales son una de las opciones más óptimas en cuestión del potencial de agotamiento de la capa de ozono y el potencial de calentamiento global, ya que ambos son casi nulos. Los refrigerantes naturales más comúnmente investigados son el dióxido de carbono (R-744), amoníaco (R-717), agua (R-718), aire (R-729) y varios hidrocarburos como etano (R-170), propano (R-290), isobutano (R-600a) y propileno (R-1270).

1.2 REFRIGERANTES NATURALES

Los refrigerantes naturales son componentes con un potencial de agotamiento de la capa de ozono igual a cero⁵, cuya función en un ciclo de refrigeración es pasar de estado líquido a gaseoso y de estado gaseoso a líquido de forma cíclica. Los refrigerantes se utilizan para los procesos que requieren de transferencia de calor y en sistemas de refrigeración, de acondicionamiento de aire, bombas de calor, calentadores de agua, entre otros.

Se considera que un componente es un refrigerante natural, cuando se produce a través de un proceso bioquímico de la naturaleza, sin intervención humana para su formación.

Para escoger los refrigerantes naturales más aptos que puedan reemplazar los refrigerantes sintéticos, hay que tener en cuenta sus propiedades físicas y químicas,

⁵ BOLAJI, B., & HUAN, Z. (2013). *Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 18, pp. 49-54

como la temperatura de ebullición, temperatura de congelación, temperatura crítica, el calor latente y la capacidad de absorber calor, sin descuidar aspectos ambientales y de seguridad.

Para saber si el refrigerante natural funciona de manera óptima hay que considerar su eficiencia energética y exergética, así como el coeficiente de desempeño del refrigerante en un ciclo de refrigeración convencional, como la refrigeración por compresión.

Actualmente se está retornando a los refrigerantes naturales, entre ellos, los que solían utilizarse en los inicios de la refrigeración. Algunos de ellos son: Amoniaco (R-717), Dióxido de Carbono (R-744), Agua (R-718), Aire (R-728) y Etil Éter (R-610)⁶

⁶ ABAS, N., KALAIR, A., KHAN, N., HAIDER, A., & SALEEM, Z. (2018). Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 346-352.

Cuadro 1. Ventajas, Desventajas y Aplicaciones de Los Refrigerantes CFC, HCFC y HFC

Refrigerante	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Estado Actual
Diclorodifluorometano (R-12)	No es tóxico ni inflamable. Fácil de manipular.	Alto potencial de degradación de la capa de ozono	Se utilizaba para refrigeración industrial y en sistemas de acondicionamiento de aire doméstico y automotriz	Eliminado en el año 2007
Clorodifluorometano (R-22)	No es tóxico ni inflamable. No daña la capa de ozono.	Tiene un alto potencial de calentamiento global	Utilizado para el acondicionamiento de aire industrial y doméstico.	Se debe eliminar para el año 2035
1,1,1,2 - Tetrafluoroetano (R-134a)	Potencial de la capa de ozono casi que insignificante	Alto potencial de calentamiento global. Reemplazo el refrigerante R-12	Se utiliza para aplicaciones de altas temperaturas como el acondicionamiento de aire doméstico y automotriz.	Se debe eliminar para el año 2035
Puron (R-410A)	No deteriora la capa de ozono. No es tóxico ni inflamable en de fuga.	Maneja presiones más altas de lo habitual. Se deben usar equipos e instrumentos adecuados para estas presiones.	Utilizado para el acondicionamiento de aire doméstico o automotriz de baja y media potencia.	Se debe eliminar para el año 2035

Fuente: MOHANRAJ, M.; JAYARAJ, S. & MURALEEDHARAN, C. (2009). *Environment Friendly Alternatives to Halogenated Refrigerants – A Review*. International Journal of Greenhouse Gas Control. Vol 3. pp 108-119.

Los refrigerantes sintéticos (CFC, HCFC y HFC) son más económicos y fáciles de implementar en sistemas de acondicionamiento de aire. En el Cuadro 1 se observan

algunos refrigerantes sintéticos que se han utilizado en gran proporción hasta que se observó que deterioraban, en una manera significativa, la capa de ozono o que tienen un gran potencial de calentamiento global. Debido a esto, se han buscado distintas formas de implementar los refrigerantes naturales en los ciclos de refrigeración utilizados en la actualidad, sin que demande cambios substanciales en dichos ciclos y sin que afecte la salud de los seres humanos. De los refrigerantes que se observa en el cuadro ya se discontinuó en uso del R-12, mientras que los otros tres aún están en proceso de ser reemplazados.

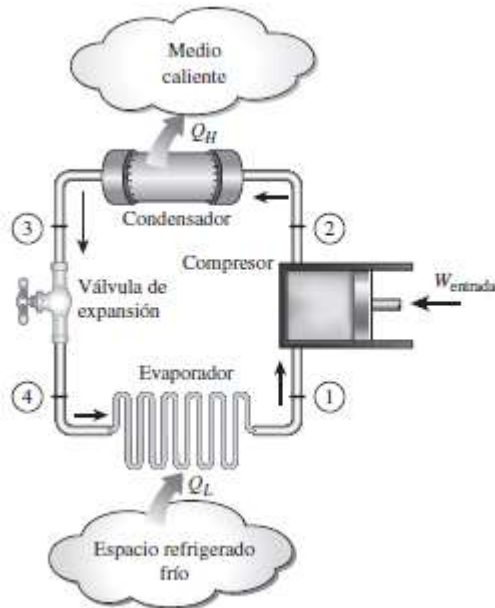
1.3 CICLOS DE REFRIGERACIÓN

Los ciclos de refrigeración están basados en el ciclo de Carnot, el cual está compuesto por dos procesos isotérmicos reversibles, un proceso isotrópico y un proceso isoentálpico. Cuando hace un giro izquierdo se conoce como ciclo invertido de Carnot; se trata de un ciclo invertible. En un proceso real se trabaja el compresor con una eficiencia entre el 85% y 99%.⁷

1.3.1 Refrigeración por compresión de vapor. La refrigeración por compresión se basa en una circulación mecánica forzada de un refrigerante en un circuito cerrado de una zona de alta presión a una de baja presión. Los equipos de este tipo de refrigeración están compuestos por un compresor, un condensador, un mecanismo de expansión, un evaporador y un refrigerante el cual circula a través de los equipos mencionados (ver figura 1). Se puede observar que es un ciclo invertido de Carnot.

⁷ AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 46.8 Refrigeration Systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Figura 1. Ciclo de Refrigeración Por Compresión de Vapor



Fuente: CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011).
Thermodynamics. New York: McGraw-Hill

El proceso consiste en elevar la presión y temperatura del refrigerante, en fase vapor, en el compresor; del compresor pasa al condensador donde intercambia calor con el entorno; del condensador sale el refrigerante en fase líquida y pasa al mecanismo de expansión, el cual, provoca una caída en la presión y temperatura del refrigerante. Por último, pasa el líquido a menor presión y temperatura al evaporador, del cual sale en fase vapor y vuelve a comenzar el ciclo en el compresor⁸.

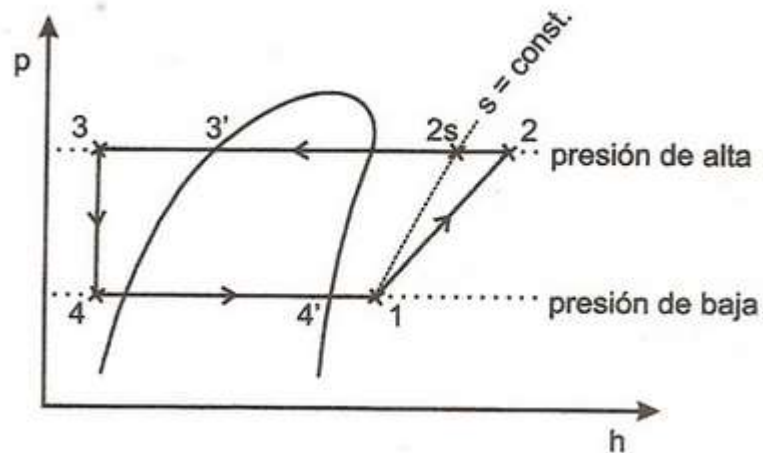
La zona de alta presión es, desde la salida del compresor hasta la entrada del mecanismo de expansión. Y la zona de baja presión es, desde la salida del mecanismo de expansión hasta la entrada del compresor.

Este ciclo de refrigeración es comúnmente utilizado en los sistemas de acondicionamiento de aire y en frigoríficos. Lo que varía entre un ciclo de refrigeración de vapor y un ciclo de refrigeración por absorción, es la

⁸ CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

instrumentación que se utiliza en el equipo⁹. Los ciclos de refrigeración por compresión de vapor se utilizan comúnmente en equipos como acondicionadores de aire, neveras, enfriadores de aguas, tanques de leche, fábricas de hielo, acondicionamiento de aire en vehículos, equipos de refrigeración industrial, entre otros.¹⁰

Figura 2. Diagrama P-H De un Ciclo de Refrigeración Por Compresión



Fuente: JUTGLAR, Luis. (2008). *Técnicas de refrigeración*. Barcelona: Marcombo. p. 49

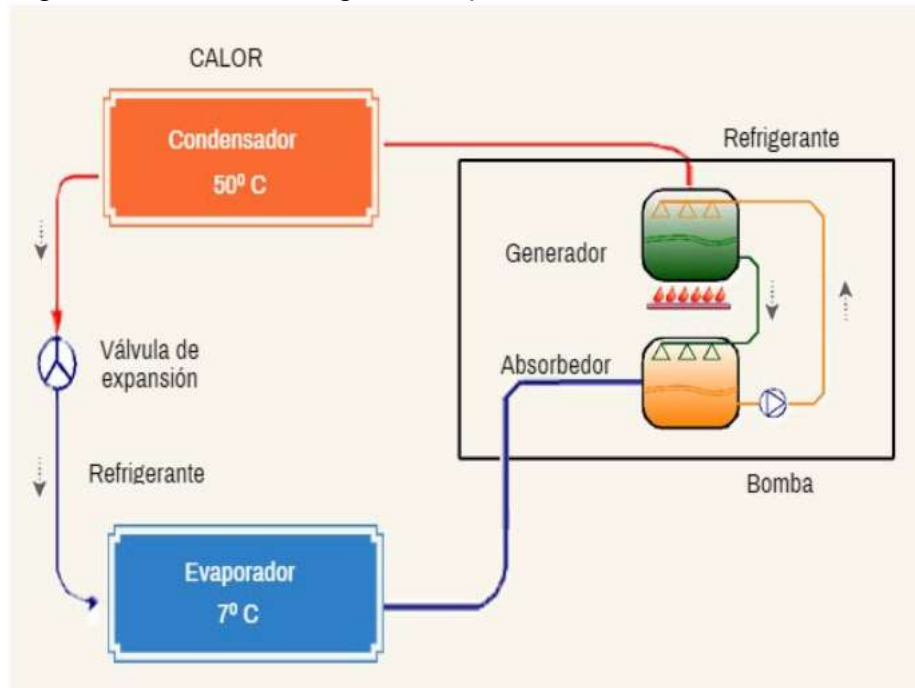
Los Diagramas P-H o diagramas de Mollier de un ciclo de refrigeración muestran los cambios de entalpía del refrigerante cuando aumenta o disminuye la presión. En la Figura 2 se observa un diagrama P-H de un ciclo de refrigeración no ideal. En la figura se observa que hay una zona, al lado derecho del diagrama, donde el refrigerante es un vapor sobrecalentado, al lado izquierdo del diagrama el refrigerante es un líquido subenfriado. Al interior del domo la fase del refrigerante es una mezcla líquido-vapor. En los ciclos de refrigeración ideales no hay vapor sobrecalentado ni líquido subenfriado, solamente hay líquido saturado y vapor saturado.

⁹ AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 46.8 Refrigeration Systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

¹⁰ WANG, S. (2001). *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. United States of America: McGraw-Hill

1.3.2 Refrigeración por absorción. El ciclo de refrigeración por absorción es similar al ciclo de refrigeración por compresión de vapor, con la diferencia que; en el ciclo de absorción se reemplaza el compresor por un generador y un absorbedor¹¹. Al igual que en la refrigeración por compresión, se utiliza un refrigerante que cumple la función de absorber calor. Este método usa como refrigerante el amoniaco (R-717) o el bromuro de litio, el cual, es un agente desecante y no un refrigerante.

Figura 3. Ciclo de Refrigeración por Absorción



Fuente: ARNABAT, I. (2007). *Sistemas de refrigeración aire acondicionado: compresión y absorción*. Instalaciones y Componentes

Dicho proceso consiste en que, el vapor que viene del evaporador pasa al absorbedor, aquí el refrigerante se pone en contacto con el vapor de una solución diluida. La solución formada en el absorbedor se bombea al generador en donde se le aumenta la presión. En el generador se aumenta la temperatura de la solución hasta que se evapora el refrigerante y pasa al condensador. La solución resultante de la evaporación en el generador va nuevamente al absorbedor. Desde que el refrigerante llega al condensador, el ciclo es igual al ciclo de refrigeración por compresión de vapor¹². (Ver Figura 3) En el sistema bromuro de litio – agua, en el

¹¹ RODRÍGUEZ, J. (1990). *Capítulo 10: Ciclos Frigoríficos*. En *Introducción a la Termodinámica con Algunas Aplicaciones de la Ingeniería* (pp.429-462). México: Universidad Tecnológica Nacional

¹² RODRÍGUEZ, J. (1990). *Capítulo 10: Ciclos Frigoríficos*. En *Introducción a la Termodinámica con Algunas Aplicaciones de la Ingeniería* (pp.429-462). México: Universidad Tecnológica Nacional

absorbedor está el bromuro de litio y el agua se utiliza como refrigerante. Mientras que en el sistema agua – amoníaco, se utiliza el amoníaco como refrigerante y el agua está en el absorbedor.

El ciclo de refrigeración por absorción se utiliza en equipos industriales. Actualmente se están usando en sistemas de acondicionamiento de aire, en cadenas de preparación y conservación de alimentos, procesos vinícolas, tratamientos de lácteos, preparaciones farmacéuticas, entre otros.

1.4 EFICIENCIAS DE PRIMERA Y SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

1.4.1 Coeficiente de desempeño. El coeficiente de desempeño (COP)¹³ representa el desempeño que tiene los ciclos de refrigeración.

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{W_{\text{neto, entrada}}} \quad \text{Ec. 1}$$

La Ecuación 1 se utiliza para calcular el coeficiente de desempeño del ciclo de refrigeración, donde Q_L es la magnitud de calor extraído y $W_{\text{neto, entrada}}$ es la entrada de trabajo neto¹⁴.

$$\text{COP}_{R, \text{Carnot}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad \text{Ec. 2}$$

La Ecuación 2 se utiliza para calcular el coeficiente de desempeño cuando se utiliza el ciclo de Carnot, donde T_H es la temperatura del medio caliente y T_L es la temperatura del medio frío³.

Es importante calcular el coeficiente de desempeño del refrigerante natural para comprobar si funciona de manera óptima en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor. El coeficiente de desempeño se utiliza para realizar un análisis del comportamiento del refrigerante en el ciclo de refrigeración, primera ley de la termodinámica y para realizar el análisis de la eficiencia exergética del refrigerante de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

¹³ CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

¹⁴ CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

1.4.2 Consumo energético. Gran parte del consumo energético a nivel mundial viene de la conservación o congelación de alimentos. Los ciclos de refrigeración utilizan energía eléctrica o fósil para su funcionamiento. Al analizar el consumo energético hay que mirar cuanto se consume en la válvula de expansión y cuanto calor térmico expulsa el condensador. El consumo energético más importante a analizar en un ciclo de refrigeración es el del evaporador debido a que este es el que indica la cantidad de energía térmica que puede absorber el refrigerante del ambiente. La energía térmica que se pueda absorber en el evaporador define la capacidad de refrigeración que tiene el ciclo¹⁵.

La primera ley de la termodinámica habla sobre la conservación de la energía durante un proceso o ciclo. La transferencia de energía se puede dar en forma de calor o de trabajo mecánico. En el caso de los ciclos de refrigeración hay un intercambio térmico entre el refrigerante en el evaporador y el ambiente que se quiere enfriar, ya sea que se utilice un ciclo de refrigeración por compresión de vapor o por absorción. El trabajo mecánico de un ciclo de refrigeración lo realiza el compresor, el compresor cumple con la función de aumentar la presión y temperatura del refrigerante en el ciclo de refrigeración.

1.4.3 Eficiencia exergética. El concepto de exergía aparece en la segunda ley de la termodinámica, la cual indica la dirección en la que va un proceso o un ciclo y la calidad y cantidad de energía que se utiliza en estos ciclos. La segunda ley de la termodinámica también habla de la entropía la cual está asociada con la irreversibilidad de un proceso. En un ciclo de refrigeración es conveniente tener una irreversibilidad baja por lo que a mayor irreversibilidad mayor va a ser el trabajo requerido para la obtener las temperaturas deseadas. Al reducir la irreversibilidad se aumenta el desempeño del ciclo de refrigeración¹⁶ por lo que el ciclo va a requerir una menor cantidad de trabajo.

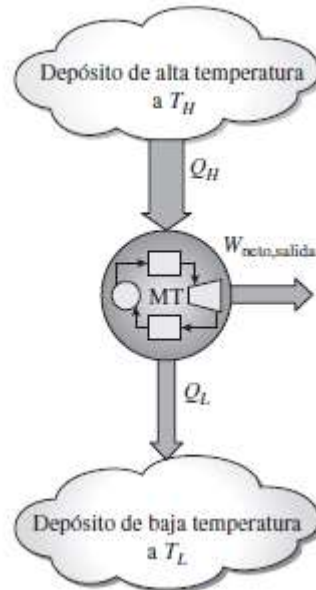
En la segunda ley de la termodinámica la exergía se conoce como la disponibilidad, la cual representa la cantidad máxima de energía útil que se puede obtener del ciclo o sistema analizado¹³. Si los sistemas que se ponen en contacto con el medio

¹⁵ CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

¹⁶ AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2017). *2017 ASHRAE® Handbook - Fundamentals (SI Edition) - 2.1.4 Second Law of Thermodynamics*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

ambiente y el de un sistema cerrado, la exergía va a ser el trabajo teórico máximo que se puede obtener del sistema analizado¹⁷.

Figura 4. Exergía de un Ciclo de Refrigeración



Fuente: CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

La eficiencia exergética o eficiencia de segunda ley se puede definir por dos métodos uno es utilizando el coeficiente de desempeño y el otro es utilizando el flujo de exergía de la zona de baja temperatura del ciclo de refrigeración.¹⁸

1.5 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DE CONGELACIÓN

La refrigeración es ampliamente utilizada en varios sectores ya sean industriales o domésticos. La refrigeración industrial representa un problema ambiental debido a que todavía se utilizan refrigerantes que tienen un alto potencial de calentamiento global. La refrigeración de conservación y congelación se utiliza en gran proporción en la industria de alimentos, motivo por el cual este sector industrial causa un gran impacto ambiental creando la necesidad de investigar el comportamiento de los

¹⁷ CABELLOS, M. & ZAFRA, J. (2016). *En Balance Exergético en la Turbina de Vapor TGM de 21.7MW Para el Incremento de su Eficiencia - Empresa Agroindustrias San Jacinto S.A.A.* Nuevo Chimbote, Perú: Universidad Nacional del Santa.

¹⁸ CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

refrigerantes naturales o los de cuarta generación para su reemplazo. Existen varios refrigerantes naturales que funcionan de manera óptima cuando se utilizan para la refrigeración de conservación, es decir a temperaturas superiores a 0°C, pero son muy pocos los refrigerantes que se pueden utilizar para la congelación de productos alimenticios por lo que hay que tener en cuenta las condiciones en las cuales se quieren conservar y la toxicidad de los refrigerantes en dado caso que haya una fuga.

Se clasifica el uso de los ciclos de refrigeración según un rango de temperaturas. Cada uno de estos rangos se utiliza para una aplicación en específico. Una de las aplicaciones es la refrigeración de congelación, cuando se requieren temperaturas menores a 0°C. El siguiente rango de temperatura es de 0°C a 12°C y es utilizado como refrigeración de conservación. El ultimo rango es el de, climatización para el confort humano, el cual trabaja en temperaturas entre 18°C y 32°C. Para lograr una buena refrigeración en cualquiera de los tres rangos, se requiere realizar un control de humedad.

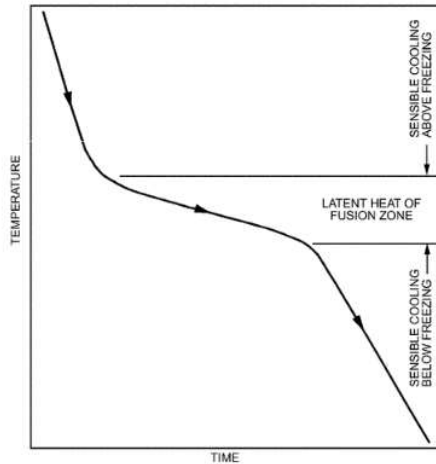
La congelación se utiliza mayormente en la industria de alimentos ya sea para conservar frutas y verdura procesada, comidas preparadas o para alimentos que requieren de temperaturas bajas, como los helados. Se utiliza la congelación para tener un cambio físico y químico lento; además de esto, se emplea para evitar la actividad microbiológica en los alimentos, prolongando de esta manera su vida útil¹⁹. La congelación también ha ayudado a facilitar el transporte de productos alimenticios perecederos de un continente a otro.

La congelación consiste en reducir la temperatura de un producto hasta llevarlo a la temperatura del lugar de almacenamiento y convertir toda el agua contenida en el producto en hielo⁵. Para congelar un alimento se requieren tres etapas: la primera, cuando se reduce la temperatura hasta el punto de congelación, eliminando su calor sensible. La segunda, cuando se elimina el calor latente convirtiendo el agua dentro del alimento en hielo. Y en la tercera etapa, se llega a una temperatura inferior a la de congelación de los alimentos, la cual es -18°C, eliminando más calor sensible²⁰. Este proceso se ve en la Figura 5.

¹⁹ AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 29.2 Blast Freezers*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

²⁰ ABELLO LINDE S.A. *Tecnología de congelación y refrigeración para la industria alimentaria*. Barcelona: The Linde Group

Figura 5. Curva de Congelamiento



Fuente: AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 29.2 Blast Freezers*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

La congelación debe ser rápida ya que de esto depende el tamaño del cristal en los tejidos del producto. Si la congelación del producto es lenta, los cristales van a ser grandes y se encontrarán en el exterior. Si la congelación es rápida, los cristales son pequeños y se forman por dentro y fuera del producto²¹. Al formarse cristales grandes se deteriora la calidad del producto.

El presente trabajo analiza el comportamiento de los refrigerantes naturales, que se pueden utilizar a temperaturas inferiores a 0°C, en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor para analizar su comportamiento y eficiencia. Se utiliza este ciclo de refrigeración por lo que es el más utilizado en los sistemas de refrigeración, sea industrial, doméstico o automotriz y además de esto, no se requiere hacer una mezcla de refrigerantes para tener un funcionamiento eficiente.

²¹THE LINDE GROUP. *Congelación y Refrigeración de Alimentos*. Gases Industriales España Sitio web: http://www.abellolinde.es/es/processes/freezing_and_cooling/food_chilling_and_freezing/index.html

1.6 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

La simulación computacional se realiza a través de un programa informático cuyo fin es modelar y simular un proceso que se desee analizar. Se utiliza la simulación computacional para conocer cómo se va a comportar el proceso o actividad que se está simulando.

La simulación se utiliza ampliamente en la aviación y actualmente se está extendiendo a los procesos industriales para conocer el comportamiento de una planta u optimizar el funcionamiento de ésta. La simulación también es un recurso para emular el comportamiento de ciertas sustancias en un producto o su funcionamiento en las diferentes etapas de producción²². También se utiliza para evaluar el comportamiento, el diseño, propiedades de los materiales, cargas termodinámicas y los requerimientos operacionales²³.

La simulación computacional es una recopilación de algoritmos y ecuaciones, los cuales ayudan a resolver un problema en particular. Estos algoritmos combinan conocimiento teórico y experimental para poder probar teorías, analizar comportamientos de un proceso en específico o ayudar a comprender el funcionamiento de una actividad. En la actualidad la simulación computacional es importante para la investigación científica aplicada. A medida que evoluciona la simulación computacional, más ramas científicas se van incluyendo, como la mecánica, biología, química, física, ciencia de materiales y la bioinformática²⁴.

1.6.1 Aspen HYSYS. Es un simulador de procesos químicos, donde se pueden emular, desde operaciones unitarias hasta plantas y refinerías. Se utiliza para realizar cálculos con el balance de masa, balance de energía, equilibrio líquido-vapor, transferencia de calor, transferencia de masa, cinética y caídas de presión²⁵. Este simulador es usado comúnmente para realizar las simulaciones de procesos

²² PUEYO, E. (2017). *Simulación Computacional*. agosto 22, 2018, de Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España Sitio web: <http://www.ciber-bbn.es/programas-transversales/programa-de-difusion-e-internacionalizacion/biomedicina-con-y-para-la-sociedad/miniserie-de-tv/simulacion-computacional>

²³ KLEINSTREUER, Clement. (2018). *Modern Fluid Dynamics (2nd Edition) - 9.2.5.2 Computer-Aided Design*. CRC Press

²⁴ STEINHAUSER, Martin Oliver. (2013). *Computer Simulation in Physics and Engineering - 1.1 Physics and Computational Physics*. De Gruyter.

²⁵ ASPENTECH. Aspen HYSYS. Sitio web: <https://www.aspentech.com/products/engineering/aspen-hysys>

en plantas química y procesos de baja escala. Las simulaciones más analizadas, de ciclos de refrigeración en Aspen son de absorción solar.²⁶

1.6.2 Winsim II. Es un simulador riguroso de procesos químicos como refrigeración, petroquímica, procesamiento de gas, tratamiento de gas, producción de amonio, metanol, sulfuro e hidrogeno. Este simulador cuenta con más de 60 métodos termodinámicos y también se puede utilizar para el modelado de procesos²⁷. Este simulador funciona de manera similar al Aspen HYSYS, también se utiliza para la simulación de procesos industriales. Uno de los proyectos para los que se ha usado este simulador es para la producción y obtención de propano. En este proceso se usó agua como refrigerante.²⁸

1.6.3 Frigosim. Es un programa de simulación para plantas de energía térmica. Se utiliza para el diseño de plantas de refrigeración, bombas de calor y sistemas de acondicionamiento de aire. Ayuda a hacer un diseño óptimo de la planta teniendo en cuenta la capacidad y la economía²⁹. Este simulador se utilizó para realizar un análisis de sensibilidad en el ciclo de licuefacción del gas natural.³⁰ Para utilizar Frigosim como simulador hay que tener en cuenta que este funciona únicamente para simular ciclos de refrigeración o parecidos.

Estos tres simuladores cumplen con simular el funcionamiento los ciclos de refrigeración por compresión de vapor aplicados a la industria de congelación de alimentos. De estos tres simuladores se trabajó con Aspen HYSYS por lo que se cuenta con la licencia de funcionamiento de este programa y posee los modelos termodinámicos necesarios para la correcta simulación de los ciclos de refrigeración utilizando refrigerantes naturales. Además de esto se tiene un amplio conocimiento del uso de este simulador, lo cual ayuda a realizar una correcta simulación de lo que se desea analizar.

²⁶ RAMÍREZ, D., TAPIA, A., LANCHEROS, V., ESPITIA, L. & GONZÁLEZ, Y. (2015). *Simulación y Análisis de un Sistema de Refrigeración Por Absorción Solar Intermitente*. Universidad de Córdoba

²⁷ WINSIM INC. About WinSim Sitio web: <https://www.winsim.com/>

²⁸ VAZQUEZ, A., CHAMOSOS, C., TAPIA, Y. (2014). *Simulación De Procesos Industriales II*. Universidad, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Bolivia

²⁹ FRIGOSIM. *FriGoSim Thermal Plant Optimization*. Sitio web: <http://www.frigosoft.no/frigosim/>

³⁰ DI SCIPIO, S. RODRÍGUEZ, A. SALAZAR, A. & TRIGILIO, A. (2014). *Simulation and Sensitivity Analysis of a Natural Gas Liquefaction Cycle*. Revista Técnica Universidad Zulia.

1.7 MÉTODO DE PONDERACIÓN LINEAL SCORING

La ponderación Lineal Scoring se construye una función de valor para cada uno de los criterios seleccionados. Es un método compensatorio y manipulable en la asignación de los puntajes a los criterios³¹. Además de esto es multicriterio ampliamente utilizado a nivel mundial.³² Consiste en que el individuo que va a realizar la selección elige entre un conjunto de criterios disponibles para obtener un resultado que cumpla con la mayoría de los requisitos solicitados.³³ Se deben conocer todas las alternativas para definir un valor para cada uno de los aspectos seleccionados según su importancia con lo que se vaya a evaluar. Cuando se tienen los criterios y sus respectivos puntajes seleccionados se evalúa cada uno de las opciones a seleccionar y se les asigna el puntaje respectivo para cada uno de los criterios, dependiendo de si cumple o no. Se suma el puntaje obtenido en cada uno de los criterios y por último se compara este resultado con las opciones que se están evaluando y se selecciona el que haya obtenido un mayor puntaje.

La gran ventaja que tiene este método es que se puede definir la importancia a cada uno de los criterios de selección. Además de esto se obtiene una puntuación global lo cual facilita la selección de la opción u opciones que cumplieron con la mayoría de los criterios seleccionados. Una de las desventajas de este método es que puede haber criterios a los que no se les dé la importancia requerida, cambiando de esta manera los resultados obtenidos.

Este método se utilizó para la preselección de los refrigerantes, el cual tuvo en cuenta los aspectos más importantes que debe tener, tales como, el punto de ebullición, la conductividad térmica y el calor latente de evaporación alto para poder usar una menor cantidad de la sustancia, reduciendo de esta manera los costos.

³¹ HURTADO, T. & BRUNO, G. (2005). *Capítulo II: Análisis de Decisiones*. agosto 20, 2018, de Universidad Nacional Mayor de San Marcos Sitio web: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/contenido.htm

³² PONS, A. (2010). *Localizaciones Óptimas Para Puertos Secos*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. 27-28

³³ TAVELLA, M., MIROPOLSKY, A., & MANERA, R. (2014). *Estudio Comparativo de Métodos Multicriterio Para El Análisis De La localización Sustentable De parques Industriales Regionales*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1, 41-48. Sitio Web: revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos_admon/article/view/4043/3018

2. SIMULACIÓN CICLOS DE REFRIGERACIÓN

Al momento de seleccionar un refrigerante natural hay que tener en cuenta las propiedades fisicoquímicas, los aspectos ambientales y de seguridad de los refrigerantes. Los refrigerantes naturales por lo general son altamente inflamables. Una de las grandes ventajas que tienen estos refrigerantes es que tienen un potencial de agotamiento de la capa de ozono igual a cero y tienen un potencial de calentamiento global no mayor a 2. Estos aspectos se utilizaron para preseleccionar los refrigerantes naturales a analizar.

Una vez preseleccionados los refrigerantes se calculó su carga térmica. Este valor indica cuál de los refrigerantes funciona de una manera más eficiente cuando se tiene una cámara de congelación con unas dimensiones específicas, una temperatura al interior de la cámara de congelación de -25°C y al exterior de la cámara de congelación de 35°C . Para realizar este cálculo se tuvo en cuenta la carga térmica por personas, la carga térmica por motores e iluminación, la carga térmica por renovación de aire al interior de la cámara de congelación y la carga térmica de las paredes de la cámara de congelación.

Cuando se conoce los refrigerantes naturales a analizar se define el modelo termodinámico, en el simulador, que mejor representa las propiedades de cada uno de los refrigerantes. Una vez definido esto se pasa a hacer la simulación la cual cuenta con un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador. Para las simulaciones se utilizó un flujo molar de 100kmol/h de refrigerante.

2.1 SELECCIÓN REFRIGERANTES

Los refrigerantes naturales han generado gran interés ya que son la opción más viable para reemplazar los HFC, debido a que su potencial de agotamiento de la capa de ozono es igual a cero y tienen un bajo potencial de calentamiento global. Los siguientes aspectos son los más importantes para la selección de un refrigerante natural:

- Debe estar en fase vapor a 25°C y 1atm
- Potencial de calentamiento global bajo
- Potencial de agotamiento de la capa de ozono igual a cero
- Preferiblemente no inflamable ni tóxico

Además de los aspectos anteriores también hay que tener en cuenta las propiedades fisicoquímicas de las sustancias como la temperatura de ebullición, temperatura de congelación, temperatura crítica, calor latente de evaporación, conductividad térmica, peso molecular y densidad. Dependiendo de estos datos y de las temperaturas a trabajar se utiliza una menor cantidad de refrigerante, reduciendo de esta manera los costos de operación.

2.1.1 Propiedades refrigerantes

Tabla 1. Refrigerantes

Sustancia	Nombre Refrigerante
Amoniaco	R-717
Dióxido de Carbono	R-744
Agua	R-718
Propano	R-290
Isobutano	R-600a
Etano	R-170
Propileno	R-1270

Fuente: The Linde Group, Tabla de Propiedades

En la Tabla 1 se observan los refrigerantes naturales más comunes con su respectivo nombre e identificación.

Tabla 2. Aspectos Ambientales

Refrigerante	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP)	Potencial de Calentamiento Global (GWP)
R-717	0	0
R-744	0	1
R-718	0	0
R-290	0	3
R-600a	0	3
R-170	0	3
R-1270	0	2

Fuente: Fichas Técnicas de los Fabricantes (Anexo B y C)

En la Tabla 2 se observan los aspectos ambientales de cada uno de los refrigerantes, esto es de gran importancia debido a que estos refrigerantes se están volviendo a utilizar por su bajo potencial de calentamiento global y su potencial de agotamiento de la capa de ozono igual a cero.

Tabla 3. Aspectos Físicoquímicos Parte 1

	Temperatura de Ebullición (°C)	Temperatura de Congelación (°C)	Temperatura Crítica (°C)	Calor Latente de Evaporación (kJ/kg)
R-717	-33.3	-77.8	132.3	1369.5
R-744	-78.5	-56.57	31.1	131.59
R-718	100	0	373.9	2270
R-290	-42.1	-187.3	96.7	425.5
R-600a	-11.75	-159.61	135	365.101
R-170	-88.6	-182.8	32.18	489.4
R-1270	-47.7	-185.25	92.4	286.26

Fuente: Fichas Técnicas de los Fabricantes (Anexo D y E)

Tabla 4. Aspectos Físicoquímicos Parte 2

	Conductividad Térmica (W/m*K)	Peso Molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/m ³)
R-717	0.2466	17.03	0.889
R-744	0.01644	44.01	1.83
R-718	0.57	18.02	1
R-290	3.68	41.10	2.427
R-600a	0.014	58.12	2.82
R-170	18	30.07	2.054
R-1270	3.535*10 ⁻³	42.08	1.762

Fuente: Fichas Técnicas de los Fabricantes (Anexo F)

En las Tablas 3 y 4 se observa las propiedades físicas y químicas más importantes que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar un refrigerante.

Tabla 5. Aspectos Seguridad

	Inflamabilidad	Toxicidad
R-717	2	B
R-744	1	A
R-718	1	A
R-290	3	A
R-600a	3	A
R-170	3	A
R-1270	3	A

Fuente: ASHRAE

Donde:

A: Baja Toxicidad

B: Alta Toxicidad

1: Sin Propagación de Llama

- 2: Baja Inflamabilidad
- 3: Alta Inflamabilidad

En la Tabla 5 se observan los aspectos de seguridad según ASHRAE para cada uno de los refrigerantes a analizar. Hay que tener en cuenta que la información utilizada en todas las tablas de este capítulo son una recopilación de la información encontrada en las fichas de seguridad, elaborada por los fabricantes de estos refrigerantes, de cada una de las sustancias refrigerantes.

2.1.2 Preselección refrigerante. El método de preselección utilizado es de ponderación, conocido como lineal Scoring, el cual consiste en dar una puntuación numérica a cada uno de los criterios y los tres refrigerantes con la puntuación más alta son los seleccionados.

Los criterios utilizados con su respectiva puntuación son:

1. El potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) del refrigerante es igual a 0³⁴
 - a. Cumple: 5
 - b. No Cumple: 1
2. El potencial de calentamiento global del refrigerante es menor o igual a 2³⁵
 - a. Cumple: 5
 - b. No cumple: 1
3. El refrigerante no es toxico.³⁶
 - a. Cumple: 5
 - b. No cumple: 1

³⁴ BOLAJI, B., & HUAN, Z. (2013). *Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 18, pp. 49-54

³⁵ CALM, J. (2008). *The Next Generation of Refrigerants - Historical Review, Considerations, and Outlook*. International Journal of Refrigeration.

³⁶ CIBSE. (2016). *Air Conditioning and Refrigeration - CIBSE Guide B3 - 2016 - 3.3.4.1 Refrigerant Selection*. CIBSE.

4. El refrigerante no es inflamable³⁰

- a. Cumple: 5
- b. Medio cumple: 3
- c. No cumple: 1

5. La Temperatura de ebullición del refrigerante es menor a 25°C³⁷

- a. Cumple: 10
- b. Medio cumple: 5
- c. No Cumple: 1

6. No es necesario hacer una mezcla de refrigerantes para que funcione³¹

- a. Cumple: 5
- b. No cumple: 0

Cuadro 2. Puntajes Refrigerantes

Criterio	Refrigerantes						
	R-717	R-744	R-718	R-290	R-600a	R-170	R-1270
1	5	5	5	5	5	5	5
2	5	5	5	1	1	1	5
3	1	1	3	3	3	3	3
4	3	5	5	1	1	1	1
5	10	10	1	10	10	10	10
6	5	5	5	5	5	5	0
TOTAL	29	29	24	25	25	25	24

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 2 se observa que el Dióxido de Carbono (R-744) obtuvo un puntaje de 31 y el Amoniaco (R-717) obtuvo un puntaje de 29, lo que indica que estos dos refrigerantes naturales son los que cumplen con la mayoría de los criterios seleccionados. Seguido de estos refrigerantes está el Propano (R-290), Isobutano (R-600a) y el Etano (R-170) con un puntaje de 25. Estos refrigerantes no cumplen con dos de los criterios, pero si cumplen con los que mayor puntuación tienen. Estos son los cinco refrigerantes naturales a los que se les va a analizar la carga térmica

³⁷ MOKHATAB, Saeid. MAK, John Y. VALAPPIL, Jaleel V. WOOD, David A. (2014). *Handbook of Liquefied Natural Gas - 4.3.1 Basic Requirements on Refrigerants*. Elsevier.

para determinar cuales tienen un mejor desempeño cuando se quiere diseñar una cámara de congelación.

2.1.3 Cálculo cargas térmicas. Se seleccionaron los refrigerantes según su carga térmica. Para conocer cuál es la carga térmica se necesita conocer la carga por transmisión de paredes (\dot{Q}_{Paredes}), carga por renovación ($\dot{Q}_{\text{Renovación}}$), carga de motores y alumbrado ($\dot{Q}_{\text{Motor,Luz}}$) y la carga por personas ($\dot{Q}_{\text{Personas}}$). Las ecuaciones para realizar estos cálculos son:

$$\dot{Q}_{\text{Paredes}} = A * k * (T_{\text{Exterior}} - T_{\text{Camara}}) \quad \text{Ec. 3}$$

$$\dot{Q}_{\text{Renovación}} = \frac{V * \Delta H * \#\text{renovaciones}}{86.4} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\dot{Q}_{\text{Motor,Luz}} = \dot{Q}_{\text{Cámara}} * \frac{t_{\text{trabajo}}}{24} + 0.2 * \dot{Q}_{\text{Motor Evaporador}} * \frac{t_{\text{Enfriamiento}}}{24} \quad \text{Ec. 5}$$

$$\dot{Q}_{\text{Personas}} = \dot{Q}_{\text{Persona}} * \#\text{personas} * \frac{t_{\text{Trabajo}}}{24} \quad \text{Ec. 6}$$

$$\dot{Q}_{\text{Térmica}} = \dot{Q}_{\text{Paredes}} + \dot{Q}_{\text{Renovación}} + \dot{Q}_{\text{Motor,Luz}} + \dot{Q}_{\text{Personas}} \quad \text{Ec. 7}$$

La carga térmica por transmisión de paredes (\dot{Q}_{Paredes}) es la carga térmica que emiten las paredes, el techo y el piso del cuarto frío. Este valor depende de la superficie de la cámara de congelación, del coeficiente de transferencia de calor de los materiales con los que fue construido y la diferencia de temperaturas del interior y exterior de la cámara de congelación.

La carga térmica por renovación ($\dot{Q}_{\text{Renovación}}$) es la cantidad de energía térmica que se requiere para renovar el aire dentro del cuarto frío. Para este cálculo se necesita conocer el volumen de la cámara de congelación, el valor del calor latente del refrigerante multiplicado por su densidad y la cantidad de renovaciones de aire que se requieren al día. El número de renovaciones que se realizan en un día depende del volumen del cuarto frío (Anexo D). La renovación del aire de la cámara de congelación consiste en la activación del ciclo de refrigeración, cuando se aumenta la temperatura al interior de la cámara de congelación, para volver a llegar a la temperatura deseada en el interior.

La carga térmica de motores y alumbrado ($\dot{Q}_{\text{Motor,Luz}}$) se debe tener en cuenta al momento de diseñar un sistema de refrigeración debido a que los motores generan

una carga térmica que se debe eliminar para alcanzar la temperatura deseada en la cámara de congelación. Para el cálculo de esta carga hay que conocer la carga térmica de la cámara y de los productos que quieran congelar, el tiempo de trabajo, la carga térmica del motor del evaporador y el tiempo de enfriamiento necesario.

La carga térmica por personas ($\dot{Q}_{Personas}$) es la cantidad de calor que emite una persona al ingresar a la cámara de congelación a una temperatura en específico. Para el cálculo de este dato se necesita conocer la carga por persona (Anexo H), la cantidad de personas dentro de la cámara de congelación y el tiempo de trabajo.

Los datos de la cámara utilizados para el cálculo de las cargas térmicas son:

Largo = 6m	Alto = 3.6m
Ancho = 5m	$T_{Exterior} = 35^{\circ}C$
$T_{Cámara} = -25^{\circ}C$	$Q_{Cámara} = 370W$
$Q_{motor\ Evaporador} = 350W$	$k = 0.024\ W/m^2\ ^{\circ}C$
Número Renovaciones = 6.576	$Q_{Persona} = 420W$
$t_{Trabajo} = 24h$	$t_{Enfriamiento} = 24h$

Para el cálculo del ΔH se multiplico el calor latente de cada una de las sustancias analizados por su densidad. (Ver los datos necesarios para realizar el cálculo en la Tabla 3 y la Tabla 4).

Cuadro 3. Calculo Cargas Térmicas

	$\dot{Q}_{Paredes}$ (W)	$\dot{Q}_{Renovación}$ (W)	$\dot{Q}_{Motor,Luz}$ (W)	$\dot{Q}_{Personas}$ (W)	$\dot{Q}_{Térmica}$ (W)
R-717	200.4	10007.7	440	420	11068
R-744		1979.5			3040
R-290		8488.7			9549
R-600a		8463.2			9524
R-170		8263			9323

Fuente: Elaboración propia

Se selecciona el Amoniaco (R-717), el Propano (R-290) y el Isobutano (R-600a) como refrigerantes para analizar su comportamiento en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, aplicado a la industria de congelación de alimentos. Estos refrigerantes se seleccionaron debido a su valor de carga térmica.

Todos los cálculos se realizaron con un ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Se utiliza este ciclo ya que no requiere hacer mezclas de refrigerantes para que se tenga un funcionamiento óptimo, en el ciclo de refrigeración por absorción

se requiere hacer mezclas de refrigerantes como bromuro de litio – agua o amoníaco – agua. El presente trabajo se encaminó al análisis del desempeño de un solo refrigerante en un ciclo de refrigeración, motivo por el cual se utiliza el ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

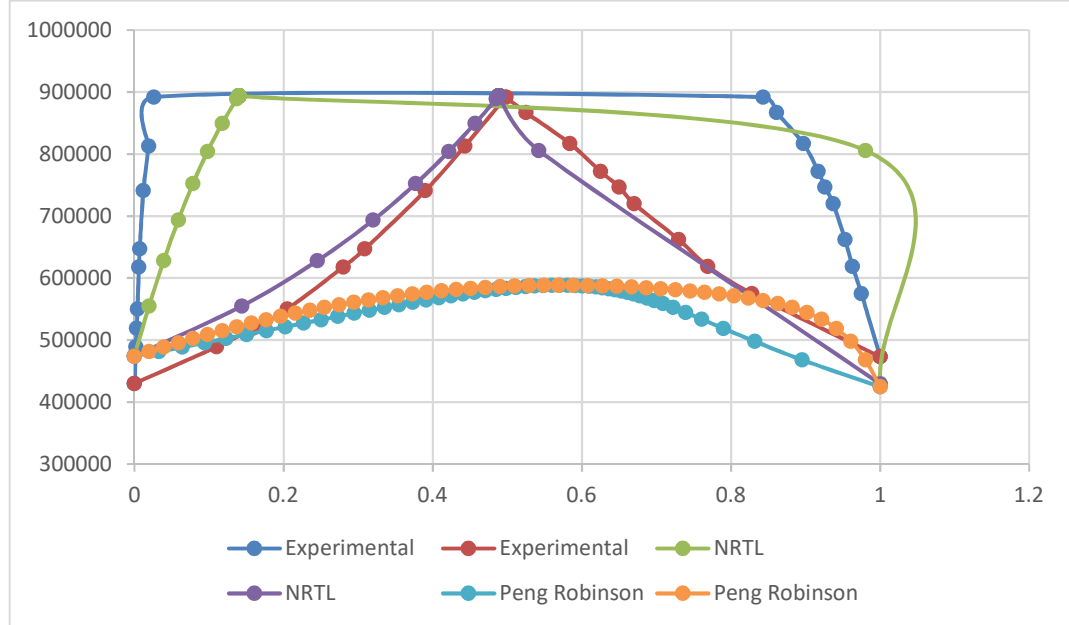
2.2 MODELOS TERMODINÁMICOS PARA LOS REFRIGERANTES SELECCIONADOS

Para la selección del paquete termodinámico usado hay que tener en cuenta que los ciclos de refrigeración están en un equilibrio líquido-vapor. Además de se deben considerar las propiedades de los refrigerantes que se van a simular en Aspen HYSYS. La selección del paquete termodinámico inadecuado afecta los resultados que se obtienen en el simulador. Para la selección del paquete termodinámico también se debe tener en cuenta la naturaleza del refrigerante de interés y el rango de presión y temperatura al cual se va a trabajar.³⁸

Se utiliza un equilibrio de fase experimental y se compara con los equilibrios de fase, obtenidos en Aspen Properties. Para la determinación del paquete termodinámico que se acomoda mejor al refrigerante se comparó el diagrama de equilibrio de fases de los métodos y se seleccionó el modelo termodinámico cuyo equilibrio de fases es más parecido al experimental.

³⁸ CARLSON, E. (1996). *Don't Gable With Physical Properties For Simulations*. Chemical Engineering Progress. Aspen Technology Inc.

Gráfica 1. Equilibrio Líquido-Vapor Amónico (R-717)

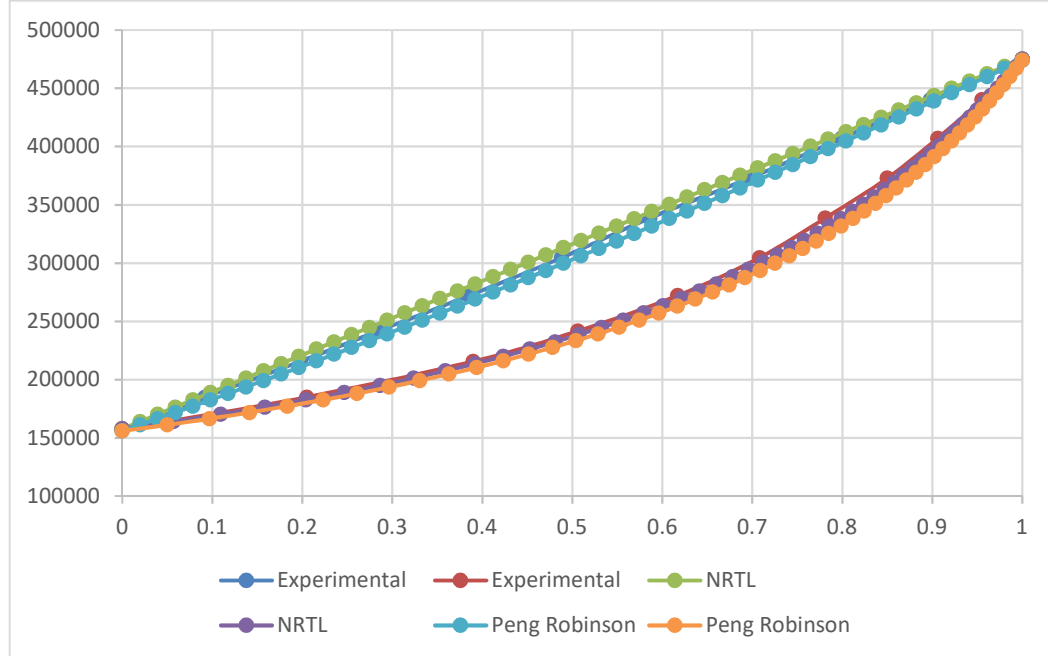


Fuente: NODA, K.; INOUE, K.; ASAI, T.; ISHIDA, K. J. (1993). *Isothermal vapor-liquid and liquid-liquid equilibria for the propane- ammonia and propylene-ammonia systems*

En la Gráfica 1 se observa que el modelo termodinámico que mejor representa al Amónico (R-717) es NRTL. Ninguno de los dos modelos representa perfectamente a este refrigerante, pero con el modelo NRTL se aproxima mucho a los valores experimentales. Por este motivo se va a utilizar el modelo termodinámico NRTL para realizar la simulación del ciclo de refrigeración por compresión de vapor cuando se utiliza el amoníaco como refrigerante.

Los puntos de color azul oscuro y los puntos de color rojo vistos en la Gráfica 1 representan los datos experimentales del equilibrio líquido-vapor del Amónico (R-717). Los puntos del equilibrio líquido-vapor de los datos que calcula el simulador (Aspen HYSYS) que más se aproximan a los experimentales son los puntos de color verde y los puntos de color morado. No se selecciona el método termodinámico Peng-Robinson por lo que el equilibrio líquido-vapor calculado por el simulador no es similar al equilibrio líquido-vapor experimental del Amónico (R-717).

Gráfica 2. Equilibrio Líquido-Vapor Propano (R-290)

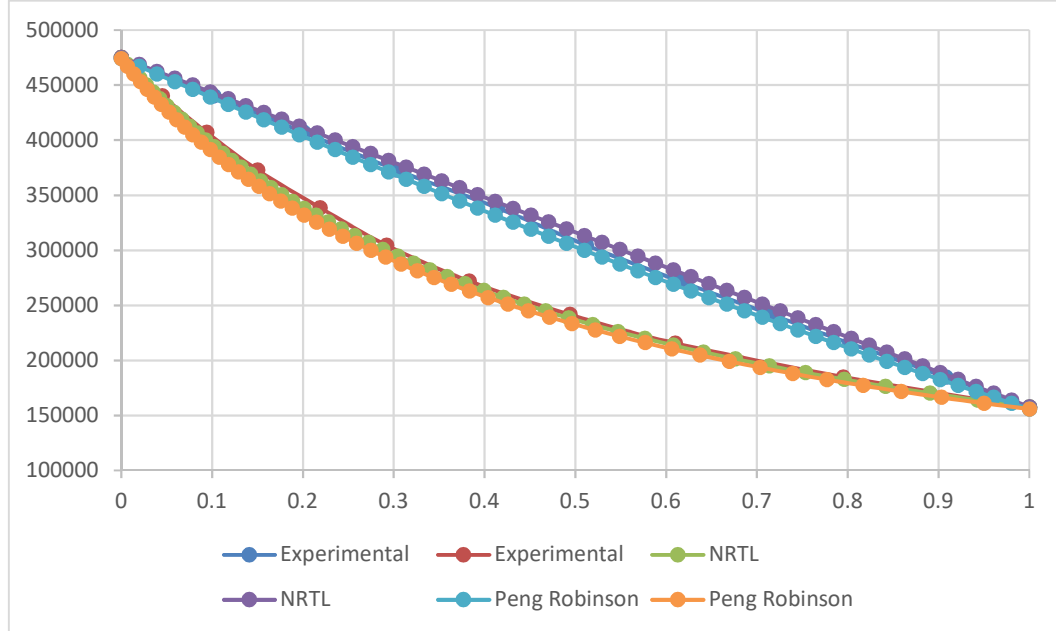


Fuente: LIM, J. S.; HO, Q. N. N.; PARK, J. -Y.; LEE, B. G. J., (2004). *Measurement of Vapor-Liquid Equilibria for the Binary Mixture of Propane (R-290) + Isobutane (R-600a)*. Chem. Eng Data, 49(2), 192-198

En la Gráfica 2 se observa que tanto el modelo termodinámico NRTL como Peng-Robinson representan de manera eficiente el comportamiento del Propano (R-290). Si se observa esta gráfica con un mayor detenimiento se puede observar que Peng-Robinson representa mejor las propiedades de este refrigerante, motivo por el cual se va a utilizar para realizar el ciclo de refrigeración por compresión de vapor utilizar.

En esta gráfica se el equilibrio líquido-vapor de los modelos termodinámicos Peng-Robinson y NRTL se aproximan a los experimentales, los cuales son los puntos de color azul oscuro y los puntos de color rojo. Se seleccionó Peng-Robinson como el modelo termodinámico a utilizar debido a que su equilibrio líquido-vapor se aproxima más al experimental, esto se observa en los puntos azul claro y en los puntos naranjas.

Gráfica 3. Equilibrio Líquido-Vapor Isobutano(R-600a)



Fuente: LIM, J. S.; HO, Q. N. N.; PARK, J. -Y.; LEE, B. G. J., (2004). *Measurement of Vapor-Liquid Equilibria for the Binary Mixture of Propane (R-290) + Isobutane (R-600a)*. Chem. Eng Data, 49(2), 192-198

En la Gráfica 3 se observa que los dos modelos termodinámicos utilizados (NRTL y Peng-Robinson) representan de manera eficiente los datos experimentales del Isobutano (R-600a). Cuando se analiza más detalladamente la gráfica se puede determinar que cuando se utiliza el modelo termodinámico Peng-Robinson se aproxima más a los datos experimentales. Teniendo esto en cuenta se va a utilizar Peng-Robinson como modelo termodinámico para realizar la simulación del ciclo de refrigeración por compresor cuando se utilice el isobutano como refrigerante.

Los datos experimentales en la Gráfica 3 están representados por los puntos de color azul oscuro y por los puntos de color rojo. Los dos modelos termodinámicos representan bien los datos experimentales. Sin embargo, el modelo de Peng-Robinson se aproxima más a los valores experimentales, esto se observa con los puntos de color azul claro y en los puntos de color naranja.

Los paquetes o modelos termodinámicos predicen efectivamente los equilibrios líquido-vapor. La ecuación está en función de la temperatura y el factor acéntrico cerca del punto crítico, y está expresado por las propiedades críticas. Solo se

pueden tener interacciones binarias independientes de la presión, temperatura y composición.³⁹

2.3 SIMULACIÓN CICLOS DE REFRIGERACIÓN

Se realizaron las simulaciones de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor en Aspen HYSYS, utilizando como refrigerantes el Amoniaco (R-717), Propano (R-290) e Isobutano (R-600a), a una temperatura al exterior de la cámara de 35°C y al interior de la cámara de -25°C

Aspen HYSYS calculó la presión de evaporación de cada uno de los refrigerantes a -25°C. Para que el simulador definiera la presión de condensación se le sumó 15°C a la temperatura ambiente, la cual es de 35°C, por lo que se buscó la presión de condensación a 50°C. Este último cálculo indica cual es la temperatura a la cual debe entrar el refrigerante al condensador. Las presiones de condensación y evaporación se compararon con las presiones de los refrigerantes a dichas temperaturas en el Anexo E. Los datos que se observan en este capítulo fueron obtenidos a través del simulador Aspen HYSYS, utilizando las temperaturas mencionados anteriormente.

Para realizar la simulación del ciclo de refrigeración por compresión de vapor se utilizó un compresor para aumentar la presión y temperatura del refrigerante, un condensador para que el refrigerante pase de fase vapor a fase líquida, una válvula de expansión en la cual se disminuye la presión y temperatura del refrigerante, y un evaporador en el cual el refrigerante pasa de fase líquida a fase vapor. Se utilizó un flujo molar de 100kmol/h para realizar las simulaciones.

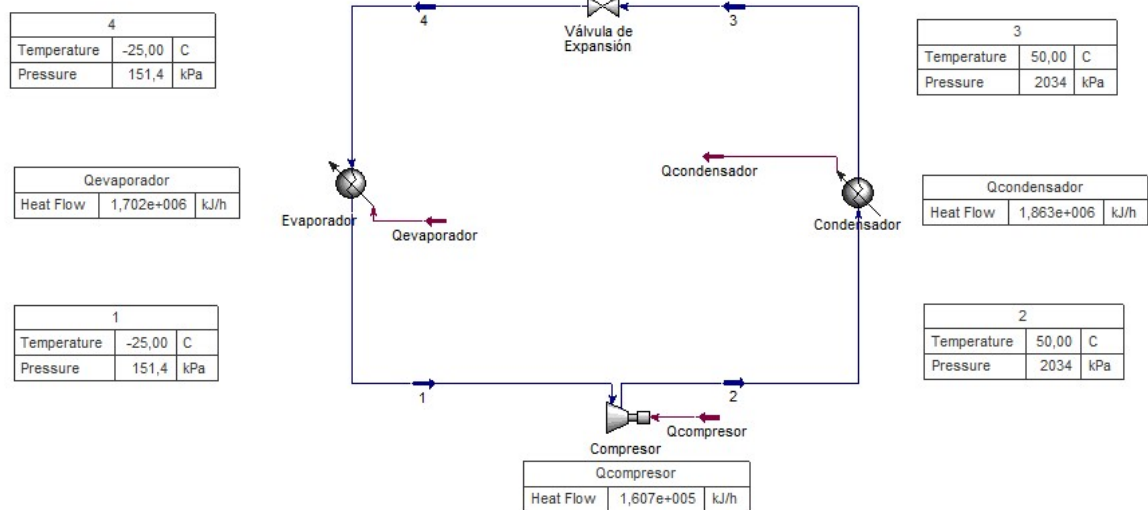
En los ciclos de refrigeración por compresión de vapor, en la válvula de expansión solamente se disminuye la presión y temperatura del refrigerante mientras gran parte del flujo molar de este se mantiene en fase vapor. Esa pequeña parte del refrigerante que cambia de fase líquida a fase vapor en la válvula de expansión al momento de pasar por el evaporador no va a poder absorber calor del ambiente, disminuyendo de esta manera la capacidad de refrigeración del ciclo. Según la bibliografía consultada un compresor en un ciclo de refrigeración por compresión de

³⁹ CADAVID, N. (2013). *Incidencia De La Selección Del Paquete Termodinámico En La Simulación Para El Diseño De Procesos En La Producción del Formaldehído y Estireno*. Universidad EAFIT, Medellín.

vapor trabaja con una eficiencia politrópica entre 85 y 95%⁴⁰. En las simulaciones realizadas se utilizó una eficiencia el en compresor de 85%.

2.3.1 Amoniaco (R-717). En la Figura 6 se utiliza amoniaco (R-717) como refrigerante. En la corriente 1 el refrigerante está en fase vapor a una temperatura de -25°C y a una presión de 151.4kPa . La corriente 1, proveniente del evaporador, entra al compresor donde aumenta su presión y temperatura, saliendo la corriente 2 con una temperatura de 50°C y a una presión de 2034kPa . La corriente 2 entra al condensador donde el refrigerante pasa de fase vapor a fase líquida. Del condensador sale la corriente 3 la cual está en fase líquida a una temperatura de 50°C y a una presión de 2034kPa . La corriente 3 entra a una válvula de expansión en donde se disminuye la presión y temperatura. De la válvula de expansión sale la corriente 4, la cual está en fase líquida y vapor, a una temperatura de -25°C y a una presión de 151.4kPa . Por último, la corriente 4 entra al evaporador en donde el refrigerante pasa de fase líquida a fase vapor sin cambiar presión ni temperatura.

Figura 6. Ciclo de Refrigeración utilizando Amoniaco como refrigerante

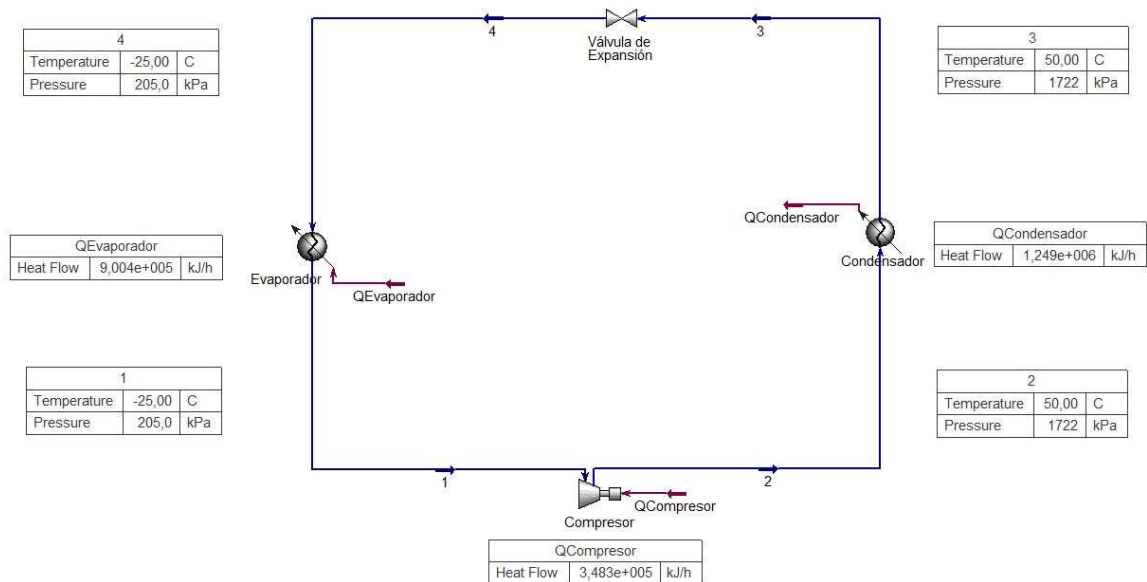


Fuente: Elaboración propia

⁴⁰ AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 46.8 Refrigeration Systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

2.3.2 Propano (R-290). En la Figura 7 se observa un ciclo de refrigeración por compresión de vapor utilizando Propano (R-290) como refrigerante. La corriente 1, la cual sale del evaporador, está en fase vapor a una temperatura de -25°C y a una presión de 205kPa . La corriente 1 entra al compresor donde se aumenta su presión y temperatura. Del compresor sale la corriente 2, en fase vapor, a una temperatura de 50°C y una presión de 1722kPa . La corriente 2 pasa por el condensador en donde el refrigerante pasa de fase líquida a fase vapor. Del condensador sale la corriente 3, en fase líquida, a una temperatura de 50°C y a una presión de 1722kPa . La corriente 3 entra a la válvula de expansión donde se disminuye la presión. De la válvula de expansión sale la corriente 4, en una mezcla entre fase líquida y vapor, a una temperatura de -25°C y a una presión de 205kPa . La corriente 4 entra al evaporador donde pasa de fase líquida a fase vapor. Del evaporador sale la corriente 1, repitiendo el ciclo.

Figura 7. Ciclo de Refrigeración utilizando Propano Como refrigerante



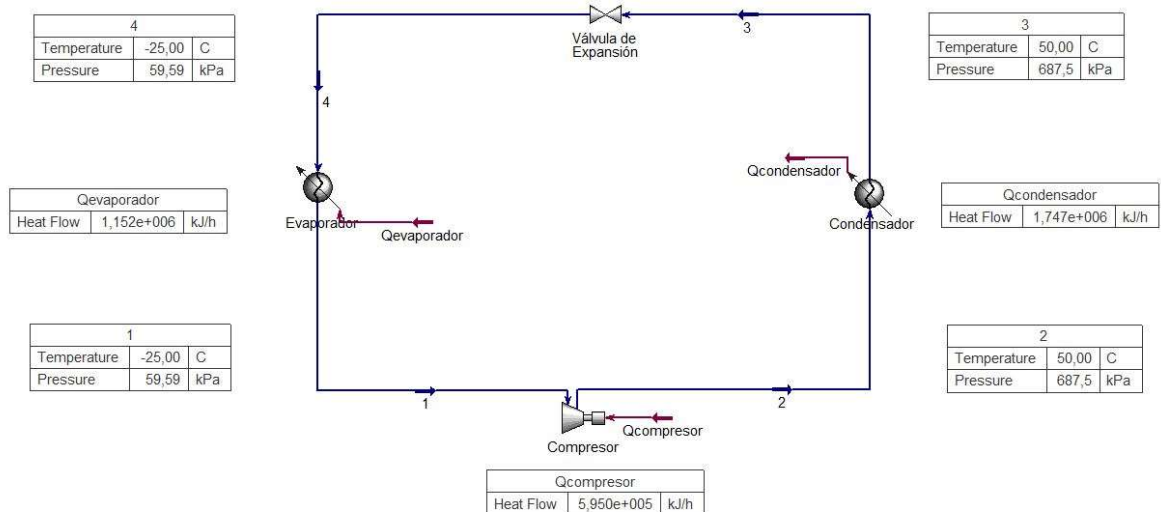
Fuente: Elaboración propia

El Propano tiene propiedades similares a las del refrigerante R-22 por lo que se ha venido implementando en refrigeradores con una capacidad pequeña, usando hasta 150g de refrigerante. También se está implementando en sistemas de

acondicionamiento de aire domésticos, para esto hay que tener en cuenta los aspectos de seguridad por lo que esta es una sustancia inflamable.⁴¹

2.3.3 Isobutano (R-600a). La Figura 8 muestra un ciclo de refrigeración por compresión de vapor utilizando Isobutano (R-600a) como refrigerante. Del evaporador sale la corriente 1 con el refrigerante en fase vapor a una temperatura de -25°C y a una presión de 59.59kPa . La corriente 1 entra al compresor donde se aumenta la presión y temperatura del refrigerante. Del compresor sale la corriente 2 con el refrigerante en fase vapor a una temperatura de 50°C y a una presión de 687.5kPa . La corriente 2 entra al condensador donde el refrigerante pasa de fase vapor a fase líquida. Del condensador sale la corriente 3 donde el refrigerante está en fase líquida a una temperatura de 50°C y a una presión de 687.5kPa . La corriente 3 pasa por la válvula de expansión en donde se disminuye la presión y temperatura del refrigerante. De la válvula de expansión sale la corriente 4 donde el refrigerante está en fase líquida y parte está en fase vapor a una temperatura de -25°C y a una presión de 59.59kPa . La corriente 4 entra al evaporador en donde el refrigerante pasa de fase líquida a fase vapor. Del evaporador sale la corriente 1, repitiendo el ciclo.

Figura 8. Ciclo de Refrigeración utilizando Isobutano Como refrigerante



Fuente: Elaboración propia

⁴¹ CICONKOV, R. (2018). *Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions*. International Journal of Refrigeration, Vol 86, pp.441-448

3. ANÁLISIS CICLOS DE REFRIGERACIÓN

Para realizar el análisis de los ciclos de refrigeración se tuvo en cuenta la primera y segunda ley de la termodinámica. Esto ayuda a definir cuál de los tres refrigerantes analizados funciona de manera más eficiente, utilizando una temperatura al exterior de la cámara de congelación de 35°C y una temperatura al interior de la cámara de congelación de -25°C.

La termodinámica es la ciencia que se encarga de estudiar la relación entre un sistema y su entorno. La primera ley indica que al variar la energía interna de un sistema cerrado se produce calor y trabajo⁴². Al analizar el consumo energético de los tres ciclos de refrigeración analizados se debe tener en cuenta el calor del evaporador, debido a que este es el que indica la cantidad de energía térmica que el refrigerante puede absorber del ambiente que se desea refrigerar.

La segunda ley de la termodinámica indica cual es la dirección en la que se da el proceso o ciclo y la calidad que tiene la energía. Además de esto, la segunda ley de la termodinámica ayuda a determinar cuál es el grado de degradación que sufre la energía durante un proceso⁴³. Con la segunda ley de la termodinámica se puede calcular la eficiencia del ciclo de refrigeración, teniendo en cuenta la cantidad de exergía que se destruye en el proceso o ciclo. Para realizar este cálculo se debe conocer la cantidad de energía térmica que requiere el compresor y el condensador y la cantidad de energía térmica que expulsa el condensador. También se puede calcular la cantidad de exergía total destruida de un proceso o ciclo conociendo el valor de la entropía de cada una de las corrientes del ciclo o el proceso, el flujo másico de refrigerante y la temperatura del estado muerto, que en el caso de un ciclo de refrigeración sería la temperatura del medio alto, para el caso analizado sería 50°C.

Se utiliza el coeficiente de despeño (COP) para el análisis de la primera y segunda ley de la termodinámica. Se utiliza en el análisis de la primera ley de la termodinámica para conocer la cantidad de potencia, en kW, de refrigeración por cada kW que se utilice en el compresor. Mientras que en la segunda ley de la termodinámica se utiliza el coeficiente de desempeño para calcular la eficiencia

⁴² ROMERO, C & ALFONSO, C. (2011). *Estudio de Casos de Optimización Exergética de Sistemas de Refrigeración y Aire Acondicionado*. Universidad Tecnológica de Bolívar.

⁴³ CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

exergética del ciclo. Para este caso se calculó el coeficiente de desempeño con el $Q_{\text{compresor}}$ y el $Q_{\text{evaporador}}$ para cada uno de los ciclos analizados y además de esto se debe calcular el coeficiente de desempeño reversible (COP_{Rev}), este depende solamente de las temperaturas del medio bajo (T_L) y las temperaturas del medio altas (T_H). Como se utilizó el mismo rango de temperaturas en los tres ciclos de refrigeración analizados, se utiliza el coeficiente de desempeño reversible para el cálculo de la eficiencia exergética.

3.1 ANÁLISIS PRIMERA LEY

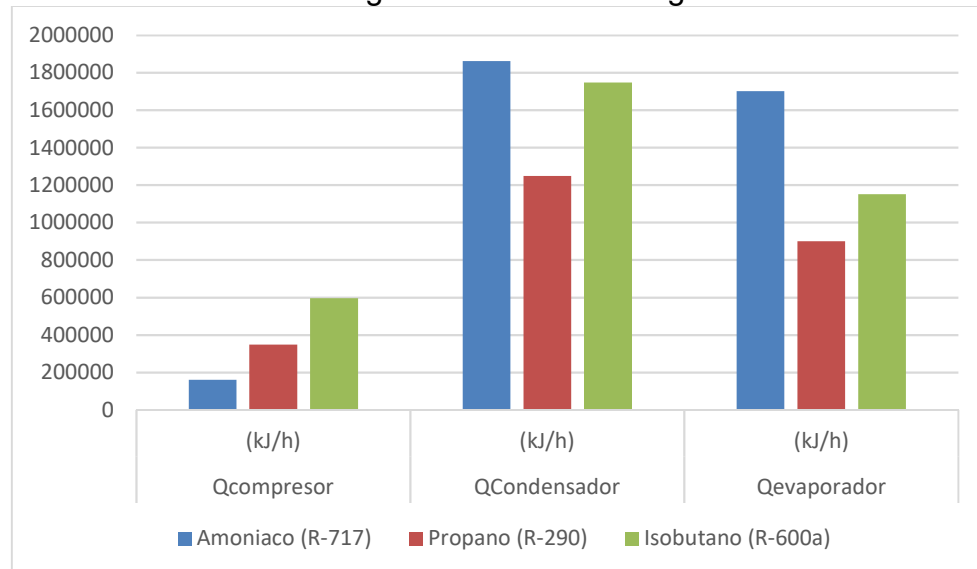
3.1.1 Consumo energético. Se requiere utilizar energía térmica en el compresor y evaporador ($Q_{\text{compresor}}$ y $Q_{\text{evaporador}}$) y en el condensador se libera la energía térmica ($Q_{\text{condensador}}$). Cada uno de los datos de la Tabla 6 fueron obtenidos en el simulador de procesos.

Tabla 6. Consumo Energético Ciclos de Refrigeración

Refrigerante	$Q_{\text{compresor}}$ (kJ/h)	$Q_{\text{Condensador}}$ (kJ/h)	$Q_{\text{evaporador}}$ (kJ/h)
Amoniaco (R-717)	160700	1863000	1702000
Propano (R-290)	348300	1249000	900400
Isobutano (R-600a)	595000	1747000	1152000

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4. Consumo Energético Ciclos de Refrigeración



Fuente: Elaboración propia

En los sistemas de refrigeración por compresión de vapor se aprovecha la propiedad de los refrigerantes de evaporarse a temperaturas bajas y a presiones mayores a la atmosférica. La capacidad de refrigeración del refrigerante depende de la cantidad de calor térmico que se pueda absorber en el evaporador.

En la Tabla 6 y Gráfica 4 se observa que, en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, aplicado en la industria de congelación, se requiere de una mayor cantidad de energía térmica en el compresor cuando se utiliza el Isobutano (R-600a) como refrigerante. Mientras que en el mismo ciclo de refrigeración utilizando Amoniaco (R-717) como refrigerante se requiere de una mayor cantidad de energía térmica en el evaporador. Esto indica que el Amoniaco (R-717) puede absorber una mayor cantidad de calor del ambiente cuando se tiene una temperatura al exterior de la cámara de 35°C y una temperatura al interior de la cámara de -25°C.

Otro motivo por el cual el Amoniaco (R-717) tiene un mejor consumo energético en el evaporador es por lo que una mayor parte del flujo molar que pasa por el evaporador sigue en fase líquida. Este cambio de fase sucede en la válvula de expansión al momento de disminuir la presión y temperatura del refrigerante. Esto no genera problemas en el ciclo de refrigeración, pero si disminuye la cantidad de energía térmica que puede absorber el refrigerante en el evaporador.

3.1.2 Coeficiente de desempeño (COP). El coeficiente de desempeño es la relación entre la energía térmica del compresor ($\dot{Q}_{\text{Compresión}}$) y la del evaporador ($\dot{Q}_{\text{Evaporación}}$). Se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{Evaporación}}}{\dot{Q}_{\text{Compresión}}} \quad \text{Ec. 8}$$

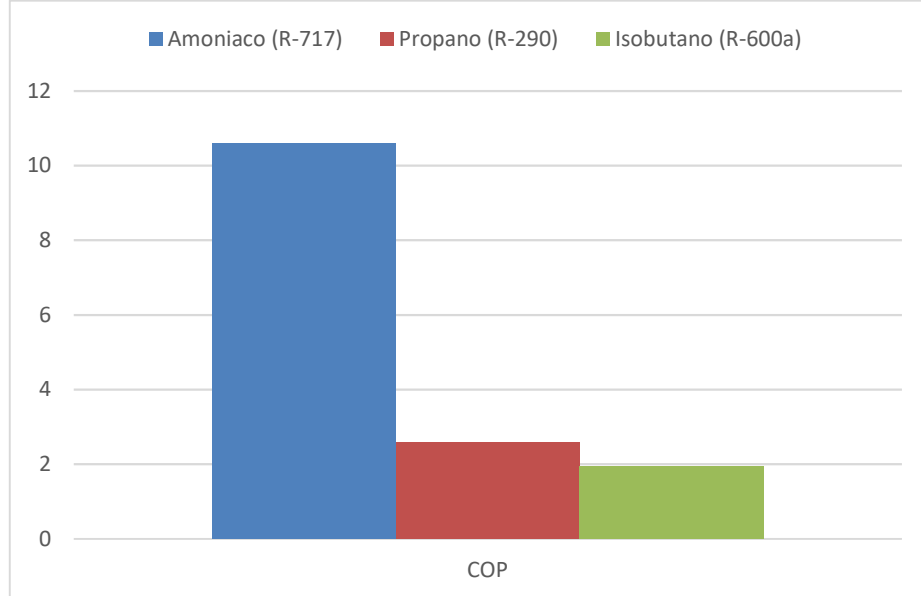
Para realizar los cálculos del coeficiente de desempeño de los ciclos se utilizaron los datos de la Tabla 6, los cuales fueron obtenidos en las simulaciones realizadas en Aspen HYSYS.

Tabla 7. Coeficiente de Desempeño

Refrigerante	COP
Amoniaco (R-717)	10.591
Propano (R-290)	2.585
Isobutano (R-600a)	1.936

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. Coeficientes de Desempeño



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 5 y en la Tabla 7 se puede observar que el Amoniaco (R-717) tiene el mayor coeficiente de desempeño (COP), lo que indica que por cada kW de potencia consumida en el compresor va a haber 10.591kW de potencia de refrigeración en el sistema. También se observa que el Propano (R-290) y el Isobutano (R-600a) tienen un coeficiente de desempeño similar entre sí. Esto muestra que estos refrigerantes, aplicados a la industria de alimentos, tienen un desempeño similar, siendo el Propano (R-290) la mejor opción de refrigerante entre estos dos.

Este coeficiente de desempeño muestra que el Amoniaco (R-717) tiene un coeficiente de desempeño cuatro veces mayor que los otros dos refrigerantes indicando que este refrigerante puede llegar a las temperaturas deseadas sin realizar tanto trabajo en el compresor, esto representa un menor consumo energético, pero al mismo tiempo muestra que este refrigerante es más eficiente de lo necesario.

3.2 ANÁLISIS SEGUNDA LEY

3.2.1 Eficiencia exérgica. Existen dos maneras para calcular la eficiencia exérgica de cada uno de los ciclos de refrigeración analizados. La primera es utilizando la Ecuación 9 y Ecuación 10.

$$\eta = \frac{COP}{COP_{Rev}} \quad \text{Ec. 9}$$

$$COP_{Rev} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad \text{Ec.10}$$

Se utiliza la Ecuación 8 para calcular el COP utilizado en la Ecuación 9. En la Ecuación 10, utilizada para calcular el COP_{Rev} , las temperaturas deben estar en kelvin. En esta ecuación T_L es la temperatura más baja del ciclo, para el caso analizado sería -25°C , y T_H es la temperatura alta del ciclo, para el caso analizado sería 50°C . Utilizando estos datos el $COP_{Rev}=3.307$ y los COP para cada uno de los refrigerantes se observan en la Tabla 7.

Tabla 8. Eficiencias Segunda Ley Calculado con el COP

Refrigerante	η	η (Porcentaje)
Amoniaco (R-717)	3.203	320.3%
Propano (R-290)	0.782	78.2%
Isobutano (R-600a)	0.586	58.6%

Fuente: Elaboración propia

El segundo método para calcular la eficiencia exergética del ciclo es con el flujo de exergía correspondiente al calor transferido en el medio de baja temperatura. Se utiliza la Ecuación 11 y la Ecuación 12 para realizar este cálculo.

$$X_{Q_L} = Q_L * \frac{T_H - T_L}{T_L} \quad \text{Ec. 11}$$

$$\eta = \frac{X_{Q_L}}{W_{Entrada}} \quad \text{Ec. 12}$$

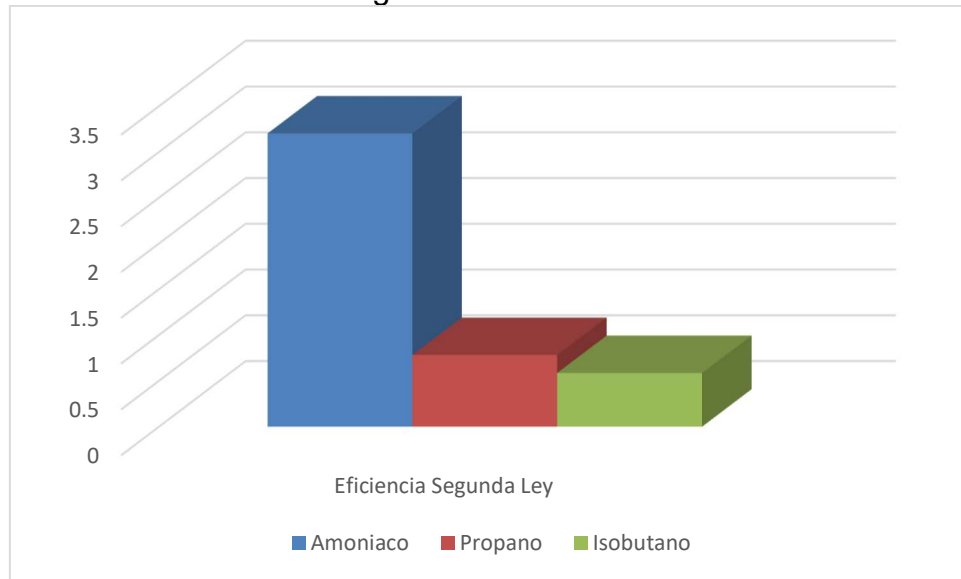
Al utilizar estas ecuaciones hay que tener en cuenta que el trabajo de entrada al ciclo de refrigeración ($W_{Entrada}$) es igual a la cantidad de calor requerido por el compresor ($\dot{Q}_{Compresión}$). Además de esto hay que tener en cuenta que Q_L es la cantidad de calor requerido por el compresor ($\dot{Q}_{Compresión}$). Estos dos datos se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 9. Eficiencias Segunda Ley Calculado con el Segundo Método

Refrigerante	X_{QI} (kJ/h)	η	η (Porcentaje)
Amoniaco (R-717)	515927.419	3.203	320.3%
Propano (R-290)	272298.387	0.782	78.2%
Isobutano (R-600a)	348387.097	0.586	58.6%

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6. Eficiencia Exergética De Los Ciclos



Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Tabla 8, la Tabla 9 y en la Gráfica 6 que se obtienen los mismos resultados con los dos métodos utilizados para calcular la eficiencia exergética de los ciclos de refrigeración analizados. También se observa que al utilizar el amoniaco (R-717) como refrigerante se obtiene la mayor eficiencia exergética de los tres refrigerantes analizados. Seguido del amoniaco, el Propano (R-290) tiene la segunda eficiencia exergética más alta de los tres refrigerantes analizados con una eficiencia del 78.2%. Los tres refrigerantes cuentan con una eficiencia mayor al 50% lo que indica que los tres funcionan de una manera óptima a con una temperatura al exterior de la cámara de 35°C y a una temperatura al interior de la cámara de congelación de -25°C.

En la Gráfica 6 también se observa que el Amoniaco (R-717) tiene una eficiencia 320.3% lo cual indica que este refrigerante es muy eficiente para la aplicación que se analizó. Se puede seguir utilizando este refrigerante, pero sería desaprovechar

las propiedades con las que cuenta este refrigerante. Teniendo esto en cuenta el refrigerante más eficiente, según su eficiencia exergética, sería el Propano (R-290) por lo que se aprovecharía de mejor manera las propiedades del refrigerante. El Isobutano (R-600a) cuenta con una eficiencia exergética mayor al 50% pero aun así no cumpliría completamente con lo deseado y para lograrlo se requiere utilizar más energía en el ciclo, representando un aumento significativo en los costos de operación.

Actualmente no hay mucha investigación sobre el uso de los refrigerantes naturales para la congelación de alimentos, gran parte de las investigaciones que se están realizando son para reemplazar los refrigerantes que se utilizan para los sistemas de acondicionamiento de aire y para la refrigeración de conservación. Sin embargo, ya hay neveras de uso doméstico en donde se utiliza el Isobutano (R-600a) como refrigerante.

Aun no se conocen investigaciones en donde se utilicen refrigerantes naturales en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor en donde se tiene una temperatura de evaporación de -25°C , motivo por el cual no se pueden validar los datos obtenidos de este modo.

El Propano (R-290) y el Isobutano (R-600a) se pueden utilizar para reemplazar el refrigerante R-134a y el R-22 por lo que cuentan con propiedades similares entre sí. Estos refrigerantes se pueden utilizar para sistemas de acondicionamiento de aire y la conservación de alimentos a temperaturas superiores a -5°C ⁴⁴.

El Amoniaco (R-717) es un refrigerante que no tiene muchas aplicaciones a nivel doméstico por los cuidados que se deben tener por su toxicidad y que se deben tener empleados especializados para el mantenimiento de los equipos. A nivel industrial se utiliza más por el costo del refrigerante y que se cuentan con todas las prevenciones necesarias. Este es un refrigerante que se puede utilizar en un rango de temperaturas entre 10°C y -50°C . Este refrigerante solamente se puede utilizar

⁴⁴ MOHANRAJ, M.; JAYARAJ, S. & MURALEEDHARAN, C. (2009). *Environment Friendly Alternatives to Halogenated Refrigerants – A Review*. International Journal of Greenhouse Gas Control. Vol 3. pp 108-119.

para la conservación de alimentos y la congelación de alimentos. No es eficiente energéticamente cuando se utiliza en sistemas de acondicionamiento de aire⁴⁵.

⁴⁵ ASOEX. (2012). *Guía De Uso Y Manejo De Amoniaco En La Refrigeración De Frutas Y Hortalizas Frescas: Plan De Emergencias*. Asociación de Exportadores de Frutas de Chile.

4. CONCLUSIONES

- Ninguno de los siete refrigerantes cumple con los seis criterios de preselección, pero cinco de ellos cumplen con al menos 4 de los criterios de selección. Al realizar el diseño de una cámara de congelación hay que tener en cuenta los aspectos con los que no hayan cumplido dichos refrigerantes para evitar tener algún inconveniente.
- El Amoniaco (R-717) puede absorber 1702000kJ/h de energía térmica del ambiente que se va a enfriar, este refrigerante es el más eficiente energéticamente de los tres analizados. Seguido del Amoniaco (R-717) viene el Isobutano (R-600a) con un consumo energético en el evaporador de 1152000W. El mayor coeficiente de desempeño (COP) obtenido fue el del Amoniaco (R-717) con un valor de 10.623. Seguido del Propano (R-290) con un valor de COP igual a 2.585.
- El valor máximo que puede dar el COP es de 3.307, esto nos indica que el Amoniaco (R-717) tiene un desempeño superior al máximo por lo que va a consumir una cantidad de energía mayor comparada con los otros dos refrigerantes. En el caso analizado el Amoniaco (R-717) obtuvo una eficiencia exergética de 320.3%, esto indica que este refrigerante es muy eficiente para el caso analizado. El Propano (R-290) y el Isobutano (R-600a) tiene una eficiencia exergética de 78.2% y 58.6% respectivamente. Según la segunda ley de la termodinámica es más recomendable utilizar en Propano (R-290) como refrigerante por lo que el 78.2% de la energía utilizada en todo el ciclo es aprovechable.

5. RECOMENDACIONES

- Analizar el comportamiento del Amoniaco en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor a nivel laboratorio para poder comprobar su correcto funcionamiento.
- Se recomienda realizar el análisis de estos refrigerantes, pero aplicados a la conservación de alimentos o productos que requieran estar a una temperatura entre 0°C y 12°C.
- Analizar la variación de eficiencia exergética, consumo energético y el coeficiente de desempeño de estos refrigerantes a diferentes rangos de temperaturas y compararlos con la eficiencia de los refrigerantes HFC que se utilizan actualmente.

BIBLIOGRAFÍA

ABAS, N., KALAIR, a., KHAN, N., HAIDER, A., & SALEEM, Z. (2018). *Natural and synthetic refrigerants, global warming a review. Renewable and Sustainable Energy Review*. Vol. 109. p. 346-352

ABELLO LINDE S.A. *Tecnología de congelación y refrigeración para la industria alimentaria*. Barcelona: The Linde Group

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 3. Carbon Dioxide Refrigeration Systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U68GK2/ashrae-handbook-refrigeration/carbon-dioxide-refrigeration>

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 29.2 Blast Freezers*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U69746/ashrae-handbook-refrigeration/blast-freezers>

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2014). *2014 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition) - 46.8 Refrigeration Systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2017). *2017 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition) - 18.1.1.1 Heat Flow Rates*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2017). *2017 ASHRAE® Handbook - Fundamentals (SI Edition) - 2.1.4 Second Law of Thermodynamics*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2017). *2017 ASHRAE® Handbook - Fundamentals (SI Edition) - 2.2.2 Theoretical Single-Stage Cycle Using a Pure Refrigerant or Azeotropic Mixture*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

ARNABAT, I. (2007). *Sistemas de refrigeración aire acondicionado: compresión y absorción*. Instalaciones y Componentes

ARNABAT, I. (2015). *Nuevo Software Airzone para proyectistas orientado al cálculo de conductos de aire acondicionado*. Aire Acondicionado Comercial.

ASPENTECH. Aspen HYSYS. Sitio web:
<https://www.aspentech.com/products/engineering/aspens-hysys>

ASOEX. (2012). *Guía De Uso Y Manejo De Amoniaco En La Refrigeración De Frutas Y Hortalizas Frescas: Plan De Emergencias*. Asociación de Exportadores de Frutas de Chile.

BAYLISS, C.R. HARDY, B.J. (2012). *Transmission and Distribution Electrical Engineering (4th Edition) - 7.4.2.1 Introduction*. Elsevier.

BEJAN, Adrian. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics (4th Edition) - 3. Entropy Generation, or Exergy Destruction*. John Wiley & Sons.

BELLOS, E., VRACHOPOULOS, M., & TSIFIF, G. (2017). *Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of a solar assisted refrigeration system for various operating scenrios*. Energy Conversion and Management, 148, pp.1055-1069.

BELLOS, E., VRACHOPOULOS, M., & TZIVANIDIS, C. (2017). *Energetic and exergetic investigation of a novel solar assisted mechanical compression refrigeration system*. Energy Conversion and Management, 147, pp.1-18.

BELMAN-FLORES, J., & PÉREZ-GARCIA, V. (2013). *CO₂ como refrigerante: del pasado al futuro*. Acta Universitaria, 23 (2), pp. 5-12.

BOLAJI, B., & HUAN, Z. (2013). *Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 18, pp. 49-54

BUTCHER, Ken J. (2006). *CIBSE Guide A - Environmental Design (7th Edition) - 5.8.2.5 Cooling Load due to Outdoor Air Supply*. CIBSE.

CABELLOS, M. & ZAFRA, J. (2016). *En Balance Exergético en la Turbina de Vapor TGM de 21.7MW Para el Incremento de su Eficiencia - Empresa Agroindustrias San Jacinto S.A.A*. Nuevo Chimbote, Perú: Universidad Nacional del Santa.

CADAVID, N. (2013). *Incidencia De La Selección Del Paquete Termodinámico En La Simulación Para El Diseño De Procesos En La Producción del Formaldehído y Estireno*. Universidad EAFIT, Medellín.

CALM, J. (2008). *The Next Generation of Refrigerants - Historical Review, Considerations, and Outlook*. International Journal of Refrigeration.

CAPEHART, Barney L. TURNER, Wayne C. KENNEDY, William J. (2016). *Guide to Energy Management (8th Edition) - 8.10.4 Heating and Cooling Load: Conduction*. Fairmont Press, Inc.

CARLE, Reinhold SCHWEIGGERT, Ralf M. (2016). *Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages - Industrial Applications for Improving Food Color - 13.4 Routine Analytical Methods for Measuring Color in Fish Flesh*. Elsevier.

CARLSON, E. (1996). *Don't Gable With Physical Properties For Simulations*. Chemical Engineering Progress. Aspen Technology Inc.

CENGEL, Y., & BOLES, M. (2011). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill

CHOUDHARI, C.S. & SAPALI, S.N. (2017, marzo). *Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems*. Energy Procedia, 109, pp.346-352.

CICONKOV, R. (2018). *Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions*. International Journal of Refrigeration, Vol 86, pp.441-448

CIBSE. (2016). *Air Conditioning and Refrigeration - CIBSE Guide B3 - 2016 - 3.3.4.1 Refrigerant Selection*. CIBSE.

DE LA OLIVA, J.F. (2009). *Guía Práctica Selección De Los Elementos De Una Instalación Frigorífica*. Sevilla: Sector de Enseñanza de CSIF

DI SCIPIO, S. RODRÍGUEZ, A. SALAZAR, A. & TRIGILIO, A. (2014). *Simulation and Sensitivity Analysis of a Natural Gas Liquefaction Cycle*. Revista Técnica Universidad Zulia.

FERNÁNDEZ, P. (1992). *Ingeniería Térmica y de Fluidos*. Santander, España: Universidad de Cantabria.

FRIGOSIM. FrigoSim Thermal Plant Optimization. Sitio web: <http://www.frigosoft.no/frigosim/>

GASPAR, Pedro. DINIS DA SILVA, Pedro Dinho. (2015). *Handbook of Research on Advances and Applications in Refrigeration Systems and Technologies - 8.7.1 Refrigeration Plant Working with R134a*. IGI Global.

GRONDZIK, Walter T. (2007). *Air-Conditioning System Design Manual (2nd Edition) - 9.2.3 Design of Storage and Cooling Plant*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

GUTHRIE, W. (2015). *Cold Regions Engineering 2015 - Developing and Maintaining Resilient Infrastructure - Proceedings of the 16th International Conference on Cold Regions Engineering, July 19-22, 2015, Salt Lake City, Utah - 25.4 Climate Change and Passive Cooling*. American Society of Civil Engineers (ASCE).

HURTADO, T. & BRUNO, G. (2005). *Capítulo II: Análisis de Decisiones*. Agosto 20, 2018, de Universidad Nacional Mayor de San Marcos Sitio web: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/contenido.htm

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN9789588585673 153p.

JUTGLAR, Luis. (2008). *Técnicas de refrigeración*. Barcelona: Marcombo. p. 49

KLEINSTREUER, Clement. (2018). *Modern Fluid Dynamics (2nd Edition) - 9.2.5.2 Computer-Aided Design*. CRC Press.

LIM, J. S.; HO, Q. N. N.; PARK, J. -Y.; LEE, B. G. J., (2004). *Measurement of Vapor-Liquid Equilibria for the Binary Mixture of Propane (R-290) + Isobutane (R-600a)*. Chem. Eng Data, 49(2), 192-198

LIZARTE, R., PALACIOS, M.E. & MARCOS, J.D. (2017). *Parametric study of a novel organic Rankine cycle combined with a cascade refrigeration cycle (ORC-CRS) using natural refrigerants*. Applied Thermal Engineering, 127, pp.782-791.

MEAD, G.C. (2004). *Poultry Meat Processing and Quality - 8.2 The Effects of Refrigeration on Product Quality*. Woodhead Publishing.

MCQUISTON, F.C., & PARKER, J.D. (2006). *Heating, ventilating, and air-conditioning analysis and design - 8. The Cooling Load*. United States.

MOHANRAJ, M.; JAYARAJ, S. & MURALEEDHARAN, C. (2009). *Environment Friendly Alternatives to Halogenated Refrigerants – A Review*. International Journal of Greenhouse Gas Control. Vol 3. pp 108-119.

MOKHATAB, Saeid. MAK, John Y. VALAPPIL, JALEEL V. WOOD, David A. (2014). *Handbook of Liquefied Natural Gas - 4.3.1 Basic Requirements on Refrigerants*. Elsevier.

NODA, K.; INOUE, K.; ASAI, T.; ISHIDA, K. J. (1993). *Isothermal vapor-liquid and liquid-liquid equilibria for the propane- ammonia and propylene-ammonia systems*

OLANREWAJU, Oladokun Sulaiman SAHARUDDIN, Abdul Hamid Ab KADER, Ab Saman Wan NIK, Wan Mohd Norsani. (2014). *Marine Technology and Sustainable Development: Green Innovations - 6.3 Solution for the Replacement of HCFC 22*. IGI Global.

PONS, A. (2010). *Localizaciones Óptimas Para Puertos Secos*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. 27-28

PUERTO, E. (2010). *Guía Técnica Para El Diseño de Cuartos Fríos*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

PUEYO, E. (2017). *Simulación Computacional*. Agosto 22, 2018, de Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España Sitio web: <http://www.ciber-bbn.es/programas-transversales/programa-de-difusion-e-internacionalizacion/biomedicina-con-y-para-la-sociedad/miniserie-de-tv/simulacion-computacional>

RAMÍREZ, D. TAPIA, A. LANCHEROS, V. ESPITIA, L. & GONZÁLEZ, Y. (2015). *Simulación y Análisis de un Sistema de Refrigeración Por Absorción Solar Intermitente*. Universidad de Córdoba

RASMUSSEN, N. (2003). *Cálculo De Los Requisitos Totales De Refrigeración Para Centros De Datos*. American Power Conversion

RODRÍGUEZ, J. (1990). *Capítulo 10: Ciclos Frigoríficos. En Introducción a la Termodinámica con Algunas Aplicaciones de Ingeniería* (pp.429-462). México: Universidad Tecnológica Nacional.

ROMERO, G. (2006). *Análisis Termodinámico de Ciclos de Refrigeración por Absorción (Amoniaco-Agua)*. Instituto Politécnico Nacional. México D.F.

ROMERO, C & ALFONSO, C. (2011). *Estudio de Casos de Optimización Exergética de Sistemas de Refrigeración y Aire Acondicionado*. Universidad Tecnológica de Bolívar.

STEINHAUSER, Martin Oliver. (2013). *Computer Simulation in Physics and Engineering - 1.1 Physics and Computational Physics*. De Gruyter.

TAVELLA, M., MIROPOLSKY, A., & MANERA, R. (2014). *Estudio Comparativo de Métodos Multicriterio Para El Análisis De La localización Sustentable De parques Industriales Regionales*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1, 41-48.
Sitio Web:
revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos_admon/article/view/4043/3018

THE LINDE GROUP. (2018). *Pressure and Temperature Data for Common Refrigerants*. Product Data Booklet.

THE LINDE GROUP. *Congelación y Refrigeración de Alimentos*. Gases Industriales España
Sitio web:
http://www.abellolinde.es/es/processes/freezing_and_cooling/food_chilling_and_freezing/index.html

URREGO, C. (2018). *Metodología de Selección de Refrigerantes*. Alternativas Ecológicas y Eficientes Energéticamente. Fundación Universidad de América.

VALVERDE, A., & ÁLVAREZ, M. (2006). *Método De Cálculo Computarizado Para La Determinación De Las Cargas Termias De Refrigeración, Aire Acondicionado Y Selección De Equipos*. Scientia et Technica, 127-132.

VEDAVARZ, Ali KUMAR, Sunil HUSSAIN, Muhammed Iqbal. (2007). *HVAC - The Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning for Design and Implementation - 7.3 Heat Source in Conditioned Space*. Industrial Press.

VENKITESWARAN, V.K., LIMAN, J., & ALKAFF, S.A. (2017). *Comparative Study of Passive Methods for Reducing Cooling Load*. Energy Procedia, 2689-2697

VAZQUEZ, A. CHAMOSOS, C., TAPIA, Y. (2014). *Simulación De Procesos Industriales II*. Universidad, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Bolivia

WANG, S. (2001). *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. United States of America: McGraw-Hill

WINSIM INC. About WinSim Sitio web: <https://www.winsim.com/>

ANEXOS

ANEXO A.
TABLA POTENCIAL CALENTAMIENTO GLOBAL REFRIGERANTES

Refrigerants	Composition	Glide	Temperature (°C)		Critical Pressure (bar)	Global Warming Potential
			Evap.	Critical		
R 134 a		0	- 26	101	40,6	1300
R 404 A	R 125/134a/143a	0,8	- 46	72	37,4	3800
R 507	R 125/R 143 a	0,1		0	0	3800
R 407 C	R 32/125/134 a	7,2	- 44	87	46,3	1600
R 410 A	R 32/125	0,5	- 51	72,5	49,5	1900
R 422 D	R 125/134a/600	4,8	- 44	80	39	2230
R 417 A	R 125/134a/600	5	- 39	90	42,4	1950
R 422 A	R 125/134a/600a	3	- 47	72	37,5	2530
R 290 (propane)		0	- 42	97	42,5	3
R 600 (butane)						3
R 600a (isobutane)			- 12	135	36,4	3
R 717 (ammonia)			- 33,3	132	113,3	0
R 744 (CO ₂)			- 78	31	73,8	0
R 718 (water)			100	374	221	0

ANEXO B.
POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO Y POTENCIAL CALENTAMIENTO GLOBAL DE LOS REFRIGERANTES PARTE 1

Refrigerante	PAO (ODP)	PCG (GWP) 100 años	Clasificación de seguridad	Inflamabilidad % de volumen en el aire	Temperatura de auto-ignición
R134A	0	1430	A1	N/A	743°C
R600	0	3	A3	LFL 1.4% UFL 9.5%	365°C
R600a	0	3	A3	LFL 1.85% UFL 8.5%	460°C
R22	0.055	1700	A1	N/A	632°C
R407C	0	1774	A1	N/A	-
R410A	0	2088	A1	N/A	-
R290	0	3	A3	LFL 2.1% UFL 9.5%	470°C
R404A	0	3922	A1	N/A	-

Tomado de: URREGO, C. (2018). *Metodología de Selección de Refrigerantes. Alternativas Ecológicas y Eficientes Energéticamente*. Fundación Universidad de América.

ANEXO C.
 POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO Y POTENCIAL
 CALENTAMIENTO GLOBAL DE LOS REFRIGERANTES PARTE 2

Refrigerante	PAO (ODP)	PCG (GWP) 100 años	Clasificación de seguridad	Inflamabilidad % de volumen en el aire	Temperatura de auto-ignición
R170	0	3	A3	LFL 3.0% UFL 12.5%	515°C
R717	0	0	B2	LFL 16% UFL 25%	651.1°C
R744	0	1	A1	N/A	-
R1270	0	2	A3	LFL 2.1% UFL 11.1%	455°C
MO29 (R402D)	0	2230	A1	N/A	-
MO49 (R413A)	0	1085	A1	N/A	-
MO59 (R417A)	0	1950	A1	N/A	-
MO79 (R422A)	0	2530	A1	N/A	-
HFO 1234yf	0	4	A2L	LFL 6.2% UFL 12.3%	405°C
R507	0	3985	A1	N/A	750°C

Tomado de: URREGO, C. (2018). *Metodología de Selección de Refrigerantes*. Alternativas Ecológicas y Eficientes Energéticamente. Fundación Universidad de América.

ANEXO D.
PROPIEDADES TERMODINÁMICAS REFRIGERANTES PARTE 1

Refrigerante	Temperatura de congelación a 1.013 bares °C	Temperatura de evaporación a 1.013 bares °C	Presión de condensación a 25°C kPa	Temperatura crítica a 1.013 bares °C	Presión crítica absoluta kPa
R134A	-103.3	-26.5	665.7	101.2	4067
R600	-138.29	-0.54	242.65	151.98	3796
R600a	-159.6	-11.75	-	134.66	3629
R22	-160.0	-40.76	1044	96.15	4988
R407C	-	-43.5	1174	86.74	4620
R410A	-	-51.58	1650	72.13	4926
R290	-187.3	-42.1	951.8	96.7	4248
R404A	-	-46.45	1254.67	72.07	3731
R170	-182.8	-88.6	7.87	32.3	4872

Tomado de: URREGO, C. (2018). *Metodología de Selección de Refrigerantes*. Alternativas Ecológicas y Eficientes Energéticamente. Fundación Universidad de América.

ANEXO E.
PROPIEDADES TERMODINÁMICAS REFRIGERANTES PARTE 2

Refrigerante	Temperatura de congelación a 1.013 bares °C	Temperatura de evaporación a 1.013 bares °C	Presión de condensación a 25°C kPa	Temperatura crítica a 1.013 bares °C	Presión crítica absoluta kPa
R717	-77.74	-33.33	98.8	132.5	11330
R744	-56.57	-78.5	-	31.1	7377
R1270	-185.25	-47.8	1158	92.42	4665
MO29	-	-43	1220	79.5	3903
(R402D)	-	-43	778	102.5	4120
MO49	-	-39	985	87.1	4039
(R413A)	-	-47	1274	71.7	3750
MO59	-	-47	1274	71.7	3750
(R417A)	-	-47	1274	71.7	3750
MO79	-	-47	1274	71.7	3750
(R422A)	-	-47	1274	71.7	3750
HFO 1234yf	-	-29.55	673	94.7	3382
R507	-	-46.9	1274	70.9	3793

Tomado de: URREGO, C. (2018). *Metodología de Selección de Refrigerantes*. Alternativas Ecológicas y Eficientes Energéticamente. Fundación Universidad de América.

ANEXO F.
PROPIEDADES FÍSICAS REFRIGERANTES

Refrigerante	Masa molar	Densidad Líquido a 1.013 bares en el punto de ebullición	Densidad Vapor a 1.013 bares en el punto de ebullición	Volumen específico en fase vapor	Calor Latente de Vaporización a punto de ebullición
	kg/mol	kg/m ³	kg/m ³	m ³ /kg	kJ/kg
R134A	102.03	1376	5.278	0.2035	216.92
R600	58.12	601.26	2.7093	0.3949	385.71
R600a	58.12	593.821	2.8265	0.3786	365.101
R22	86.47	1409.172	4.7039	0.2262	233.75
R407C	86.20	1134	4.6	0.2242	249.9
R410A	72.59	1062	4.12	0.2569	276
R290	44.10	581	2.427	0.441	425.5
R404A	97.61	1048	5.41	0.1955	200
R170	30.07	543.83	2.054	0.5166	489.4
R717	17.03	681.97	0.889	1.1853	1369.5
R744	44.01	763	1.83	0.3723	131.59
R1270	42.08	504.45	1.762	0.4508	286.26

Tomado de: URREGO, C. (2018). *Metodología de Selección de Refrigerantes*. Alternativas Ecológicas y Eficientes Energéticamente. Fundación Universidad de América.

ANEXO G.
ASPECTOS DE SEGURIDAD AHSRAE

Refrigerant Number	Chemical Formula	Safety Group	
		Old	New
10	CCl ₄	2	B1
11	CCl ₃ F	1	A1
12	CCl ₂ F ₂	1	A1
13	CClF ₃	1	A1
13B1	CBrF ₃	1	A1
14	CF ₄	1	A1
21	CHCl ₂ F	2	B1
22	CHClF ₂	1	A1
30	CH ₂ Cl ₂	2	B2
40	CH ₃ Cl	2	B2
50	CH ₄	3a	A3
113	CCl ₂ FCClF ₂	1	A1
114	CClF ₂ CClF ₂	1	A1
115	CClF ₂ CF ₃	1	A1
123	CHCl ₂ CF ₃		B1
134a	CH ₂ FCF ₃		A1
142b	CH ₃ CClF ₂	3b	A2
152a	CH ₃ CHF ₂	3b	A2
170	CH ₃ CH ₃	3a	A3
290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	3a	A3
C318	C ₄ F ₈	1	A1
400	R12/114	1	A+/A1
500	R-12/152a	1	A1
501	R-22/12	1	A1
502	R-22/115	1	A1
600	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	3a	A3
600a	CH(CH ₃) ₃	3a	A3
611	HCOOCH ₃	2	B2
702	H ₂		A3
704	He		A1
717	NH ₃	2	B2
718	H ₂ O		A1
720	Ne		A1
728	N ₂		A1
740	Ar		A1
744	CO ₂	1	A1
764	SO ₂	2	B1
1140	CH ₂ =CHCl		B3
1150	CH ₂ =CH ₂	3g	A3
1270	CH ₃ CH=CH ₂	3a	A3

ANEXO H. POTENCIA LIBERADA POR PERSONA

Temperatura de la cámara (°C)	Potencia liberada por persona (W)
10	210
5	240
-5	270
-10	300
-15	360
-20	390
-25	420

ANEXO I. PROPIEDADES ALIMENTOS

Alimentos	Temperatura de almacenamiento (°C)	Humedad relativa (%)	Duración de almacenamiento	Punto de congelación (°C)	Calor másico antes de la solidificación (kJ/kg K)	Calor másico después de la solidificación (kJ/kg K)	Calor de congelación kJ/kg	Calor de respiración kJ/kg/día	Observaciones
<i>Carne y productos cárnicos</i>									
Tocino- fresco	+ 1 / -4	85	2-6 sem.	-2	1,53	1,1	68		
• congel.	-18	90-95	4-6 meses						
Filete • fresco	0 / -1	88-92	1-6 sem.	-2	3,2	1,67	231		
• congel.	-18	90-95	9-12 meses						
Jamón • fresco	0 / + 1	85-90	7-12 días	-2	2,53	1,46	167		
• congel.	-18	90-95	6-8 meses						
Cordero • fresco	0 / + 1	85-90	5-12 días	-2	3,0	1,66	216		
• congel.	-18	90-95	8-10 meses						
Manteca de cerdo • fresca	+ 7	90-95	4-6 meses		2,09	1,42	210		
• congel.	-18	90-95	12-14 meses						
Hígado • congel.	-18	90-95	3-4 meses	-2					
Carne de cerdo • fresca	0 / + 1	85-90	3-7 días		2,13	1,3	128		
• congel.	-18	90-95	4-6 meses						
Aves frescas	0	85-90	1 sem.	-2,7	3,3	1,76	246		
• congel.	-18	90-95	8-12 meses						
Conojo fresco	0 / + 1	90-95	1-5 días	-2,7	3,1	1,67	228		
• congel.	-18	90-95	0-6 meses						
Salchicha • fresca	0 / + 1	85-90	3-12 días	-2	3,73	2,34	216		
• congel.	-18		2-6 meses						
Vaca • fresca	0 / + 1	90-95	5-10 días	-2	3,08	1,67	223		
• congel.	-18 / + 1	90-95	8-10 meses						

ANEXO J. RENOVACIÓN DE AIRE POR ABERTURA DE LAS PUERTAS

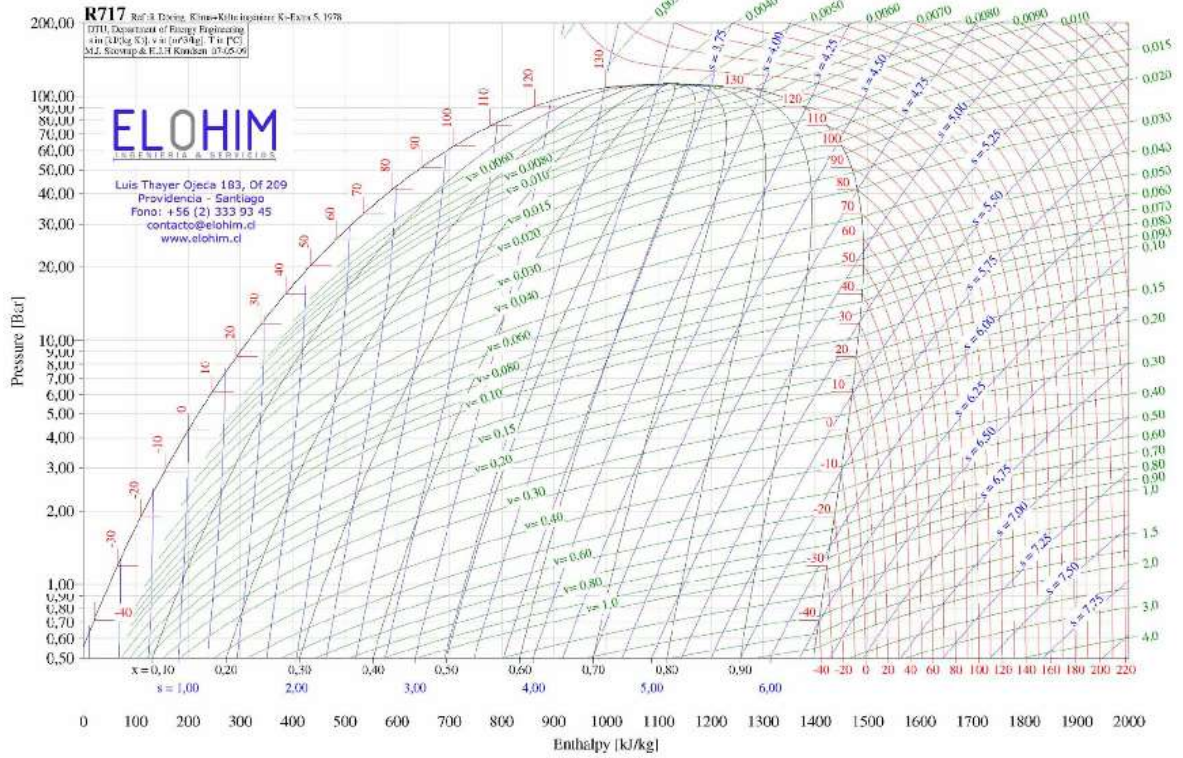
Volumen de la cámara (m³)	Renovación de aire diario n/d		Volumen de la cámara (m³)	Renovación de aire diario n/d		Volumen de la cámara (m³)	Renovación de aire diario n/d		Volumen de la cámara (m³)	Renovación de aire diario n/d	
	-	+		-	+		+	-		-	+
2,5	52	70	20	16,5	22	100	6,8	9	600	2,5	3,2
3,0	47	63	25	14,5	19,5	150	5,4	7	800	2,1	2,8
4,0	40	53	30	13,0	17,5	200	4,6	6	1.000	1,9	2,4
5,0	35	47	40	11,5	15,0	250	4,1	5,3	1.500	1,5	1,95
7,5	28	38	50	10,0	13,0	300	3,7	4,8	2.000	1,3	1,65
10,0	24	32	60	9,0	12,0	400	3,1	4,1	2.500	1,1	1,45
15,0	19	26	80	7,7	10,0	500	2,8	3,6	3.000	1,05	1,30

ANEXO K.

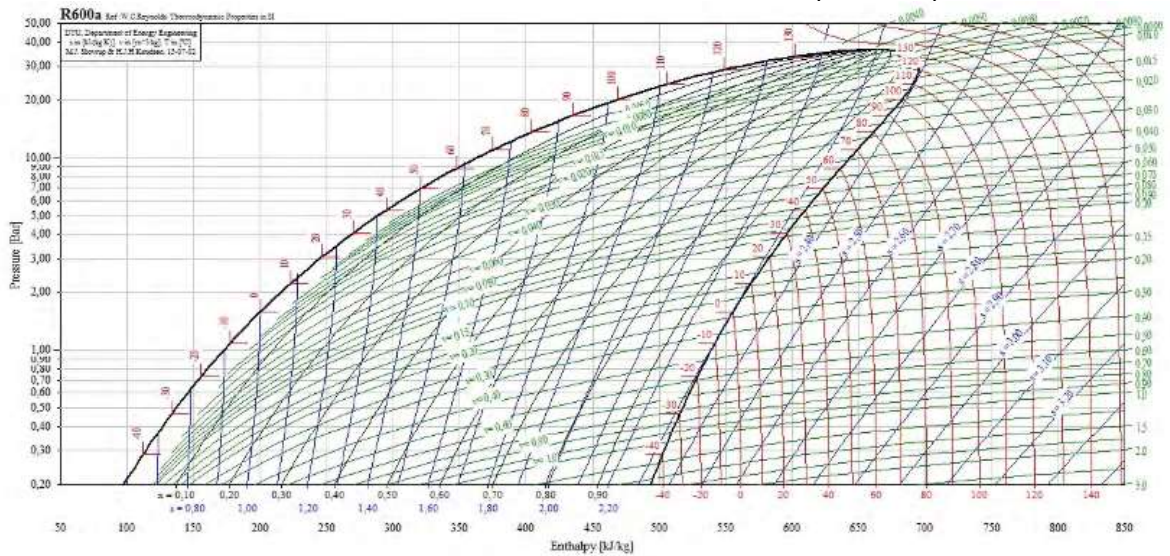
TABLA T – P AMONIACO (R-717), PROPANO (R-209) E ISOBUTANO (R-600A)

Gas	Natural Refrigerants & HFOs						
	R290 (Propane)	R600a (Isobutane)	R717 (Ammonia)	R744 (CO ₂)	R1270 (Propene)	R1234yf (Opteon® YF)	R1234ze (Solstice® ZE)
	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	HFO	HFO
Temperature °C							
-50	71	17	41	682	91	37	21
-48	78	19	46	739	100	42	24
-46	85	21	51	800	109	46	26
-44	93	23	58	864	119	51	30
-42	102	26	64	933	130	57	33
-40	111	29	72	1005	141	62	37
-38	121	32	80	1081	154	69	41
-36	132	35	88	1161	167	75	45
-34	143	39	98	1245	181	83	50
-32	155	42	108	1334	196	91	55
-30	168	47	119	1428	212	99	61
-28	181	51	132	1526	228	108	67
-26	196	56	145	1629	246	118	74
-24	211	61	159	1738	265	128	81
-22	227	67	174	1851	285	139	89
-20	245	72	190	1970	306	151	97
-18	263	79	208	2094	328	163	106
-16	282	86	226	2224	351	177	115
-14	302	93	246	2359	375	191	125
-12	323	100	268	2501	401	206	136
-10	345	108	291	2649	428	222	147
-8	369	117	315	2803	457	239	160
-6	393	126	341	2963	486	256	173
-4	419	136	369	3130	517	275	186
-2	446	146	398	3304	550	295	201
0	474	157	429	3485	584	316	217
2	504	168	462	3673	620	338	233
4	535	180	497	3869	657	361	250
6	567	193	535	4072	696	385	269
8	601	207	574	4283	736	411	288
10	637	221	615	4502	779	438	308
12	673	235	659	4730	823	466	330
14	712	251	705	4966	868	495	352
16	752	267	753	5211	916	526	376
18	793	284	804	5465	966	558	401
20	836	302	857	5729	1017	592	427
22	881	321	914	6003	1071	627	455
24	928	341	973	6288	1126	664	484
26	977	361	1035	6584	1184	702	514
28	1027	382	1099	6892	1243	742	545
30	1079	405	1167	7214	1305	784	578
32	1133	428	1238		1369	827	613
34	1189	452	1312		1435	872	649
36	1247	478	1390		1504	919	686
38	1307	504	1471		1575	968	726
40	1369	531	1555		1648	1018	766
42	1434	560	1644		1724	1071	809
44	1500	589	1735		1803	1126	853
46	1569	620	1831		1884	1183	899
48	1640	652	1931		1967	1241	947
50	1713	685	2034		2054	1302	997

ANEXO L. DIAGRAMA DE MOLLIER AMONIACO (R-717)



ANEXO M. DIAGRAMA DE MOLLIER ISOBUTANO (R-600a)



ANEXO N.
TÉCNICA NEVERA MABE

HECHO EN COLOMBIA FABRICADO POR / MADE BY MABE COLOMBIA S.A.S. MADE IN COLOMBIA
MANIZALES, COL. A.A. 408

1.3 MAB V1502277

MODELO / MODEL: RMP360FYCU

REF. EN REFRIGERADOR DOMESTICO FROST FREE
ESCARCHA HOUSEHOLD REFRIGERATOR REFUR. **mabe**

ESPEC. GABINETE: 181294804

14RCC 1 L 60 OR

TIPO DE REFRIGERANTE:	REFRIGERANT:	R600a	
MASA REFRIGERANTE:	REFRIGERANT MASS:	43	g
ESPUMA DE AISLAMIENTO:	FOMING AGENT:	Ciclopentano	
CORRIENTE NOMINAL:	NOMINAL CURRENT:	1.11	A
POTENCIA NOMINAL:	NOMINAL POWER:	120.64	W
CLASE CLIMATICA:	CLIMATE CLASS:	16°C-38°C	
CAP. DE CONG. (Kg/24h):	FREEZING CAP. (Kg/24h):	4.5	Kg
FRECUENCIA DESHIELO:	ICE MAKING CAP.:	1.6	
PUEERTAS:	DOORS:	2	
VOLUMEN NOMINAL BRUTO:	GROSS NOMINAL VOLUME:	360	l
VOL. NOM. TOTAL DE ALM:	NOMINAL STORAGE VOL.:	353.0	l
VOL. ALM. CONGELADOR:	FREEZER STORAGE VOL.:	101	l
VOL. ALM. REFRIGERADOR:	FRESH F. STORAGE VOL.:	252	l
POTENCIA RESIT. CALEF.:	HEATER POWER:	240	W
POTENCIA LAMPARA MAX 1:	LAMPS POWER MAX 1x:	25	W
C. ENERGIA (KWh/24h):	POWER CONSUMPTION:	1.08	
C. ENERGIA (KWh/ABO):	ENERGY USE:	394.2	
VOLTAGE: (V± 10%):	VOLTAGE: (V± 10%):	115	V
FRECUENCIA:	FREQUENCY:	60	Hz

SERIAL No. 1841413120

ANEXO O.
FICHA TÉCNICA NEVERA LG

LG REFRIGERADOR - CONGELADOR
MODELO: LT44SGP

TIPO DE CLIMA ST
TEMPERATURA DE OPERACION 16 °C a 38 °C
CLASE DE COMPARTIMENTO DE CONGELADOR * **
CONGELADOR SIN ESCARCHA

TENSION NOMINAL	115 V-
FRECUENCIA NOMINAL	60 Hz
POTENCIA NOMINAL	110 W
POTENCIA EN FASE DE DESHIELO	230 W
CORRIENTE NOMINAL	2,5 A
POTENCIA LAMPARAS CONGELADOR	2,0 W
REFRIGERADOR	2,0 W
VOLUMEN BRUTO TOTAL	471 L
VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO	CONGELADOR 117 L
REFRIGERADOR	321 L
TOTAL	438 L
REFRIGERANTE / MASA	R600a / 61 g
AGENTE ESPUMANTE	CICLOPENTANO
PESO NETO	74 kg
DIMENSIONES	ancho 700 mm
	fondo 730 mm
	alto 1780 mm

Importador: LG Electronics Colombia Ltda.
Carrera 11 # 94A-34
Bogotá, Colombia
No.Serie: 808TRPT15624
Taizhou LG Electronics Refrigeration Co.,Ltd

MANUFACTURADO: 2018 MEZ64595495
HECHO EN CHINA