



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

**ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD PARA UTILIZAR GAS METANO EN UN
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LLAMA**

Eleazar Antonio García Rivera

Asesorado por el Ing. Edwin Steward López Mazariegos

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD PARA UTILIZAR GAS METANO EN UN
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LLAMA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELEAZAR ANTONIO GARCÍA RIVERA

ASESORADO POR EL ING. EDWIN STEWARD LÓPEZ MAZARIEGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Mynor Roderico Figueroa Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo
EXAMINADOR	Ing. Herbert Samuel Figueroa Avendaño
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD PARA UTILIZAR GAS METANO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LLAMA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 29 de abril del 2019.

Eleazar Antonio García Rivera

Guatemala, 23 de febrero de 2,021

Estimada Escuela de Ingeniería Mecánica

Señor Ingeniero:

Gilberto Enrique Morales Baiza

Director Escuela de Ingeniería Mecánica

Presente,

Le dirijo la presente para informarle que el proceso de asesoría para la presentación del trabajo de graduación titulado "ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD PARA UTILIZAR GAS METANO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LLAMA" presentado por el señor bachiller Eleazar Antonio García Rivera, fue concluido satisfactoriamente, lo que hago de su conocimiento para que se pueda proseguir con el proceso de revisión.

Sin otro particular, hago propicia la oportunidad de expresarle mis respetos,

Atentamente,



Edwin S. López Mazariegos
Colegiado No. 10272

Ing. Edwin Steward López Mazariegos
Ingeniero Mecánico
Colegiado 10,272
ASESOR



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen favorable del Asesor y del Ing. Luis Alfredo Asturias Zúñiga, docente titular del curso de Refrigeración y Aire Acondicionado y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **“ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD PARA UTILIZAR GAS METANO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LLAMA”** desarrollado por el estudiante **Eleazar Antonio García Rivera**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Coordinador Área Térmica

Guatemala, julio del 2,021

RGO/



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.164.2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD PARA UTILIZAR GAS METANO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LLAMA** del estudiante **Eleazar Antonio García Rivera**, CUI **213167662**, Reg. Académico **201314847** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, noviembre 2021

/aej




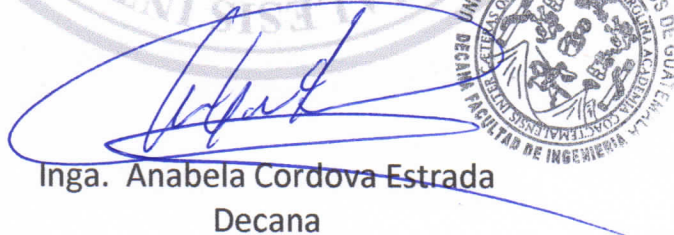
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 720.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD PARA UTILIZAR GAS METANO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LLAMA**, presentado por el estudiante universitario: **Eleazar Antonio García Rivera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, noviembre de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Mi familia

Por estar siempre a mi lado y apoyarme siempre.

Mis amigos

Por animarme y apoyarme durante la carrera.

A mí

Porque, a pesar de todo, sigues acá y sigues para adelante.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera y por enseñarme los valores necesarios.
Facultad de Ingeniería	Por instruirme en la profesión que soñaba.
Mónica Sussette Barillas Chete	Por inspirarme, apoyarme y creer en mí siempre.
Mis amigos de la Facultad	Por siempre estar allí en las buenas y en las malas

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Usos de metano	1
1.2. Composición del metano	6
1.3. Principio de combustión del metano.....	8
1.4. Efecto de los componentes en el comportamiento del metano.....	10
2. ESTUDIO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN	15
2.1. Sistema de absorción	18
2.1.1. Principio de funcionamiento.....	20
2.1.2. Rendimiento de los equipos.....	22
2.1.3. Clasificación de los sistemas de absorción	26
2.1.3.1. Según el ciclo de absorción.....	26
2.1.3.2. Según la sustancia que componga la solución	29
2.1.4. Descripción del ciclo de absorción simple	31
2.1.5. Ciclos mejorados de absorción.....	35
2.1.5.1. Ciclo de absorción de doble efecto.....	35

	2.1.5.2.	Ciclo de absorción de triple efecto	39
2.2.		Equipos característicos	39
	2.2.1.	Absorbedor	41
	2.2.2.	Generador	44
	2.2.3.	Condensador	45
	2.2.4.	Válvula de expansión	46
	2.2.5.	Evaporador	47
	2.2.6.	Intercambiador de calor	48
	2.2.7.	Rectificador	49
3.		INSTRUMENTACIÓN	51
	3.1.	Puesta a punto del refrigerador	51
	3.2.	Metodología para el análisis	53
	3.3.	Termómetros	64
	3.4.	Caudalímetro	66
	3.5.	Mechero bunsen	67
	3.6.	Resultados	70
4.		ANÁLISIS ECONÓMICO	77
	4.1.	Compra y modificaciones del refrigerador	77
	4.2.	Inversión total inicial	78
	4.3.	Análisis de ganancia económica	79
5.		ANÁLISIS ECOLÓGICO	83
	5.1.	Impacto ambiental del metano	83
	5.2.	Sustancias refrigerantes	85
	5.2.1.	Sustancias empleadas en absorción	86
	5.2.2.	Sistema agua-amoniaco	88

6.	COMPARACIÓN DE REFRIGERACIÓN CON METANO Y COMBUSTIBLES COMUNMENTE USADOS	93
6.1.	Resultados obtenidos	93
6.2.	Costos	95
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES	103
	BIBLIOGRAFÍA.....	105
	APÉNDICES	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso Fischer-Tropsch	2
2.	Estructura de Lewis de la geometría de la Molécula de Metano, fórmula Química.....	7
3.	Diagrama de triangulo de fuego	8
4.	Ciclo de refrigeración por absorción de amoniaco	16
5.	Procesos de absorción y adsorción.....	17
6.	Máquina de hielo diseñada por Carré	19
7.	Esquema de ciclo de refrigeración por absorción	24
8.	Ciclo de absorción LiBr-H ₂ O de efecto simple	27
9.	Ciclo de absorción LiBr-H ₂ O de doble efecto	28
10.	Ciclo de absorción LiBr-H ₂ O de triple efecto	29
11.	Funcionamiento de máquina de absorción de simple efecto.....	32
12.	Diagrama de una máquina de absorción de doble efecto LiBr-H ₂ O.....	37
13.	Configuraciones de ciclos de absorción de doble efecto.....	38
14.	Comparación de un sistema por compresión frente a un sistema por absorción.....	40
15.	Absorbedor con flujos líquidos y vapor continuo	42
16.	Absorbedor con flujo líquido y vapor discontinuo	43
17.	Esquema de generador para sistema de absorción NH ₃ -H ₂ O.....	45
18.	Diagrama de válvula de expansión típica.....	47
19.	Evaporador de una máquina de absorción.....	48
20.	Ubicación de rectificador en diagrama de ciclo de absorción.....	50

21.	Refrigerador por absorción de efecto simple modificado para usar metano como combustible	53
22.	Ciclo de refrigeración por absorción	61
23.	Termómetro infrarrojo Fluke Max 62.....	64
24.	Termómetro digital Velleman PMTEMP1	65
25.	Gasómetro Sintta Mechanical <i>steel gas meter</i>	66
26.	Mechero Bunsen EISCO.....	67
27.	Llama obtenida con biogás en el mechero Bunsen	70
28.	Puntos a medir temperatura en refrigeradora	71
29.	Diagrama de Mollier de ciclo de refrigeración por absorción con biogás	74
30.	Diagrama de Mollier de ciclo de compresión de refrigerante R134a.....	75
31.	Comparación de costo de consumo entre metano y electricidad.....	81
32.	Costo de combustible consumido en 3 meses.....	97
33.	Costo de combustible consumido en 6 meses.....	98
34.	Costo de combustible consumido en 12 meses.....	98

TABLAS

I.	Usos del biogás	3
II.	Potencial de calentamiento global de gases de efecto invernadero	5
III.	Potencial de agotamiento de ozono de diferentes sustancias	6
IV.	Propiedades físicas del metano.....	7
V.	Composición promedio del biogás	9
VI.	Efecto de los componentes en el biogás	10
VII.	COP de una máquina de frío por absorción a gas natural	25
VIII.	Sustancias de trabajo comunes en sistemas de absorción	30
IX.	Coeficientes de transferencia de calor de diferentes materiales.....	58
X.	Factores de calor removido por infiltración [BTU/ft3]	60

XI.	Temperaturas del sistema [°C].....	74
XII.	Inversión inicial requerida.....	79
XIII.	Consumo de kWh de un refrigerador convencional de 400 watts	80
XIV.	Estimados de las principales fuentes naturales y antropogénicas de metano a nivel global (Millones de Ton/año).....	83
XV.	Libras de CO2 emitida por millón de unidades BTU de energía para varios combustibles.....	85
XVI.	Propiedades de algunos refrigerantes.....	89
XVII.	Poder calorífico de diferentes combustibles.....	94
XVIII.	Precios de combustibles (en fase líquida) por litro	96
XIX.	Precios de combustibles (en fase gaseosa) por 100 litros	96

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
USD	Dólares estadounidenses
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
kcal/kg	Kilocalorías por kilogramo
kg	Kilogramo
Kg/m³	Kilogramos por metro cúbico
kJ/kg	kilojulios por kilogramo
kPa	Kilo pascal
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
lb	Libra
L	Litro
L/h	Litro por hora
psi	Libra por pulgada cuadrada
m³	Metro cúbico
m³/L	Metro cúbico por litro
Q	Quetzales
BTU	Unidad térmica británica
W	Vatio

GLOSARIO

Absorbedor	Retener en una sustancia las moléculas de otra.
Absorción	Acción de absorber.
Adsorción	Atraer y retener en una superficie moléculas o iones de otro cuerpo.
Amoniaco	Gas incoloro, de olor irritante, soluble en agua, compuesto de un átomo de nitrógeno y tres de hidrógeno.
Biogás	Gas obtenido por la degradación anaeróbica de residuos orgánicos.
Bomba	Máquina o artefacto para impulsar agua u otro líquido en una dirección determinada.
Bromuro de litio	Es un compuesto químico de litio y bromo. Debido a su alta absorción de agua se usa como un agente de secado en acondicionadores de aire.
Ciclo Termodinámico	Es el conjunto de las transformaciones termodinámicas de un fluido, en un sistema que retorna a las condiciones iniciales después de haber realizado un trabajo.

Condensador	Aparato para reducir los gases a menor volumen.
COP	Coeficiente de eficiencia de la bomba de calor.
Desorción	Emisión de un fluido previamente adsorbido por un material.
Energía	Capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo.
Evaporador	Es un intercambiador de calor donde se produce la transferencia de energía térmica desde un medio a ser enfriado hacia el refrigerante.
Intercambiador de calor	Es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos.
Metano	Hidrocarburo gaseoso e incoloro, formado por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno, que se produce en las minas de carbón y en la descomposición de materia orgánica.
Refrigerante	Es un compuesto utilizado en la transmisión de calor que, en un sistema de refrigeración, absorbe calor a bajas temperaturas y presión, cediéndolo a temperatura y presión más elevadas.

- Solución** Mezcla que resulta de disolver un cuerpo o una sustancia en un líquido.
- Válvula de expansión** Es un componente clave en sistemas de refrigeración y aire acondicionado, que tiene la capacidad de generar la caída de presión necesaria entre el condensador y el evaporador en el sistema.

RESUMEN

Este trabajo analizó las ventajas y desventajas del uso de un sistema de refrigeración para la conservación de alimentos, el cual hace uso de un refrigerador con modificaciones donde se implementa el gas metano como combustible para el quemador, que provee calor al generador para que este pueda completar el ciclo.

Como primera parte se analizaron las propiedades físicas y químicas del gas metano y sus diferentes usos en las industrias de hoy en día, con las cuales se procedieron a desarrollar los principios de funcionamiento del ciclo de refrigeración por absorción, definiendo los diferentes tipos de clasificación de los ciclos de absorción y el cálculo de su rendimiento en equipos. Una vez definidos los aspectos teóricos de la refrigeración por absorción, se procedió a describir el funcionamiento de cada uno de los equipos característicos que constituyen un refrigerador por absorción. El trabajo desarrolló los pasos para las modificaciones necesarias para que el refrigerador use como combustible el gas metano para la llama y la puesta a punto de todos los componentes.

Finalmente se hizo una serie de análisis de balance de energías interpretando y comparando los resultados. Los análisis que se realizaron fueron el de análisis económico, el cual estudia el impacto económico que tiene el gasto inicial en las modificaciones del equipo y el gasto en el suministro de combustible. También se realizó un análisis ecológico analizando el impacto ambiental de la combustión del gas metano y, por último, se realizó una comparación de propiedades físicas y químicas entre el metano y diferentes tipos de combustibles.

OBJETIVOS

General

Desarrollar un estudio de prefactibilidad para la aplicación del biogás metano en sistemas de refrigeración por llama, enfocando la utilización de combustibles renovables.

Específicos

- Investigar la viabilidad del uso del gas metano como combustible en la industria.
- Analizar si el gas metano es apto para ser utilizado en un generador de un sistema de refrigeración.
- Demostrar mediante un estudio de prefactibilidad que el metano se puede utilizar en un sistema de refrigeración por llama.
- Investigar los conceptos básicos del ciclo de absorción de refrigeración, tanto sus principios de funcionamiento como el equipo en el que trabaja.
- Analizar si se obtienen beneficios para sistemas de refrigeración por llama aplicando metano como combustible.

- Justificar la idea de utilizar combustibles renovables para usos industriales.
- Proporcionar material de consulta y/o referencia para aquellas personas que busquen implementar biocombustibles en la refrigeración.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la refrigeración de productos alimenticios como frutas, verduras y carnes se ha vuelto muy importante desde la industria ligera hasta la pesada, ya que la preservación de comida es de suma importancia para la subsistencia de pequeñas comunidades, como pueden ser los pueblos y aldeas en el interior del país, hasta comunidades grandes como lo pueden ser las ciudades. La refrigeración de productos permite que las raciones de comida duren más, se puedan exportar a más largas distancias sin que estas se echen a perder.

Existen diferentes sistemas de refrigeración los cuales dependen del ciclo termodinámico que implementen en su sistema, entre ellos se encuentran la refrigeración por compresión y por absorción. Este trabajo se enfoca principalmente en el ciclo por absorción. El ciclo de este tipo de refrigeración se basa físicamente en la capacidad que tienen algunas sustancias, como el bromuro de litio, agua y diferentes tipos de sales, de absorber otra sustancia como puede ser el agua y el amoníaco, en fase de vapor. Esta última sustancia cumple la función de refrigerante y es la encargada de absorber la carga calorífica de los productos.

Este tipo de refrigeración tiene un menor rendimiento COP que la refrigeración por compresión, sin embargo, este no requiere de energía eléctrica para completar el ciclo, por lo que lo hace ideal para lugares que no cuentan con una fuente de energía eléctrica continua o aquellos que carecen completamente de esta. Por medio de una llama que la provee una fuente continua de combustible y un quemador, se separan el absorbedor y el refrigerante mediante

el calor en el equipo llamado generador. Existen varios tipos de combustibles los cuales pueden ser usados para este tipo de procesos, como lo pueden ser: el gas propano, GLP y el gas metano. Dependiendo del tipo de combustible, solo sería necesario un reacondicionamiento del sistema para que este le permita usar el combustible deseado.

Esta investigación se enfoca en la factibilidad de usar el gas metano como combustible para el quemador y en cuáles son sus ventajas y desventajas en comparación con otros combustibles. También se muestra el equipo necesario y sus modificaciones necesarias para que este pueda usar el gas metano como llama y así completar su ciclo de la manera más eficiente posible.

El gas metano es un biogás abundante, debido a su naturaleza se puede obtener de diferentes fuentes, ya sea de tratamientos de aguas residuales o de desechos orgánicos, entre otras. También existen diferentes maneras de extraerlo, ya sea extrayéndolo de fuentes de gas natural que se encuentran en la tierra, hasta recolectarlo de desechos naturales de industrias agrícolas. El gas metano también es conocido por ser un combustible eficiente en la combustión, y genera más poder calorífico que otros hidrocarburos más complejos. El uso de este biogás para la refrigeración sería una gran ventaja para las comunidades que carecen de electricidad y necesiten refrigerar productos ya que su obtención es relativamente fácil y es un recurso abundante en la naturaleza.

1. GENERALIDADES

1.1. Usos de metano

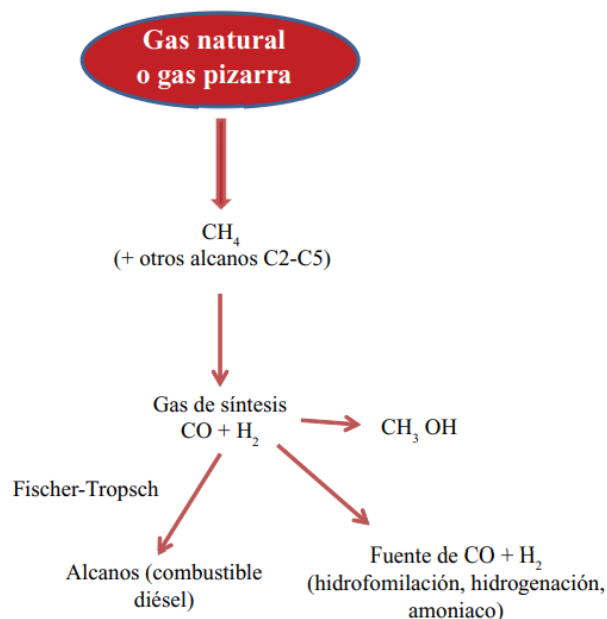
El gas metano es un combustible que popularmente ha sido usado como una fuente de energía. La energía puede obtenerse por medio de la combustión del gas. Las necesidades energéticas de las personas continúan creciendo conforme la industria avanza.

El gas natural es la segunda fuente de energía fósil después del carbón y tiene la mejor relación H/C para la explotación de energía y por consecuencia las menores emisiones de CO₂. También tiene un costo relativamente bajo en el mercado global. Metano es el principal constituyente del gas natural cuya composición puede llegar hasta el 80 % al 90 % del total de este.¹

En lo que se refiere a su uso en la industria como materia prima, el biogás se descompone para producir el gas de síntesis (*syngas*), el cual es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno molecular. Esta mezcla constituye como material principal para la producción de metanol o de gasolina sintética e hidrógenos gaseosos mediante el proceso de Fischer-Tropsch (figura 1).

¹ CABALLERO, A. y PÉREZ, P. 2014. El metano como materia prima: un reto vigente. *Anales de Química*. España: Real Sociedad Española de Química, 110, No. 2, p. 131-139.

Figura 1. **Proceso Fischer-Tropsch**



Fuente: CABALLERO, A. y PÉREZ, P. 2014. El metano como materia prima: un reto vigente. *Anales de Química*. España: Real Sociedad Española de Química, 110, No. 2, pp. 131-139.

Una de las importantes aplicaciones para el metano en la industria es para la generación eléctrica, ya que se emplea como combustible en las generadoras de vapor o en las turbinas de gas.

En los últimos años, ha sido aplicado con buenos resultados como fuente de energía alternativa a pequeña escala, generando el biogás a partir de residuos orgánicos o plantas de tratamiento. El biogás natural tiene diversos usos, ya que se trata de un gas con gran capacidad calorífica al ser quemado. Es por lo que se emplea tanto a pequeña escala como en distintas industrias. A continuación, se muestran los consumos y rendimientos de ciertos usos en que se utiliza el biogás.

Tabla I. **Usos del biogás**

Aparato	Consumo	Rendimiento [%]
Heladera (1001)	30 – 75 L/h	20 – 30
Motor a gas	0,5 m ³ /kWh	25 – 30
Lámpara de mantilla (60 W)	120 – 170 L/h	30 – 50
Quemador de cocina	300 – 600 l/h	50 – 60
Quemador (10 kW)	2 m ³ /h	80 – 90
Cogenerador	1 kWh	Hasta 90
Infrarrojo (200 W)	30 L/h	95 – 99

Fuente: FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, pp.5

En muchas poblaciones, el metano es transportado en tuberías hasta las viviendas o comercios como combustible para la calefacción y para la preparación de alimentos. En Guatemala y en sus departamentos, este tipo de instalaciones son muy limitadas o no existentes y solo se pueden transportar el gas metano por medio de tanques de gas, sin embargo, una opción donde se puede conseguir una fuente continua de gas son las plantas de tratamiento de aguas residuales. También es posible la construcción de biodigestores, que, con suficiente materia orgánica, como por ejemplo bagazo, se puede conseguir el suministro suficiente de gas metano. Su principal ventaja es su coste más reducido y mayor seguridad con respecto de alternativas como el gasoil o GLP (gas licuado de petróleo). También es usado en los gasodomésticos (Se trata de la línea blanca de electrodomésticos que funcionan con gas natural). Entre sus ventajas principales esta la reducción del consumo eléctrico y una mayor durabilidad en las máquinas. En estos casos el metano es conocido como gas natural.

En caso de usos industriales, el metano es usado comúnmente en procesos químicos industriales e incluso puede ser transportado como líquido refrigerado, e incluso usado como refrigerante, pero esta última no es tan viable debido a que existen refrigerantes más eficientes y menos contaminantes. En la industria química, el metano es la materia prima elegida para la producción de hidrógeno, metanol, ácido acético y anhídrido acético. Sin embargo, las dos principales corrientes que surgen en una refinería contienen, por un lado, gases como el etileno, el propeno y el butadieno, y por otro una mezcla de compuestos aromáticos llamados BTX, por las siglas de Benceno, tolueno y xileno. A partir de ambos procesos, se pueden prepararse una gran variedad de productos de primera generación que, a su vez son materia prima para otros más especializados.²

La disponibilidad de grandes cantidades de metano en nuestro planeta podría situarlo por encima de una lista de materia prima para la industria química. Sin embargo, esta molécula tan sencilla presenta una inercia química alta, debida fundamentalmente a dos motivos: una alta energía de disociación (105 kcal/mol) y una baja polaridad de sus enlaces C-H ($X_C = 2.55$; $X_H = 2.20$). La baja reactividad conduce a un problema no menos importante: la selectividad.³

Cuando el metano se convierte en otra molécula, esta suele tener enlaces más reactivos que los que del mismo metano, lo que hace que la reacción avance a partir del primer producto y no del hidrocarburo del inicio.

Debido a la naturaleza del metano y compuestos similares, estos pueden causar daños al medio ambiente como aportar al calentamiento global o al agotamiento del ozono. Estos pueden ser medidos como potencial de calentamiento global (PCG) y Potencial de agotamiento de ozono (PAO).

El Potencial de calentamiento global (PCG) se define como el calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce una liberación de 1kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. A continuación, en la tabla II se muestra el potencial de calentamiento global del metano y otros gases:

² FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, p. 6-8.

³ *Ibidem*, p. 6-8.

Tabla II. **Potencial de calentamiento global de gases de efecto invernadero**

Gas	PCG
Dióxido de Carbono	1
Metano	21
Propano (R290)	≤ 0
Butano (R600a)	≤ 0
Óxido Nitroso	296
Fluoro carburos	120 – 12 000
Cloro fluoro carbonos	5 700 – 11 900
Hexafluoruro de azufre	22 200

Fuente: *Intergovernmental Panel on Climate Change. Panel Internacional de Cambio Climático Tercer Reporte de evaluación. Reino Unido: Cambridge University Press, 2001.*

El potencial de agotamiento de ozono (PAO) es el factor que refleja la capacidad para agotar la capa de ozono que es reflejada en masa por kilogramo. A cada sustancia se le asigna un valor relativo a la sustancia CFC-11, cuyo PAO por definición tiene valor de 1. En la tabla III se encuentra el potencial del metano, así como el de varias sustancias.

Tabla III. **Potencial de agotamiento de ozono de diferentes sustancias**

Sustancias	PAO
CFC-11	1
Metano	≤ 0
Propano (R290)	0
Butano (R600a)	0
Halon-1301	10
Tetracloruro de carbono	1,1
HCFC-22	0,055
HBFC-22B1	0,74
Bromo cloro metano	0,12

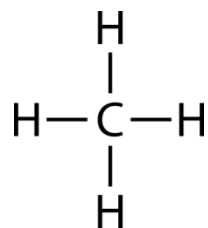
Fuente: Ravishankara, A. R.; Daniel, John S.; Portmann, Robert W. *Supporting Online Material for Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century*. 2009.

1.2. Composición del metano

El metano es el hidrocarburo más simple que existe, su molécula está formada por un átomo de carbono (C), al que se encuentra unidos covalentemente a cuatro átomos de hidrógeno (H) (Figura 2). Es un gas incoloro, inodoro y muy inflamable, de menor peso que el aire, que en la naturaleza se produce por la descomposición de la materia orgánica. A temperatura ambiente es un gas y se halla presente en la atmósfera.⁴

⁴ CORNEJO, P. *Aplicaciones del Metano*. [En línea] 2009. <<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n4/m2.html#refe1>>

Figura 2. **Estructura de Lewis de la geometría de la Molécula de Metano, fórmula Química**



Fuente: SOTO, J. *Química orgánica II: hidrocarburos y sus derivados halógenos síntesis*. España: Editorial Síntesis, 2001.

Tabla IV. **Propiedades físicas del metano**

Propiedades físicas del metano (CH₄)	
Punto de ebullición (°C)	-161 °C
Punto de fusión (°C)	-183 °C
Solubilidad en agua, ml/100 ml a 20 °C	3,3
Densidad relativa de vapor (aire=1)	0,6
Punto de inflamación	Gas inflamable
Temperatura de auto ignición (°C)	537 °C
Límite de explosividad, % en volumen en el aire	5 – 15

Fuente: SOTO, J. *Química orgánica II: hidrocarburos y sus derivados halógenos síntesis*. España: Editorial Síntesis, 2001.

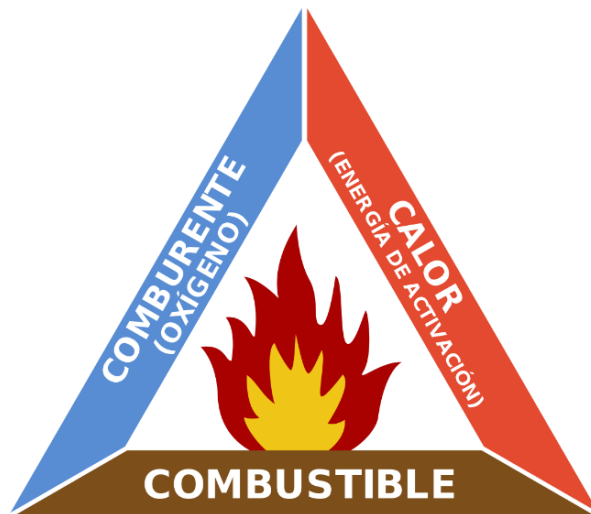
Entre las propiedades químicas, el metano es un compuesto molecular, cuyas unidades básicas son grupos de átomos unidos entre sí por medio de enlaces covalentes simples. La molécula de metano consta de un átomo de carbono con cuatro átomos de hidrógeno unidos a él. La forma general de la

molécula es un tetraedro, una figura con cuatro lados triangulares idénticos, con un átomo de hidrógeno en cada vértice y el átomo de carbono en su centro.

1.3. Principio de combustión del metano

Para obtener energía térmica de la combustión del biogás, este debe de mezclarse con aire de modo que los componentes reaccionen con oxígeno, tal como se indica en el triángulo de combustión (Ver figura 3) donde debe de haber: Combustible, calor y oxígeno.

Figura 3. Diagrama de triángulo de fuego



Fuente: Ángel Lanchas. (2015). *El Triángulo de Fuego*. 20 de octubre de 2021, de Asociación Española de Laboratorios de Fuego. [En línea] <: <http://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/>>

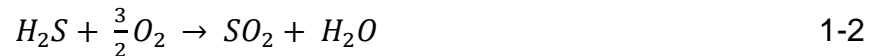
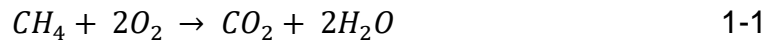
El biogás está compuesto por los siguientes componentes:

Tabla V. **Composición promedio del biogás**

Composición	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂
% Volumen	90,87	6,19	0,27	1,88	0,79

Fuente: VILLAFLORES, Gloria. 2008. Variables significativas del proceso de combustión de gas natural. *Información Tecnológica*. Argentina: Universidad Nacional de Salta, 19, No. 4, pp. 57-62.

Las reacciones más importantes que suceden en la combustión del metano son las siguientes:



Estas son reacciones que ocurrirían si la cantidad de oxígeno fuese la estequiométrica, y para asegurar que la cantidad de O₂ es suficiente se aumenta el aire introducido en las cámaras de combustión. La cantidad de aire necesario para la combustión del metano es un poco mayor que para los combustibles tradicionales.

El nitrógeno contenido en el biogás se comporta como inerte en el proceso de combustión, ya que la formación de óxidos de nitrógeno no afecta la cantidad de aire necesario para la combustión ni la cantidad de gases de combustión producidos. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental es importante considerar la formación de dichos óxidos por la contaminación que producen los mismos.

El valor energético del biogás depende en gran medida de la cantidad de metano que contenga. Suele tener valores comprendidos entre 20 y 25 MJ/m³, mientras que el valor energético del gas natural se encuentra entre 33 y 38 MJ/m³. Si se desea aumentar el valor del biogás debe limpiarse de las sustancias que no añaden valor, como el dióxido de carbono.⁵

1.4. Efecto de los componentes en el comportamiento del metano

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. Las sustancias que acompañan al metano en la composición del biogás le afectan a este de distintas maneras. Su comportamiento depende de las proporciones de estas (ver tabla V), así como el efecto que pueda tener el paso del gas a través de equipos usados. La tabla VI describe el efecto de cada sustancia.

Tabla VI. Efecto de los componentes en el biogás

Sustancia	Proporción	Efecto
CO₂	0 – 40 %	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución del poder calorífico • Incremento de la cantidad de metano • Corrosión de los equipos • Daños de las celdas alcalinas de combustible
Vapor de agua	1 – 5 %	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión de equipos y sistema de tubería • Daños a instrumentación por condensado • Riesgo de congelación y bloqueo de tuberías y válvulas

⁵ VILLAFLORES, Gloria. 2008. Variables significativas del proceso de combustión de gas natural. Información Tecnológica. Argentina: Universidad Nacional de Salta, 19, No. 4, p. 57-62.

Continuación de la tabla VI.

N₂	0 – 5 %	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuye la energía calorífica
H₂S	0 – 0,05 %	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión de equipos y sistema de tubería • Emisiones de SO₂ tras la combustión • Emisiones de H₂S en combustión imperfecta • Inhibición de catálisis
NH₃	0 – 0,05 %	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de NO_x • Daños a las celdas de combustible
Siloxenos	0 – 50 mg/m ³	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasión y daños en los motores
Polvo	>50 µm	<ul style="list-style-type: none"> • Bloqueo de las boquillas y celdas de combustible

Fuente: FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, pp.8.

Guatemala cuenta con una industria ganadería relativamente grande que se encuentra en todo el país. La industria agropecuaria debido a la cantidad de bovinos, estos liberan al ambiente grandes cantidades de biogás. Por lo cual se corre el riesgo de que equipos, maquinaria, y diferentes industrias se vean afectadas por el biogás.

La presencia de dióxido de carbono (CO₂), es esencial para la formación de metano en el biogás. Por esta razón es recomendable deshacerse de este hasta que no se extraiga el gas final. La cantidad de dióxido de carbono se suele medir en base a la razón CO₂/CH₄ en porcentaje de volumen. El dióxido de carbono es

el segundo componente más presente en el biogás, y la composición de este viene afectada por los siguientes factores:

- La descomposición anaeróbica del sustrato mejora cuanto más avanzado sea el perdido de retención. La cantidad de metano en el biogás aumenta en gran medida cuando el dióxido de carbono producido desactiva el proceso de hidrólisis.
- La homogeneidad del sustrato disminuye el tiempo necesario para que el proceso de fermentación comience.
- Una carga con una gran cantidad de humedad reduce la concentración de CO₂ en el gas debido a que este quedará disuelto en el agua.
- El incremento de la temperatura durante la fermentación reduce la cantidad de CO₂ disuelto en el líquido.
- Una alta presión durante la fermentación provoca un incremento de dióxido de carbono disuelto.⁶

Con respecto al nitrógeno y al oxígeno, la introducción de estos en el biogás se realiza con el fin de eliminar el ácido sulfúrico indeseado en el reactor. Para lograr este efecto, la relación de N₂ y O₂ se encuentra habitualmente en una proporción 4 a 1.

Las concentraciones de H₂S en el biogás depende mayoritariamente del proceso que se ha utilizado para su obtención y el sustrato utilizado. Si este es de una viscosidad más elevada, la concentración de ácido sulfúrico es menor. En caso de no existir un proceso de desulfuración la concentración puede llegar a superar 0,2 % en volumen.⁷

No permitir que el contenido de ácido alcance unos niveles elevados es una necesidad de vital importancia, dado que los componentes que entren en contacto con el gas sufrirán corrosión. Para evitar el daño de los equipos, se usa el proceso de desulfuración en el interior del mismo reactor.

El ácido sulfúrico (H₂SO₄) que puede encontrarse en el biogás proviene de una reacción entre el sulfuro de hidrógeno y el vapor de agua. Este ácido puede ser nocivo para equipos en los que se desee utilizar el biogás. Si el porcentaje llegara

⁶ VARNERO, M. *Manual del Biogás*. Santiago de Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Energía, 2011. p. 61.

⁷ *Ibídem*, p. 61

a superar el 2 % del volumen del reactor, es de gran necesidad la reducción del sulfuro de hidrógeno.⁸

La concentración ideal del amoníaco en el compuesto total del biogás no suele superar los 0,1 mg/m³, con excepción del caso en los que el sustrato tiene una gran cantidad de heces de aves, o contaminantes muy particulares. Este límite no debe superarse, ya que puede ser perjudicial para los quemadores o los motores en que se produzca la combustión del gas.

Una concentración aceptable de Siloxenos en la quema de un biogás es de 0,2 mg/m³. Tras la combustión de este se forma SiO₂, que se deposita en la superficie de la maquinaria y puede llegar a producir desgaste de abrasión en la superficie de las partes de esta.⁹

⁸ Pauss, A., Andre, G., Perrier, M. & Guiot, S. 1990. Liquid-to-Gas Mass Transfer in Anaerobic Processes: Inevitable Transfer Limitations of Methane and Hydrogen in the Biomethanation Process. *Applied and Environmental Microbiology*. Canadá: American Society for Microbiology, vol. 56, No. 6, p.1636-1644.

⁹ Ibidem

2. ESTUDIO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

La segunda ley de la termodinámica estipula que, en ningún caso se puede disipar el calor de una fuente a otra de mayor temperatura, ya que esto impediría que el ciclo de refrigeración se complete. Ya que, si esto se pudiera hacer, el ciclo tendría el 100 % de eficiencia y es teóricamente imposible ya que la segunda ley de la termodinámica lo prohíbe. Con esto se puede decir que, para poder enfriar un recinto, implica que traslademos el calor de una fuente de temperatura superior a la deseada.

Por lo tanto, si se desea extraer el calor de un cuerpo cuya temperatura es menor a la del ambiente que lo rodea, es necesario intercalar un proceso de frío. El enfriamiento se puede llevar a cabo por medio de ciclos diferentes de enfriamiento, los cuales comparten ciertas características: ciclo de compresión y absorción.¹⁰

Un refrigerador es un equipo cuyo objetivo es el extraer calor de un cuerpo a una cierta temperatura y cederlo a un medio que se encuentra a una temperatura superior. Estos equipos son parecidos a los motores térmicos. El fluido de trabajo usado en el ciclo se le llama refrigerante. La producción de frío se obtiene al provocar la evaporación del refrigerante. Para ello se debe de elevar previamente su presión, al reducirla nuevamente se provoca la evaporación y con ello la refrigeración.

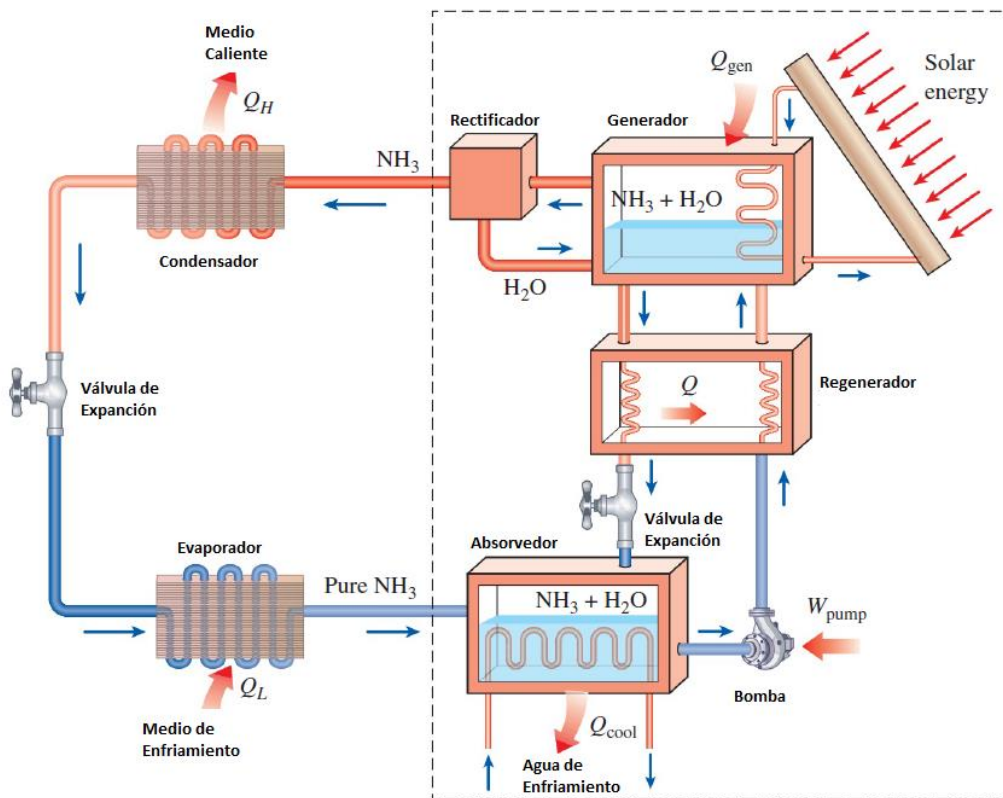
Ambas técnicas producen esta compresión, la diferencia se encuentra en el método de conseguirla. La técnica por compresión se realiza de manera mecánica succionando el fluido del evaporador, mientras que por medio de

¹⁰ CENGEL, Y. *Thermodynamics: an Engineering Approach, 8th edition*. Estados Unidos: McGraw Hill Education, 2015, p. 633-639.

absorción se produce una compresión térmica tras absorber el refrigerante por medio de un material diseñado para ello (figura 4).

En el siguiente trabajo de investigación se describirán las diferentes definiciones que se han utilizado para expresar los sistemas de refrigeración por absorción y adsorción.

Figura 4. **Ciclo de refrigeración por absorción de amoníaco**



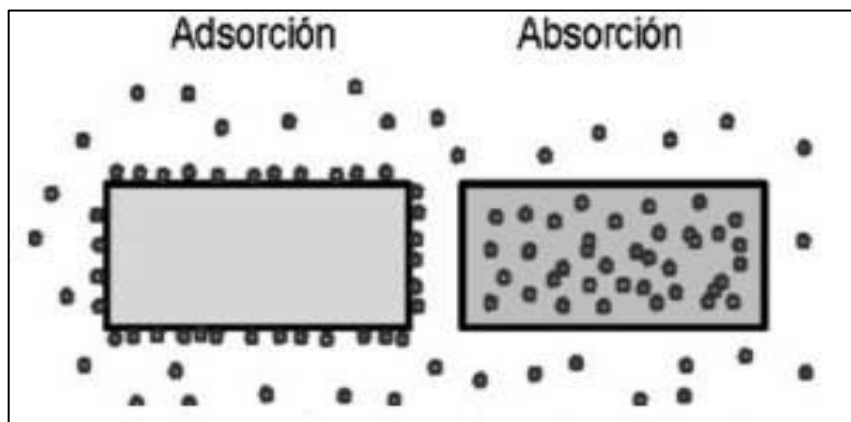
Fuente: CENGEL, Y. *Thermodynamics: an Engineering Approach, 8th edition*. Estados Unidos: McGraw Hill Education, 2015, pp. 633-639.

- Absorción: en este sistema, el fluido refrigerante en fase de gas es disuelto en otra sustancia, en la cual se produce una reacción química. La

sustancia absorbente puede ser tanto sólida como líquida. Este sistema se basa en la afinidad fisicoquímica que tienen ambas sustancias empleadas en dicho ciclo. Como, por ejemplo: el agua con el amoníaco.

- “Adsorción: a diferencia del método por absorción, la adsorción une las sustancias por causas físicas, sin que ocurra alguna reacción química posteriormente. El resultado de esta unión es solamente superficial. Generalmente se emplea un sólido para realizar la adsorción del vapor, pero también se puede lograr entre un líquido y un gas, aunque no hay muchas sustancias que puedan lograr esto.”¹¹

Figura 5. **Procesos de absorción y adsorción**



Fuente: MORENO, F., PERDONE, E. y GUEVARA, D. 2018. *Diseño y evaluación de un Sistema de refrigeración experimental trabajando por adsorción solar*. Revista Chilena de Ingeniería. Chile: Ingeniare, 26, No. 4. Pp. 622-630.

Para el desarrollo y propósito de esta investigación, se centrará únicamente en el ciclo de absorción dejando por un lado el sistema de adsorción.

¹¹ PINO, F. *Análisis de los sistemas de refrigeración por adsorción*. Tesis de licenciatura. Universidad de Sevilla, Escuela técnica superior de ingenieros, España, 2011. p. 75.

2.1. Sistema de absorción

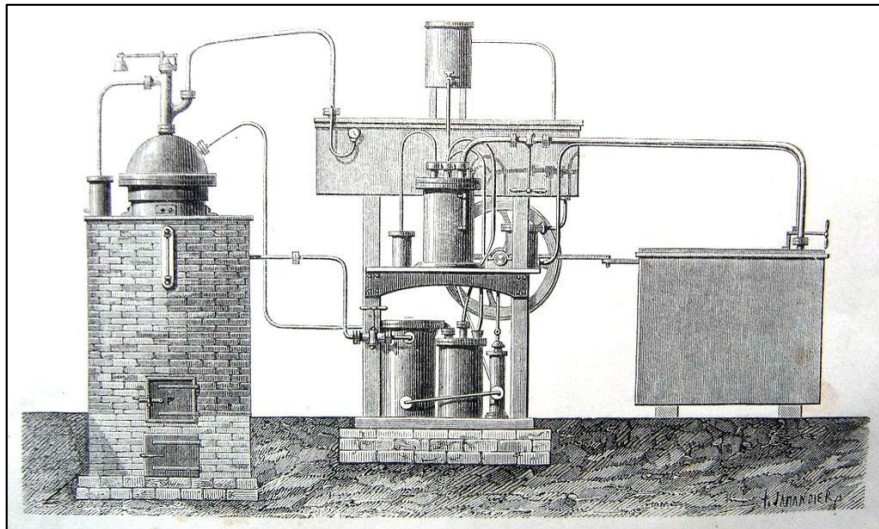
Una forma de refrigeración que se vuelve económicamente atractiva cuando existe una fuente barata de energía térmica a una temperatura de 100 a 200 °C es refrigeración por absorción. Algunos ejemplos de energía térmica barata incluyen energía geotérmica energía solar, calor sobrante de centrales térmicas e incluso gas natural (biogás o metano) cuando este se encuentra a un precio relativamente bajo.

Pueden encontrarse avances de sistemas de refrigeración por absorción desde 1845. Este año, Edmund Carré diseño, construyó y logró vender una máquina que refrigeraba agua potable operando con una mezcla de agua y ácido sulfúrico. Años después, en 1851, su hermano, Ferdinand Carré, realizó con éxito el primer diseño de la primera máquina comercial de refrigeración por absorción que empleaba agua y amoníaco (figura 6). Durante los años siguientes, después de estos inventos, se hallaron numerosos avances para los sistemas, pero solamente de manera empírica.

En 1913, Edmund Altenkirch aportó una primera base teórica al respecto, estableciendo los principios de la termodinámica de mezclas binarias para la absorción. A partir de estos principios surgieron las primeras listas de los componentes cuyas características les permiten trabajar mezclando para la realización de los ciclos.¹²

¹² VILLANUEVA, J. *Máquina refrigeradora por absorción de baja potencia*. [En línea] <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3892/34040-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>

Figura 6. **Máquina de hielo diseñada por Carré**



Fuente: TISSANDIER. *Las Maravillas del Agua*, 4ta edición, Nueva York, Estados Unidos: C. Scribner and Co, 1878

Luego de la segunda guerra mundial, comenzó una era donde se popularizó el uso de la refrigeración por absorción, gracias al uso de la mezcla bromuro de litio y agua. Durante los años siguientes se desarrollaron y comercializaron equipos tanto para uso doméstico como para unidades industriales. En 1945, Carrier vendió el primer equipo de gran capacidad, este trabajaba con 530kW. Los coeficientes de operación de los ciclos con los que trabajan estos equipos no eran muy eficientes, ya que trabajaban con un coeficiente de 0.65. Sin embargo, estos gozaban de una gran aceptación, gracias en gran medida a que el precio del gas era lo bastante bajo durante esas épocas, y el suministro de energía eléctrica carecía de regularidad, ya que los apagones eran comunes en esos tiempos."¹³

Hoy en día, los sistemas de compresión son los que dominan el mercado, sin embargo, con la creciente preocupación por el medio ambiente y el calentamiento global, se está haciendo que la tecnología de absorción recupere parte de este mercado. Con los años, esta tecnología ha logrado avances y

¹³ JULIO, A. y RAMOS, A. *Diseño Y Construcción De Un Sistema De Refrigeración Por Absorción Intermitente Empleando Energía Solar*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Córdoba, Facultad de ingeniería, Colombia, 2018. p. 25.

evolucionado hasta llegar al día de hoy, consiguiendo la disponibilidad de una gran gama de productos con unas fiabilidades muy atractivas y unos rendimientos que anteriores equipos no lograban.

Una de las grandes ventajas de los sistemas de refrigeración por absorción se encuentra en la disminución de la tarifa eléctrica e incluso obviarla totalmente si se hace valer solamente de calores residuales o fuentes de energía renovable, así como el incremento de la eficiencia en los sistemas de cogeneración que valgan al mismo tiempo para la producción de electricidad calor y frío, sin dejar de tomar en cuenta el cuidado del medio ambiente.

Hoy en día, la inversión inicial que requieren los sistemas de absorción son tales que la diferencia de costos de operación no compensa el gasto, debido a que cuestan aproximadamente el doble de los sistemas por compresión de vapor para la misma capacidad. Por ello, si se requiere un éxito comercial se deben de buscar alternativas para reducir los costes de los equipos.

2.1.1. Principio de funcionamiento

Como el nombre implica, un sistema de refrigeración por absorción involucra la absorción de un refrigerante por un medio de transporte. El sistema de absorción más popular usado es el sistema de amoníaco-agua, donde el amoníaco (NH_3) cumple la función de refrigerante y el agua (H_2O) como el medio de transporte. Otros sistemas de refrigeración por absorción incluyen: agua-bromuro de litio; y agua-cloruro de litio. Estos dos sistemas mencionados anteriormente están limitados a aplicaciones como aire acondicionado donde la temperatura mínima está por arriba de la del punto de congelamiento del agua.

Para entender los principios básicos involucrados en la refrigeración por absorción, examinamos el sistema $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ (Figura 2-1). Esta máquina fue patentada por el francés Ferdinand Carré, pocos años después estos equipos eran usados ampliamente en los Estados Unidos de América para la preservación de comida y la creación de hielo. Como se puede ver, este sistema es muy similar a un sistema de ciclo por compresión, sin embargo, el compresor ha sido sustituido por un complejo mecanismo de absorción (que nos referiremos a este como “caja”) que consta de: un absorbedor, bomba de agua, un generador, un regenerador, válvulas de paso, y un rectificador.

Una vez la presión del amoníaco (NH_3) llega a una presión adecuada por medio de los componentes dentro de la caja (esta es su única función), es enfriado y condensado dentro del condensador disipando el calor a sus alrededores, es forzado a la presión del evaporador, y este absorbe el calor del recinto refrigerado a medida que fluye hacia el evaporador.”¹⁴

Muy similar a un sistema convencional de refrigeración con excepción a los procesos que suceden dentro de la caja.

Dentro de dicha caja sucede lo siguiente: el vapor de amonio sale del evaporador y entra el absorbedor, donde este se disuelve y reacciona con el agua para formar $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Esta es una reacción exotérmica; por lo cual el calor es disipado durante este proceso. La cantidad de amoníaco (NH_3) que puede ser disuelto en H_2O es inversamente proporcional a la temperatura.¹⁵

Por lo tanto, es necesario que se enfrié el absorbedor para mantener la temperatura lo más baja posible, lo que hace posible maximizar la cantidad de amoníaco (NH_3) disuelto en agua.

¹⁴ SARABIA, E., SOTO, V. y PINAZO, J. (s.f.). *Refrigeración por Absorción*. En línea <http://personales.upv.es/emsaes/apuntes/FRIO_ABSORCION.html>

¹⁵ Ibídem

La solución líquida $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, la cual es rica en NH_3 , es después bombeada hacia el generador. El calor de la fuente es después transferido hacia la solución para que esta vaporice parte de la solución. El vapor, el cual es rico en amoniaco (NH_3), pasa por el rectificador, el cual separa el agua y la devuelve al generador. El vapor de NH_3 puro a alta presión continúa su trayecto por el resto del ciclo. Luego la solución caliente de $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, la cual es tenue en NH_3 , pasa por el regenerador, donde transfiere algo de calor a la solución rica en NH_3 que está saliendo de la bomba, y es estrangulada a la presión del absorbedor.

A comparación de los sistemas de vapor-compresión, la refrigeración por absorción tienen una ventaja muy grande la cual es: un líquido es comprimido en vez de vapor. El trabajo de flujo constante es proporcional al volumen específico, lo que hace que el trabajo suministrado por la refrigeración por absorción sea bastante bajo (en el sentido que 1 % del calor suministrado al generador) y con frecuencia descuidado en el análisis del ciclo. La operación de estos sistemas es basada en la transferencia de calor de fuentes externas. Por lo tanto, el sistema de refrigeración por absorción está clasificada como un: “*heat-driven system*” o sistema impulsado por el calor.¹⁶

2.1.2. Rendimiento de los equipos

El coeficiente COP es la manera de indicar la eficiencia que un sistema de producción de frío puede llegar a alcanzar. Cuanto mayor sea el coeficiente, menor es la cantidad necesaria para producir la misma cantidad de frío, y puede variar en función de las condiciones en las que esté operando el equipo.

El coeficiente COP para un sistema de refrigeración por absorción está definido por:

$$COP_{Absorción} = \frac{\text{Frío obtenido}}{\text{Combustible utilizado}} = \frac{Q_L}{Q_{Generador} + W_{Bomba}} \cong \frac{Q_L}{Q_{Generador}}$$

¹⁶ Srihirin, P., Aphornratana, S. & Chungpaibulpatana, P. 2001. A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Países Bajos: Elsevier, 5. p. 343-372.

El coeficiente máximo de COP de un sistema de refrigeración por absorción puede ser determinado asumiendo que todo el ciclo es totalmente reversible (el ciclo no involucra irreversibilidades, ni transferencia de calor de un diferencial de temperatura). El sistema de refrigeración sería reversible si el calor de la fuente ($Q_{\text{Generador}}$) fuera transferida a un motor de ciclo Carnot, y el trabajo producido de este motor de calor ($W = \eta_{x,rev} \cdot Q_{\text{gen}}$) es suministrado a un refrigerador con ciclo de Carnot para remover el calor del espacio refrigerado. Note que:

$$Q_L = W \cdot COP_{R,rev} = \eta_{x,rev} Q_{gen} COP_{R,rev}$$

Debido a esto, el COP general de un sistema de refrigeración por absorción que trabaja bajo condiciones reversibles sería:

$$COP_{rev,Absorción} = \frac{Q_L}{Q_{Gen}} = \eta_{x,rev} COP_{R,rev} = \frac{T_L(T_s - T_0)}{T_s(T_0 - T_L)}$$

Donde:

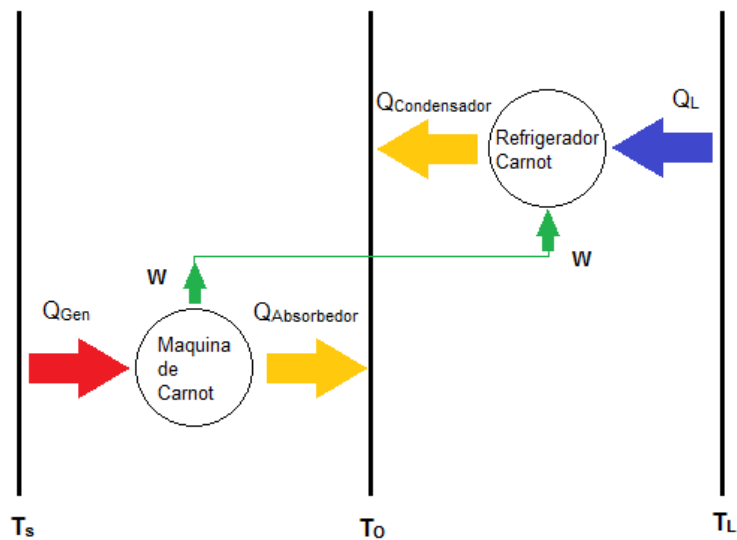
- T_L = Temperatura de refrigerante en evaporador
- T_0 = Temperatura del absorbedor
- T_s = Temperatura en el generador

Entonces en este caso el COP ideal solamente se podría obtener en un sistema trabajando a temperaturas y condiciones iguales a la del ciclo de Carnot. Se puede observar en la expresión anterior (ecuación 2-3) que el COP ideal es igual al producto de la eficiencia de una máquina de Carnot operando entre T_s y T_0 y un refrigerador de Carnot operando entre T_0 y T_L como se puede ver en la siguiente expresión:

$$COP_{rev,Absorción} = \frac{Q_{Transferido}}{Q_{Generado}} = \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L} \right) \left(\frac{T_s - T_0}{T_s} \right) = COP_{Carnot} \cdot \eta_{Carnot} \quad 2-4$$

Entonces, el sistema ideal de refrigeración por absorción puede ser considerado un sistema combinado que consiste en una máquina de Carnot y un refrigerador de Carnot, como puede ser apreciado en la siguiente imagen:

Figura 7. **Esquema de ciclo de refrigeración por absorción**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio (2020).

Por lo tanto, el COP de un ciclo completamente reversible incrementa conforme la temperatura del generador (T_s) y la del evaporador (T_L) incrementan y el calor rechazado (T_0) disminuye. Sin embargo, el COP de un sistema real será mucho menor al de COP de un sistema completamente reversible, esto debido a las irreversibilidades internas y externas de sistemas que operan en condiciones reales.

En la siguiente tabla (tabla VII) se muestran valores de COP de diferentes tipos de sistemas por absorción que operan con gas natural.

Tabla VII. **COP de una máquina de frío por absorción a gas natural**

Tipo de sistema de absorción	COP a plena carga
Simple efecto	0,6 – 0,7
Doble efecto	1,0 – 1,2
Triple efecto	1,6 – 1,7

Fuente: FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, pp.19

En comparación con otros sistemas de refrigeración, un sistema por absorción puede llegar a requerir hasta 5 veces más energía que un sistema que use el ciclo de compresión. Podemos tomar por ejemplo el COP de un sistema de aire acondicionado por absorción el cual es de aproximadamente 0,7 en comparación con el de un sistema que usa un ciclo de compresión cuyo COP es de 3,5. La diferencia está en que un ciclo por absorción usa energía térmica y no energía eléctrica.¹⁷

A pesar de que es menos eficiente, el producir energía térmica es mucho más barato que la energía eléctrica e incluso en algunos casos puede llegar hasta ser gratis o el producto de calor perdido de algún proceso tales como: vapor, agua caliente, gas natural y energía solar en algunos casos. Por lo cual la energía térmica es ideal para sistemas de absorción.

¹⁷ Absorsistem. *Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua*. [En línea] <https://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-simple-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua>. [Consulta: 21 de octubre de 2020]

Las siguientes características afectan el rendimiento de un sistema por absorción:

- Mientras más alto sea el suministro de temperatura del generador, mayor será su COP.
- Mientras más alta sea la temperatura de la evaporación del refrigerante mayor será su COP.
- Mientras menor sea la temperatura ambiente (o del medio) para disponer el calor perdido, mayor será el COP.
- Sistemas de absorción mejorados que usan generadores de doble y triple efecto pueden llegar a mejorar su COP hasta 1,2 y 1,7 respectivamente.¹⁸

2.1.3. Clasificación de los sistemas de absorción

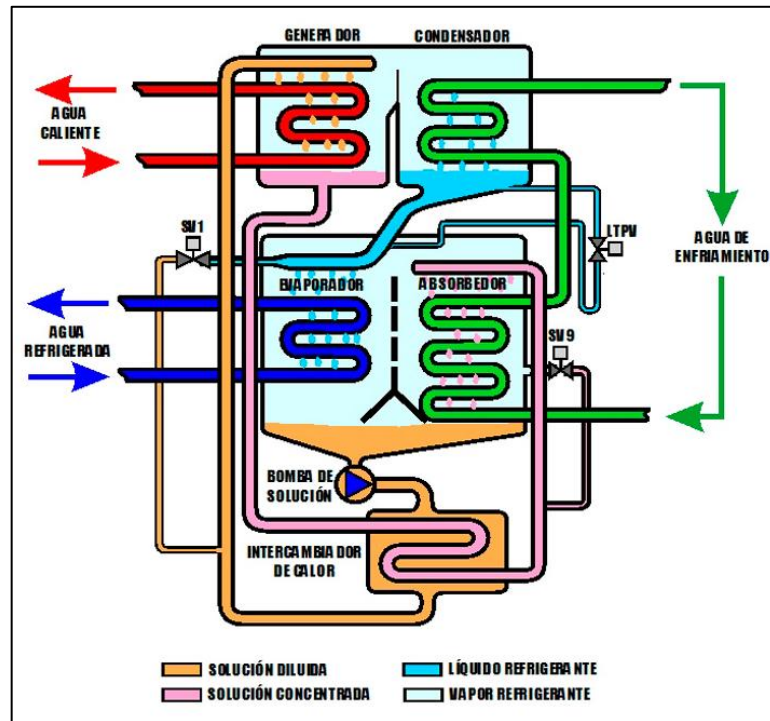
La clasificación de los sistemas de absorción se puede definir en función de varios criterios: según el tipo de ciclo o según las sustancias que lo compongan.

2.1.3.1. Según el ciclo de absorción

- De simple efecto: Es de una única etapa de generación, o de separación del refrigerante y el absorbente (figura 8).

¹⁸ Absorsistem. *Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua*. [En línea] <<https://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-simple-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua.>> [Consulta: 21 de octubre de 2020]

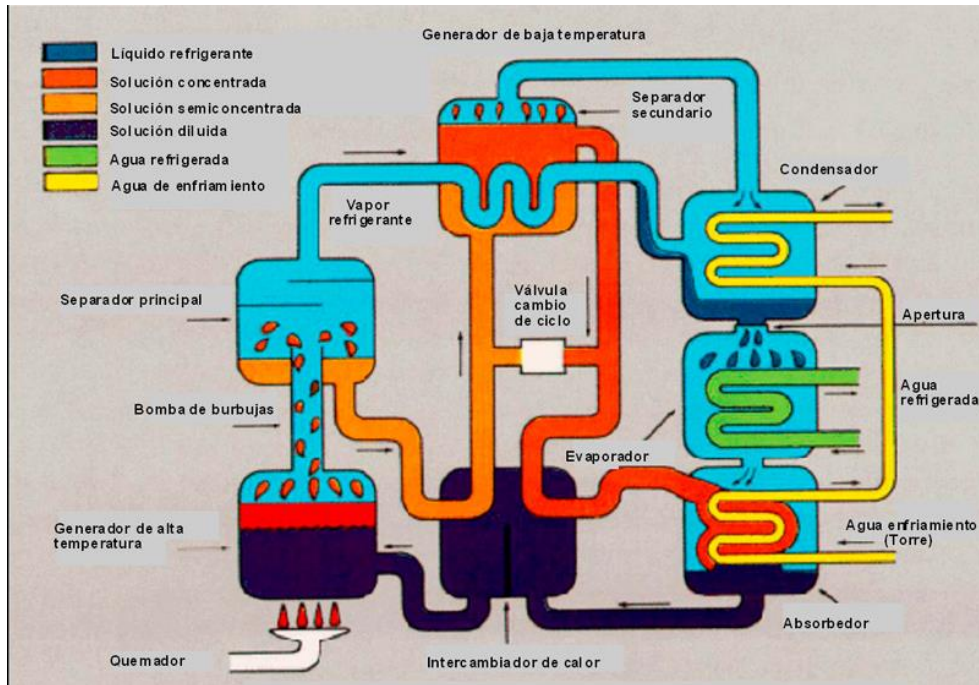
Figura 8. Ciclo de absorción LiBr-H₂O de efecto simple



Fuente: Absorsistem. *Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua.* [En línea] <<https://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-simple-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua>> [Consulta: diciembre 2020]

- De doble efecto: a este se le debe de agregar un condensador y un intercambiador de calor más al ciclo. Debido a esto la eficiencia del ciclo llega a superar al del ciclo de simple efecto. En la etapa de alta temperatura, la primera de las dos, la solución recibe el calor directamente del quemador y en la etapa de baja temperatura, este recibe el calor por medio de un intercambiador, del vapor del refrigerante antes de que haya pasado al condensador (figura 9).

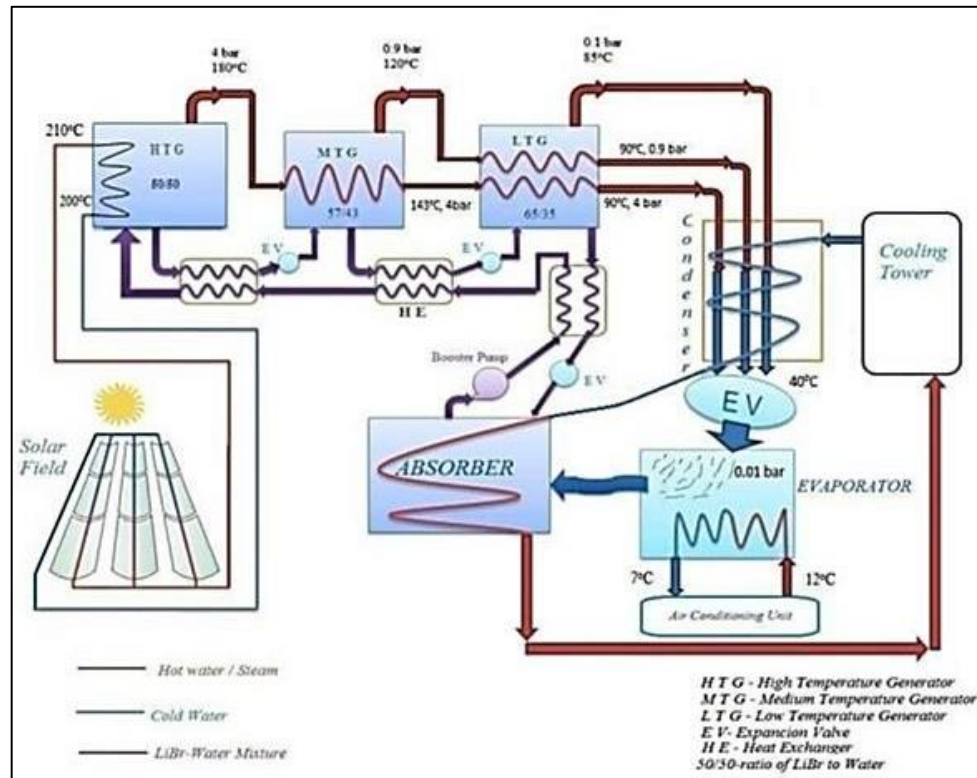
Figura 9. **Ciclo de absorción LiBr-H₂O de doble efecto**



Fuente: Absorsistem. *Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua.* [En línea] <<https://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-simple-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua.>> [Consulta: diciembre 2020]

- De triple efecto: funciona de una forma parecida al de doble efecto, con la diferencia de que este agrega un nuevo condensador e intercambiador.

Figura 10. Ciclo de absorción LiBr-H₂O de triple efecto



Fuente: RATHER, N. 2018. Performance evaluation and COP calculation of Triple effect vapour Absorption machine working on Solar Energy. *International Journal of Current Engineering and Technology*. Estados Unidos: Inpressco, Vol 8, No. 1, pp. 61-65.

2.1.3.2. Según la sustancia que componga la solución

En la refrigeración por absorción se tienen 2 componentes: el refrigerante y el absorbente. Los cuales, a las presiones y temperaturas utilizadas en el ciclo de refrigeración, coexisten tanto en la fase de vapor y líquida, como en vapor y sólida. La evaporación del refrigerante a partir de una solución líquida se puede remplazar por evaporación a partir de una fase sólida. Dentro de esta gran

variedad de posibilidades, existe la dificultad de hacer una selección adecuada. Por lo tanto, se consideran las siguientes cualidades a la hora de la selección: fisiología, estabilidad química, influencia sobre los productos a enfriar, toxicidad, capacidad de ser detectado a la hora de las fugas y precio.

El conjunto de sustancia más comúnmente usado en la industria es el de amoniaco-agua y el bromuro de litio-agua. En la tabla VII, se presentan los principales conjuntos de refrigerantes y absorbedores usados en las diferentes tecnologías de absorción. El rendimiento de un sistema de refrigeración por absorción está vinculado con las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo.

Tabla VIII. **Sustancias de trabajo comunes en sistemas de absorción**

Refrigerante	Absorbente		Temperatura (°C)	
			Evaporación	Generación
Absorción gas – líquido				
Amoniaco	Agua-NaSCN	LiNO ₃	< 0	120 - 200
Agua	LiBr, LiCl		> 0	80 - 200
Monometilamina	Agua		> 0	60 - 150
Absorción gas – sólido				
Amoniaco	MnCl ₂ SrBr ₂ CdCl ₂	PbCl ₂ LiCl ₂ BaCl ₂	< 0	120 - 150
	CaCl ₂	FeCl ₂		
	ZnCl ₂	NiCl ₂		
	CuCl ₂	MgCl ₂		
	SnCl ₂			
Monometilamina	Lic., CaCl ₂		> 0	60 - 150

Fuente: RUBIO, J. Ciclos de Refrigeración por Absorción. [En línea]

<<https://www.mundohvacr.com.mx/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion>> [Consulta: 20 de octubre de 2020]

2.1.4. Descripción del ciclo de absorción simple

Cuando se refiere al ciclo simple de absorción, se puede notar que el compresor ha sido sustituido por un sistema de absorción conformado por un absorbedor y un generador, y para ciertos casos una bomba. Este sistema realiza la misma función que un compresor para un ciclo de compresión, elevar la presión del refrigerante del nivel bajo al alto. Tanto el condensador como el generador trabajan a alta presión mientras que el evaporador y el absorbedor lo hacen a baja presión.¹⁹

El fluido utilizado en el ciclo de refrigeración por absorción puede ser una combinación de gas-líquido o gas-sólido. Las combinaciones más comunes son las de gas-líquido entre ellas agua-amoniaco y agua-bromuro de litio. Para describir el ciclo de absorción simple nos enfocaremos en la combinación de agua-Bromuro de litio.

Esta solución se compone de agua, la cual actúa como refrigerante y bromuro de litio (LiBr) como el absorbente. El LiBr es una sal muy similar a la sal común, las cuales tienen una gran afinidad con el agua, absorbiéndola fácilmente. La mayoría de las máquinas de absorción comerciales disponibles requieren una bomba para el transporte de la solución diluida desde el absorbedor hasta el generador. El consumo eléctrico de esta bomba es aproximadamente de 1 % a 5 % de la potencia de refrigeración total.

Como se puede apreciar en la Figura 6, existe un intercambiador entre la solución diluida y la solución concentrada, que permite precalentar el fluido que se dirige hacia el generador. El recuperador de calor que trabaja entre el absorbedor y el generador ayuda a aumentar la eficiencia del equipo.

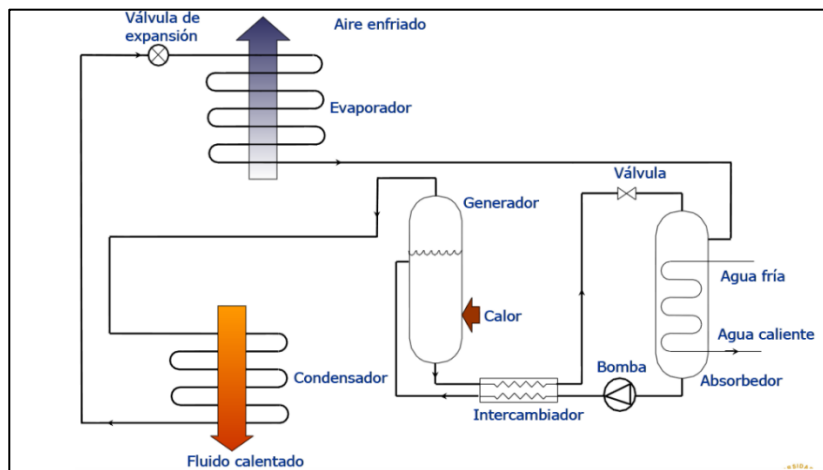
Los equipos de absorción, al igual que los de compresión de vapor, se basan en el principio de la condensación y la evaporación de un refrigerante para la obtención

¹⁹ NIETO, A. 2008. *Ciclos de Refrigeración por Absorción*. [En línea] <[https://www.mundohvacr.com.mx/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion/#:~:text=De%20acuerdo%20a%20la%20figura,expansi%C3%B3n%20\(v%C3%A1lvula%20de%20expansi%C3%B3n\)>](https://www.mundohvacr.com.mx/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion/#:~:text=De%20acuerdo%20a%20la%20figura,expansi%C3%B3n%20(v%C3%A1lvula%20de%20expansi%C3%B3n)>)>

de frío. La principal diferencia entre estos ciclos es cómo este pasa de la zona de baja presión a la de alta presión. En lo mencionado anteriormente, un sistema convencional por compresión de vapor utiliza un compresor mecánico, mientras tanto el sistema por absorción utiliza un sistema por absorción, el cual es un proceso más complejo. El refrigerante vaporizado en la zona de baja presión es captado por la solución absorbente (que comúnmente es agua-bromuro de litio). Luego la mezcla se bombea a la zona de alta presión, y la separación absorbente-refrigerante se produce la aportación de calor.²⁰

Una de las ventajas está en que el trabajo de bombeo es mucho menor que el necesario para mover el compresor en un ciclo de compresión mecánica, con lo que resulta en un ahorro energético. Incluso para sistemas de refrigeración por absorción más pequeños, es posible omitir la bomba por completo. El funcionamiento del sistema se describe en la figura 8 que representa el proceso de una máquina de absorción de simple efecto.

Figura 11. **Funcionamiento de máquina de absorción de simple efecto**



Fuente: VICENTE, J. *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por absorción*. Proyecto de fin de carrera. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, 2015. pp. 45.

²⁰ RUBIO, J., 2016. *Ciclos de Refrigeración por Absorción*. [En línea] <<https://www.mundohvacr.com.mx/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion>> [Consulta: 20 de octubre de 2020]

Mediante el aporte de calor (puede venir de varias fuentes como energía solar, mecheros, etc.) se produce la evaporación de parte del agua de la solución de LiBr-H₂O, concentrándose en dicha solución. El vapor de agua (el refrigerante) se dirige al condensador, mientras que la solución concentrada se dirige al absorbedor. Dado que el bromuro de litio (el absorbente) no es muy volátil, en condiciones normales de funcionamiento no debe producirse el arrastre de gotas de solución en el proceso de evaporación, o si se produce serán en cantidades despreciables.

Una vez llegado al condensado, el vapor de agua cede calor latente y por consecuencia este se condensa. En condiciones normales, la condensación del vapor de agua se realiza mediante otra corriente de agua, que circula por el lado de los tubos. Por lo tanto, es necesario enfriar esta agua y normalmente se puede hacer mediante una torre de enfriamiento para retirar dicha energía sobrante. Se tendrá en cuenta que puede haber equipos que condensan con aire. La presión de trabajo del condensador varía mucho en función del refrigerante que se está empleando.

Tras abandonar el condensador, el refrigerante se dirige hacia el evaporador, pero antes debe pasar por la válvula de expansión para reducir su presión lo necesario para que se produzca la evaporación a la temperatura correcta. Aquí nuevamente hay distinciones dependiendo del refrigerante que se usa. En el caso del vapor de agua, la diferencia de presiones para temperaturas típicas de funcionamiento de una máquina de absorción pequeña, por lo que con un dispositivo que produzca una pequeña pérdida de carga es suficiente. Sin embargo, si el refrigerante es amoníaco, la diferencia de presiones es muy alta, por lo que si es necesario emplear una válvula de expansión para producir la pérdida de carga necesaria.

Luego de disminuir su presión, el refrigerante llega al evaporador. En él, el refrigerante se evapora tomando la energía necesaria de otra corriente (normalmente agua) produciéndose en dicha corriente el efecto frigorífico. Es de importancia indicar la necesidad de que no se cree arrastre de absorbente, ya que esto modificaría la presión de trabajo en el evaporador y también esto pudiera ocasionar la cristalización del bromuro de litio. En cuanto a las presiones de trabajo, en caso de trabajar con vapor de agua como refrigerante, seguirá trabajando por debajo de la presión atmosférica, un poco más aun, mientras que si empleamos amoniaco seguiremos trabajando con presiones mayores a la atmosférica, aunque no tanto como el condensador.

El refrigerante deja el evaporador dirigiéndose hacia el absorbedor para cerrar el ciclo. Para ello se pone en contacto el refrigerante (vapor de agua) y la solución concentrada que proviene del generador. La solución concentrada absorbe el vapor de agua diluyéndose la solución, volviendo a las condiciones de partida. Este proceso de mezcla es exotérmico, por lo tanto, es necesario evacuar el calor generado para que este no eleve la temperatura del absorbedor y se recaliente el proceso de mezcla. Para ello se emplea una corriente auxiliar de agua que evacua dicha energía y luego la disipa en lo que puede ser el ambiente o comúnmente una torre de enfriamiento. Normalmente, es la misma corriente de agua la que se usa para refrigerar el absorbedor y el condensador, pero primero pasa por el absorbedor y luego por el condensador.

“Una vez se ha producido la mezcla, la bomba se encarga de elevar la presión de la solución hasta la presión de trabajo (cabe mencionar que se han producido pérdidas de carga en el paso del condensador al evaporador) e impulsarla al generador.”²¹

²¹ VICENTE, J. *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por absorción*. Proyecto de fin de carrera. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, 2015. p. 45.

Por último, antes de llegar al generador, la solución pasa por un intercambiador de calor onde entra en contacto indirecto con la solución concentrada que proviene del generador y se dirige al absorbedor, disminuyendo la temperatura de esta, y aumentando la suya. Con esto se consigue bajar las necesidades de refrigeración del absorbedor y también disminuye el aporte energético necesario a realizar en el generador.

2.1.5. Ciclos mejorados de absorción

Hoy en día en la industria, siempre es indispensable está buscando maneras más eficientes de realizar un trabajo, en el caso de la refrigeración por absorción también se buscan mejoras en su rendimiento, así como la reducción de tamaño y el peso de los equipos necesarios para su funcionamiento.

2.1.5.1. Ciclo de absorción de doble efecto

Una máquina de refrigeración por absorción de doble efecto es aquella que incorpora al ciclo de absorción simple una etapa más para mejorar su rendimiento. Para lograr esto, al sistema se le debe de agregar nuevos equipos para obtener la etapa extra, dichos equipos son un segundo condensador, intercambiador de calor y generador. Los de doble efecto son posibles en las máquinas que emplean la combinación de LiBr-H₂O, por que trabajan con niveles de presión muy bajos, al contrario que en el caso de par H₂O-NH₃. Introducir una segunda etapa en los ciclos de NH₃ elevaría la temperatura hasta un nivel en el que el aumento de la presión sería excesivo y por ende peligroso.

Los ciclos simples de LiBr-H₂O, trabajan en un rango de temperaturas de entre 70 a 90 °C, mientras que los ciclos de doble efecto pueden llegar a alcanzar un rango de temperaturas mayor, que comprenden de entre 140 a 180 °C. El incremento de temperatura que conlleva al aumento de coeficiente COP, que pasa de ser de entre un 0,65 – 0,75 a duplicarlos, 1,2 – 1,35. Este aumento es debido a que se ha incorporado un generador, un condensador y un intercambiador de calor (solución-

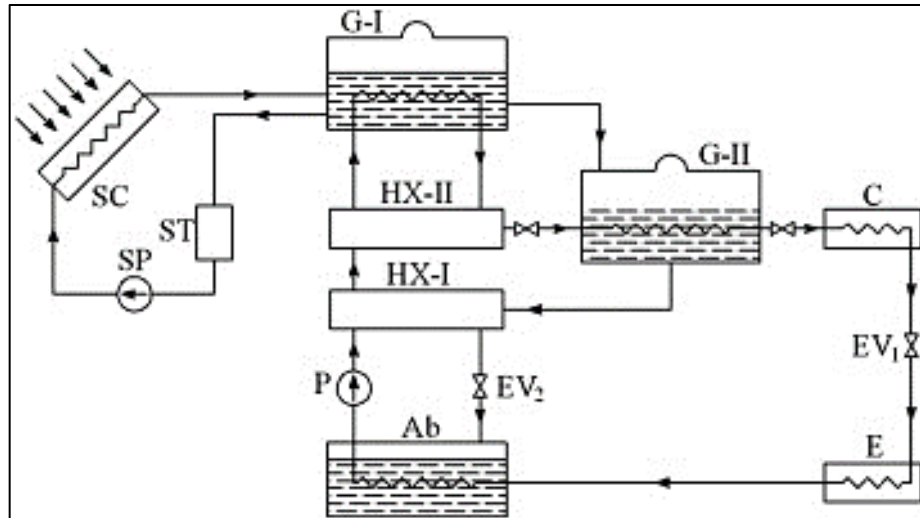
solución). Pero se debe recalcar que estos valores son teóricos, ya que siempre se encuentran la presencia de irreversibilidades, las cuales son causadas por las transferencias térmicas entre el absorbedor y el condensador secundarios, así como en los intercambiadores de temperatura, hacen que no sean los que se han obtenido hasta el momento en las máquinas comercializadas (0,8 – 1,0), a esto se le debe de agregar el aumento en el costo de la máquina, ya que se requiere de equipo extra para trabajar.²²

El funcionamiento de los ciclos de simple y doble efecto es muy similar, y se distinguen en que en los ciclos de doble efecto hay una mayor cantidad de corrientes. Para poder explicar el funcionamiento de un ciclo de absorción de doble efecto se observará su representación gráfica (figura 12).

La tecnología usada para un equipo de refrigeración por absorción de doble efecto incrementa la eficiencia del sistema usando una fuente de calor a mayor temperatura.

²² FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, p.22-29.

Figura 12. **Diagrama de una máquina de absorción de doble efecto**
LiBr-H₂O



Fuente: SARBU, I. *Solar Heating and Cooling Systems*, Capítulo 7, 1ra edición, Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier Inc, 2017.

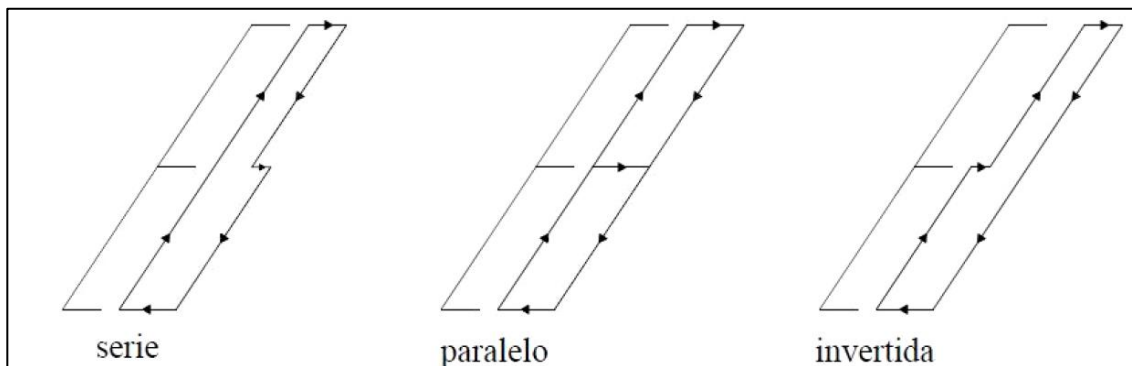
Suponga que el inicio del ciclo (Ver Figura 12) es en el generador de alta temperatura (G-I) el cual provee de calor al generador de baja temperatura (G-II). El condensador (C) disipa el calor en el ambiente y envía el líquido de trabajo hacia el evaporador (E), en esta etapa es donde la refrigeración ocurre. Luego, los fluidos pasan por los intercambiadores de calor (HX-I & HX-II) desde el absorbedor (Ab) hacia el generador de alta temperatura (G-I) por medio de una bomba (P).²³

Por medio de este proceso, el intercambiador de calor (HX-II) puede llevar el fluido hacia el generador de baja temperatura (G-II), y luego el generador (G-II) envía los fluidos hacia el intercambiador de calor (HX-I). Este ciclo incluye tres diferentes niveles de presiones: alta, media y baja.

²³ SARBU, I. *Solar Heating and Cooling Systems*, Capítulo 7, 1ra edición, Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier Inc, 2017.

Los sistemas de refrigeración por absorción de doble efecto pueden ser contruidos de tres maneras diferentes, las cuales son: en serie, paralelo e invertida. Estas configuraciones se pueden apreciar en la Figura 13 de forma esquemática.

Figura 13. **Configuraciones de ciclos de absorción de doble efecto**



Fuente: VICENTE, J. *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por absorción*. Proyecto de fin de carrera. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, 2015. p 46.

- Configuración en serie: la solución concentrada procedente del absorbedor se dirige hacia el generador de alta temperatura y luego entra al de baja temperatura.
- Configuración en paralelo: el flujo saliente del absorbedor se divide en dos para alimentar de forma independiente a los generadores.
- Configuración invertida: al contrario que la configuración en serie, la solución concentrada entra primero en el generador de baja temperatura y luego en el de alta.

2.1.5.2. Ciclo de absorción de triple efecto

Como dice el nombre, este método se trata de añadir un componente más a la máquina para poder producir un tercer efecto en el ciclo. Los equipos que deben añadirse son un nuevo generador y condensador, que trabajen a una temperatura superior a la del generador de alta temperatura del ciclo de doble efecto. La temperatura a la que trabaja un generador de alta temperatura en un ciclo de doble efecto se encuentra entre 140 a 180 °C, por lo que es necesario una fuente de energía extrema que le pueda proveer temperaturas muy elevadas.²⁴

La mayor eficiencia se logra conseguir colocando los tres generadores en serie, pero en caso de colocar el tercero en paralelo se mejora la operación del equipo a costa de reducir el rendimiento. Hay una gran variedad de posibles configuraciones para los ciclos de triple efecto. Sin embargo, la mayoría de estos siguen en fase de investigación y aún no han llegado estos equipos al mercado comercial. Debido a esto, no hay certeza de cuál es la configuración más aconsejable.

2.2. Equipos característicos

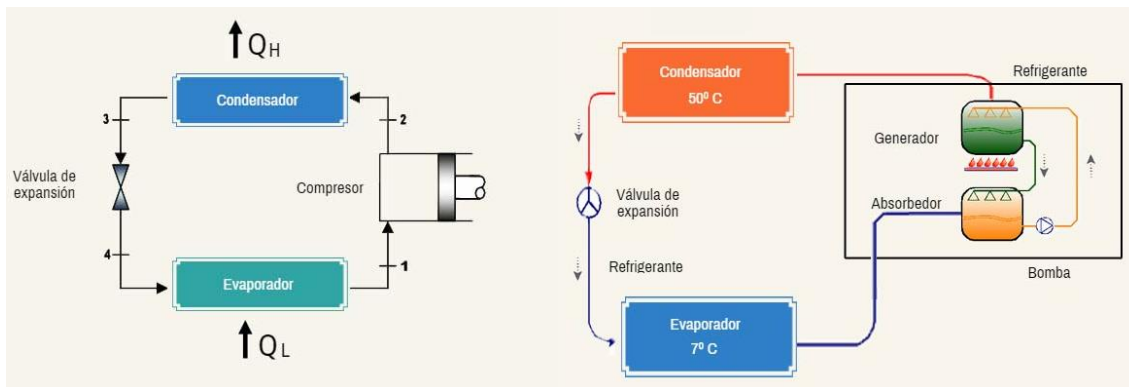
Un sistema de refrigeración por absorción está compuesto por los siguientes componentes: el absorbedor, el generador, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador. Algunos de estos componentes son comunes en sistemas de refrigeración más convencionales, sin embargo, los componentes más característicos de los sistemas por absorción son el absorbedor y el generador. A estos sistemas también se les puede agregar intercambiadores de calor y rectificadores. El equipo normalmente está compuesto por un recipiente de acero, dentro el cual se ubica el condensador, el evaporador y el absorbedor. Si el sistema usara amoniaco, ninguno de los componentes puede estar usando

²⁴ FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Tesis de licenciatura. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, p. 29.

cobre y sus aleaciones ya que son incompatibles y este atacará el cobre corroyéndolo. Esto puede causar una pérdida de eficiencia del equipo y podría acortar su vida útil considerablemente.

En comparación con un sistema de refrigeración que usa el ciclo de compresión se pueden ver (ver figura 14) que muchos elementos como lo es el condensador y el evaporador siguen siendo iguales. La diferencia más notoria se puede observar en que el sistema de refrigeración por absorción no hace uso de un compresor compresión para aumentar de presión y de temperatura el refrigerante. El ciclo por absorción hace uso de un absorbedor y generador para poder llevar el refrigerante a las condiciones ideales para que siga al condensador. En las siguientes secciones se desarrollará el funcionamiento de los diferentes componentes que comprende un equipo de refrigeración por absorción.

Figura 14. **Comparación de un sistema por compresión frente a un sistema por absorción**



Fuente: ARNABAT, I., 2007. *Sistemas de refrigeración aire acondicionado: compresión y absorción*. [En línea] <<https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-instalaciones-componentes/sistemas-de-refrigeracion-compresion-absorcion.html>> [Consulta: 20 de febrero 2021]

2.2.1. Absorbedor

Unos de los componentes más importantes en los sistemas de absorción, el absorbedor es un dispositivo que está diseñado para poner en contacto dos corrientes. Dentro de este el vapor de refrigerante es absorbido por el absorbente y como proceso exotérmico este es evacuado al agua de enfriamiento que circula a través de los tubos en el interior del absorbedor.

La absorción del vapor del refrigerante crea una zona de baja presión dentro del absorbedor que gracias a la afinidad del absorbente por el agua (en caso de BrLi-H₂O) induce un flujo continuo de vapor refrigerante desde el evaporador.

Para el caso de NH₃-H₂O, la alimentación de la corriente rica en amoníaco debe de realizarse por la parte baja del tanque mientras que la solución pobre en amoníaco es alimentada por la parte superior. Esto es necesario para evitar que el amoníaco escape en forma de gas sin disolverse en la solución pobre. El diseño de los absorbedores es un punto de gran importancia, originado por la complejidad de los procesos de transferencia de masa y calor. Un intercambio de calor eficiente en el absorbedor depende especialmente de un mezclado óptimo entre el vapor y la solución de trabajo y de la máxima área de contacto entre la pared del intercambiador de calor y la solución. Como este componente estará encontrado con el amoníaco no debe contener cobre ya que este lo ataca y corre acortando su vida útil.²⁵

Los absorbedores se pueden clasificar atendiendo a la trayectoria continua o discontinua de las fases líquida y de vapor; así, se pueden encontrar absorbedores con fase líquida y vapores continuos, con fase vapor continuo y de líquido discontinua y por último aquellos que en la fase de vapor es discontinua y la fase líquida continua.

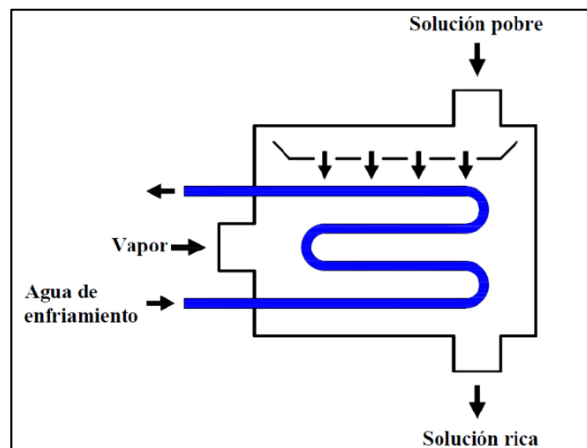
- Absorbedores con fases vapor y líquido continuo: en este tipo de absorbedores, la fase líquida está conformada por una película

²⁵ ROCA, L. 2001. *Refrigerantes naturales: los equipos de absorción como alternativa ecológica en la climatización*. [En línea] <www.energuia.com>

descendente en contacto con la fase de vapor; las configuraciones de los tubos disponibles pueden ser tanto verticales como horizontales.

La configuración de tubos horizontales es la más usada comercialmente por las enfriadoras de agua de BrLi-H₂O. La configuración de tubos verticales tiene la ventaja que es más versátil, ya que puede usarse agua de enfriamiento o aire para la disipación de calor generado. Solamente que su buen funcionamiento depende significativamente de la existencia de una buena distribución de solución.

Figura 15. **Absorbedor con flujos líquidos y vapor continuo**



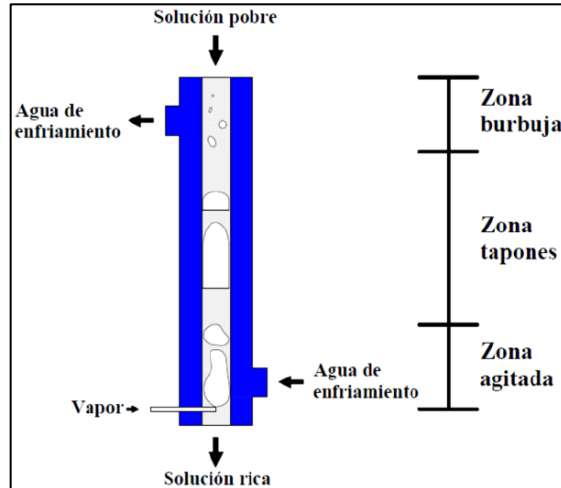
Fuente: BRAVO, J. 2011. *Estudio Analítico De La Transferencia De Calor En Un Absorbedor De Burbujas* [En línea]

<<https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/12646/1/TESIS%20DE%20MAESTRIA%20JAIME%20BRAVO%20MENDEZ.pdf>>

- Absorbedores con flujo líquido continuo y vapor discontinuo: Estos absorbedores se encuentran inundados, esto quiere decir que en el interior del canal central se encuentra lleno de mezcla pobre y el refrigerante es introducido en forma de burbujas. La refrigeración del equipo se realiza mediante agua que circula por el exterior del dispositivo. Con el objetivo de aumentar la capacidad de absorción, se suele instalar en la parte inferior

canales de distribución de vapor de refrigerante y solución pobre; mientras que se recoge la solución rica en la parte superior mediante un recolector.²⁶

Figura 16. **Absorbedor con flujo líquido y vapor discontinuo**



Fuente: BRAVO, J. 2011. *Estudio Analítico De La Transferencia De Calor En Un Absorbedor De Burbujas*. [En línea]

<<https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/12646/1/TESIS%20DE%20MAESTRIA%20JAIME%20BRAVO%20MENDEZ.pdf>>

Absorbedores con fases vapor discontinuo y líquido continuo: Este tipo de configuración separa las acciones de absorción del vapor y disipación del exceso de temperatura. Inicialmente se ponen en contacto las fases líquida y gaseosa. Luego de finalizar la absorción, la corriente con concentración rica en refrigerante se introduce en un intercambiador de calor para disipar el calor de la reacción. Finalmente, la solución se divide en dos flujos donde uno se dirige al generador y el otro es devuelto al absorbedor.²⁷

²⁶ BRAVO, J. 2011. *Estudio Analítico De La Transferencia De Calor En Un Absorbedor De Burbujas*. [En línea]
<<https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/12646/1/TESIS%20DE%20MAESTRIA%20JAIME%20BRAVO%20MENDEZ.pdf>>

²⁷ BRAVO, J. 2011. *Estudio Analítico De La Transferencia De Calor En Un Absorbedor De Burbujas*. [En línea]
<<https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/12646/1/TESIS%20DE%20MAESTRIA%20JAIME%20BRAVO%20MENDEZ.pdf>>

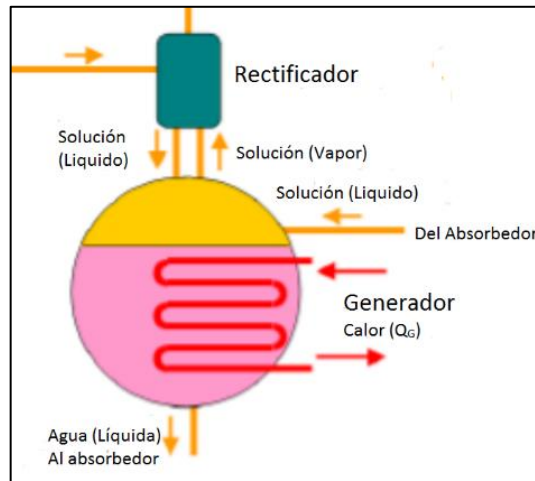
Debido a que la absorción se produce de forma adiabática, la temperatura de la solución se eleva provocando que el proceso se detenga cuando la suma de presiones de saturación y capilar alcanza el nivel de la presión de la cámara.

La presión de la capilaridad que provoca la tensión superficial de las gotas es inversamente proporcional al diámetro de las propias gotas. Para que suceda la absorción, se requiere superar la presión capilar de la gota. Si se ha de dar esta situación, la presión del absorbedor debe de ser superior a la suma de las presiones de saturación de la solución y capilar de la gota. De esto se puede inferir un diámetro óptimo para que el tubo dé una absorción máxima.

2.2.2. Generador

En el generador es donde se aplica la energía térmica para obtener vapor de refrigerante. La fuente de energía la cual es normalmente agua caliente fluye a través de tubos inmersos en una solución de refrigerante y absorbente. Esta solución absorbe el calor de la fuente a alta temperatura, lo que hace que la solución se evapore. Luego se separan el refrigerante del absorbente, al hacerlo evapora y recupera parte del absorbente al separarlo de la solución líquida. Para lograr una separación eficiente en equipos que emplean una mezcla de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, es necesario instalar un rectificador adicional al sistema.

Figura 17. Esquema de generador para sistema de absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$



Fuente: BRAVO, J. 2011. *Estudio Analítico De La Transferencia De Calor En Un Absorbedor De Burbujas*. [En línea]

<<https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/12646/1/TESIS%20DE%20MAESTRIA%20JAIME%20BRAVO%20MENDEZ.pdf>>

2.2.3. Condensador

El condensador es uno de los componentes que más relación tiene con la eficiencia de un sistema de refrigeración independiente si es por compresión de vapor, absorción o adsorción. A pesar de su importancia en el funcionamiento tal del sistema, el funcionamiento de este es muy sencillo en cuanto a su estructura y el proceso que realiza.²⁸

Al condensador llega el vapor del refrigerador que proviene del generador (o del rectificador si lo hubiese). Una vez en el condensador, este se condensa hasta llegar a líquido. Para que se dé este cambio de fase en el refrigerante es necesario extraerle el calor, disipándolo en el ambiente por medio de la superficie exterior del condensador.

²⁸ VICENTE, J. *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por absorción*. Proyecto de fin de carrera. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, 2015. p. 31.

Los materiales de construcción usados comúnmente en la fabricación del serpentín de los condensadores pueden ser de tubos de cobre con aletas de aluminio o totalmente de aluminio. Sin embargo, si estos equipos van a estar en contacto con el amoniaco, no es posible usar cobre como material debido a su reacción con el amoniaco, lo cual puede llegar a atacar y dañar el equipo.

2.2.4. Válvula de expansión

Para realizar el proceso de producción de frío, el ciclo maneja dos niveles de presión para ciclos simples y tres para ciclos dobles. Debido a estas presiones es por lo que el dispositivo de expansión es muy importante, dado que es el que permite pasar de la zona de alta presión a la zona de baja presión. A este efecto se le llama efecto Joule-Kelvin.

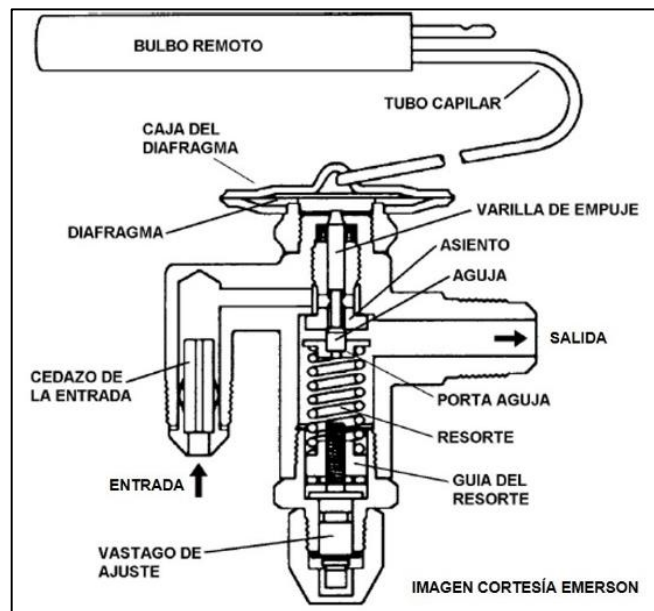
El efecto Joule-Kelvin hace que el refrigerante que originalmente se encuentra como líquido saturado a altas temperaturas y presión cambie evaporándose parcialmente y bajando ambas. Luego de la válvula de expansión el refrigerante pasa al evaporador, donde esta evaporación parcial pasa a ser total. Las válvulas de expansión son usadas en equipos de refrigeración y de aire acondicionado, sin embargo, no son usadas en equipos domésticos como refrigeradores. Las válvulas de expansión están hechas normalmente de hierro, aluminio, bronce y cobre. No es recomendable usar esta última cuando en el sistema se esté usando amoniaco ya que este puede acortar la vida útil de la válvula.²⁹

Las refrigeradoras domésticas, en cambio, usan un componente llamado tubo capilar, que como su nombre lo indica, es un tubo muy largo y delgado. Al ser muy delgado, el tubo capilar restringe el paso de refrigerante creándose a partir de aquí una gran diferencia de presiones. El tubo capilar se enrolla en la línea de succión fría para evitar que en ese punto el refrigerante líquido pudiera evaporarse un poco. Estos pueden estar fabricados de distintos materiales:

²⁹ YAÑEZ, G. 2017. *Válvula de expansión termostática*. [En línea] <<http://bohnmxico.blogspot.com/2017/03/>> [Consulta: 10 de noviembre de 2020]

vidrio, cobre, aleaciones metálicas, entre otros., en función de su uso o aplicación.

Figura 18. **Diagrama de válvula de expansión típica**



Fuente: YAÑEZ, G. 2017. *Válvula de expansión termostática*. [En línea]
<<http://bohmexico.blogspot.com/2017/03/>> [Consulta: 10 de noviembre de 2020]

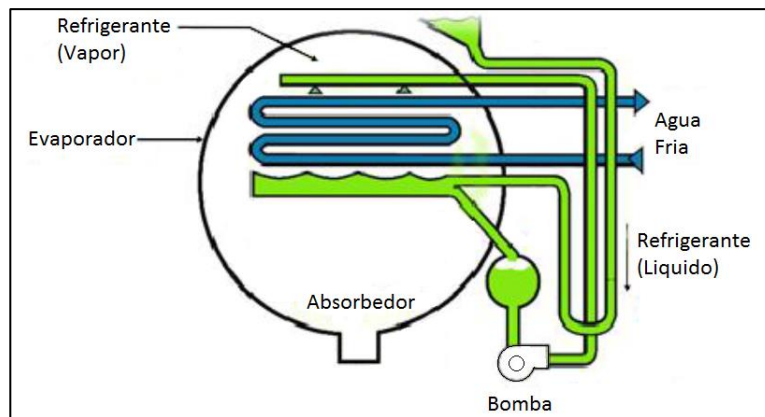
2.2.5. Evaporador

Este componente es básicamente un intercambiador de calor en el cual el refrigerante cambia de fase y enfría el espacio a refrigerar. Los evaporadores pueden ser clasificados de acuerdo con el método de alimentación, por ejemplo: expansión directa o por inundación.

En el caso de expansión directa, la salida del evaporador es un vapor ligeramente sobrecalentado que se alimenta en cantidades pequeñas para

asegurar la vaporización completa al final del sistema. En el caso del método por inundación, la cantidad de refrigerante excede la cantidad evaporada. La decisión de cuál emplear en el sistema depende del diseñador. Así como están fabricados los condensadores, los evaporadores pueden ser fabricados de tubos de cobre con aletas de aluminio o totalmente de aluminio, siempre recordando que, si el sistema usa amoníaco, no usar cobre como material de construcción.

Figura 19. **Evaporador de una máquina de absorción**



Fuente: PINO, F. *Análisis de los sistemas de refrigeración por adsorción*. Tesis de licenciatura. Universidad de Sevilla, Escuela técnica superior de ingenieros, España, 2011. pp. 75.

2.2.6. Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor instalados en un sistema de refrigeración por absorción pueden llegar a aumentar significativamente la eficiencia del ciclo de absorción. Los sistemas de doble efecto suelen emplear un intercambiador más que los de simple efecto. Los intercambiadores de calor de este tipo son generalmente fabricados de aluminio, acero inoxidable y hierro negro. Para sistemas donde usan amoníaco, es común que estos sean fabricados de acero inoxidable. Como el sistema de un refrigerador por absorción utiliza amoníaco, no se debe de usar cobre como material de fabricación.³⁰

³⁰ PINO, F. *Análisis de los sistemas de refrigeración por adsorción*. Tesis de licenciatura. Universidad de Sevilla, Escuela técnica superior de ingenieros, España, 2011. p. 22-26.

Para un ciclo de efecto simple, el intercambiador normalmente se instala entre el absorbedor y el generador, como se puede ver en la figura 8, para calentar la mezcla concentrada a la entrada del generador y enfriar la mezcla pobre facilita la posterior absorción y elevar la de la solución rica reduce la cantidad de combustible necesaria para la desorción de la mezcla.

Otra ubicación ideal para el intercambiador de calor es entre el flujo que proviene del condensador al evaporador y saliente del evaporador que se dirige al absorbedor. Al elevar la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador, este aproxima más a la temperatura de la solución pobre con la que se combinará en el absorbedor. Al mismo tiempo, enfriar el refrigerante antes de entrar al evaporador asegura que el líquido esté subenfriado, por lo que podrá absorber una mayor cantidad de calor en el recinto a acondicionar.³¹

2.2.7. Rectificador

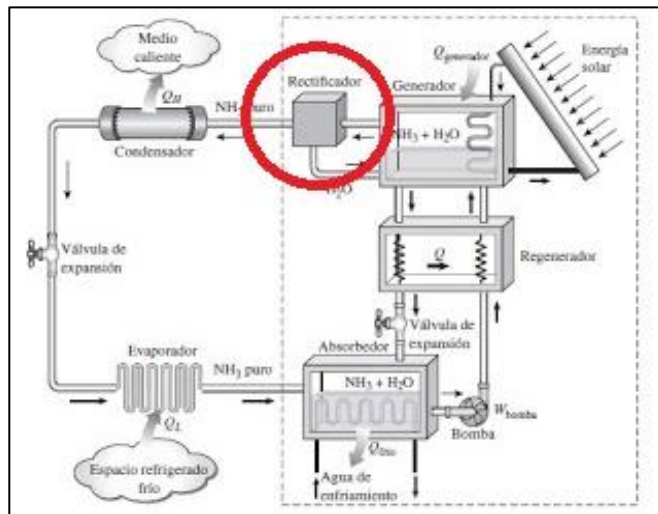
Los sistemas de refrigeración por absorción que emplean la combinación de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ conllevan al problema de la volatilidad del absorbente, por lo que es de gran importancia deshacerse del agua antes de que llegue al condensador. También cabe recomendar que este componente no contenga cobre ni ninguno de sus aleaciones. La eficiencia del sistema mejora a la hora que se elimine el agua que es arrastrada por el amoníaco a la salida del generador.

Para eliminar el agua arrastrada por el amoníaco, se introduce el rectificador al sistema (ver figura 20). Este consiste en un intercambiador que, al extraer calor del fluido a la salida del generador provoca la condensación de dicha agua arrastrada para evitar la probabilidad de generar hielo en la válvula de expansión o en el evaporador. El rectificador está construido de materiales similares a un intercambiador de calor, siempre tomando en cuenta el no usar cobre para evitar contacto con el amoníaco del sistema. Dado que las temperaturas que se pueden

³¹ Ibidem, p. 22-26.

llegar a alcanzar en el evaporador son muy bajas, el agua se podría solidificar bloqueando las tuberías, lo que a la larga reduce el rendimiento del sistema.

Figura 20. **Ubicación de rectificador en diagrama de ciclo de absorción**



Fuente: CENGEL, Y. *Thermodynamics: an Engineering Approach, 8th edition*. Estados Unidos: McGraw Hill Education, 2015, pp. 633-639.

Del rectificador se obtiene un flujo de vapor con una concentración muy cercana al 100 % en amoníaco, y luego se envía al condensador. La otra salida del rectificador contiene una corriente líquida con una gran cantidad de agua que retorna al desorbedor, llamada también como reflujo. El proceso puede generar pérdidas de carga si se intercambia el calor con un fluido refrigerante externo, pero si se realiza con la solución rica procedente del absorbedor se logra una mejora en el rendimiento del equipo.

3. INSTRUMENTACIÓN

Por motivo de la particularidad de los equipos con los que se trabaja la refrigeración por absorción, no siempre se es posible el acceder a ciertos parámetros como lo es la presión y caudales dentro del sistema. Por lo tanto, se tomarán los valores de las especificaciones como ciertas.

3.1. Puesta a punto del refrigerador

La puesta a punto es un procedimiento en el cual se procede a montar una maquinaria o equipo por primera vez. Durante el mismo, las herramientas también reciben un preciso ajuste.

La puesta a punto del refrigerador se trata de hacer unas modificaciones para que se pueda emplear el biogás. El refrigerador por usar puede ser un refrigerador por absorción comercial convencional, sin embargo, habrá que hacer ciertas modificaciones para que esta pueda usar biogás como combustible. Cabe recordar que debido a que el sistema estará trabajando con un ciclo de refrigeración por absorción, va a estar usando amoníaco como refrigerante, no usar accesorios o equipo que contenga cobre ya que el amoníaco ataca el cobre acortando su vida útil considerablemente.

Hay que tomar varios parámetros en cuenta para que el equipo pueda alcanzar las temperaturas necesarias para que el ciclo funcione correctamente. Para esto se tiene que ajustar la llama del quemador, lo cual se hace ajustando el flujo y la presión al que el combustible es suministrado. Para la combustión del gas metano es recomendable instalar un mechero Bunsen.

Sin estos ajustes, puede que la llama no entregue la energía suficiente para que la temperatura de los fluidos en el interior del circuito cumpla los requerimientos del refrigerador causando este no enfrié.

En el 2014, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bolivia, se realizaron modificaciones para un refrigerador por absorción de 184 litros marca MTH, modelo MTH-10 de capacidad de 3 000 a 5 000 BTU/h que usa como refrigerante amoniaco, para que este usara gas metano como combustible. Este mismo gas será usado para suministrar el combustible al mechero Bunsen. El equipo usa amoniaco como refrigerante en el sistema de refrigeración, el cual es un refrigerante muy común en este tipo de equipos. Este proyecto se enfocó en proveer soluciones de refrigeración para aquellas comunidades que carecen de suministro de energía eléctrica.³²

Gracias a la instalación de un mechero Bunsen, se logra ajustar el tamaño de la llama para que este entregue la energía suficiente. Se recalca que se instale el mechero correctamente en el generador para que la llama se dirija lo mejor posible a la parte inferior del generador. La Escuela Técnica de Ingenieros de Bolivia realizó varias mediciones en diferentes puntos del sistema, donde trabajaron con una presión de biogás en los contenedores de biogás de 7 bares y una llama de combustión de 10 cm de longitud. El biogás fue obtenido de una planta de biodigestión la cual es alimentada por plátano maduro, el cual es almacenado en tanques de gas para el almacenamiento de este.³³

Luego, por medio de una manguera de alta presión, el tanque fue conectado al mechero Bunsen para suministrar el combustible. Las tomas de datos se toman a la salida y la entrada de cada uno de los componentes del sistema.

³² FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, p.78.

³³ Ibidem, p. 79.

Figura 21. **Refrigerador por absorción de efecto simple modificado para usar metano como combustible**



Fuente: FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, pp.59.

3.2. Metodología para el análisis

Para la evaluación del funcionamiento de un sistema de refrigeración por absorción se requiere que se tenga un amplio conocimiento en lo que se trata del rendimiento del sistema completo y sus componentes. Esto es necesario para encontrar los parámetros óptimos y que el equipo funcione lo más eficiente

posible, y así realizar una comparación de ahorro de energía con otros sistemas. Para esto existe el análisis por medio de un método matemático, un método que es usado por varios investigadores en publicaciones científicas.

Este método comprende calcular el balance de energías de los componentes del sistema por separado y de todos en conjunto para poder obtener los valores del rendimiento. Una aplicación del método matemático es que se puede usar como comparación con el rendimiento actual del equipo. Como se mencionó anteriormente, es necesario conocer los parámetros óptimos para que el refrigerador funcione lo más eficientemente posible, de lo contrario el equipo no sería rentable. Esta comparación de rendimiento también puede servir como indicador para detectar fallas en el equipo.

Las ecuaciones para el estudio general de la máquina se distinguirán en dos procedimientos: uno por balance de masa y el otro por balance de cargas térmicas. Para el balance de masas se utiliza la ecuación diferencial de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad 3-1$$

Debido que el fluido viaja en una sola dirección ($v_j = v_k = 0 \rightarrow |\vec{v}| = v_i$), se podrá utilizar la ecuación simplificada:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + [\rho \cdot v_i \cdot A] - [\rho \cdot (v_i + \frac{\partial v_i}{\partial x} \cdot dx) \cdot A] = 0 \quad 3-2$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \dot{m}_e - \dot{m}_s = 0 \quad 3-3$$

Ya que las propiedades del sistema no cambian con el tiempo se puede aplicar el régimen permanente ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$), podemos simplificar la ecuación anterior (Ecuación 3-3) en la siguiente ecuación final:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = 0 \quad 3-4$$

Donde:

- ρ = Densidad del fluido
- t = Tiempo a lo largo del proceso de transferencia
- \vec{v} = Velocidad vectorial del fluido (v_i, v_k, v_j); (x, y, z)
- A = Área transversal del tubo
- \dot{m}_e = Flujo másico de entrada
- \dot{m}_s = Flujo másico de salida

Para el balance de energías en un volumen de control a través del cual circula un fluido en régimen estacionario se puede expresar como:

$$Q - W + \sum^{in} [m_i(h + e_c + e_p)_i] - \sum^{out} [m_j(h + e_c + e_p)_j] = \Delta E \quad 3-5$$

Según el sistema, el único trabajo que sucede durante el ciclo de refrigeración es el de dilatación, el cual por ser tan pequeño es despreciable. De igual manera se pueden menospreciar las energías cinéticas y potenciales, tanto de la entrada como de la salida, debido a que el fluido no viaja con velocidades altas y al no tener grandes diferencias en altura.

Simplificada tenemos la siguiente expresión:

$$Q + \sum^{in}(\dot{m}_i \cdot h_i) - \sum^{out}(\dot{m}_j \cdot h_j) = 0 \quad 3-6$$

La ecuación en función de tiempo resulta en la siguiente igualdad:

$$\dot{Q} + \sum^{in}(\dot{m}_i \cdot h_i) - \sum^{out}(\dot{m}_j \cdot h_j) = 0 \quad 3-7$$

La carga térmica considerada debe de ser la potencia neta, es decir la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida más la potencia total generada en el volumen de control. Sin embargo, la potencia generada en el volumen de control es nula ya que en el interior del material aislante de la cámara de refrigeración no se genera ninguna carga térmica y se puede asumir esta última carga como despreciable. Entonces considerando lo anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e - \dot{Q}_s \quad 3-8$$

Sustituyendo esta última ecuación con la ecuación 3-8, se obtiene la expresión para el estudio de balance de energías:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_s + \sum^{in}(\dot{m}_i \cdot h_i) - \sum^{out}(\dot{m}_j \cdot h_j) = 0 \quad 3-9$$

Donde:

ΔE = Incremento de la energía interna del sistema

Q = Carga térmica aportada al sistema

W = Trabajo producido por el sistema

- m_i = Masa "i" entrante en el volumen de control
- m_j = Masa "j" entrante en el volumen de control
- h = Entalpía del fluido en la corriente
- e_c = Energía Cinética por unidad de masa
- e_p = Energía Potencial por unidad de masa
- \dot{Q} = Energía térmica aportada al sistema por unidad de tiempo

La carga total que requiere el sistema (\dot{Q}_{total}) es total al a sumatoria de todas las cargas internas del sistema. Estas cargas son: cargas por transmisión (\dot{Q}_T), carga de los productos a enfriar (\dot{Q}_p), cargas internas (\dot{Q}_I) y cargas por infiltración (\dot{Q}_a). Por lo tanto, se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_p + \dot{Q}_I + \dot{Q}_a \quad 3-10$$

El cálculo de la carga por transmisión (\dot{Q}_T) se obtiene de la suma de las cargas de todas las paredes del refrigerador. Dicha carga térmica depende de 3 factores:

- La diferencia de temperatura a través de la cual fluye el calor
- El área de la superficie a través de la cual fluye el calor
- El coeficiente de transmisión de calor (U) de la superficie

Lo anterior se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_T = U * A * \Delta T \quad 3-11$$

Donde:

\dot{Q}_T = Carga térmica por transmisión [BTU/h]

U = Coeficiente de transferencia de calor del material [BTU/h x ft² - °F]

A = Diferencia de temperatura entre exterior e interior de la cámara [°F]

Los coeficientes de transferencia de calor de algunos materiales comunes son los siguientes:

Tabla IX. **Coeficientes de transferencia de calor de diferentes materiales**

Material	Coeficiente U [BTU/h x ft ² - °F]
Aluminio	1 449,27
Acero	322,58
Cobre	263,15
Concreto	5,55
Fibra de vidrio	0,30
Poliuretano	0,17
Aire	0,17

Fuente: CENGEL, Y. *Thermodynamics: an Engineering Approach, 8th edition*. Estados Unidos: McGraw Hill Education, 2015, pp. 633-639.

Para la carga térmica por los productos (\dot{Q}_p), es necesario conocer dos factores: el calor que debe extraerse a los productos y el calor de transpiración de los productos (este último solo será un factor para frutas y verduras). Por lo cual, el total de carga térmica por productos será la sumatoria de estas dos cargas:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{Producto} + \dot{Q}_{Evolución} \quad 3-12$$

Para el cálculo de carga térmica por productos sin calor de evolución se usa la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{Productos} = \frac{\dot{m} * C_p * \Delta T}{3,600 * t} \quad 3-13$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico del producto [lb/seg]

C_p = Coeficiente de calor específico del producto [BTU/lb-°F]

ΔT = Diferencia entre temperatura interior y exterior [°F]

t = Tiempo que los productos permanecerán en el refrigerador [h]

Para el cálculo de carga térmica para productos que tengan calor de evolución es la siguiente:

$$\dot{Q}_{Evolución} = \frac{m * C_v}{t} \quad 3-14$$

Donde:

m = Masa de producto [lb]

C_v = Calor de evolución [BTU/lb]

t = Tiempo que los productos permanecerán en el refrigerador [h]

Cualquier cantidad de aire que penetre en el espacio refrigerado debe reducir su temperatura a la de almacenamiento, aumentando de este modo la carga de refrigeración. Además, en caso de que el contenido de humedad del aire que ha penetrado sea superior que el que existe en el espacio refrigerado, el exceso de humedad se condensará.

Para saber la carga de aire infiltrado (\dot{Q}_a), se debe conocer la cantidad de aire que se renueva en el interior del refrigerador y con qué frecuencia. En la Tabla IX se proporciona también el calor removido del aire de enfriamiento a las condiciones del refrigerador. Para saber la potencia requerida para enfriar el aire de infiltración nos referimos a la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_a = V * n * f_{calor\ removido} \quad 3-15$$

Donde:

- V = Volumen de la cámara [ft³]
- n = Veces en que se abre la puerta del refrigerador
- f = Factor de calor removido por infiltración [BTU/ft³]

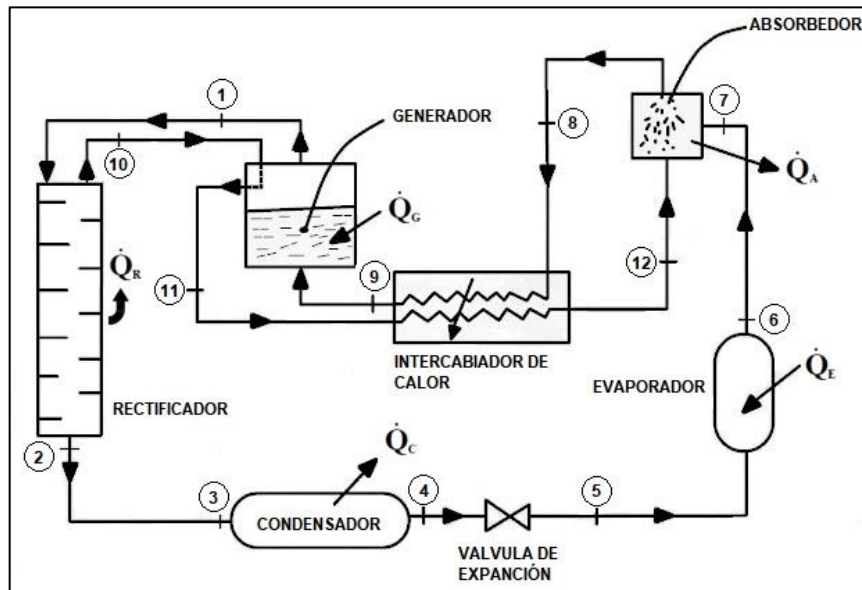
Tabla X. Factores de calor removido por infiltración [BTU/ft³]

Temp [°f]	Temperatura de aire exterior [°f]							
	85		90		95		100	
	% humedad relativa							
	50	60	50	60	50	60	50	60
65	0,45	0,64	0,68	0,91	0,93	1,20	1,21	1,51
60	0,66	0,85	0,89	1,12	1,14	1,41	1,42	1,71
55	0,85	1,04	1,08	1,31	1,33	1,60	1,61	1,91
50	1,03	1,22	1,26	1,49	1,51	1,78	1,79	2,09
45	1,19	1,39	1,43	1,66	1,66	1,94	1,95	2,25
40	1,35	1,55	1,59	1,81	1,81	2,10	2,11	2,41
35	1,50	1,70	1,74	1,96	1,96	2,25	2,26	2,56
30	1,65	1,84	1,88	2,10	2,13	2,39	2,40	2,70

Fuente: manual de fundamentos ASHRAE 1967.

Para los que son cargas internas (\dot{Q}_I), esta hace referencia a los equipos que se pueden encontrar en el interior de la cámara, por ejemplo, motores, iluminación y personas entre otros. Como en este trabajo de investigación se enfoca en lo que es un refrigerador, estas cargas pueden asumirse como nulas ya que ninguna de estas cargas adicionales se encontrará dentro del refrigerador.

Figura 22. **Ciclo de refrigeración por absorción**



Fuente: Absorption Chiller. 2011. Ammonia/Water Absorption Refrigeration System [En línea] <<http://absorptionchiller4u.blogspot.com/2013/02/ammoniawater-absorption-refrigeration.html>>

[Consulta: octubre 2020]

El análisis por medio del modelo matemático se basa generalmente en llevar a cabo un balance de masa y energía para cada componente (Figura 22). Valiéndonos de las ecuaciones 3-4 y 3-9 para cada componente en el balance de masas, tenemos las siguientes igualdades:

$$\dot{m}_{abs} = \dot{m}_1 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad 3-16$$

$$\dot{m}_{rica} = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad 3-17$$

$$\dot{m}_{pobre} = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \quad 3-18$$

$$\dot{m}_{abs} = \dot{m}_{rica} + \dot{m}_{pobre} \quad 3-19$$

Donde:

\dot{m}_{abs} = Flujo másico de solución absoluta

\dot{m}_{rica} = Flujo másico de solución rica

\dot{m}_{pobre} = Flujo másico de solución pobre

Respectivamente, el flujo másico de la solución rica y pobre puede ser correlacionado con el flujo másico del refrigerante como:

$$\dot{m}_{rica} = \frac{X_{pobre}}{X_{pobre} - X_{rica}} \dot{m}_r; \quad \dot{m}_{pobre} = \frac{X_{rica}}{X_{pobre} - X_{rica}} \dot{m}_r \quad 3-20$$

Donde:

X_{rica} = Porcentaje de solución rica

X_{pobre} = Porcentaje de solución pobre

\dot{m}_{rica} = Flujo másico de refrigerante

Las ecuaciones de los balances de energía para los componentes resultarían de la siguiente manera:

$$\text{Generador:} \quad \dot{Q}_G = \dot{m}_{abs}(h_1 - h_9) + \dot{m}_{pobre}(h_{11} - h_{10}) \quad 3-21$$

$$\text{Rectificador:} \quad \dot{Q}_R = \dot{m}_{abs}h_{11} - \dot{m}_{rica}h_2 - \dot{m}_{pobre}h_{10} \quad 3-22$$

$$\text{Condensador:} \quad \dot{Q}_C = \dot{m}_{rica}(h_3 - h_4) \quad 3-23$$

$$\text{Evaporador:} \quad \dot{Q}_E = \dot{m}_{rica}(h_6 - h_5) \quad 3-24$$

$$\text{Absorbedor:} \quad \dot{Q}_A = \dot{m}_{rica}h_7 + \dot{m}_{pobre}h_{12} - \dot{m}_{abs}h_8 \quad 3-25$$

$$\text{Intercambiador:} \quad \dot{m}_{abs}(h_8 - h_9) = \dot{m}_{pobre}(h_{12} - h_{11}) \quad 3-26$$

Donde:

\dot{Q}_G = Energía térmica absorbida de la llama por el generador

\dot{Q}_R = Energía térmica cedida al ambiente por el rectificador

\dot{Q}_C = Energía térmica cedida al ambiente por el condensador

\dot{Q}_E = Energía absorbida del interior de la cámara del refrigerador en el evaporador

\dot{Q}_A = Energía cedida al ambiente por el absorbedor

Para calcular el COP se puede hacer referencia a la ecuación 2-1, y junto con el balance de energías se determina que:

$$COP_{Absorción} = \frac{Q_L}{Q_{Generador}} = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G} \quad 3-27$$

Sustituyendo la ecuación anterior con las igualdades 3-21 y 3-24 de los balances de energías de los componentes, el coeficiente de operación se calcula como:

$$COP_{Absorción} = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G} = \frac{\dot{m}_{rica}(h_6 - h_5)}{\dot{m}_{abs}(h_1 - h_9) + \dot{m}_{pobre}(h_{11} - h_{10})} \quad 3-28$$

3.3. Termómetros

Es importante que las temperaturas durante el ciclo sean las adecuadas para que el equipo pueda funcionar de la manera más eficiente posible y pueda generar la capacidad frigorífica necesaria. El monitoreo de las temperaturas también es importante, ya que provee un indicio del comportamiento del ciclo térmico de todo el sistema.

Para medir las temperaturas y realizar las mediciones necesarias se recomienda usar termómetros infrarrojos a distancias industriales. Una recomendación es el termómetro “Fluke 62 Max non-contact” con rango entre -22 °F (-30 °C) a + 932 °F (500 °C) con una precisión de $\pm 1,5$ °C y 1,5 % del valor leído del rango entre -30 a 500 °C (Figura 23).

Figura 23. **Termómetro infrarrojo Fluke Max 62**



Fuente: *Fluke Corporation*, USA. Termómetro Fluke 62 Max+ [En línea]
<<https://www.fluke.com/es-gt/producto/medicion-de-temperatura/termometros-infrarrojos/fluke-62-max-plus>> [Consulta: 04 de noviembre de 2021]

Como se explicó en la sección 3.2 en la metodología del análisis, es necesario tener ciertos datos para poder completar los balances de energía y de esa manera poder calcular el COP del sistema. Los puntos donde es necesario tomar las medidas de temperatura (ver Tabla XI para ver valores de temperatura de los siguientes puntos) cuando el equipo esté en funcionamiento con el termómetro infrarrojo son:

- Entrada y salida del intercambiador [T_I]
- Entrada y salida del generador [T_G]
- Entrada y salida del rectificador [T_R]
- Entrada y salida del condensador [T_C]
- Entrada y salida del evaporador [T_E]
- Entrada y salida del absorbedor [T_A]

También es necesario tomar en cuenta las mediciones de temperatura dentro del refrigerador ya que de esa manera tenemos las condiciones en el interior de la cámara y poder completar el balance de energía. Se recomienda usar un termómetro digital para poder mantener la cámara cerrada y de esa manera evitar dejar entrar cargas adicionales no deseadas causadas por infiltración. Un termómetro recomendado para este tipo de mediciones es el “Velleman PMTEMP1” capaz de medir temperaturas entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ con precisión de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.³⁴

Figura 24. **Termómetro digital Velleman PMTEMP1**



Fuente: Velleman Group. *Termómetro digital PMTEMP1* [En línea]
<<https://www.velleman.eu/products/view/?country=fr&lang=es&id=375852>>

³⁴ MORENO, F., PERDONE, E. y GUEVARA, D. 2018. Diseño y evaluación de un Sistema de refrigeración experimental trabajando por adsorción solar. *Revista Chilena de Ingeniería*. Chile: Ingeniare, 26, No. 4. p. 622-630.

3.4. Caudalímetro

El caudalímetro nos servirá para poder conocer la cantidad de combustible empleado para el funcionamiento correcto del todo el sistema, ya que una cantidad muy baja de combustible no proporcionaría una carga suficiente para poder refrigerar el producto.

Un gasómetro es ideal para este tipo de mediciones y poder medir el caudal de gas, la Universidad de El Salvador en el año 2010 realizó una conversión de un refrigerador de absorción que utilizaba combustible de un bio digestor que producía biogás. Para la medición del caudal de combustible utilizaron un gasómetro “Sintta Mechanical Steel gas meter” el cual mide el volumen total que ha circulado por el interior del sistema.³⁵

Figura 25. **Gasómetro Sintta Mechanical steel gas meter**



Fuente: Tradesparq Ltd. *Hangzhou Sintta Meter Technology Co., Ltd.* [En línea]

<<https://www.tradesparq.com/users/108604/Miss-Meggie/company/99171/Hangzhou-Sintta-Meter-Technology-Co-Ltd>> [Consulta: 20 de octubre de 2020]

³⁵ MORENO, F., PERDONE, E. y GUEVARA, D. 2018. Diseño y evaluación de un Sistema de refrigeración experimental trabajando por adsorción solar. *Revista Chilena de Ingeniería*. Chile: Ingeniare, 26, No. 4. p. 622-630.

Para conocer el caudal de combustible, se debe realizar la división del volumen total que ha circulado por el gasómetro en ese periodo de tiempo entre el mismo tiempo que dura el período.

$$C_{i+1} = \frac{V_{i+1}-V_i}{t_{i+1}-t_i} \quad 3-13$$

3.5. Mechero Bunsen

Para que el sistema de refrigeración por absorción pueda lograr usar el biogás como combustible se emplea un quemador. Un quemador ideal para este caso es el mechero Bunsen, como se ha mencionado anteriormente. Para este se recomienda un mechero Bunsen convencional de laboratorio, el cual puede ser de la marca EISCO (figura 26) que se enfocan en equipo de laboratorio e industrial.

Figura 26. **Mechero Bunsen EISCO**



Fuente: Amazon. Eisco Labs Nextgen Meker Mechero Bunsen. [En línea]
<<https://www.amazon.com/-/es/nextgen-Mechero-stabilibase-anti-tip-temperatura/dp/B00UZCHUZ6>>

El mechero Bunsen nos permite controlar el tamaño de la llama, algo que el quemador original del refrigerador no nos permite. El mechero iría conectado directamente a los tanques, donde es muy importante posicionar el mechero correctamente para que la llama se dirija lo mejor posible a la parte inferior del generador, ya que una pequeña variación supone una disminución de varios grados de la temperatura a la entrada y a la salida del generador. Como se mencionó con anterioridad, la Escuela Técnica de Ingenieros de Bolivia realizó pruebas alcanzando las temperaturas necesarias con éxito utilizando una presión en el biogás de 7 bares, logrando una llama de 10 cm de altura (figura 27).

Los mecheros Bunsen pueden presentar varios peligros por incendio. Por seguridad y conveniencia para todos los que están trabajando con este equipo es importante que sigan los siguientes lineamientos para el uso adecuado y seguro del mechero. En caso de fuego hay que evacuar el recinto por la salida principal o por la de emergencia, avisando a los compañeros de trabajo y conservando la calma.³⁶

Para fuegos pequeños, una vez localizado, se apaga utilizando un extintor adecuado, arena o cubriendo el fuego con un recipiente que lo ahogue. No se debe utilizar agua para extinguir un fuego provocado por la inflamación de un disolvente o de origen eléctrico. En casos de fuegos grandes se aísla el fuego y se utilizan los extintores adecuados. En el interior del país, así como pueblos y aldeas que carecen de los equipos necesarios de seguridad contra incendios, se recomienda mantener la instalación del sistema al aire libre, y lejos de sustancias inflamables. En todo caso que ocurriera un incendio, lo primero sería cortar el suministro de combustible y se recomienda usar arena o tierra para apagar el fuego restante.

³⁶ MORENO, F., PERDONE, E. y GUEVARA, D. 2018. Diseño y evaluación de un Sistema de refrigeración experimental trabajando por adsorción solar. *Revista Chilena de Ingeniería*. Chile: Inginiare, 26, No. 4. p. 622-630.

Si no se puede controlar rápidamente, se dará aviso al servicio de extinción de incendios y evacuación del edificio. Si se incendia la ropa lo ideal es rodar sobre uno mismo para apagar las llamas. No se utiliza nunca un extintor sobre una persona y tampoco retirar la ropa adherida a la piel de la víctima.

Los siguientes lineamientos fueron propuestos por la Oficina de Seguridad Ambiental y Ocupacional; *The Environmental and Occupational Safety Office*”(OESO):

- No posicionar el mechero Bunsen debajo de ninguna estantería, equipo inflamable o eléctrico por al menos 12 pulgadas.
- Recogerse el pelo en caso de que sea pelo largo, no usar joyería ni ropa suelta.
- Inspeccionar las mangueras en busca de hoyos, grietas y asegurarse que las uniones estén sujetas adecuadamente para evitar fugas.
- En caso de que la manguera se encuentre en mal estado, se debe de remplazar.
- Notificar al personal en el área de que el mechero se estará usando.
- Utilizar encendedor con boquilla extendida para encender el mechero. No se deben usar cerillos para encenderlo.
- Tener el encendedor a la mano antes de encender el suministro de combustible.
- Cerrar paso de combustible cuando no se esté usando el mechero.
- Dejar que el mechero Bunsen se enfríe antes de manejarlo y asegurar que la válvula está cerrada antes de dejar el laboratorio.³⁷

³⁷ Pauss, A., Andre, G., Perrier, M. & Guiot, S. 1990. Liquid-to-Gas Mass Transfer in Anaerobic Processes: Inevitable Transfer Limitations of Methane and Hydrogen in the Biomethanation Process. *Applied and Environmental Microbiology*. Canadá: American Society for Microbiology, vol. 56, No. 6, p.1636-1644.

Figura 27. **Llama obtenida con biogás en el mechero Bunsen**



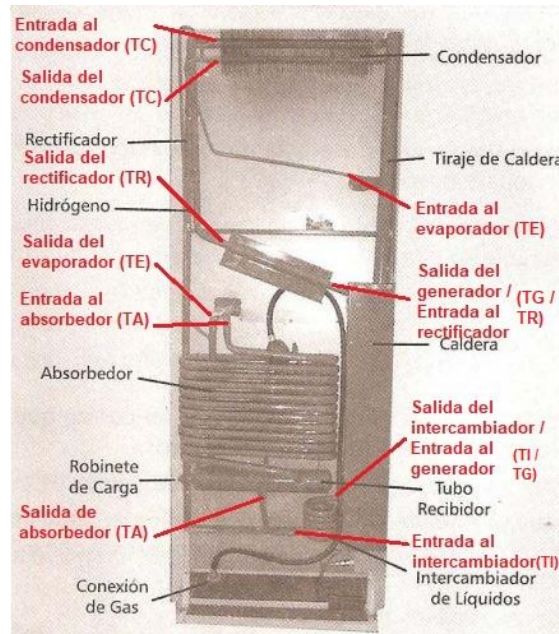
Fuente: FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, pp.19.

3.6. Resultados

Para corroborar que el refrigerador esté funcionado correctamente hay que verificar que la temperatura sea la adecuada en los puntos siguientes (figura 28):

- Entrada y salida del intercambiador [T_I]
- Entrada y salida del generador [T_G]
- Entrada y salida del rectificador [T_R]
- Entrada y salida del condensador [T_C]
- Entrada y salida del evaporador [T_E]
- Entrada y salida del absorbedor [T_A]
- Cámara de enfriamiento [$T_{Cámara}$]

Figura 28. **Puntos a medir temperatura en refrigeradora**



Fuente: Ecosolar S. A. *Heladera y freezer a gas modelo MTH-10*. [En línea]
<https://www.ecosolar.com/A24_Heladera.aspx> [Consulta: 20 de octubre de 2020]

La temperatura en estos puntos refleja la capacidad de enfriamiento del equipo. Desde aquí se puede ver donde el equipo necesita ser ajustado para poder llegar a los resultados deseados, ya sea aumentando la intensidad de la llama, aumentando el caudal o la presión de biogás para la combustión o ajustando los diámetros de las tuberías del sistema de refrigeración.

El 13 de diciembre del 2013, la Escuela Técnica de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de Bolivia realizó ensayos en un congelador convertido para uso de biogás. Con una temperatura ambiente de 18,5 °C a una altitud de 3 600 m.s.d.m. obtuvieron una temperatura dentro de la cámara de -10 °C con un caudal de suministro al mechero Bunsen de 120 L/h de biogás (tabla XI). La energía calorífica del sistema fue de 34 kW con un COP de 1,402 en el sistema.

La altitud del sitio en el que se desarrolla la combustión tiende a afectar también la potencia térmica desarrollada en el quemador. En la investigación: Teoría de descarga en inyectores u orificios de combustibles gaseosos de la Universidad de Antioquía, Colombia por el ingeniero Andrés Adolfo Amell Arrieta han mostrado el efecto de este parámetro.

Cuando una corriente de un combustible gaseoso se descarga por el orificio de un inyector de un quemador, la potencia térmica disponible en función del poder calorífico inferior del combustible puede ser calculado a partir de la siguiente relación desarrollada por el Ing. Amell:

$$Q_T = CA \sqrt{\frac{2p}{\rho_{std}} \frac{P+p}{P_{st}} \frac{T_{st}}{T}} Q_i \quad 3-29$$

Donde:

- Q_t = Potencia Térmica [kW]
- CA = Caudal de combustible gaseoso [L/h]
- P = Presión manométrica [Pa]
- ρ_{std} = Densidad del aire según condiciones [Kg/m^3]
- P_{st} = Presión absoluta según condiciones [Pa]
- T = Temperatura del gas antes de la descarga en el inyector [$^{\circ}\text{K}$]
- T_{st} = Temperatura absoluta en el estado estándar [288 °k]
- Q_i = Poder calorífico inferior del combustible gaseoso [kWh/m^3]

Como se observa en la siguiente ecuación 3-29, la potencia térmica disponible en el quemador depende de los siguientes factores:

- Condiciones atmosféricas del sitio donde opera el quemador: temperatura y presión atmosférica [altitud].
- Propiedades del gas combustible, poder calorífico y densidad (que varía con la altitud).
- La geometría del inyector.

La potencia térmica queda en función de las condiciones atmosféricas de sitio donde se opera el quemador, particularmente de la presión atmosférica, la cual depende de la altura sobre el nivel del mar. Los resultados obtenidos por las investigaciones del ing. Amell muestran que la altitud donde se realiza la combustión afecta de manera adversa la potencia térmica desarrollada, y se puede concluir que la potencia desarrollada en la combustión disminuye aproximadamente un 1,5 % por 304 metros de incremento de altitud, por lo cual para mayor eficiencia se recomienda este tipo de instalaciones en altitudes bajas para menor consumo de combustible.

En Guatemala, lamentablemente no se ha trabajado un sistema similar, ya que no existe un distribuidor regular de este tipo de refrigeradores. Los fabricantes de equipos de refrigeración en Centro América como Fogel solo se especializan en equipos con el ciclo de compresión. Sin embargo, por medio de importaciones se pueden conseguir y comprar equipos de refrigeración por llama que usen amoniaco como refrigerante, de países como China y Brasil. Se espera que este estudio de prefactibilidad ayude a aquellas personas que deseen elaborar un sistema similar o que de esta manera se puedan planear proyectos a una escala un poco más grande donde se puedan importar varios equipos y de esta manera proveer de este tipo de refrigeración a varias personas.

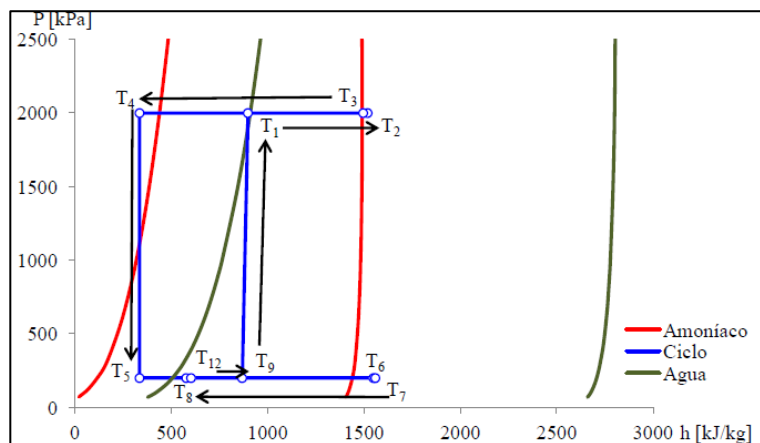
Tabla XI. **Temperaturas del sistema [°C]**

T_I^e	T_I^s	T_G^e	T_G^s	T_R^e	T_R^s	T_C^e	T_C^s	T_E^e	T_E^s	T_A^e	T_A^s	T_{Camara}
43,5	117	117	128	128	57	49	28,5	28	28,5	33	36,5	-10

Fuente: FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, pp.64.

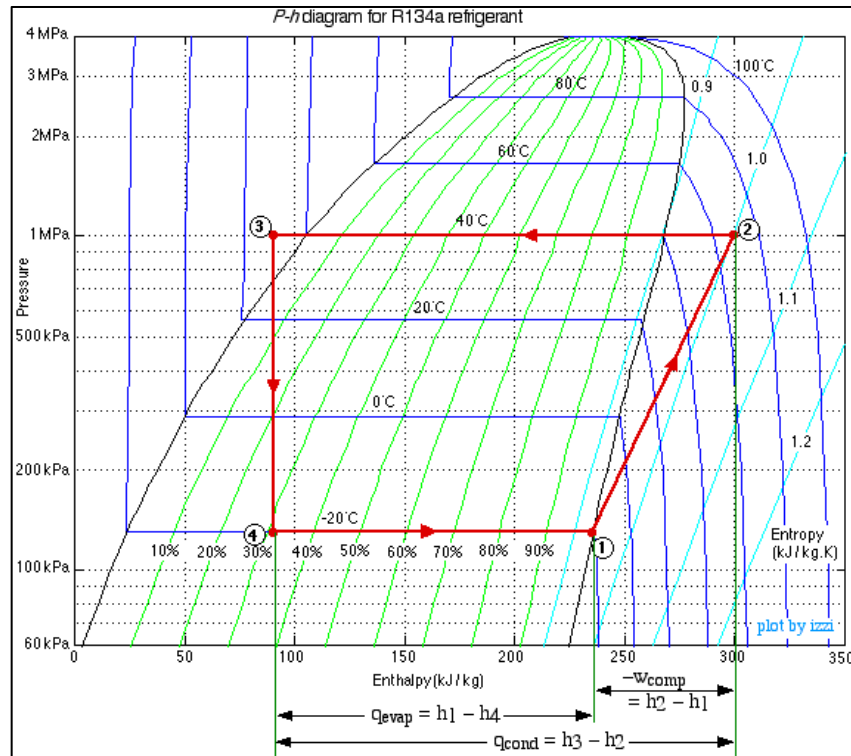
Dado los resultados de temperaturas de la tabla XI, es posible obtener la gráfica del ciclo de refrigeración (Presión [kPa] - Energía específica [kJ/kg]) que se muestra en la figura 29.

Figura 29. **Diagrama de Mollier de ciclo de refrigeración por absorción con biogás**



Fuente: FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014, pp.65.

Figura 30. **Diagrama de Mollier de ciclo de compresión de refrigerante R134a**



Fuente: Urieli, I. 2010. *Chapter 4: The First Law of Thermodynamics for Control Volumes* [En línea] https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1_6/Chapter4c.html [Consulta: 21 de octubre de 2020]

Comparando este ciclo de absorción de amoníaco (figura 29) con un ciclo de compresión que usa refrigerante R134a (figura 30), se pueden observar varias diferencias. Entre estas se pueden observar que el ciclo de absorción llega a presiones mucho más altas, obteniendo una mayor entalpia lo cual significa que podremos llegar a capacidades de enfriamiento mucho más altos. Sin embargo, el rendimiento es menor que en un sistema con ciclo de compresión (0,8 frente a 5,5 aproximadamente), pero, en algunos casos compensa el que la energía proveniente de una fuente calorífica, incluso residual o un subproducto destinado

a desecharse. Los sistemas que usan el ciclo de absorción no llegan a ser tan eficientes como los sistemas que usan ciclo de compresión. Esto se debe a que es necesario invertir más energía para llegar a dichas capacidades frigoríficas.

La temperatura en el interior del congelador, la cual se mide únicamente al completar el arranque, llega hasta los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual es una temperatura razonable para la conservación de alimentos conservados. Cabe mencionar que los resultados pueden variar dependiendo el tipo de refrigeradora que se quiera usar, y las condiciones del sistema. Se recomienda verificar los diámetros de las tuberías de transporte de agua y amoníaco para que estas puedan generar la capacidad frigorífica necesaria para el uso que se le vaya a dar. Estas pueden ser consultadas y verificadas normalmente en los manuales o fichas técnicas de los refrigeradores que se estén usando.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

En esta sección se realizará un estudio de los costos que supone la compra y modificaciones necesarios de un refrigerador de absorción para que este use como combustible gas metano para la llama del generador y poder completar el ciclo.

4.1. Compra y modificaciones del refrigerador

El refrigerador empleado MTH-10, es fabricado en Argentina y puede importarse nuevo por un precio de alrededor de USD. 1 775,00 aproximadamente. El precio se reduce a USD 1 040,00 aproximadamente si se compra un equipo igual, pero de segunda mano. Otra opción es la compra local, sin embargo, esta tecnología no es popular en Guatemala, por lo cual es muy difícil encontrar equipos usados y los equipos nuevos tendrían que ser importados o mandados a hacer bajo pedido.

Existen empresas en Centro América que se dedican a la producción de equipos de refrigeración, como lo es el Grupo FOGEL de Centro América S.A., originarios de Filadelfia, Estados Unidos. Estos se dedican a la fabricación de refrigeradores y congeladores para el uso comercial. La empresa rectifica su decisión en la producción de equipos basados solamente el ciclo de compresión, ya que la producción de equipos con ciclo de absorción o adsorción no sería rentable. Esto se debe a que Centro América no posee las instalaciones requeridas para proveer a nivel comercial y residencial un suministro de gas ya sea propano o metano, a diferencia de países como Estados Unidos o España.

Una tercera opción se encuentra en importar equipos similares desde China. Se cotizaron dos refrigeradoras similares. El primero es el refrigerador marca Bushman, modelo XCD-185 de 174 litros, el cual tendría un precio aproximado ya puesto en Guatemala de USD 720,00. Este refrigerador usa amoníaco como refrigerante y combustible usa GLP. La segunda opción es un refrigerador manufacturado por Foshan Shunde Wiki Electrical Co., Ltd, modelo BC-135L de 135 litros, el cual tiene un precio aproximado ya puesto en Guatemala de USD 590,00. Al igual que el refrigerador anterior, este usa amoníaco como refrigerante y GLP como combustible.

El precio de un mechero Bunsen se encuentra alrededor de entre USD 20,00 a USD 80,00. El mechero Bunsen mostrado en la sección 3.5. es de marca EISCO Labs, modelo B00VYNTNE6, y este tiene un precio aproximado de USD 70,67 importado a Guatemala. Este mechero cumple con las características deseadas, las cuales son: altura, regulador de caudal y entrada de aire.

4.2. Inversión total inicial

El costo total de inversión que se requiere para la compra del refrigerador por gas, adaptarlo y conectarlo a una fuente de gas metano se muestra en la Tabla XII. Como lo que buscamos es la menor inversión posible se toma en cuenta solamente el refrigerador.

Tabla XII. **Inversión inicial requerida**

Descripción de materiales	Precio [USD]	Precio [Q]*
Refrigerador de absorción.	USD 590,00	Q 4 661,00
Manguera de alta presión para gas de 3/8" para presiones de hasta 350 PSI. Para unión.	USD 30,00	Q 237,00
Mechero Bunsen con caudal y entrada de aire ajustable.	USD 70,67	Q 558,29
Accesorios varios: Tuercas, cinta de teflón, soportería, etc.	USD 15,00	Q 118,50
Mano de obra	USD 100,00	Q 790,00
Total	USD 805,67	Q 6 364,79

* Tasa de cambio USD 1 = Q 7,90

Fuente: elaboración propia, empleando Excel (2021).

Dado que el combustible (gas metano) podría ser suministrado por varias fuentes las cuales podrían ser: biodigestores, plantas de tratamiento, o producido por la misma población no supone un gasto inicial. Únicamente en caso de algún desperfecto de alguno de los componentes del sistema sería necesario realizar un gasto adicional.

4.3. Análisis de ganancia económica

En esta sección, se mostrará una comparación de los gastos del sistema mostrado en la sección 4.2. en comparación con un refrigerador convencional eléctrico de una misma capacidad. Se comparará tanto el gasto inicial como una comparativa de gasto energético.

Según la tabla XII de inversión inicial, se tiene que el gasto total para un sistema de refrigeración por llama con sus respectivas modificaciones para el uso de metano es de Q. 6 364,79. Un refrigerador convencional eléctrico de la misma capacidad ronda alrededor de los Q. 3 000,00. Esto quiere decir que el sistema de refrigeración por llama con uso de metano es aproximadamente 2,12 veces más caro que un refrigerador convencional. Esto hace poco práctico al refrigerador por llama ya que por más de la mitad del precio se podría conseguir un refrigerador convencional. Pero cabe recordar que este sistema va enfocado a áreas que carecen de electricidad o de una fuente continua de electricidad.

Un refrigerador convencional de 9 pies consume alrededor de 400 watts. Según el tarifario de la Distribuidora de Electricidad de Occidente, S.A. del 2020, el precio por kWh es de 1,12 sin IVA. Cabe mencionar que DEOCSA tiene un cargo por cliente de Q. 19,37 sin IVA. Entonces si se supone un uso de 24 horas se tendrían los siguientes consumos:

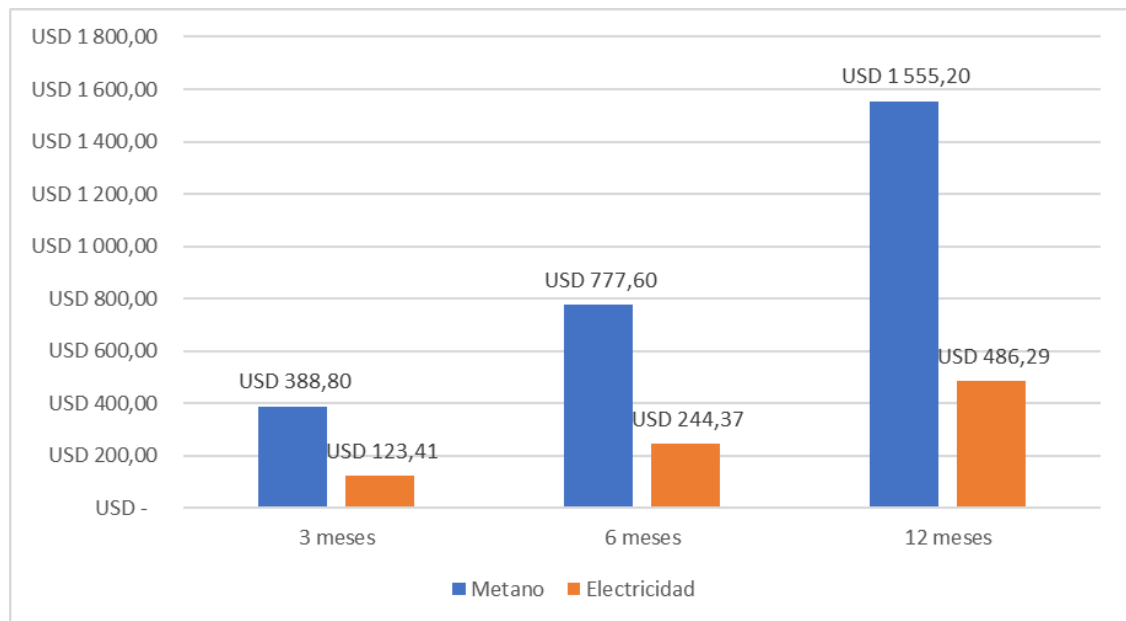
Tabla XIII. **Consumo de kWh de un refrigerador convencional de 400 watts**

Equipo	Consumo kWh en 3 meses	Consumo kWh en 6 meses	Consumo kWh en 12 meses
Refrigerador convencional de 9 pies	864	1 728	3 456

Fuente: elaboración propia, empleando Excel (2021).

Entonces con las tarifas proporcionadas por DEOCSA de Q/kWh; y la tarifa por cliente y los resultados de costos de combustible del metano obtenidos en la sección 6.2. Costos, tenemos la siguiente comparación para 3, 6 y 12 meses:

Figura 31. **Comparación de costo de consumo entre metano y electricidad**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel (2021).

En esta gráfica se puede observar que el precio por consumo de metano a comparación del precio por consumo de electricidad es aproximadamente 3,15 veces más alto. Esto hace poco rentable el usar metano como sustituto de la electricidad. También es importante ver los efectos del uso del metano en el medio ambiente, si se compara con las emisiones emitidas en la quema de otros combustibles fósiles, se puede ver que el metano es más amigable con el medio ambiente, esto se desarrollará a más profundidad en el capítulo 6.

Como fue mencionado anteriormente, un sistema de este tipo va enfocado para comunidades que carecen de una distribución constante de electricidad. Aunque para comunidades de pocos recursos tendrían dificultad de aplicar este tipo de sistema.

5. ANÁLISIS ECOLÓGICO

5.1. Impacto ambiental del metano

El metano es el combustible fósil catalogado como el de menor impacto ambiental. El gas se extrae directamente de la naturaleza y sin haberse sometido a ningún tipo de refinamiento, llega a su punto de consumo. El gas metano es un combustible más limpio que el petróleo y el carbón, aunque al igual que el carbón, este puede variar su composición dependiendo de donde este sea extraído.

Tabla XIV. **Estimado de las Principales fuentes de metano a nivel global (millones de Ton/año)**

Natural		Energía/desechos		Agricultura	
Pantanos	115	Gas y petróleo	50	Cultivos de arroz	60
Océanos	15	Carbón mineral	40	Animales domésticos	80
Termitas	20	Carbón vegetal	10	Abonos orgánicos	10
Combustión	10	Relleno Sanitarios	30	Combustión	5
		Aguas residuales	25		
Total	<u>160</u>	Total	<u>155</u>	Total	<u>155</u>

Fuente: U.S Energy Information Administration. 2020. *Natural Gas Explained* [En línea] <<https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/natural-gas-and-the-environment.php>> [Consulta: 20 de octubre de 2020]

Con el avance económico del mundo, el gas metano a estado siendo utilizado para diferentes propósitos. Por ejemplo, a nivel doméstico puede ser empleado para la cocina, lavado, secado, refrigeración y calefacción. Por parte

del sector comercial e industrial puede ser usado para procesos industriales, hospitales, comercios o centros educativos.

Si bien el impacto ambiental del gas natural es menor en todas sus etapas (extracción, elaboración, transporte y utilización) se ha comprobado que en la primera fase pueden desprenderse algunos contaminantes. Esto es a raíz del *fracking*, técnica la cual consiste en crear fisuras en la roca para que parte del gas fluya al exterior y puedan extraerse luego de mejor manera desde un pozo. Este sistema tiene varias desventajas como la contaminación sonora, la contaminación de la atmósfera y hasta puede generar temblores en las cercanías. Esta técnica tiene una gran oposición mundial.

El metano también es un gas con efecto invernadero, cuyo PCG es de 21 (ver Tabla II). Con la industria agropecuaria siendo una de las que más metano produce debido a crianza de bovinos. Una sola vaca produce entre 250 a 500 litros de metano por día, lo que equivale a emitir 3,1 gigatoneladas de dióxido de carbono a la atmósfera.³⁸

El metano produce más energía por masa que otros combustibles fósiles, por lo cual es una fuente de energía más eficiente y amigable con el medio ambiente. Siempre y cuando se eviten las fugas hacia la atmósfera. Entonces el uso del metano por encima de otros combustibles, por ejemplo: el carbón para generar energía eléctrica provocaría menos contaminación (producción de CO₂) que el carbón (tabla XV).

Se puede concluir que el uso del metano o biogás como combustible, no solo es el menos dañino hacia el medio ambiente, sino también más eficiente para procesos industriales. Entonces el uso del metano como combustible para un sistema de refrigeración por absorción es factible e incluso da mejores

³⁸ ROCA, L. 2001. *Refrigerantes naturales: los equipos de absorción como alternativa ecológica en la climatización*. [En línea] <www.energuia.com>

resultados que los combustibles usados normalmente como el propano, siempre y cuando se tenga una fuente continua de esta.

Tabla XV. **Libras de CO₂ emitida por millón de unidades BTU de energía para varios combustibles**

Combustible	Libras de CO₂
Carbón (Antracita)	228,6
Carbón (Hulla)	205,7
Carbón (lignito)	215,4
Carbón (sub-bituminoso)	214,3
Diesel	161,3
Gasolina	157,2
Propano	139
Biogás	117

Fuente: U.S. Energy Information Administration, 2016. *Carbon Dioxide Emissions Coefficients*.

[En línea] <https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php>

5.2. Sustancias refrigerantes

Los refrigerantes son un agente de enfriamiento, con propiedades específicas de punto de evaporación y condensación. Por medio de cambios de temperatura y presión estos absorben energía calorífica de un espacio y lo disipan hacia otro ambiente por medio de un cambio de líquido a gas y viceversa.

El agua fue el primer refrigerante usado y todavía es usado en nuestra época, como, por ejemplo, en el sistema de enfriamiento de los automóviles. Con el tiempo se han desarrollado máquinas para disminuir la presión del vapor de agua y acelerar su evaporación. Durante la primera parte del siglo XIX, se desarrollaron máquinas para la compresión de vapor y se probaron diferentes fluidos en donde

el amoníaco, bióxido de azufre, cloruro de metilo y algunos hidrocarburos tuvieron buenos resultados.³⁹

Desde el año 1876, el amoníaco ha sido uno de los refrigerantes principalmente usados gracias a sus excelentes propiedades como refrigerante. En la actualidad, el amoníaco ha demostrado ser satisfactorio sobre todo en refrigeración industrial en grandes plantas. Los fluorocarbonos (CFC) han sido un tipo común de refrigerante en la mayoría de los sistemas de enfriamiento, sin embargo, estos han demostrado ser altamente dañinos para la capa de ozono.⁴⁰

5.2.1. Sustancias empleadas en absorción

En los sistemas de refrigeración por absorción, se usan normalmente una combinación de dos sustancias, tanto para los sistemas de absorción líquido-gas y líquido-sólido, las cuales: son el refrigerante y el absorbente. En la tabla VII se pueden observar las combinaciones de estas. Siendo el agua y el amoníaco las más comunes para refrigerante y para absorbentes sales como el bromuro de litio y cloruros. Sin embargo, existe una gran variedad de combinaciones posibles entre refrigerante y absorbente para la industria de refrigeración.

Para la selección de la combinación de compuestos a usar, por lo general se consideran varias cualidades, las cuales son: fisiológicas, toxicidad, detección en caso de fugas, influencia en los productos a enfriar y precio. Pero probablemente el factor más importante es la estabilidad química entre ambos componentes.

La combinación más popular, comúnmente usada y a la que se ha estudiado ampliamente es la de amoníaco-agua y bromuro de litio-agua. Pero este no podría ser el caso siempre porque muchas veces la combinación depende de las

³⁹ ROCA, L. 2001. *Refrigerantes naturales: los equipos de absorción como alternativa ecológica en la climatización*. [En línea] <www.energuia.com>

⁴⁰ Ibidem.

condiciones de operación, de construcción y técnicas, las cuales no pueden obtenerse con combinaciones convencionales.

La eficiencia de un sistema de refrigeración por absorción está relacionada con las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo. Para los sistemas de absorción líquido-gas, un requerimiento muy importante entre la combinación del refrigerante-absorbente es cuando en la fase líquida, estos deben tener un margen de solubilidad en el rango de operación del ciclo. La mezcla debe de ser no tóxica, ni explosiva y químicamente estable.

Otras características deseables para la combinación de refrigerante-absorbente:

- El refrigerante debe poseer un alto calor de vaporización y alta relación de concentración en el absorbente, con el fin de mantener baja la circulación entre el generador y el absorbedor por unidad de capacidad de enfriamiento.
- El absorbente debe de ser menos volátil que el refrigerante, para facilitar su separación en el generador. Si esto es posible, se requerirá la integración de un rectificador para llevar a cabo esta separación en forma de vapor.
- Tanto el refrigerante como el absorbente deben de ser no corrosivos y amigables con el medio ambiente.⁴¹

“Muchas mezclas han surgido a lo largo de los años en la industrial, se estima que existen más de 40 compuestos de refrigerantes”.⁴²

Al revisar las características que debe reunir la mezcla ideal, se observa que es difícil encontrar un par que reúna todas las propiedades deseables, y por ello, resulta práctico hacer más eficiente la selección en función de las condiciones de operación, y de la misma manera el uso de equipo.

⁴¹ PINO, F. *Análisis de los sistemas de refrigeración por adsorción*. Universidad de Sevilla, Escuela técnica superior de ingenieros, España, 2011. p. 98.

⁴² Ibidem

5.2.2. Sistema agua-amoniaco

Como fue mencionado anteriormente, una de las mezclas más comunes para la refrigeración por absorción y de la que se expandió en este estudio de prefactibilidad es la de agua-amoniaco, siendo el agua como el absorbente y el amoniaco como refrigerante. El amoniaco usado en la refrigeración se denomina amoniaco anhidro cuando prácticamente no contiene agua (99 % de pureza).

El amoniaco anhidro es un líquido incoloro que hierve a temperaturas de $-33,33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las propiedades del amoniaco le confieren una transferencia de calor que supera con facilidad la de los refrigerantes fluorados más comunes como el R-22, el cual es seis veces más eficiente. Gracias a sus propiedades y a que la viscosidad del amoníaco es un poco mayor que sus contrapartes fluoradas, el costo de las tuberías es menor.

Otra ventaja del amoníaco es que el precio es mucho más bajo que la mayor parte de refrigerantes fluorados, y este siendo más eficiente, se necesitara una cantidad menor de amoniaco para poder producir el mismo enfriamiento que otros refrigerantes.

Los sistemas de llama directa también son usados ampliamente en el uso comercial y residencial al utilizar combustibles como el propano, butano o metano. Un ejemplo es en el sector alimenticio donde demandan refrigeración comprendida entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para producir hielo o cámaras refrigeradas de almacenamiento.

En la siguiente tabla (tabla XVI) se muestran algunas propiedades de diferentes refrigerantes a comparación del amoniaco.

Tabla XVI. **Propiedades de algunos refrigerantes**

Refrigerante	PAO (Potencial de agotamiento de ozono)	Influencia en efecto invernadero	Desliz	Punto de ebullición normal	Capacidad de enfriamiento (-5/+45 °C)	Toxicidad
R-22	0,05	0,35	0 K	-40,8 °C	100 %	Alta
R-407c	0	0,29	5-7 K	-36,0 °C	97 %	Media
R-410 ^a	0	0,41	≈ 0 K	-50,5 °C	141 %	Baja
R-410b	0	0,41	≈ 0 K	-51,2 °C	137 %	Baja
R-507	0	0,98	0 K	-46,7 °C	96 %	Baja
Amoniaco	0	0	0 K	-33,6 °C	112 %	Alta

Fuente: Renedo, C. Tecnología Frigorífica. [En línea]

<<https://personales.unican.es/renedoc/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Tec%20Frig/005%20Refrigerantes%20y%20Salm.pdf>> [Consulta: 20 de octubre de 2020]

Ambos, el agua y el amoníaco tienen una gran solubilidad entre uno y el otro, lo que permite un amplio rango de condiciones de operaciones, lo que hace de esta muy versátil. El agua también tiene una afinidad con el vapor de amoníaco procedente del evaporador de un sistema de refrigeración por absorción procedente del evaporador. Las sustancias son altamente estables, tanto por separado como mezcladas y son compatibles con la mayoría de los materiales de equipos, exceptuando el cobre y sus derivados.

Sin embargo, esta mezcla también tiene sus fallas. Su uso en los sistemas de aire acondicionado es limitado debido a la toxicidad del amoníaco. En sistemas de refrigeración por absorción una desventaja en la mezcla es que si las presiones de condensación y evaporación son superiores a la atmosférica (si la temperatura de condensación es de 40 °C y la de evaporación de 0 °C, al

amoníaco alcanzará presiones próximas a 1 500 y 500 kPa), por lo que, la toxicidad del amoníaco limita su uso en algunos países como España.

Otra desventaja de la mezcla en sistemas de refrigeración por absorción se encuentra en el agua, que tiene una volatilidad relativamente alta, por lo que, a la salida del generador pueden contenerse grandes cantidades de vapor de absorbente. En el caso de que estas partículas atravesasen el condensador de camino al evaporador, elevaría la temperatura de este último reduciendo su eficiencia. Esto se puede solucionar instalando un rectificador que elimina el vapor de agua procedente del generador antes que llegue al condensador.

Es necesario que el agua mantenga su calidad fisicoquímica y microbiológica en los parámetros recomendados por los fabricantes del equipo o por normativas que se estuvieran usando. Hay varias condiciones las cuales se tienen que controlar, las cuales son:

Incrustación: evitar la formación de cristales de sales insolubles dentro del sistema, las cuáles reducen el rendimiento y la vida útil del equipo. Existen diferentes tratamientos para emplear, tantos externos por procesos físicos o internos mediante la adición de productos químicos.

Crecimiento de algas y microorganismos: se debe evitar el contacto de la luz solar con el agua y evitar el crecimiento y proliferación de algas mediante la continua limpieza. Se pueden emplear químicos como los biocidas utilizados en la limpieza de torres de enfriamiento.

Control de corrosión: este es el desgaste de las superficies metálicas por procesos físicos, químicos o electroquímicos. Para evitar la corrosión en el equipo, durante la etapa de diseño, se consideran materiales no oxidables o

cuando se trabaja se emplean productos que crean una capa protectora sobre la superficie protegiéndola de la oxidación ocurrida por el agua.

Control de sólidos disueltos: las sales disueltas por la evaporación de agua aumentan la conductividad de esta, se debe procurar tener un valor máximo admisible y regularlo mediante purgas del sistema que renueve el agua del ciclo y evite la aparición de depósitos o corrosión.

Control de sólidos en suspensión: el agua de refrigeración puede llegar a ensuciarse debido al arrastre de partículas del ambiente exterior. Para eliminar esas partículas del sistema, se pueden emplear filtros para evitar la formación de lodos dentro del sistema.

6. COMPARACIÓN DE REFRIGERACIÓN CON METANO Y COMBUSTIBLES COMUNMENTE USADOS

Los combustibles en un sistema de refrigeración por absorción más comunes son: el propano, butano, GLP y metano entre otros. En Guatemala, residencialmente se usa más el propano ya que es el más abundante y accesible para el público.

A la hora de comparar combustibles es necesario distinguir entre el aspecto técnico y el económico. Además, cuando se escoge el combustible a usar, debe de tenerse en cuenta la disponibilidad de estos para su suministro continuo ya que el refrigerador debe de ser alimentado constantemente.

6.1. Resultados obtenidos

En el capítulo 3 de instrumentación, sección 3.5. del mechero Bunsen, se indica que el ensayo llevado a cabo por el Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones, se proporcionó un caudal de 120 L/h (0,12 m³/h) de biogás para poder producir el calor suficiente para el proceso de refrigeración por absorción. En esta sección se usará esta medida como base para calcular el poder calorífico en comparación de otros combustibles.

Tabla XVII. Poder calorífico de diferentes combustibles

Combustible	Metano	Propano	Butano	GLP
Potencia calorífica inferior másico	11 944 Kcal/Kg	11 082 Kcal/Kg	10 938 Kcal/Kg	11 867 Kcal/Kg
Volumen específico (gas)	0,717 Kg/m ³	0,552 Kg/m ³	0,405 Kg/m ³	0,420 Kg/m ³

Fuente: The Engineering Toolbox. *Methane Density and Specific Weight*. [En línea] <https://www.engineeringtoolbox.com/methane-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2020.html> [Consulta: 20 de octubre 2020]

Entonces, si se usan los 0,12 m³/h de metano utilizados anteriormente se encuentra que:

$$\frac{0.72 \text{ Kg}}{\text{m}^3} * \frac{11,944 \text{ Kcal}}{\text{Kg}} * \frac{0.12 \text{ m}^3}{\text{h}} = 1,031.9616 \text{ Kcal/h}$$

Se determina que la energía calorífica teórica suministrada al refrigerador por absorción con un caudal de 0,12 m³/h es de 1 031,9616 Kcal/h. Ahora se encontrará el caudal necesario de los siguientes combustibles para poder dar la misma energía calorífica.

Entonces para gas propano se tiene:

$$1,031.9616 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} * \frac{\text{Kg}}{11,082 \text{ Kcal}} * \frac{\text{m}^3}{0.522 \text{ Kg}} = 0.1687 \text{ m}^3/\text{h} \text{ ó } 168.7 \text{ L/h}$$

Para el gas butano se tiene:

$$1,031.9616 \frac{Kcal}{h} * \frac{Kg}{10,938 Kcal} * \frac{m^3}{0.405 Kg} = 0.2329 m^3/h \text{ ó } 232.9 L/h$$

Y para el GLP se tiene:

$$1,031.9616 \frac{Kcal}{h} * \frac{Kg}{11,867 Kcal} * \frac{m^3}{0.420 Kg} = 0.2070 m^3/h \text{ ó } 207.0 L/h$$

Con estos datos podemos concluir que el metano es el combustible más eficiente de entre los combustibles más comunes para este procedimiento y el gas butano siendo el menos eficiente de ellos. Por lo cual se hace factible y hasta mejor opción utilizar gas metano para alimentar la llama del refrigerador por absorción. Sin embargo, siempre se debe de tomar en cuenta la disponibilidad de cada uno. Donde los derivados del petróleo siempre serán más abundantes.

6.2. Costos

Con los precios (apéndice 10) de los diferentes combustibles según la dirección de hidrocarburos del Ministerio de Energías y Minas (actualizados 2018) los precios de los combustibles por litros serían los siguientes:

Tabla XVIII. **Precios de combustibles (en fase líquida) por litro**

Combustible	Precio por litro [L/USD]
Metano	USD 0,35
Propano	USD 0,65
GLP	USD 0,34
Butano	USD 1,87

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2018. Estadísticas de Hidrocarburos Guatemala: Informe estadístico año 2018. [En línea] <<https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/03/2018-Revista-Hidrocarburos-04T.pdf>>

En la tabla XVIII se debe considerar que los combustibles se encuentran en estado líquido para un mejor almacenamiento y transporte. Por lo que hay que considerar que, para su uso como combustible, estos se expanden hasta llegar al estado gaseoso donde es posible usarlos en instrumentos como el mechero Bunsen del refrigerador por absorción. Las proporciones de líquido a gas son las siguientes: Metano 240:1; Propano 270:1; GLP 250:1; y Butano 122:1. Con esto se obtiene los precios:

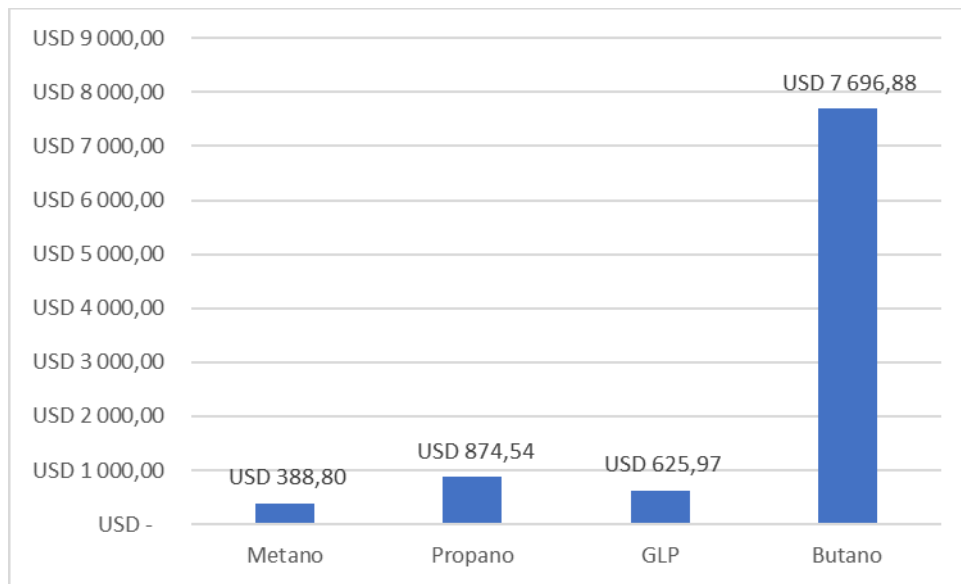
Tabla XIX. **Precios de combustibles (en fase gaseosa) por 100 litros**

Combustible	Precio por 100 litros [100L/USD]
Metano	USD 0,15
Propano	USD 0,24
GLP	USD 0,14
Butano	USD 1,53

Fuente: elaboración propia, empleando Excel (2021).

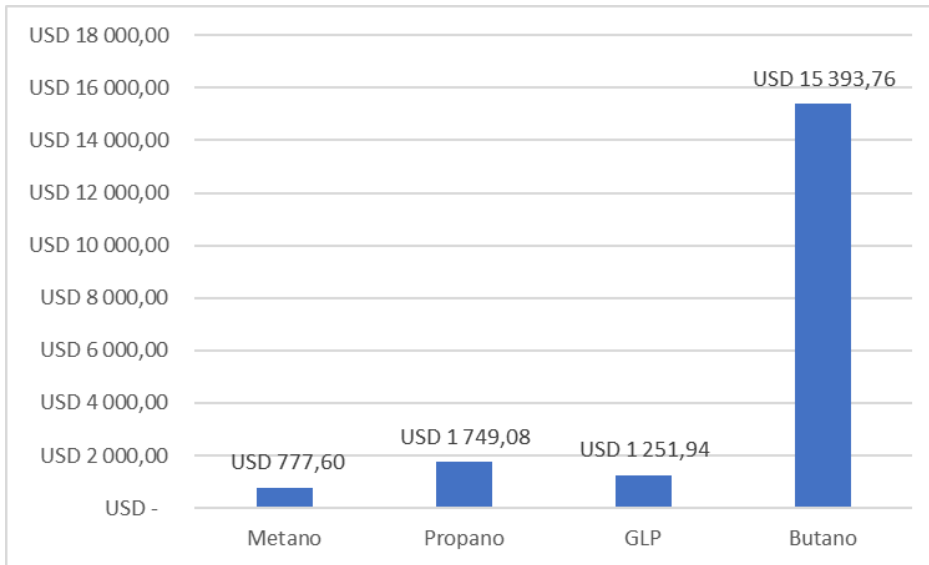
Con los datos obtenidos en la sección 6.1. se sabe el caudal necesario de cada combustible para aportar la misma energía calorífica del metano. A continuación, se presenta una serie de gráficas, la cuales muestran el valor de combustible usado en 3 meses, 6 meses y 12 meses; si se usa el refrigerador durante 24 horas.

Figura 32. **Costo de combustible consumido en 3 meses**



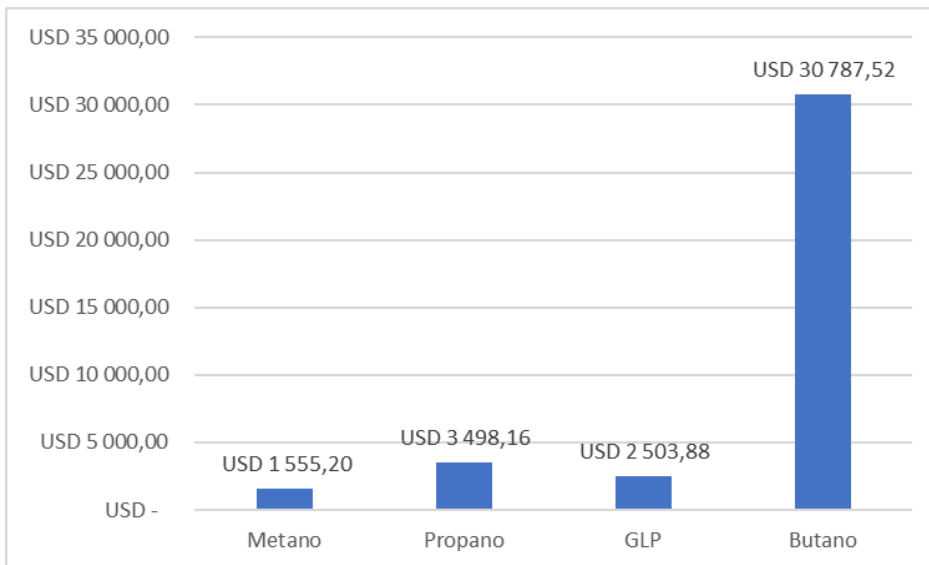
Fuente: elaboración propia, empleando Excel (2021).

Figura 33. Costo de combustible consumido en 6 meses



Fuente: elaboración propia, empleando Excel (2021).

Figura 34. Costo de combustible consumido en 12 meses



Fuente: elaboración propia, empleando Excel (2021).

Se puede observar que la opción más barata será la del metano, seguidas respectivamente por el GLP y el propano. El butano sería la opción más cara por un porcentaje sumamente alto. Esto se puede deber al fenómeno de oferta y demanda, ya que según el Departamento de Análisis Económico del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala en el 2018; solo se importaron aproximadamente 690 barriles de butano en comparación de 6 335 020 barriles de GLP. El butano siendo un combustible muy versátil, no se comercializa tan bien como el propano, GLP y otros combustibles en Guatemala.

En conclusión, se puede usar el metano como combustible para el refrigerador con absorción donde este será la opción más barata de todas, siempre y cuando se tenga una fuente constante de este.

CONCLUSIONES

1. La aplicación del biogás metano como combustible en sistemas de refrigeración por llama que trabajan bajo el ciclo de refrigeración por absorción, es factible con las modificaciones adecuadas y bajo circunstancias favorables como tener a disposición el refrigerador por llama y un suministro estable de gas metano.
2. La abundancia y las propiedades del biogás metano, lo hacen un combustible bastante favorable para su uso en la industria gracias a que tiene una mayor eficiencia en comparación a otros combustibles usados comúnmente como el propano, butano y el GLP.
3. En Guatemala no existen actualmente instalaciones de líneas de gas para suministro de combustible, sin embargo, existen diferentes maneras de poder obtener gas metano como en plantas de aguas residuales y la construcción de bio digestores.
4. Comúnmente los sistemas de refrigeración por llama están diseñados para usar gas propano o GLP; el gas metano puede ser usado sin ningún problema modificando solamente el sistema de llama, por medio de la instalación de un mechero Bunsen en el generador.
5. Un sistema de refrigeración por llama con sus debidas modificaciones para usar gas metano demostró ser más eficiente que otros combustibles como el gas propano, GLP y el butano; sin embargo, también demostró ser

menos eficiente que un refrigerador eléctrico convencional de ciclo de compresión.

6. Un sistema de refrigeración por llama funciona con base en el ciclo de refrigeración por absorción, el cual hace uso de una reacción química entre dos sustancias, el refrigerante y el absorbedor, para poder generar una carga frigorífica.
7. El gas metano tiene una potencia calorífica mayor que la de otros combustibles como el propano, GLP y el butano.
8. El gas metano es más amigable con el medioambiente ya que genera menor cantidad de gases de invernadero durante su combustión a comparación de otros combustibles como el propano, GLP y el butano.
9. El uso de combustibles renovables en la industria puede traer varios beneficios ya que estos pueden resultar económicamente más baratos trayendo ganancias a la empresa; estos también son abundantes y pueden ser obtenidos fácilmente tanto de residuos orgánicos como de depósitos naturales.
10. Este estudio de prefactibilidad proporciona información sobre las características del gas metano como combustible, su aplicación en un sistema de refrigeración por absorción y su comparación con otros combustibles usados comúnmente.

RECOMENDACIONES

1. Corroborar la capacidad del refrigerador para poder calcular el caudal ideal de gas metano hacia la llama y de esa manera hacer el sistema lo más eficiente posible.
2. Considerar tener una fuente continua de gas metano (24 horas, los 7 días de la semana), para poder suministrarle sin problemas el combustible necesario al equipo.
3. Utilizar combustibles renovables, como gas metano que puede proveer una variedad de ventajas; como un ahorro económico y que son más amigables con el medioambiente que muchos combustibles usados actualmente en la industria.
4. Adecuar el diámetro de mangueras para el transporte de gas, con el fin de alcanzar el caudal y presiones necesarias para el sistema.
5. Considerar la compra de refrigeradores con la menor cantidad de sistemas electrónicos posibles (con excepción del sistema de encendido). Estos pueden llegar a ser más baratos y dichos elementos podrían generar conflicto con las modificaciones hechas a la quemadora de gas del refrigerador.
6. Manejar estos sistemas en lugares que carecen parcial o totalmente de suministro de energía eléctrica pero que tengan disponible una fuente continua de gas metano.

7. Elaborar un plan de seguridad para aquellos lugares dentro del interior de la república que carecen de los equipos de seguridad necesarios contra incendios y de esta manera evitar futuros accidentes.
8. Considerar un programa de mantenimiento preventivo para el sistema, para así alargar el tiempo de vida del equipo y evitar problemas en el futuro.
9. Utilizar material de consulta y referencias puede ser de gran ayuda ya que provee a lector de la teoría necesaria, recomendaciones y ejemplos de varios proyectos similares.

BIBLIOGRAFÍA

1. Absorsistem. *Funcionamiento del ciclo de absorción de doble efecto con bromuro de litio y agua llama*. [En línea] <https://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-doble-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua-llama> [Consulta: 21 de octubre de 2020]
2. Absorsistem. *Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua*. [En línea] <https://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/funcionamiento-del-ciclo-de-absorcion-de-simple-efecto-con-bromuro-de-litio-y-agua> [Consulta: 21 de octubre de 2020]
3. ÁNGEL, L. (2015). *El Triángulo de Fuego*, de Asociación Española de Laboratorios de Fuego. [En línea] <http://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/> [Consulta: 20 de octubre de 2021]
4. ARNABAT, I, 2007. *Sistemas de refrigeración aire acondicionado: compresión y absorción*. [En línea] <https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-instalaciones-componentes/sistemas-de-refrigeracion-compresion-absorcion.html> [Consulta: 20 de febrero de 2021]
5. BRAVO, J. 2011. *Estudio Analítico De La Transferencia De Calor En Un Absorbedor De Burbujas*. [En línea] <https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/12646/1/TE>

SIS%20DE%20MAESTRIA%20JAIME%20BRAVO%20MENDEZ.p
df>

6. CABALLERO, A. y PÉREZ, P. 2014. El metano como materia prima: un reto vigente. *Anales de Química*. España: Real Sociedad Española de Química, 110, No. 2, pp. 131-139.
7. CENGEL, Y. *Thermodynamics: an Engineering Approach, 8th edition*. Estados Unidos: McGraw Hill Education, 2015, pp. 633-639.
8. CHIRIBOGA, J. y COLLAGAUZO, P. *Diseño y construcción de un Sistema de enfriamiento por absorción de calor con una capacidad de 1,320 J/min, con la utilización de un colector térmico*. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2018. Pp. 127.
9. CORNEJO, P. 2009. *Aplicaciones del Metano*. [En línea] <<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n4/m2.html#refe1>>
10. Ecosolar S. A. *Heladera y freezer a gas modelo MTH-10*. [En línea] <https://www.ecosolarsa.com/A24_Heladera.aspx> [Consulta: 20 de octubre de 2020]
11. FERNÁNDEZ, Mikel. *Estudio de refrigeración por absorción con alimentación de biogás para su uso en regiones de Bolivia carentes de energía eléctrica*. Trabajo de graduación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2014. pp. 15-56, 75-150.

12. FLOREZ, O., VELANDIA, R. *Diseño y construcción de un prototipo para la experimentación en la refrigeración absortiva usando la mezcla bromuro de litio, agua*. Tesis de licenciatura. Universidad Industrial de Santander, Escuela de ingeniería mecánica, Colombia, 2012. 279 pp.
13. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Comentarios al Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE-2007)*. España: Gobierno de España, 2007.167 p.
14. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Panel Internacional de Cambio Climático Tercer Reporte de evaluación*. Reino Unido: Cambridge University Press, 2001. 148 p.
15. URIELI, I. 2010. *Chapter 4: The First Law of Thermodynamics for Control Volumes* [En línea] <https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1_6/Chapter4c.html> [Consulta: 21 de octubre de 2020]
16. RUBIO, J. *Ciclos de Refrigeración por Absorción*. [En línea] <<https://www.mundohvacr.com.mx/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion>> [Consulta: 20 de octubre de 2020]
17. JULIO, A. y RAMOS, A. *Diseño Y Construcción De Un Sistema De Refrigeración Por Absorción Intermitente Empleando Energía Solar*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Córdoba, Facultad de ingeniería, Colombia, 2018. pp. 5-30.

18. Martínez, R., Chávez, E. y López, I. (noviembre 2008) *Utilización del biogás como combustible para motores de combustión interna*. En: V Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica (COMEC).

19. Ministerio de Energía y Minas, 2018. *Estadísticas de Hidrocarburos Guatemala: Informe estadístico año 2018*. [En línea] <<https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/03/2018-Revista-Hidrocarburos-04T.pdf>>

20. MORENO, F., PERDONE, E. y GUEVARA, D. 2018. Diseño y evaluación de un Sistema de refrigeración experimental trabajando por adsorción solar. *Revista Chilena de Ingeniería*. Chile: Ingeniare, 26, No. 4. Pp. 622-630.

21. NIETO, A. 2008. Ciclos de Refrigeración por Absorción. [En línea] <[108](https://www.mundohvacr.com.mx/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion/#:~:text=De%20acuerdo%20a%20la%20figura,expansi%C3%B3n%20(v%C3%A1lvula%20de%20expansi%C3%B3n)>>

22. NOGUÉS, M. <i>Desarrollo de una bomba de calor de absorción a gas con fluidos orgánicos e intercambiadores de placas</i>. Tesis de doctorado en ingeniería Química. Universidad Rovira I Virgili, España, 2001. pp. 56-76.

23. Pauss, A., Andre, G., Perrier, M. & Guiot, S. 1990. Liquid-to-Gas Mass Transfer in Anaerobic Processes: Inevitable Transfer Limitations of Methane and Hydrogen in the Biomethanation Process. <i>Applied and</i>

</div>
<div data-bbox=)

Environmental Microbiology. Canadá: American Society for Microbiology, vol. 56, No. 6, pp.1636-1644.

24. PINO, F. *Análisis de los sistemas de refrigeración por adsorción. Tesis de licenciatura*. Universidad de Sevilla, Escuela técnica superior de ingenieros, España, 2011. pp. 24, 98.
25. RATHER, N. 2018. Performance evaluation and COP calculation of Triple effect vapour Absortion machine working on Solar Energy. *International Journal of Current Engineering and Technology*. Estados Unidos: Inpressco, Vol 8, No. 1, pp. 61-65.
26. RAVISHANKARA, A. R.; DANIEL, John S.; PORTMANN, Robert W. 2009. *Supporting Online Material for Nitrous Oxide (N2O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century*. [En línea] <https://www.researchgate.net/publication/26773393_Nitrous_Oxide_N2O_The_Dominant_Ozone-Depleting_Substance_Emitted_in_the_21st_Century/link/54d379f10cf250179182297d/download>
27. RENEDO, C. *Tecnología Frigorífica*. [En línea] <https://personales.unican.es/renedoc/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Tec%20Frig/005%20Refrig%20y%20Salm.pdf> [Consulta: 20 de octubre de 2020]
28. ROCA, L. 2001. *Refrigerantes naturales: los equipos de absorción como alternativa ecológica en la climatización*. [En línea] <www.energuia.com>

29. SÁNCHEZ, R. *Proyecto De Dimensionamiento, Montaje Y Análisis Del Funcionamiento De Una Instalación De Climatización Basado En Un Sistema Solar Térmico Y Una Máquina De Absorción De Pequeña Potencia*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2007. 293 p.
30. SARABIA, E., SOTO, V. y PINAZO. Refrigeración por Absorción. [En línea]<http://personales.upv.es/emsaes/apuntes/FRIO_ABSORCION.html> [Consulta: 21 de octubre de 2020]
31. SARBU, I. *Solar Heating and Cooling Systems*, Capítulo 7, 1ra edición, Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier Inc, 2017.
32. SOTO J. *Química orgánica II: hidrocarburos y sus derivados halógenos síntesis*. España: Editorial Síntesis, 2001. 543 p.
33. Srihirin, P., Aphornratana, S. & Chungpaibulpatana, P. 2001. A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Países Bajos: Elsevier, 5. Pp. 343-372.
34. TISSANDIER. *Las Maravillas del Agua*, 4ta edición, Nueva York, Estados Unidos: C. Scribner and Co, 1878.
35. VAN TASSEL, G., 2012. *Introduction to LNG as a Maritime fuel: The Good, The Bad, The Ugly*. [En línea] <<http://www.glmri.org/downloads/focusAreas/presentations/vanTassel2-2012.pdf>> [Consulta: 21 de octubre de 2020]

36. VARNERO, M. Manual del Biogás. Santiago de Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Energía, 2011. pp. 61.
37. VICENTE, J. *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por absorción*. Proyecto de fin de carrera. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, 31, 45, 46, 214. 213 p.
38. VILLAFLOR, Gloria. 2008. Variables significativas del proceso de combustión de gas natural. *Información Tecnológica*. Argentina: Universidad Nacional de Salta, 19, No. 4, pp. 57-62.
39. YAÑEZ, G. 2017. Válvula de expansión termostática. [En línea] <<http://bohnmxico.blogspot.com/2017/03/>> [Consulta: 10 de noviembre de 2020]

APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de propiedades del agua saturada (líquido-vapor) y temperaturas

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m ³ / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpía kJ / kg			Entropía kJ / kg K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501
10	0.01226	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008
11	0.01312	1.0004	99.857	45.20	2390.5	45.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2536	8.7351
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.3	0.4231	8.4739
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.0	0.4369	8.4533
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2557.7	0.4507	8.4329
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.3	0.4644	8.4127
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.3	2561.0	0.4781	8.3927
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2562.5	0.4917	8.3728
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2564.0	0.5053	8.3531
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2565.4	0.5188	8.3336
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648
50	0.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	8.0763
55	0.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.9913
60	0.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.9096
65	0.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	7.8310
70	0.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	7.7553
75	0.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824
80	0.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122
85	0.5793	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445
90	0.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791
95	0.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159
100	1.014	1.0438	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1718.2	2801.5	2.7927	6.0730
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1669.5	2796.6	2.8838	6.0019
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1620.2	2789.7	2.9751	5.9301
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1235.0	1570.6	2779.6	3.0668	5.8571
290	74.36	1.3656	0.02557	1279.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Tabla de entalpia de agua sobrecalentada

t [°C]	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
P [kPa]	h [kJ/kg]													
100	2676	2696	2716	2736	2756	2776	2796	2816	2835	2855	2875	2895	2914	2934
200			2727	2748	2769	2789	2809	2830	2850	2870	2890	2910	2930	
300			2739	2761	2782	2803	2824	2845	2865	2886	2906	2926	2946	
400				2753	2775	2797	2818	2839	2860	2881	2902	2922	2942	
500					2767	2790	2812	2833	2855	2876	2897	2918	2938	
600					2759	2783	2805	2828	2850	2871	2893	2914	2934	
700						2775	2799	2822	2844	2867	2888	2910	2930	
800							2792	2816	2839	2861	2884	2906	2926	
900							2785	2809	2833	2856	2879	2902	2922	
1000							2778	2803	2827	2851	2874	2897	2917	
1100								2796	2821	2846	2869	2893	2913	
1200								2790	2815	2840	2865	2888	2908	
1300									2809	2835	2859	2884	2904	
1400									2803	2829	2854	2879	2899	
1500									2796	2823	2849	2874	2894	
1600										2817	2844	2869	2889	
1700										2811	2838	2864	2884	
1800										2805	2833	2859	2879	
1900										2798	2827	2854	2874	
2000											2821	2849	2869	
2100											2815	2844	2864	
2200											2809	2838	2858	
2300											2802	2832	2852	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Tabla de entalpia de agua subenfriada

t [°C]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
P [kPa]	h [kJ/kg]																				
100	42'12	83'96	125'8	167'6	209'4	251'3	293'1	335'0	377'0												
200	42'22	84'06	125'9	167'7	209'5	251'3	293'2	335'1	377'1	419'2	461'4	503'8									
300	42'31	84'15	126'0	167'8	209'6	251'4	293'3	335'2	377'1	419'2	461'5	503'9	546'5								
400	42'41	84'24	126'1	167'9	209'7	251'5	293'3	335'2	377'2	419'3	461'6	504'0	546'5	589'3							
500	42'51	84'34	126'2	168'0	209'8	251'6	293'4	335'3	377'3	419'4	461'6	504'0	546'6	589'4	632'4						
600	42'61	84'43	126'2	168'1	209'9	251'7	293'5	335'4	377'4	419'5	461'7	504'1	546'7	589'4	632'4						
700	42'70	84'53	126'3	168'2	210'0	251'8	293'6	335'5	377'5	419'5	461'8	504'2	546'7	589'5	632'5	675'7					
800	42'80	84'62	126'4	168'2	210'0	251'8	293'7	335'6	377'5	419'6	461'9	504'2	546'8	589'6	632'6	675'8	719'3				
900	42'90	84'71	126'5	168'3	210'1	251'9	293'8	335'6	377'6	419'7	461'9	504'3	546'9	589'6	632'6	675'9	719'4				
1000	43'00	84'81	126'6	168'4	210'2	252'0	293'8	335'7	377'7	419'8	462'0	504'4	546'9	589'7	632'7	675'9	719'4				
1100	43'09	84'90	126'7	168'5	210'3	252'1	293'9	335'8	377'8	419'8	462'1	504'4	547'0	589'8	632'7	676'0	719'5	763'3			
1200	43'19	85'00	126'8	168'6	210'4	252'2	294'0	335'9	377'8	419'9	462'1	504'4	547'1	589'7	632'8	676'0	719'5	763'4			
1300	43'29	85'09	126'9	168'7	210'5	252'3	294'1	336'0	377'9	420'0	462'2	504'5	547'1	589'9	632'9	676'1	719'6	763'4	807'7		
1400	43'39	85'18	127'0	168'8	210'6	252'3	294'2	336'0	378'0	420'1	462'3	504'7	547'2	590'0	632'9	676'1	719'6	763'5	807'7		
1500	43'48	85'28	127'1	168'9	210'6	252'4	294'2	336'1	378'1	420'1	462'4	504'7	547'3	590'0	633'0	676'2	719'7	763'5	807'7		
1600	43'58	85'37	127'2	168'9	210'7	252'5	294'3	336'2	378'2	420'2	462'4	504'8	547'3	590'1	633'0	676'3	719'8	763'6	807'8	852'4	
1700	43'68	85'47	127'3	169'0	210'8	252'6	294'4	336'3	378'2	420'3	462'5	504'9	547'4	590'1	633'1	676'3	719'8	763'6	807'8	852'5	
1800	43'78	85'57	127'3	169'1	210'9	252'7	294'5	336'4	378'3	420'4	462'6	504'9	547'5	590'2	633'2	676'4	719'9	763'7	807'9	852'5	
1900	43'87	85'65	127'4	169'2	211'0	252'8	294'6	336'4	378'4	420'5	462'7	505'0	547'5	590'3	633'2	676'4	719'9	763'7	807'9	852'6	
2000	43'97	85'75	127'5	169'3	211'1	252'9	294'7	336'5	378'5	420'5	462'7	505'1	547'6	590'3	633'3	676'5	720'0	763'8	808'0	852'6	
2100	44'07	85'84	127'6	169'4	211'2	252'9	294'7	336'6	378'5	420'6	462'8	505'2	547'7	590'4	633'4	676'6	720'0	763'8	808'0	852'6	
2200	44'16	85'93	127'7	169'5	211'2	253'0	294'8	336'7	378'6	420'7	462'9	505'2	547'7	590'5	633'4	676'6	720'1	763'9	808'1	852'7	
2300	44'26	86'03	127'8	169'6	211'3	253'1	294'9	336'8	378'7	420'8	462'9	505'3	547'8	590'5	633'5	676'7	720'1	763'9	808'1	852'7	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Tabla de propiedades del aire a diferentes alturas

Altitud, h [m]	Temperatura, T [°C]	Presión, P [kPa]	Gravedad, g [m/s ²]	Velocidad del sonido, V _s [m/s]	Densidad, ρ [kg/m ³]	Viscosidad, μ [Pa·s]	Conductividad térm [W/m·K]
0	15'0	101'33	9'807	340'3	1'225	17'89	0'0253
200	13'7	98'95	9'806	339'5	1'202	17'83	0'0252
400	12'4	96'61	9'805	338'8	1'179	17'77	0'0252
600	11'1	94'32	9'805	338'0	1'156	17'71	0'0251
800	9'8	92'08	9'804	337'2	1'134	17'64	0'0250
1000	8'5	87'88	9'804	336'4	1'112	17'58	0'0249
1200	7'2	87'72	9'803	335'7	1'090	17'52	0'0248
1400	5'9	85'60	9'802	334'9	1'069	17'45	0'0247
1600	4'6	83'53	9'802	334'1	1'048	17'39	0'0245
1800	3'3	81'49	9'801	333'3	1'027	17'32	0'0244
2000	2'0	79'50	9'800	332'5	1'007	17'26	0'0243
2200	0'7	77'55	9'800	331'7	0'987	17'20	0'0242
2400	-0'59	75'63	9'799	331'0	0'967	17'13	0'0241
2600	-1'89	73'76	9'799	330'2	0'947	17'07	0'0240
2800	-3'19	71'92	9'798	329'4	0'928	17'00	0'0239
3000	-4'49	70'12	9'797	328'6	0'909	16'94	0'0238
3200	-5'79	68'36	9'797	327'8	0'891	16'87	0'0237
3400	-7'09	66'63	9'796	327'0	0'872	16'81	0'0236
3600	-8'39	64'94	9'796	326'2	0'854	16'74	0'0235
3800	-9'69	63'28	9'795	325'4	0'837	16'68	0'0234
4000	-10'98	61'66	9'794	324'6	0'819	16'61	0'0233
4200	-12'30	60'07	9'794	323'8	0'802	16'55	0'0232
4400	-13'6	58'52	9'793	323'0	0'785	16'48	0'0231
4600	-14'9	57'00	9'793	322'2	0'769	16'42	0'0230
4800	-16'2	55'51	9'792	321'4	0'752	16'35	0'0229
5000	-17'5	54'05	9'791	320'5	0'736	16'28	0'0228
5200	-18'8	52'62	9'791	319'7	0'721	16'22	0'0227
5400	-20'1	51'23	9'790	318'9	0'705	16'15	0'0226
5600	-21'4	49'86	9'789	318'1	0'690	16'08	0'0224
5800	-22'7	48'52	9'789	317'3	0'675	16'02	0'0223
6000	-24'0	47'22	9'788	316'5	0'660	15'95	0'0222
7000	-30'5	41'11	9'785	312'3	0'590	15'61	0'0217
8000	-36'9	35'65	9'782	308'1	0'526	15'27	0'0212
9000	-43'4	30'80	9'779	303'8	0'467	14'93	0'0206
10000	-49'9	26'50	9'776	299'5	0'414	14'58	0'0201

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Tabla de propiedades termodinámicas del amoníaco saturado**

Temp., T [°C]	Presión de saturación, P [kPa]	Densidad, ρ [kg/m ³]		Entalpia [kJ/kg]			Calor específico, C _p [kJ/kg·K]		Conductividad térmica, k [mW/m·K]		Viscosidad dinámica, μ [Pa·s]		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β [1/K]
		Líquido	Vapor	h _g	h _l	h _v	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
-40	71'690	690'2	0'6438	1388'6	19'17	1408	4'41	2'24	688'1	20'64	281'2	7'86	-	0'9955	1'76E-03
-30	119'43	677'8	1'037	1359'7	63'60	1423	4'47	2'33	654'6	21'15	244'1	8'15	-	1'017	1'85E-03
-20	190'08	665'1	1'603	1329'1	108'6	1438	4'51	2'43	622'0	21'77	214'4	8'45	1'821	1'041	1'94E-03
-10	280'71	652'1	2'391	1296'7	154'0	1451	4'56	2'54	590'1	22'50	190'2	8'75	1'718	1'072	2'05E-03
0	429'38	638'6	3'457	1262'2	200'0	1462	4'62	2'68	559'2	23'37	170'1	9'06	1'624	1'107	2'16E-03
10	615'05	624'6	4'868	1225'5	246'6	1472	4'68	2'84	529'1	24'37	153'0	9'36	1'539	1'147	2'30E-03
20	857'48	610'2	6'702	1186'4	293'8	1480	4'75	3'03	499'9	25'52	138'3	9'68	1'463	1'193	2'45E-03
25	1003'6	602'8	7'803	1165'8	317'7	1483	4'79	3'14	485'6	26'16	131'7	9'84	1'430	1'218	2'54E-03
30	1167'2	595'2	9'053	1144'4	341'8	1486	4'83	3'25	471'4	26'85	125'5	10'00	1'399	1'244	2'64E-03
35	1351'2	587'4	10'45	1122'3	366'1	1488	4'88	3'38	457'4	27'59	119'6	10'16	1'372	1'272	2'75E-03
40	1555'4	579'4	12'03	1099'3	390'6	1490	4'93	3'51	443'5	28'38	114'0	10'33	1'347	1'303	2'87E-03
45	1783'2	571'3	13'80	1075'3	415'5	1491	4'99	3'66	429'7	29'24	108'8	10'50	1'327	1'335	3'01E-03
50	2034'0	562'9	15'79	1050'5	440'6	1491	5'06	3'82	416'3	30'16	103'8	10'67	1'310	1'371	3'16E-03
55	2311'1	554'2	18'01	1024'5	466'1	1491	5'14	4'01	402'9	31'16	99'0	10'86	1'297	1'409	3'34E-03
60	2615'6	545'2	20'49	997'3	492'0	1489	5'24	4'21	389'6	32'26	94'5	11'05	1'288	1'452	3'54E-03
70	3313'5	526'3	26'41	938'9	545'0	1484	5'47	4'70	363'2	34'80	85'9	11'47	1'287	1'551	4'04E-03
80	4142'0	505'7	33'89	874'0	600'3	1474	5'78	5'36	337'1	38'00	78'0	11'95	1'312	1'683	4'74E-03
90	5116'7	482'8	43'48	800'6	658'6	1459	6'25	6'29	311'0	42'24	70'5	12'55	1'375	1'871	5'79E-03
95	5664'3	470'2	49'33	759'8	689'2	1449	6'57	6'93	297'9	44'99	66'8	12'91	1'429	1'999	6'52E-03
100	6255'3	456'6	56'12	715'6	721'0	1437	6'99	7'76	284'8	48'36	63'2	13'32	1'503	2'163	7'49E-03
105	6892'3	441'9	64'06	667'2	754'4	1422	7'56	8'88	271'5	52'65	59'6	13'82	-	-	-
110	7578'3	425'6	73'53	613'4	789'7	1403	8'36	10'46	258'1	58'33	56'0	14'42	-	-	-
115	8317'0	407'2	85'18	552'3	827'7	1380	9'63	12'91	244'6	66'28	52'3	15'19	-	-	-
120	9112'5	385'5	100'1	480'3	869'9	1350	11'94	17'21	231'2	78'40	48'3	16'21	-	-	-
130	10898	312'3	156'7	247'3	992'0	1239	54'21	76'49	221'9	160'39	37'3	20'63	-	-	-
132'25	11333	225'0	225'2	0	1119	1119	∞	∞	∞	∞	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Tabla de propiedades termodinámicas del amoníaco saturado**

t [°C]	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130			
t _{sat} [°C]	h [kJ/kg]																			
P [kPa]																				
-40	71'690	1430	1452	1473	1495	1516	1538	1559	1581	1602	1624	1646	1668	1690	1712	1734	1756	1778		
-35	93'100	1427	1449	1471	1493	1515	1536	1558	1580	1601	1623	1645	1667	1689	1711	1733	1755	1778		
-30	119'43	1446	1469	1491	1513	1535	1556	1578	1600	1622	1644	1666	1688	1711	1733	1755	1778			
-25	151'50	1442	1466	1488	1510	1533	1555	1577	1599	1621	1643	1665	1687	1710	1732	1754	1777			
-20	190'08		1462	1485	1508	1530	1552	1575	1597	1619	1641	1664	1686	1708	1731	1753	1775			
-18'9	200'00		1461	1484	1507	1529	1552	1574	1597	1619	1641	1664	1686	1707	1730	1752	1774			
-15	236'20		1457	1481	1504	1527	1550	1572	1595	1617	1639	1662	1684	1707	1730	1752	1774			
-10	280'71			1476	1500	1523	1546	1569	1592	1615	1637	1660	1683	1705	1728	1751	1773			
-5	354'90			1470	1495	1519	1542	1566	1589	1612	1635	1658	1681	1704	1727	1750	1773			
0	429'38				1488	1514	1538	1562	1585	1609	1632	1655	1678	1701	1724	1747	1770			
5	516'00				1481	1507	1532	1557	1581	1605	1628	1652	1675	1699	1723	1746	1770			
10	615'05					1500	1526	1551	1576	1600	1624	1648	1672	1696	1720	1744	1768			
15	728'80					1491	1518	1545	1570	1595	1620	1644	1668	1692	1716	1740	1764			
20	857'48						1509	1537	1564	1589	1614	1639	1664	1688	1713	1738	1762			
25	1003'6						1499	1528	1556	1582	1608	1634	1659	1683	1709	1734	1759			
30	1167'2							1517	1547	1574	1601	1627	1653	1678	1704	1730	1755			
35	1351'2								1505	1537	1565	1593	1620	1646	1672	1699	1725	1751		
40	1555'4									1523	1554	1584	1612	1639	1665	1693	1720	1747		
45	1783'2										1509	1542	1573	1602	1630	1658	1687	1715	1743	
49'3	2000'0										1496	1529	1562	1592	1622	1650	1680	1709	1739	
50	2034'0											1527	1560	1591	1621	1649	1680	1709	1739	
55	2311'1												1510	1546	1579	1610	1639	1671	1702	1733

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Tabla de propiedades termodinámicas del metano líquido**

Temp., T [°C]	Densidad, ρ [kg/m ³]	Calor específico, C _p [J/kg·K]	Conductividad térmica, k [W/m·K]	Difusividad térmica, α [m ² /s]	Viscosidad dinámica, μ [Pa·s]	Viscosidad cinemática, ν [m ² /s]	Número de Prandtl, Pr	Coefficiente de expansión volumétrica, β [1/K]
-160	420'2	3492	0'1863	1'270E-7	113'3	2'699E-7	2'126	3'52E-3
-150	405'0	3580	0'1703	1'174E-7	91'69	2'264E-7	1'927	3'91E-3
-140	388'8	3700	0'1550	1'077E-7	75'51	1'942E-7	1'803	4'44E-3
-130	371'1	3875	0'1402	9'749E-8	62'88	1'694E-7	1'738	5'20E-3
-120	351'4	4146	0'1258	8'634E-8	52'57	1'496E-7	1'732	6'37E-3
-110	328'8	4611	0'1115	7'356E-8	43'77	1'331E-7	1'810	8'41E-3
-100	301'0	5578	0'0967	5'761E-8	35'77	1'188E-7	2'063	1'282E-2
-90	261'7	8902	0'0797	3'423E-8	27'61	1'055E-7	3'082	2'922E-2

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Especificaciones de refrigerador por absorción propuesto

Specification

Model No.	BC-135L
Approval	CE/ERP/REACH/ROHS/LFGB
Total (L)	134L
Freezer Capacity (L)	/
Refrigerator Capacity(L)	134
Climate class	N/ST
Power (V~/HZ)	220-240 V/50HZ
Refrigerant	R600a
Noise	40
Color	white / silver / black
Finishing (PCM/VCM)	Painting / pcm / vcm
Adjustable Leg	Yes
Handle	Recessed
Key/Lock	Optional
Temp. Control	Mechanic
Defrosting	Manual
Condenser	Inside
Interior Light	Yes
Width:mm (Net/Packing)	545/585
Depth:mm (Net/Packing)	555/595
Height:mm(Net/Packing)	850/885
Kg (Net / Gross)	36/40
LOAD CAPACITY20/40/ 40HQ	80/160/236 PCS

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Especificaciones de refrigerador por absorción usado de ejemplo**

Heladeras y Freezers a Absorción







Características

Las heladeras y freezers son armados con mecheros a gas, totalmente seguras ya que están equipadas con una válvula de seguridad y poseen un encendido electrónico que permiten prenderlas con comodidad.

El proceso de refrigeración por absorción posee importantes ventajas:

- No contiene partes móviles.
- Realiza conversión directa de calor/frío.
- No genera ruido

Los gabinetes son de chapa pre-pintada, el interior en plástico PAI con rejillas de alambre, crisper transparente.

Los equipos de refrigeración están contruidos con tubos de acero 1010, tratados especialmente para el sistema de refrigeración por absorción. La presión de prueba a que son sometidos es de 60 kg x cm². La presión en funcionamiento es de 20 kg x cm². Pintados por inmersión (sistema catalítico) y galvanizados en caliente.

Datos Técnicos

Tipo	Modelo	Capacidad	Medidas en cm Alto x ancho x Prof	Tipo de puerta
Heladera	H8	8 pies	120 x 61,5 x 66 Interior 88 x 50 x 42	Frontal
Heladera	H10 (2P)	10 pies	164 x 61,5 x 66 Heladera 88 x 50 x 42 Freezer 44 x 32 x 32	2 Frontal
Freezer	F140	140 litros	103 x 82 x 75 Interior 68,5 x 58 x 38	Horizontal
Freezer	F220	220 litros	103 x 104 x 75 Interior 68,5 x 98 x 38	Horizontal

Todos los datos son ilustrativos, el fabricante se reserva el derecho de modificarlos sin previo aviso.



Ecosolar s.a.
<http://www.ecosolar.com> email: ecosolar@ecosolar.com

Distribuidor Solar de



First In Your Innovation





MONROE 2630 piso 6º B
 1420 - Buenos Aires
 Tel. (011) 4515-4679

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Importación anual de productos petroleros 2010 a 2018

Unidad: barril americano

CONCEPTO/ AÑO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Diesel	9,011,131.74	9,219,828.10	9,549,888.54	9,760,898.04	10,984,748.49	12,397,307.01	12,650,412.41	12,185,095.42	-
Diesel LS	-	-	-	-	-	-	-	-	11,687,749.79
Diesel ULS	-	-	-	-	-	-	-	-	147,139.10
Gasolina Superior	5,212,706.35	4,733,637.74	4,877,062.81	5,015,279.88	5,734,521.16	6,918,916.69	7,246,261.37	7,381,421.78	7,118,390.94
Gasolina Regular	3,358,398.28	3,268,362.32	3,046,599.48	3,585,079.29	4,403,119.26	5,499,986.44	5,945,338.76	6,221,673.94	6,657,778.43
GLP	3,979,823.17	4,073,975.00	4,304,669.10	4,915,256.29	4,873,213.03	5,918,686.03	6,407,322.67	6,764,868.92	6,335,020.31
PetCoke	625,389.22	1,184,988.53	1,114,503.39	1,154,786.77	1,279,415.78	1,101,541.60	1,193,901.12	1,881,283.48	3,046,732.73
Bunker	3,796,035.49	4,179,310.90	3,879,270.01	3,167,976.88	3,082,862.16	3,525,150.75	3,216,085.99	1,873,889.56	1,505,491.27
Combustible Turbo Jet	-	-	-	-	-	-	-	-	760,462.78
Gasolina Aviación	15,370.00	13,801.00	13,799.20	15,312.85	44,233.53	11,536.58	31,811.10	41,741.25	82,173.55
Asfalto	78,914.40	100,092.98	97,014.62	39,679.05	82,752.30	89,059.17	49,880.02	39,348.07	53,682.38
Kerosina	593,385.40	589,729.24	591,016.60	771,962.23	1,025,771.21	1,375,339.56	1,493,295.10	1,066,506.17	1,000.00
Butano	-	-	-	-	-	-	-	722.89	689.53
TOTALES:	26,671,154.04	27,363,725.81	27,473,823.74	28,426,231.27	31,510,636.91	36,837,523.82	38,234,308.54	37,456,551.48	37,396,310.81

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Costo anual de importación de productos petroleros 2010 a 2018

Unidad: Dólares de los Estados Unidos

Concepto / Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Diesel	842,190,855.19	1,185,616,175.97	1,274,566,633.14	1,224,972,034.49	1,268,994,373.50	816,033,627.95	718,168,518.93	845,380,844.98	-
Diesel LS	-	-	-	-	-	-	-	-	1,019,577,779.50
Diesel ULS	-	-	-	-	-	-	-	-	11,686,654.67
Gasolina Superior	488,961,450.41	598,604,185.26	625,233,003.59	617,346,404.08	651,750,085.96	692,655,745.09	452,806,986.24	546,110,699.88	600,639,652.57
Gasolina Regular	301,754,237.81	409,779,070.61	382,350,176.80	425,099,718.28	468,000,929.83	339,708,485.55	337,343,125.56	420,945,247.74	529,848,154.93
Gas Licuado de Petróleo	244,604,068.71	300,940,410.60	248,862,608.73	290,923,580.44	326,982,539.71	236,699,226.83	246,327,544.76	333,397,262.53	348,327,037.75
Bunker C o Fuel Oil	282,543,024.04	419,296,961.07	411,960,379.78	320,658,199.14	272,825,686.06	156,385,106.22	107,151,719.41	88,665,634.27	89,754,735.49
Combustible Turbo Jet	-	-	-	-	-	80,599,734.95	64,635,430.10	70,706,243.28	63,723,951.75
PetCoke	10,828,358.77	29,742,470.04	17,429,841.96	17,849,383.29	19,494,369.19	14,019,328.19	12,687,898.84	28,097,728.08	50,721,599.10
Gasolina Aviación	2,016,939.31	2,340,662.54	2,657,377.65	2,917,098.30	4,974,329.73	973,909.84	3,113,138.47	4,795,935.73	11,852,592.50
Asfalto	5,927,241.04	9,917,314.54	10,062,563.58	4,249,343.91	7,611,363.47	6,692,113.01	2,611,763.12	2,699,887.86	4,382,378.27
Butano	-	-	-	-	-	-	-	210,189.60	205,278.70
Kerosina	56,433,580.49	77,235,474.87	79,561,548.88	94,811,794.61	116,746,995.56	11,995,874.75	13,978,739.72	74,027.20	99,140.00
TOTALES:	2,235,259,755.76	3,033,472,725.51	3,052,684,134.11	2,998,827,556.54	3,137,380,673.00	2,355,763,152.38	1,958,826,865.17	2,341,083,701.14	2,730,818,955.23

Fuente: elaboración propia.