

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## DIVISIÓN DE INGENIERÍA



## POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON ENERGÍA  
ALTERNA PARA ACONDICIONAR LA TEMPERATURA AMBIENTE  
DEL INTERIOR DE UNA CABINA DE AUTOMÓVIL

# TESIS

PRESENTADA POR  
**JAVIER ARMANDO MOLINA GONZÁLEZ**

Desarrollada para cumplir con uno de los  
requerimientos parciales para obtener  
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS  
DR. VICTOR HUGO BENITEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA.

FEBRERO 2013

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos  
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# RESUMEN

El presente proyecto surgió a partir del interés por los acontecimientos climatológicos que se viven actualmente en nuestro medio ambiente, y que se ligan a fenómenos resultados del calentamiento global, mismo que es respuesta del trato que le hemos dado al planeta donde vivimos.

Para dar solución a estos fenómenos, en la actualidad se buscan diferentes tipos de energía que no dañen el medio ambiente y hagan de nuestro planeta un lugar mejor para vivir, la mejor sustitución para esos tipos de energía son las llamadas “energías renovables” como la energía del sol o el viento. Sin embargo, al no encontrar viabilidad para utilizar estas energías, se recurre a las “energías alternas” las cuales son esas energías que no se aprovechan en los procesos, tal como es el caso de la energía térmica de los gases de escape de una combustión.

Este documento de tesis muestra el análisis de un sistema de refrigeración por absorción de vapor (VAR – *Vapor Absorption Refrigeration*) utilizando una solución LiBr-H<sub>2</sub>O (Bromuro de litio - agua), para sustituir el sistema de aire acondicionado convencional de un automóvil, tratando de abrir camino hacia nuevas aplicaciones de este sistema, tomando en cuenta sus potenciales beneficios.

El objetivo principal de este proyecto es hacer un análisis de un sistema VAR con solución par LiBr-H<sub>2</sub>O lo suficientemente eficiente para contribuir al confort térmico de los tripulantes, con el fin de sustituir el sistema de refrigeración por compresión de vapor (VCR) que generalmente se encuentra instalado en un automóvil con motor de combustión interna (MCI).

La primer parte del trabajo se enfoca en desarrollar una investigación teórica que justifique la sustitución de un sistema VCR de un automóvil por un sistema VAR con solución par LiBr-H<sub>2</sub>O.

Habiendo realizado lo anterior, se lleva a cabo un análisis matemático tomando en cuenta la capacidad instalada del sistema VCR actual y calculando las características de transferencia de calor con las que tiene que cumplir el sistema VAR con solución par LiBr-H<sub>2</sub>O, para la misma capacidad instalada.

Adicionalmente, se realiza un análisis de temperatura con termografía para determinar el lugar exacto de la tubería de gases de escape, el cual se utilizará como fuente de energía térmica para el sistema VAR propuesto.

Como equipo auxiliar, se propone un regulador de flujo de gases de escape para evitar fluctuaciones de flujo de gas que podrían traducirse en deficiencias en el proceso.

El proyecto realizado en esta tesis, queda preparado para la realización de las fases de diseño y construcción de componentes, instalación y experimentación.

# ABSTRACT

This project arose from interest in weather events currently occurring in our environment, and that are linked to global warming phenomena. In order to solve these phenomena, it is interest in looking for different types of energy that do not harm the environment and make our planet a better place to live, the best replacement for these energies are called "renewable energy" as the energy of sun or wind. However, the lack of viability for using renewable energies has lead to use "alternative energy" which is those residual energies that are not used in the main process, such as the great thermal energy of the exhaust gases of combustion.

This thesis document analyzes a vapor absorption refrigeration system (VAR - Vapor Absorption Refrigeration) using a LiBr-H<sub>2</sub>O solution (lithium bromide - water), to replace the conventional air conditioning system of a car, trying to experiment with new applications of this kind of system, taking in mind its possible benefits.

The first part of the work focuses on developing a theoretical investigation to justify the replacement of a VCR system of an automobile by a VAR system with LiBr-H<sub>2</sub>O. In the second part a mathematical analysis takes place, considering the capacity of the current VCR system and calculating the heat transference characteristics need it by the VAR system to work properly at the same installed capacity.

A temperature analysis is also performed with thermography to determine the exact location of the exhaust pipe which is used as thermal energy source for the proposed VAR system. As auxiliary equipment, is proposed a flow regulator to prevent exhaust gas flow fluctuations which may result in deficiencies in the process.

The project in this thesis document is ready to carry out the design and construction phases of components, installation and testing.

## **AGRADECIMIENTOS**

En los siguientes párrafos quiero agradecer a las personas que me apoyaron, aconsejaron e hicieron posible que esta tesis se llevara hasta su exitosa culminación.

Primeramente quiero agradecer a Dios, por darme la paciencia en los momentos de desesperación, por darme fuerza para aceptar mis errores y enmendar mi camino, por enseñarme las valiosas lecciones que hoy hacen mi vida más feliz, y por darme la iluminación necesaria para desarrollar y culminar este proyecto con éxito.

Agradezco a mis padres y hermanos por apoyarme y aconsejarme siempre con amor y sabiduría, por enseñarme a nunca desistir y siempre guiarme con honestidad y valor ante la severidad de la vida.

Quiero agradecer también a María de Los Ángeles Gutiérrez Rivera por su apoyo incondicional, por sus consejos siempre muy acertados, por su paciencia, por soportar mis malas rachas, y sobre todo por su amor. ¡Te amo!.

Agradezco también a mis amigos, que con su apoyo me ayudaron a salir adelante en los momentos más difíciles y me enseñaron el valor de la verdadera amistad.

A mi director de tesis, el Dr. Victor Hugo Benitez Baltasar por su gran apoyo y paciencia. Al Dr. Luis Felipe Romero Dessens, por ser un gran consejero y apoyarme en gran parte del proyecto de tesis. A los maestros del posgrado y su gran profesionalismo. Al Ing. Rogelio Bonillas Olivas, por su valioso tiempo y apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología (CONACYT) y al Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI 2011), por su apoyo económico.

A todos ustedes, muchas gracias.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	4
1.3. Objetivo .....	5
1.4. Preguntas de investigación .....	6
1.5. Hipótesis .....	6
1.6. Alcances y delimitaciones .....	6
1.7. Justificación.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. Degradación de la calidad del medio ambiente.....	8
2.2. Posibles causas del cambio climático .....	12
2.3. Uso de energías alternas para disminuir del CO <sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero. ....	15
2.4. Sistemas de refrigeración utilizados y una propuesta de mejora .....	17
2.4.1. Ventajas del sistema de absorción de vapor.....	23
2.5. Confort humano y Estándares de Confort.....	25
2.6. Maquinas termodinámicas .....	29
2.6.1. Primera y segunda ley de la termodinámica .....	29
2.7. Componentes del sistema de refrigeración.....	31
2.7.1. El generador .....	31
2.7.2. El evaporador .....	31
2.7.3. El condensador .....	33
2.7.4. El absorbedor .....	34
2.8. Cristalización.....	35
CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA.....	36
3.1. Análisis del automóvil.....	37

3.1.1. Obtener y analizar la capacidad instalada .....	37
3.2. Análisis del sistema VAR .....	38
3.2.2. Calculo de transferencia de calor.....	38
3.3. Análisis de la fuente de Generación.....	38
3.3.1. Determinar la posición de la fuente térmica para generación .....	38
3.3.2. Propuesta de regulador de gases de escape .....	39
CAPITULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	40
4.1. Análisis del sistema VCR instalado.....	40
4.2. Análisis del sistema VAR propuesto. ....	43
4.3. Análisis de la fuente térmica de generación.....	48
4.3.1. Beneficios relacionados con la temperatura de los gases exhaustos .....	50
4.3.2.- Análisis de la propuesta de regulador de gases exhaustos.....	52
CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN .....	55
CAPÍTULO 6. FUTURAS INVESTIGACIONES.....	57
REFERENCIAS.....	58
ANEXOS .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Promedio mundial de la temperatura en superficie en grados centígrados.	9
Figura 2.2 Promedio mundial del nivel del mar en milímetros. ....	9
Figura 2.3 Disminución de la cubierta de nieve del hemisferio norte en millones de km <sup>2</sup> . ....	10
Figura 2.4 Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004.	13
Figura 2.5 Parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO <sub>2</sub> equivalente.....	13
Figura 2.6. Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO <sub>2</sub> equivalente.....	14



Figura 2.7. Ejemplos de equipos que utilizan el Sistema de Refrigeración por Compresión.....	18
Figura 2.8. Ciclo de refrigeración por absorción con solución LiBr-H <sub>2</sub> O.....	22
Figura 2.9. Aislamiento de vestimenta necesario para varios niveles de confort a una temperatura dada.....	27
Figura 2.10. Límites aceptables de temperatura de operación y humedad para personas vestidas en un típico verano o ropa de invierno, para actividad una ligera o media –sedentaria.....	28
Figura 2.11. Generador de un sistema VAR instalado en un automóvil.....	31
Figura 2.12. Evaporador de un sistema VAR.....	32
Figura 2.13. Condensador de un sistema VAR, enfriado pro aire.....	33
Figura 2.14. Serpentín de evaporador conectado al absorbedor.....	35
Figura 3.1. Cuadro ilustrativo de la estructura de la metodología.....	36
Figura 4.1. Sistema simple de refrigeración por absorción.....	44
Figura 4.2. Cámara de Termografía Fluke Ti32.....	48
Figura 4.3. Comportamiento de la temperatura del manifold de escape.....	49
Figura 4.4. Comportamiento de la temperatura antes del pre-silenciador.....	49
Figura 4.5. Temperatura después del pre-silenciador.....	49
Figura 4.6. Temperatura de los gases exhaustos sin carga del compresor del VCR.....	51
Figura 4.7. Temperatura de los gases exhaustos con carga del compresor del sistema VCR.....	51
Figura 4.8. Diseño teórico del sistema de control de flujo de los gases de exhaustos.....	53

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Valor de un CLO de aislamiento.....	26
Ecuación 4.1. Efecto refrigerante.....	41
Ecuación 4.2. Flujo volumétrico, sistema VCR.....	41
Ecuación 4.3. Flujo másico, sistema VCR.....	42

Ecuación 4.4. Flujo de energía térmica del evaporador, sistema VCR .....	42
Ecuación 4.5. Coeficiente de rendimiento (COP) del sistema VCR .....	42
Ecuación 4.6. Energía neta de entrada de sistema VCR .....	43
Ecuación 4.7. Flujo másico en el evaporador, sistema VAR .....	46
Ecuación 4.8. Flujo proveniente del generador al absorbedor, sistema VAR.....	46
Ecuación 4.9. Flujo másico a la salida del absorbedor, sistema VAR .....	46
Ecuación 4.10. Flujo de energía térmica en el generador, sistema VAR .....	47
Ecuación 4.11. Entalpía de vapor de agua de un gas ideal .....	47
Ecuación 4.12. Coeficiente de rendimiento COP del sistema VAR propuesto .....	48

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de rendimiento del A/AC instalado tipo VCR.....	61
Anexo 2. Diagrama Presión-Entalpía HCFC-134a .....	62
Anexo 3. Diagrama de comportamiento típico de un sistema VAR con solución LiBr- H <sub>2</sub> O.....	63
Anexo 4. Diagrama concentración-entalpia para soluciones de LiBr- H <sub>2</sub> O.....	64
Anexo 5. Tabla de propiedades del refrigerante 718 (vapor de agua) .....	65
Anexo 6. Datos de seguridad de la SAL-T6 (LiBr).....	66
Anexo 7. Datos de seguridad del Hidruro de Nitrogeno - NH <sub>3</sub> (Amoniaco).....	70

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Constantemente, la ingeniería ha buscado diferentes caminos para desarrollar proyectos que presenten alta eficiencia con el menor daño producido al medio ambiente y hagan de nuestro planeta un lugar con una mejor calidad de vida para el presente y futuro. Una opción para la sustitución del uso de combustibles fósiles como fuente de energía primaria, son las llamadas “energías alternas”.

El ciclo de refrigeración por absorción puede ser operado con una fuente de energía térmica, este tipo de aplicaciones conllevan a ahorros energéticos y por ende a la protección del medio ambiente (Izasa, 2010). Debido al esfuerzo internacional por encontrar energías alternativas, la refrigeración por absorción se ha convertido en un sistema principal par muchas aplicaciones de refrigeración. Donde la energía térmica está disponible, el sistema de refrigeración por absorción puede hacer una buena sustitución del sistema de refrigeración por compresión (Vicatos et al, 2008).

Se piensa que la temperatura de los gases exhaustos del motor de combustión interna (MCI) es una fuente importante de energía térmica. El presente proyecto desarrollará un análisis para adecuar el sistema de refrigeración por absorción de vapor (VAR) utilizando una solución par LiBr-H<sub>2</sub>O (Bromuro de litio - agua) a un sistema de aire acondicionado de un automóvil. Con ello, se contribuye a la posibilidad de sustituir el actual sistema de refrigeración por compresión de vapor (VCR), el cual toma energía directa del MCI para realizar el proceso de compresión, lo que incurre en excesivos gastos de combustible, exceso de temperatura y caudal de gases exhaustos enviados a la atmósfera.

## 1.1. Antecedentes

La refrigeración, conocida comúnmente como un proceso de enfriamiento se define mas correctamente como la remoción de calor de una sustancia para llevarla o

mantenerla a una temperatura convenientemente baja, inferior a la temperatura ambiente (Pita, 1999).

El método de refrigeración comúnmente utilizado es el sistema de compresión de vapor. En este sistema el refrigerante líquido volátil se evapora por medio de un evaporador, este proceso da como resultado una remoción de calor (enfriamiento) de la sustancia que se debe enfriar. El sistema requiere un compresor y un condensador a fin de mantener el proceso de refrigeración y recuperar el refrigerante para su reutilización. El esquema 4.1 ilustra el proceso simple de refrigeración por compresión de vapor.

Otro método ampliamente utilizado, es el sistema de refrigeración por absorción, en este proceso, el refrigerante se evapora (al igual que el sistema anteriormente mencionado), pero la evaporación se mantiene absorbiendo el refrigerante en otro fluido. Por mencionar otros sistemas, se tiene la refrigeración termoeléctrica, la de chorro de vapor y por ciclo de aire. (Pita, 1999).

En los años recientes, considerando el uso de refrigerantes que son más amigables para el ambiente y también tomando en cuenta su capacidad de trabajar con fuentes de energía solar, geotérmica y biomasa, los sistemas de refrigeración por absorción han estado ganando popularidad. (Boukholda, 2009).

Las unidades de refrigeración por compresión de vapor requieren una entrada de alto grado de energía en forma de trabajo por medio de un compresor accionado eléctricamente. Esto lleva a mayores demandas de energía de las centrales eléctricas que a su vez llevan a más emisiones de CO<sub>2</sub>. Los sistemas de absorción requieren una forma de bajo grado de energía con el fin de proporcionar un efecto de enfriamiento. Esto significa que la fuente de energía no necesariamente es energía eléctrica, sino más bien es una fuente de energía proveniente de cualquier fuente de calor que sea suficientemente alta (Micallef, 2010).

Una máquina de refrigeración por absorción está formada por los siguientes equipos: generador, condensador, evaporador, absorbedor, dos intercambiadores regenerativos y una bomba. En el generador la solución es calentada (mediante vapor, el sol, o cualquier otro medio de calentamiento) y el elemento más volátil (absorbato) se desprende de dicha solución en forma de vapor, pasando seguidamente al condensador, donde se condensa. Este líquido saturado pasa al evaporador a través de la válvula de expansión. Los vapores producidos en el evaporador debido a la ganancia de calor, pasan al absorbedor, donde serán absorbidos por la solución débil (con menor contenido de absorbato) proveniente del generador, para con ello formar la solución fuerte (con mayor contenido de absorbato). Esta solución fuerte es bombeada de nuevo hacia el generador a través de uno de los intercambiadores regenerativos, con lo cual se completa el ciclo. (Cisneros, 2002). El esquema presentado en la figura 4.2 ilustra lo anterior.

El proceso de absorción funciona de la siguiente manera: El evaporador contiene el refrigerante (agua). El absorbedor es un recipiente adjunto que contiene una solución fuerte (concentrada) de agua y bromuro de litio. Los dos recipientes se hallan conectados de manera que el vapor pueda fluir libremente entre los dos. A los recipientes se les vacía todo el aire hasta obtener una presión extremadamente baja. El agua en el evaporador comenzará a vaporizarse súbitamente; esto es, hervirá. El efecto refrigerante del calor latente de vaporización enfriará el agua no evaporada, lográndose la refrigeración.

La temperatura de evaporación del refrigerante depende de presión y temperatura de saturación. Esto es, la temperatura a la cual el refrigerante se evapora (hierve) varía con la presión del evaporador. La presión debe ser lo suficientemente baja para que la temperatura resultante de evaporación se encuentre al valor que se necesita para la aplicación de la refrigeración (Pita, 1999).

Las maquinas comerciales de refrigeración por absorción que trabajan por debajo de los 0°C utilizan la solución par amoniaco – agua, con amoniaco como refrigerante y agua como absorbente. La gran toxicidad y el irritante olor del amoniaco son serios obstáculos para instalarse en uso general (Zhong, 2004). El amoniaco ataca al cobre y sus aleaciones cuando ha sido hidratado. El American National Standards Institute (ANSI) clasificó a los refrigerantes en tres grupos en cuanto a su seguridad de uso. El amoniaco debido a su toxicidad cae en el grupo 2, lo que significa que no puede ser utilizado en sistemas de aire acondicionado en expansión directa en el serpentín del evaporador. El equipo debe ser instalado fuera del espacio habitante. (Vicatots et al., 2008).

Se han realizado estudios teóricos de los sistemas de refrigeración por absorción aplicados a un vehículo automotor utilizando la temperatura de los gases de escape como fuente de energía térmica para proveer al generador de calor, como es el caso de Horuz (1999) y Vicatots (2008).

Para efectos de diseño de una refrigeración para condicionar el aire de una cabina de automóvil, se utilizará la solución par bromuro de litio – agua, ya que en este caso el agua es el refrigerante y a diferencia de los sistemas de absorción que utilizan la solución par amoniaco – agua, el amoniaco es el refrigerante. Por lo tanto, existe un porcentaje de inseguridad para las personas que viajan dentro de la cabina del automóvil, por ser el amoniaco una solución toxica para el ser humano y estar expuestos a posibles fugas de refrigerante que dañen su salud. En el anexo 6 y 7 se muestran las fichas de datos de seguridad del Bromuro de litio y el amoniaco.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Actualmente el sistema de refrigeración por compresión que utilizan los automóviles para acondicionar el aire que se encuentra dentro de la cabina, consume cantidades importantes de combustible para el requerimiento de potencia del MCI para accionar el compresor del sistema de refrigeración. Además de presentarse un aumento en la

cantidad y temperatura de los gases exhaustos que se envían a la atmósfera por medio del sistema de escape, con el consecuente daño al medio ambiente.

En el presente proyecto se analiza una solución viable de sustitución del sistema de refrigeración por compresión para acondicionar el aire de la cabina de un automóvil, por un sistema de refrigeración por absorción con solución par bromuro de litio – agua el cual reduzca los gastos excesivos de combustible y los daños al medio ambiente por emanaciones y temperaturas elevadas de gases exhaustos.

### **1.3. Objetivo**

Hacer un análisis de un sistema VAR con solución par  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ , lo suficientemente eficiente para contribuir al confort térmico de los tripulantes, con el fin de sustituir el sistema de refrigeración VCR que generalmente se encuentra instalado en un automóvil con MCI.

#### **1.3.1. Objetivos específicos**

- Desarrollar una investigación teórica lo suficientemente completa como para justificar la sustitución de un sistema VCR de un automóvil por un sistema VAR con solución par  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ .
- Desarrollar un análisis matemático tomando en cuenta la capacidad instalada del sistema VCR actual y calculando el flujo másico en los componentes del sistema VAR con solución par  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ , necesario para obtener la mayor eficiencia en la transferencia de calor mejorando el confort de los tripulantes.
- Determinar el lugar exacto de la tubería de gases de escape, con la temperatura adecuada para generación de vapor, como fuente de energía principal para el sistema VAR propuesto, realizando un análisis de temperaturas con termografía.
- Proponer un regulador de flujo de gases exhaustos instalado en la tubería de escape para evitar fluctuaciones de flujo de gas que podrían traducirse en deficiencias en el proceso.

## 1.4. Preguntas de investigación

1. ¿Se encontrará información suficiente para justificar la sustitución del sistema VCR instalado en el automóvil por un sistema VAR con solución par LiBr-H<sub>2</sub>O?
2. ¿Será posible determinar la capacidad instalada de refrigeración con la que cuenta actualmente el vehículo?
3. ¿Será posible analizar matemáticamente las características de transferencia de calor necesarias para un sistema VAR de modo que pueda sustituir el equipo VCR instalado en un automóvil?
4. ¿Se encontrará un punto efectivo para utilizarse como fuente de generación, en la tubería de gases de escape del vehículo?
5. ¿Será posible desarrollar una propuesta de regulador de gases de escape para evitar fluctuaciones de temperatura en la fuente de generación?

## 1.5. Hipótesis

Es posible justificar técnicamente la sustitución de un sistema VCR de un automóvil por un sistema VAR con solución par Bromuro de litio – Agua.

## 1.6. Alcances y delimitaciones

El proyecto a desarrollar es ambicioso en el tema de análisis y desarrollo como para presentar resultados concluyentes, por lo cual en el presente trabajo solo se desarrollará una base teórica y los cálculos matemáticos básicos. Las etapas posteriores son: diseño, construcción, instalación y experimentación, las cuales no son parte del alcance de este proyecto.

Una limitante para el proyecto es que solo se cuenta con los recursos necesarios para investigar en la base de datos de la biblioteca de la Universidad de Sonora, por



lo cual la magnitud de la investigación se verá limitada a los resultados encontrados en dicha base de datos.

## **1.7. Justificación**

Con la utilización del sistema de refrigeración por absorción en los automóviles se eliminará el uso del compresor, que es el accesorio que requiere potencia directa del MCI para su accionamiento. Con este proyecto se busca disminuir el volumen y la temperatura de los gases exhaustos enviados a la atmósfera, así como el exceso de gasto de combustible por requerimiento de potencia directa del MCI.

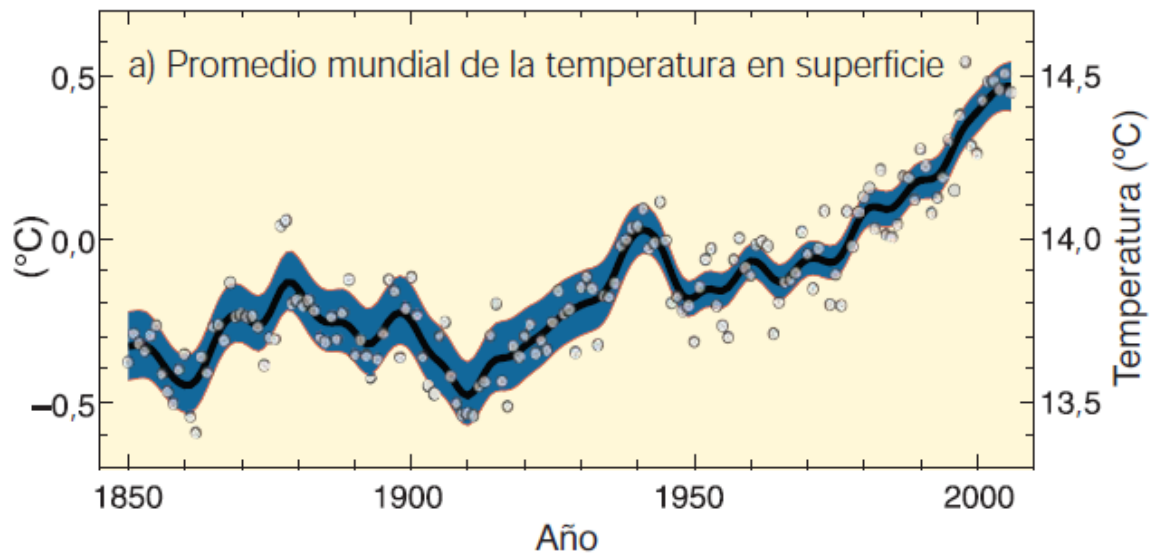
## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

En el siguiente capítulo se podrá observar la revisión bibliográfica que se llevó a cabo para sustentar la investigación y el desarrollo del proyecto. Con el marco teórico se busca dar una base a lo que próximamente se desarrolla en el capítulo 3.

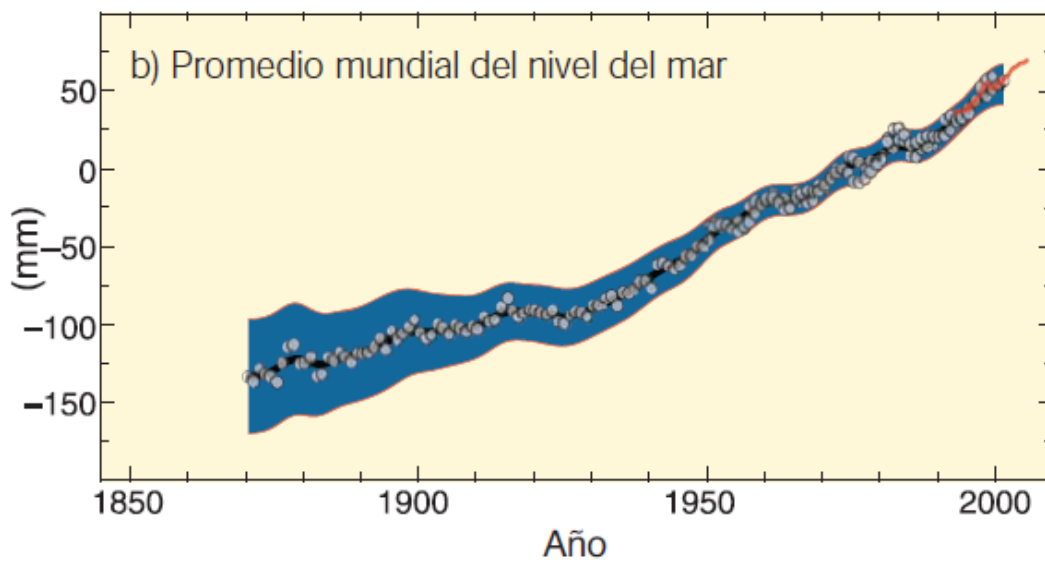
Las siguientes secciones muestran la base del surgimiento de la idea de éste proyecto de tesis, ya que el equipo de refrigeración VCR que utilizan los automóviles actualmente utilizan parte de la potencia del motor para desarrollar su función, la cual da como resultado un aumento a la cantidad de gases exhaustos enviados a la atmosfera, lo que disminuye la calidad del medio ambiente. Se incluye una visualización de los sistemas que se utilizan actualmente y terminando con una propuesta de mejora.

### **2.1. Degradación de la calidad del medio ambiente**

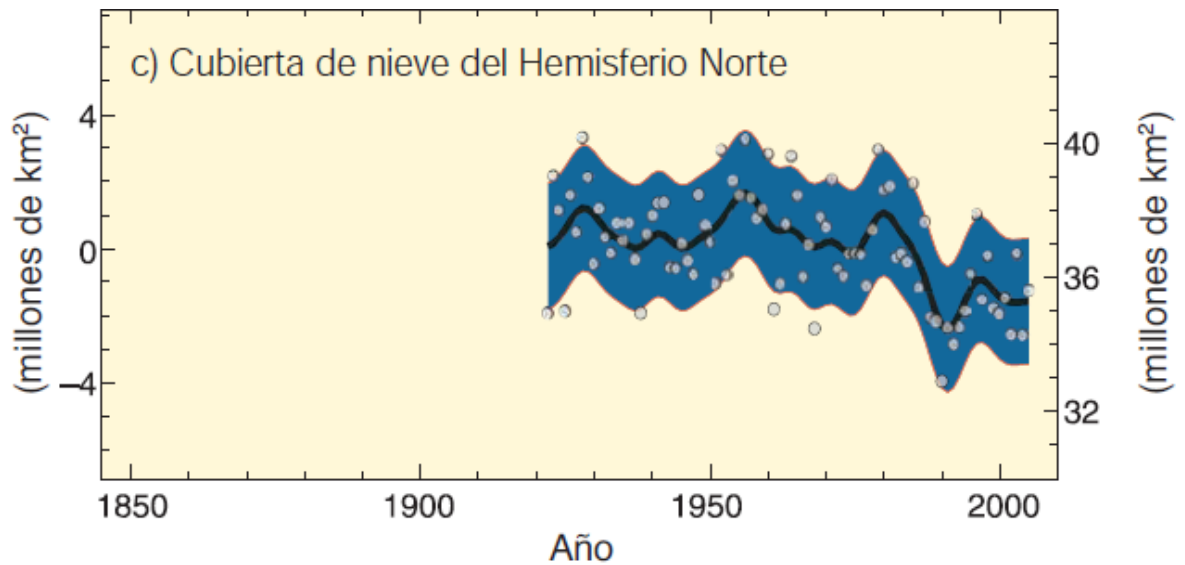
De los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los más cálidos en los registros de la temperatura de la superficie mundial. El aumento de nivel del mar y la disminución observada de las extensiones de nieve y de hielo concuerdan con este calentamiento. Es muy probable que en los últimos 50 años los días fríos, las noches frías y las escarchas hayan sido menos frecuentes en la mayoría de las áreas terrestres, y que los días y noches cálidos hayan sido más frecuentes (Pachauri, 2007). El comportamiento de la temperatura promedio de la superficie del planeta, el promedio mundial del nivel del mar en milímetros y el promedio en millones de kilómetros cuadrados de la cubierta de nieve en el hemisferio norte son mostrados en las figuras 2.1, 2.2 y 2.3.



**Figura 2. 1** Promedio mundial de la temperatura en superficie en grados centígrados (Pachauri, 2007).



**Figura 2. 2** Promedio mundial del nivel del mar en milímetros (Pachauri, 2007).



**Figura 2. 3** Disminución de la cubierta de nieve del hemisferio norte en millones de km<sup>2</sup> (Pachauri, 2007).

El aumento de la temperatura afectaría:

- La gestión agrícola y forestal en latitudes superiores del Hemisferio Norte, por ejemplo en una plantación más temprana de los cultivos en primavera, y en alteraciones de los regímenes de perturbación de los bosques por efecto de incendios y plagas;
- Ciertos aspectos de la salud humana, como la mortalidad a causa del calor en Europa, o una alteración de los vectores de enfermedades infecciosas en ciertas áreas, o de los pólenes alergénicos en latitudes altas y medias del Hemisferio Norte;
- Ciertas actividades humanas en la región ártica (por ejemplo, la caza, o los viajes a través de nieve o hielo) y en áreas alpinas de menor elevación (por ejemplo, los deportes de montaña). (Pachauri, 2007).

El año 2010 se destacó especialmente por una temperatura superficial mundial que alcanzó valores sin precedentes, igualando los de 1998 y 2005, en consonancia con la aceleración del calentamiento de la atmósfera que se viene experimentando

durante los últimos 50 años. Asimismo, el año 2010 marcó el fin de la década más cálida de la que se tenga registro. Durante esa década el calentamiento fue notablemente mayor en algunas regiones, en particular en el norte de África y la península Arábiga, Asia meridional y el Ártico. Además, en varias regiones del mundo se registraron importantes fenómenos climáticos extremos de larga duración, que acarrearón repercusiones socioeconómicas significativas. Las inundaciones en Pakistán y Australia, así como la ola de calor estival en la Federación de Rusia, en particular, fueron algunos de los fenómenos climáticos extremos más destacados del año (Jarraud, 2011)

El cambio climático es la mayor amenaza ambiental para el siglo XXI, con consecuencias económicas, sociales y ambientales de gran magnitud. Todos sin excepción, tanto ciudadanos, empresas, economías y la naturaleza en todo el mundo está siendo severamente afectadas. Al buscar la causa de esta aceleración se encontró que existe una relación directa entre el calentamiento global o cambio climático y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero provocado por las sociedades humanas tanto industrializadas como en desarrollo (Frers, 2006). A continuación se mencionan algunos ejemplos:

- El nivel de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ha aumentado en un 31%.
- La presencia de metano ( $\text{CH}_4$ ) se ha incrementado en un 145%.
- El óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) se ha incrementado en un 15%.
- Se sabe que las concentraciones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera en la actualidad superan las alcanzadas en el último medio millón de años, y probablemente en los últimos 20 millones de años.
- Además, la atmósfera está recibiendo otros gases que no existían, como lo son los clorofluorcarbonados y compuestos perfluorados (Frers, 2006).

A partir del año 1987, el Protocolo de Montreal controla el uso de Clorofluorocarbonos (CFC's) y se ha fijado un tiempo determinado para la eliminación de este producto. Este acuerdo es un paso histórico en el actual proceso

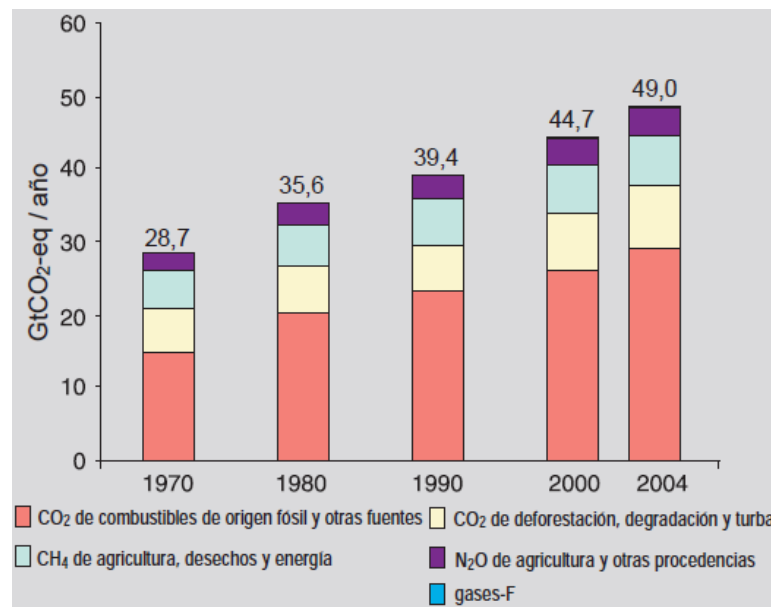
de construcción de un consenso respecto a los impactos ambientales de los CFC's (Vicatos et al., 2008).

## **2.2. Posibles causas del cambio climático**

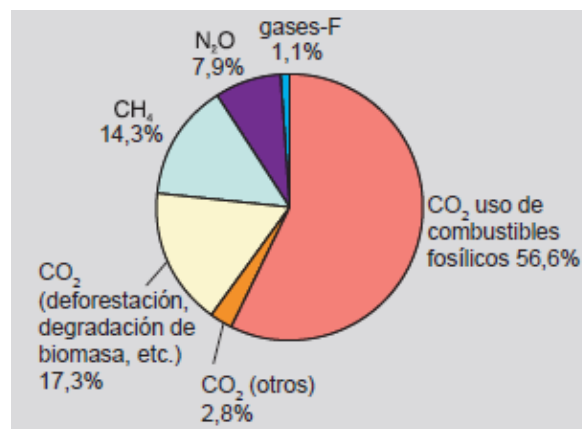
La variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el GEI antropógeno más importante. Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004. La disminución a largo plazo de las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía suministrada invirtió su tendencia a partir del año 2000 (Pachauri, 2007).

Las concentraciones atmosféricas de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> con 379 ppm) y Metano (CH<sub>4</sub> con 1774 ppm) en 2005 exceden con mucho el intervalo natural de valores de los últimos 650.000 años. Los aumentos de la concentración mundial de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra. Es muy probable que el aumento observado de la concentración de CH<sub>4</sub> se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles de origen fósil (Pachauri, 2007).

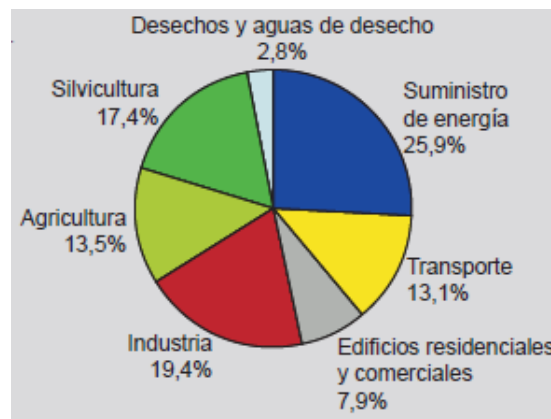
En el informe de síntesis del cambio climático del año 2007 publicado por el Panel Intergubernamental del Cambio climático (IPCC), se muestran las siguientes gráficas (figuras 2.4, 2.5 y 2.6) correspondientes a las variaciones de la contaminación ambiental entre el 1970 y el 2004.



**Figura 2. 4** Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004.



**Figura 2. 5** Parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO<sub>2</sub> equivalente.



**Figura 2. 6.** Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropogénicas en 2004, en términos de CO<sub>2</sub> equivalente. (En el sector silvicultura se incluye la deforestación).

Cristian Frers (2006), muestra algunas propuestas de lo que se puede hacer para mitigar el cambio climático y disminuir las posibles consecuencias:

- Las empresas eléctricas, responsables del 24% de la emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) deben aumentar su eficiencia, utilizar los combustibles y procesos que emitan menos gases efecto invernadero y aumentar la proporción de energías renovables.
- Las industrias consumidoras de energía, responsables del 16% de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) deben optimizar sus procesos para aumentar su eficiencia.
- Fomentar formas de transporte que consuman menos energía por viajante como transporte público, carburantes menos contaminantes, entre otras medias.
- Fomentar la eficiencia energética de los edificios, y consumir más eficientemente la energía en las oficinas y en el hogar.
- Aumentar las superficies vegetales que actúan como sumideros, es decir que absorben carbono, evitar la deforestación y aumentar las repoblaciones, especialmente de especies arbustivas.



### **2.3. Uso de energías alternas para disminuir del CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero.**

El hidrógeno (H<sub>2</sub>) es una alternativa de energía limpia ideal para sustituir a los Combustibles de Hidrocarburos Fósiles (CHF) si lo que se quiere son motores que no emitan CO<sub>2</sub>, ya que el H<sub>2</sub> sólo produce agua como residuo, ya sea usándolo en motores de chispa o en celdas de combustible. Sin embargo, debido a la muy baja densidad del H<sub>2</sub>, se hace necesario comprimirlo a muy alta presión para almacenarlo, lo que además de aumentar los costos, también aumenta el riesgo de fugas. Aún disminuyendo el factor riesgo (e.g., usando tanques criogénicos), los vehículos accionados con H<sub>2</sub> necesitarían unos tanques de combustible relativamente grandes que podrían limitar la aerodinámica del transporte, particularmente en el caso del transporte aéreo.

Otra alternativa de energía limpia son las celdas fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz solar. Esta alternativa debe suponer una descentralización de la distribución de la energía eléctrica, ya que el establecimiento de grandes centrales (equivalentes a las actuales que funcionan con CHF) implicaría costosos paneles solares ocupando áreas enormes. Además, sería también necesario el almacenamiento de grandes cantidades de energía (en baterías recargables) para compensar las variaciones de la radiación solar durante los cambios del día a la noche, o de cielo despejado a cielo nublado. El problema de la intermitencia de esta alternativa energética podría ser solucionado al generar electricidad junto a H<sub>2</sub> por electrólisis durante el día, para luego usar el H<sub>2</sub> en celdas de combustible en la noche (Laine, 2009).

Otra alternativa, aunque actualmente poco limpia y no-renovable, es la energía nuclear (i.e., la fisión nuclear, ya que la fusión nuclear pudiera ser catalogada como renovable y limpia si se logra controlar en el futuro). Con centrales que pueden alcanzar potencias tan altas como las obtenidas en las más poderosas centrales que

operan con CHF. Pero algunos accidentes ocurridos, como el de Chernobil, así como también la dificultad para deshacerse de los desechos radiactivos de la fisión, han sido factores negativos que han frenado la expansión de esta alternativa (Laine, 2009).

Las turbinas eólicas han experimentado durante los últimos 20 años un desarrollo significativo. Se han mejorado los rendimientos, ha aumentado la confiabilidad y se han reducido los costos. El único punto sobre el que quedan algunas dudas es la durabilidad. Si bien en los cálculos se acostumbra tomar 20 años de vida útil, por el momento, ninguna de las máquinas actualmente en operación ha alcanzado ese tope. La industria es aún demasiado joven y debe esperar unos 10 años más para demostrar con los hechos que esa meta es alcanzable; las tecnologías y materiales empleados dan un margen de confianza razonable (Moragues, 2003).

Paradójicamente, se ha llegado a la necesidad de nuevos ingenios para resolver los problemas creados por el éxito de la ingeniería (Laine, 2009).

Mientras el sistema de refrigeración provee confort a los pasajeros en un vehículo, esta operación tiene un impacto doble: primeramente en el consumo de gasolina y posteriormente en las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>). Lo anterior se relaciona con la necesidad de combustible adicional para hacer funcionar el compresor del sistema de refrigeración instalado (Shah, 2009).

Lo anterior no solo repercute en la parte económica del usuario, sino que también apoya al deterioro de la calidad del medio ambiente ya que al utilizar potencia del MCI para mover el compresor del sistema VCR también se producen más explosiones de combustible, lo que hace que el MCI mande mayor cantidad de gases exhaustos a la atmosfera.

En el siguiente subtema se abordará el caso específico de los sistemas de refrigeración automotriz convencionales y una propuesta de mejora. Esta propuesta de mejora se busca gracias a los inconvenientes presentados por el sistema VCR convencional automotriz, el cual presenta un gasto de combustible gracias a que requiere gran parte de la energía del motor para mover el compresor.

## **2.4. Sistemas de refrigeración utilizados y una propuesta de mejora**

En acuerdo con la *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE), el aire acondicionado es la ciencia de controlar la temperatura, humedad, movimiento y limpieza del aire dentro de un ambiente cerrado (ASHRAE, 2001).

En el capítulo 1 se habló un poco del sistema de refrigeración por compresión de vapor y el sistema de refrigeración por absorción vapor. A continuación se comparan las partes esenciales del sistema de refrigeración por compresión y las partes esenciales de uno de los sistemas de refrigeración por absorción de vapor, que es el sistema Amoniaco – Agua.

El sistema de compresión tiene como componentes principales el compresor, el condensador, la válvula de expansión y los serpentines evaporadores. Las partes esenciales de un sistema de refrigeración por absorción son el condensador, la válvula de expansión, los serpentines evaporadores, el absorbedor y el generador. En ambos sistemas el condensador, la válvula de expansión y serpentines evaporadores puedan ser exactamente los mismos. En vez de un compresor, el sistema de absorción usa un absorbedor y un generador, así como una bomba para que el amoniaco circule en agua a través del absorbedor y generador. En el absorbedor, el vapor de amoniaco que viene del evaporador a baja presión es absorbido en la solución débil y relativamente fría del amoniaco-agua.

En el generador se aplica calor a la solución concentrada de amoníaco y agua, llevándose parte del amoníaco al condensador. La solución débil de baja concentración se enfría al volver al absorbedor para absorber más amoníaco. Esta breve descripción muestra que los sistemas de absorción y los sistemas de compresión son similares en principio. El absorbedor ocupa el lugar de la carrera de succión del compresor aspirando el gas a baja presión que proviene del evaporador. El generador ocupa el lugar de la carrera de compresión, descargando el gas de amoníaco a alta presión y temperatura. Este amoníaco a alta presión pasa después al condensador, donde se convierte a líquido y fluye a través de la válvula de expansión de los serpentines evaporadores, como en un sistema de compresión (Elonka et al, 1988). En la figura 2.7 se muestran ejemplos de sistemas VCR comerciales.



**Figura 2. 7.** Ejemplos de equipos que utilizan el Sistema de Refrigeración por Compresión.

Existen puntos importantes que abordar acerca de los sistemas de refrigeración:

- Refrigerar mediante un sistema de compresión de vapor puede ser un método eficiente. Sin embargo, la energía de entrada es trabajo suministrado mecánicamente y, por lo tanto, costosa. Se requiere una cantidad relativamente grande de trabajo, porque durante la compresión el vapor experimenta una gran variación de su volumen específico.
- Si hubiese medios disponibles para elevar la presión del refrigerante sin alterar apreciablemente su volumen, podría reducirse mucho el trabajo requerido. El

sistema de refrigeración por absorción muestra cómo este proceso puede ser posible mediante la absorción del vapor refrigerante por un líquido.

- La ventaja principal del sistema de refrigeración por absorción es que sólo requiere una pequeña cantidad de trabajo. Sin embargo, encontramos que se requiere un suministro de calor muchas veces mayor que el trabajo requerido por el ciclo de compresión de vapor. Si el calor es suficientemente barato, el sistema de refrigeración por absorción será atractivo económicamente (Threlkeld, 1973).

Los sistemas de refrigeración por absorción han sido utilizados para producir frío desde 1850. Hoy en día estos sistemas se han hecho más atractivos, especialmente por se amigables con el ambiente. También existen otras ventajas como la utilización de energías como la solar, geotérmica y descarga de calor de desperdicio proveniente de varios procesos (Mehrabian, 2004).

Un sistema de absorción utiliza la capacidad de una sustancia (el absorbente) para aspirar volúmenes, relativamente grandes, de vapor de otra sustancia, por lo común un líquido (refrigerante). El absorbente tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de vapor cuando esta frío y de liberarlas cuando está caliente.

Uno de los primeros y todavía el más ampliamente utilizado es el sistema de refrigeración por absorción con solución par amoniaco-agua, en donde el agua sirve como absorbente mientras que el amoniaco funge como refrigerante. Pero existen otros tipos de sistemas de absorción, uno de ellos es el sistema de absorción con solución par de bromuro de litio-agua en el cual, en este caso, el agua es el refrigerante y el bromuro de litio el absorbente (Elonka et al, 1988).

La principal diferencia entre los sistemas de absorción con amoniaco-agua y con bromuro de litio-agua, consiste en que, con el bromuro de litio, el agua es el refrigerante y el bromuro de litio es el material absorbente. En un sistema de

amoníaco, el amoníaco es el refrigerante y el agua es el absorbente. En lugar de que sea vapor de agua el que deje el generador y vaya al condensador, se saca vapor de amoníaco del líquido concentrado y sigue por el circuito hacia el condensador.

Además teniendo el agua como refrigerante, la evaporación es inducida por el alto vacío en el evaporador. En las máquinas de amoníaco, el ciclo opera bajo una presión positiva comparable con las presiones de los sistemas de compresores mecánicos. Esta es la razón por la que el amoníaco puede usarse para producir condiciones de temperatura bajo cero, una imposibilidad con el agua, la cual tiene un límite de 32 °F (0 °C) en el evaporador. Pero los componentes básicos son los mismos que en el ciclo de bromuro de litio.

Las diferencias entre un sistema de compresión y un sistema de absorción son que en un sistema de absorción, el aumento de presión es producido por medio del calor suministrado por el vapor circundante o algún otro gas caliente o fluido caliente a través de un serpentín o tubería. El generador-absorbedor hace el trabajo de un compresor en el que el absorbedor reemplaza la carrera de succión y el generador la carrera de compresión. El cabezal rociador del generador corresponde a la válvula de expansión de un sistema de compresión. El evaporador y el condensador son idénticos tanto en el sistema de absorción como en el de compresión. El ciclo de refrigeración por absorción utiliza dos fenómenos: 1) una solución de absorción (absorbente más refrigerante) puede absorber vapor de refrigerante y 2) un refrigerante hierve (y se enfría a sí mismo) cuando está sujeto a baja presión (Elonka, 1988)

El proceso de absorción funciona de la siguiente manera para mantener la baja presión: El evaporador contiene el refrigerante (agua). El absorbedor es un recipiente adjunto que contiene una solución fuerte (concentrada) de agua y bromuro de litio. Los dos recipientes se hallan conectados de manera que el vapor pueda fluir

libremente entre los dos. A los recipientes se les vacía todo el aire hasta obtener una presión extremadamente baja.

El agua en el evaporador comenzará a vaporizarse súbitamente; esto es, hervirá. El efecto refrigerante del calor latente de vaporización enfriará el agua no evaporada, lográndose la refrigeración.

La temperatura de evaporación del refrigerante depende de la presión y temperatura de saturación. Esto es, la temperatura a la cual el refrigerante se evapora (hervir) varía con la presión del evaporador. La presión debe ser lo suficientemente baja para que la temperatura resultante de evaporación se encuentre al valor que se necesita para la aplicación de la refrigeración.

Dos pares de sustancias son los más utilizados en los sistemas de absorción. Un par está compuesto de agua y amoníaco. El agua es el absorbente y el amoníaco es el refrigerante. El otro par es el bromuro de litio y el agua, en este caso el bromuro de litio es el absorbente y el agua es el refrigerante, se observará que en uno de los casos el agua es el absorbente y en el otro el agua es el refrigerante (Pita, 1999).

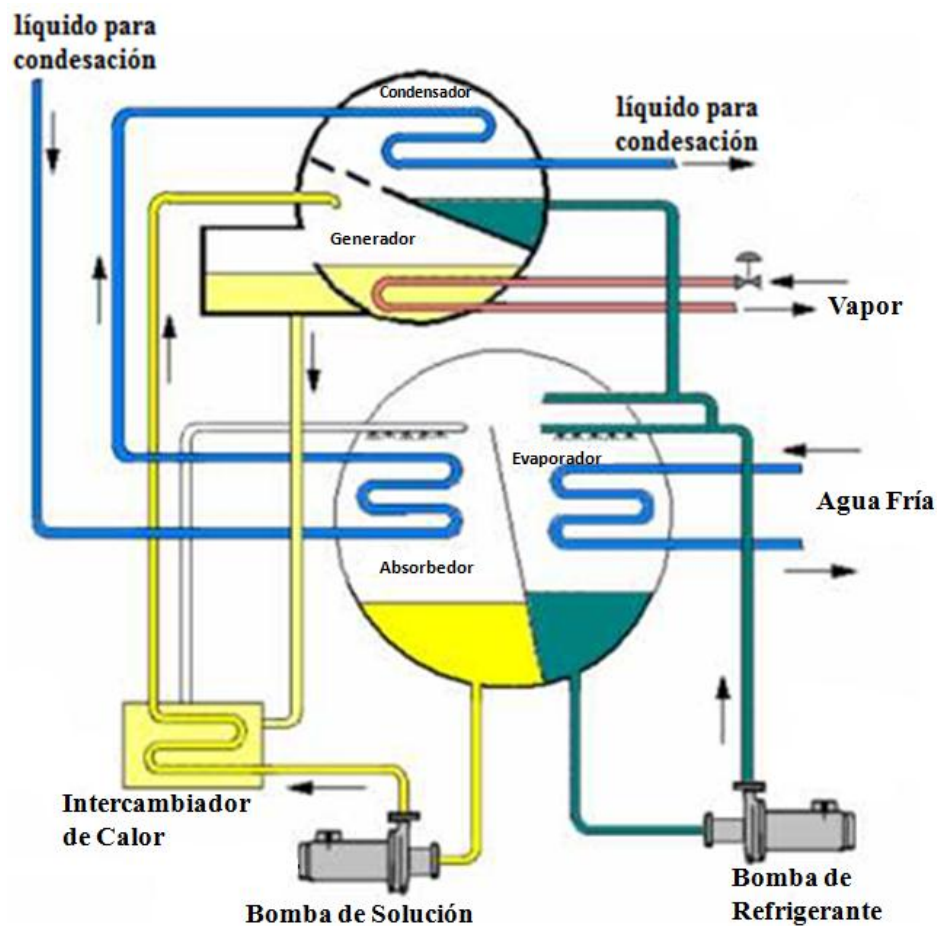
La tabla 2.1 muestra la comparación de características entre tres diferentes soluciones utilizadas en los sistemas de refrigeración por absorción.

Las máquinas comerciales de refrigeración por absorción que trabajan por debajo de los 0°C utilizan la solución par amoníaco – agua, con amoníaco como refrigerante y agua como absorbente. La gran toxicidad y el irritante olor del amoníaco son serios obstáculos para instalarse en uso general (Zhong, 2004). Sin embargo, el sistema de absorción puede ser utilizado en lugar del sistema de compresión, en lugares donde se encuentra una fuente barata de calor o donde hay poca disponibilidad de energía eléctrica (Trott, 2000).

Característica deseada	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	LiBr-H <sub>2</sub> O	MMA-H <sub>2</sub> O
Temperatura generación	Alta (> 120°C)	Media (> 80°C)	Baja (> 60°C)
Presión de operación	Alta (10-15 bar)	Vacío (0.01 bar)	Baja (5-7 bar)
Calor latente	Medio	Alto	Bajo
Rectificación	Si	No	Si
Eficiencia	Baja	Alta	Baja
Toxicidad	Alta	Baja	Alta
Inflamabilidad	Media	Baja	Alta
Cristalización	No	Si	No
Corrosión	Baja	Moderada	Baja
Costo reactivos	Baja	Alto	Alto
Viscosidad	Baja	Baja	Baja

**Tabla 2. 1.** Comparación entre soluciones utilizadas en el sistema de absorción.

En la figura 2.8 se muestra la conformación del sistema de refrigeración por absorción con LiBr-H<sub>2</sub>O.



**Figura 2. 8.** Ciclo de refrigeración por absorción con solución LiBr-H<sub>2</sub>O.



Isaza C. (2010) muestra en su artículo “Análisis termodinámico de un sistema de refrigeración solar por absorción usando soluciones de Monometilamina – Agua para la conservación de alimentos”, el uso de una solución par de MMA – H<sub>2</sub>O para utilizarse como una propuesta interesante en el ámbito de conservación de alimentos.

Se han realizado estudios teóricos de los sistemas de refrigeración por absorción aplicados a un vehículo automotor utilizando la temperatura de los gases de escape como fuente de energía térmica para proveer al generador de calor.

I. Horuz (1999) en el que asegura lo siguiente: “Las unidades de refrigeración que se utilizan actualmente en los vehículos de transporte por carretera son en su mayoría del tipo refrigeración por compresión de vapor (VCR), en los que el compresor de vapor requiere un aporte de energía en forma de trabajo. En los sistemas pequeños, la entrada de trabajo del compresor se puede obtener a través de una transmisión por correa desde el motor de propulsión principal, mientras que en los grandes sistemas del compresor es normalmente conducido por una combustión interna dedicada (IC) del motor. En el sistema de refrigeración por absorción de vapor (VAR), un proceso físico reemplaza el proceso mecánico del sistema de refrigeración por compresión, mediante el uso de energía en forma de calor en lugar de trabajo mecánico. Las principales ventajas de este sistema radica en la posibilidad de utilizar la energía de los gases residuales calientes.”

#### **2.4.1. Ventajas del sistema de absorción de vapor**

Las ventajas que se atribuyen a los sistemas de absorción sobre los sistemas de compresión son:

- Ahorros en el costo de operación por usar vapor de agua a baja presión y de bajo costo, en muchos casos el vapor de desperdicio de otros procesos.
- Eliminación de cargas eléctricas pesadas.
- Simplicidad de la operación y de los sistemas de control.

- Arranque y paro automáticos.
- Plena eficiencia en todos los rangos de carga reducida.
- Posible instalación en exteriores.
- Economía del área de piso requerida para grandes tonelajes.
- Mantenimiento mínimo debido a que hay menos partes móviles.
- Mínima cantidad de equipo móvil necesario (Elonka et al, 1988).

El proceso de refrigeración por compresión de vapor, utilizado actualmente en los automóviles, genera el aumento de gases exhaustos a la atmosfera, por el hecho de requerir aumento de potencia del motor de combustión interna. Con el sistema de refrigeración por absorción de vapor no se requiere aumento de potencia directa del motor para su óptimo desarrollo. Lo anterior muestra dos beneficios completamente tangibles: la reducción del volumen de gases exhaustos a la atmosfera y la reducción de la temperatura de los gases exhaustos que se liberan al medio ambiente. La reducción de gases de efecto invernadero, como lo es el CO<sub>2</sub>, es de gran importancia en el presente, ya que de eso depende la calidad de vida en el futuro.

Es bien sabido que se desperdicia una gran cantidad de energía térmica asociada con los gases de exhaustos provenientes del MCI en funcionamiento. Una estimación del balance de energía disponible en la combustión de gasolina en un MCI muestra que una tercera parte es convertida en trabajo útil (movimiento del automóvil), otra tercera parte se pierde en disipación de calor, y la última parte de la energía térmica total producida, es enviada hacia la atmósfera por medio de los gases de escape (Vicatos et al., 2008).

En el siguiente subtema se abordará una breve explicación del confort térmico, ya que a partir de ese subtema se comenzará a desarrollar información técnica de los sistemas de refrigeración.

## **2.5. Confort humano y Estándares de Confort**

El aire acondicionado automotriz o móvil, ha desempeñado un papel importante en el confort humano y, en cierta medida, en la seguridad humana durante la conducción del vehículo en diversas condiciones atmosféricas (Shah, 2009).

Como el objetivo de los sistemas de acondicionamiento de aire es proporcionar un ambiente interior confortable, el diseñador y el operador del sistema deben comprender los factores que afectan la comodidad (Pita 1994).

El Confort es definido como una condición que al cambiar, hace que una persona se sienta incomoda.

La percepción del confort, temperatura y aceptabilidad térmica está relacionada con la tasa de producción de calor metabólico, la tasa de transferencia al ambiente y, los ajustes psicológicos y temperaturas del cuerpo humano. La tasa de transferencia de calor está influenciada por los factores de temperatura del aire, radiación térmica, movimiento del aire y humedad, y los factores de actividad y vestimenta personal (McQuinston et al., 2005).

Uno de los factores a tomar en cuenta en la evaluación de cargas térmicas es la pérdida de calor corporal. El cuerpo humano genera calor al metabolizar (oxidar) los nutrientes, este calor corporal pasa continuamente a sus alrededores, al medio ambiente más frío. El factor que determina si uno siente calor o frío es la velocidad de pérdida de calor corporal. Cuando esta velocidad queda dentro de ciertos límites, se tiene una sensación confortable. Si la velocidad de pérdida de calor es demasiado alta, se siente frío. Si es demasiado baja, se siente calor (Pita 1994).

La vestimenta es un importante modificador de pérdida de calor del cuerpo y el confort. El aislamiento provocado por la vestimenta puede estar descrito por valores de “CLO (Abreviación de la palabra inglesa *Clothing*)” en donde:

$$1 \text{ clo} = 0.88 \frac{\text{ft}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}}{\text{Btu}} = 0.155 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (2.1)$$

donde Btu (British Thermal Unit) y W (Watt) son unidades de energía; el Btu es la cantidad de energía necesaria para calentar 1 libra de agua, 1 °F; el Watt expresa la cantidad de energía disipada en 1 segundo.

En un ambiente térmico uniforme, el 80% de los límites de aceptabilidad térmica ocurren a condiciones que producen sensaciones térmicas cercanas a ligeramente frío o ligeramente caliente.

En la figura 2.9 se muestran las temperaturas de operación o ajustadas de bulbo húmedo y los valores de CLO corresponden a la sensación óptima de neutral y del 80% de los límites de la temperatura aceptable del *Standard 55* de ASHRAE.

En Estados Unidos se estableció una serie de condiciones ideales para interiores. El *Standard 55* de ASHRAE, a partir de estudios sobre los efectos de la temperatura, la humedad, el movimiento y las prendas de vestir del confort humano. El *Standard 55-1981* se muestra en la figura 2.10. Las zonas sombreadas se llaman zonas de confort y señalan combinaciones de efectos según las cuales, al menos el 80% de los ocupantes opinaría que el medio ambiente es confortable. (Nota: Hay zonas separadas para invierno y verano, con un ligero traslape (Pita 1994).

Sin embargo existen las siguientes limitaciones

- Las zonas de confort solo se aplican a personas sedentarias o poco activas

- Las zonas de confort solo se aplican a ropa de verano como pantalones delgados y camisas de manga corta, o algo equivalente (0.5 clo); y a ropa de invierno consistente en pantalones gruesos, camisa de manga larga y suéter o chamarra, o algo equivalente (0.9 clo).
- Las zonas de confort se aplican al movimiento de aire de la zona ocupada que no exceda 30 pies por minuto (FPM) en el invierno ni 50 pies por minuto en verano.
- Las zonas de confort solo se aplican bajo ciertas condiciones de radiación entre el ocupante y las superficies del recinto.

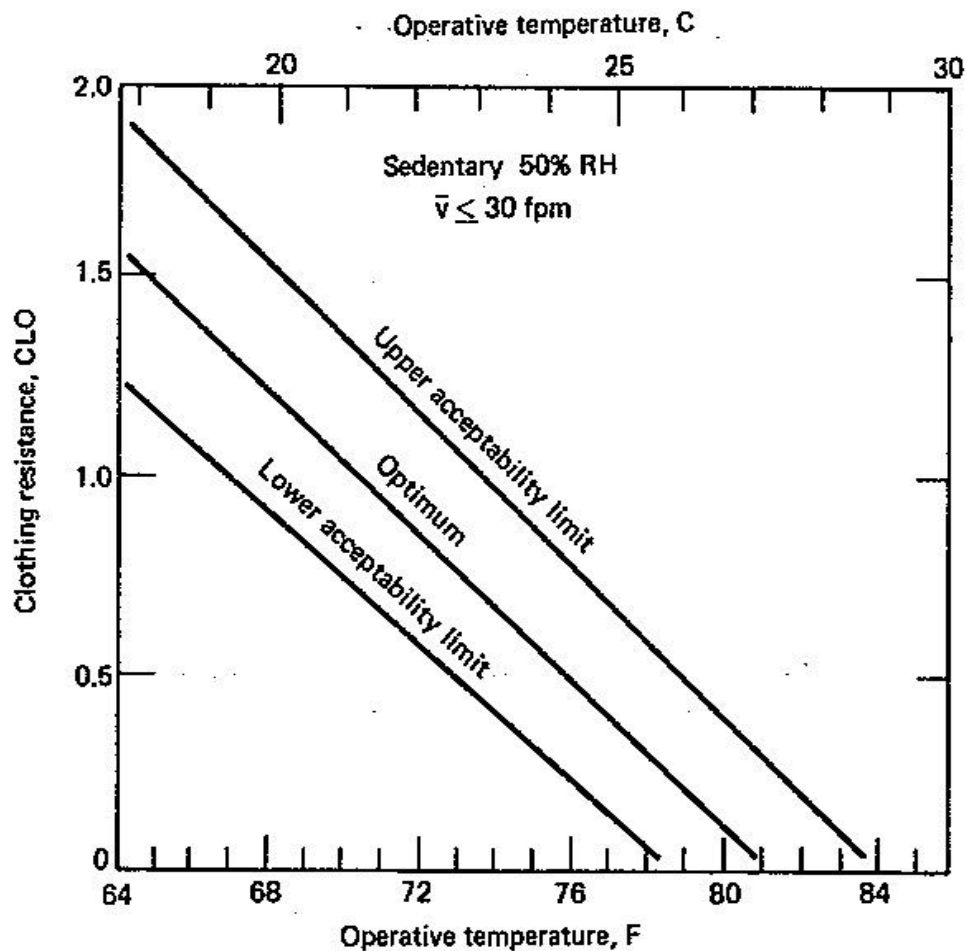
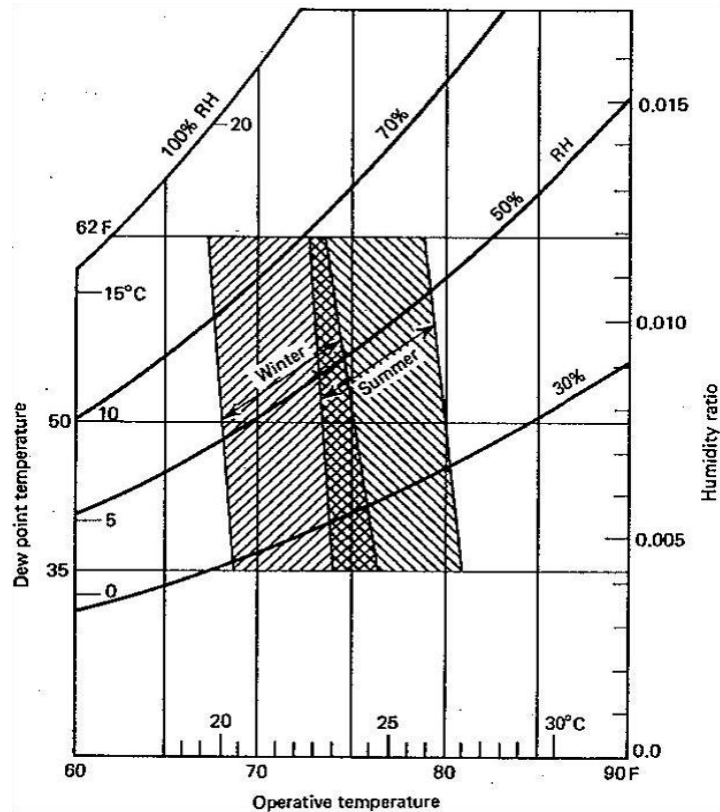


Figura 2. 9. Aislamiento de vestimenta necesario para varios niveles de confort a una temperatura dada.



**Figura 2. 10.** Límites aceptables de temperatura de operación y humedad para personas vestidas en un típico verano o ropa de invierno, para actividad una ligera o media –sedentaria.

Aunque podría parecer que estas restricciones reducen la utilidad de la gráfica de la figura 2.10, en realidad no es así. En primer lugar, las condiciones que se especificaron son muy comunes; son las de un medio normal de oficina. Además, para los cambios de las diversas condiciones, se ajustan las zonas de confort para adaptarse a esos cambios. Los procedimientos para llevar a cabo estos cambios están en el *Standard 55* ASHRAE.

Con el fin de usar la gráfica del *Standard 55* y decidir si determinado conjunto de condiciones es confortable, es necesario conocer la temperatura y humedad del aire del recinto. A la temperatura del aire se le llama técnicamente “temperatura de bulbo seco (BS)”. La humedad se expresa con frecuencia como “porcentaje de humedad relativa (% HR)” (Pita 1994).

El siguiente subtema está ligado a nuestro estudio gracias a que el sistema de refrigeración es tomado en cuenta como un sistema termodinámico o una máquina termodinámica de absorción de calor por las características propias que encuadran en la definición de una “Máquina Termodinámica”.

## **2.6. Maquinas termodinámicas**

Una maquina termodinámica es un sistema termodinámico que funciona continuamente y solo energía (calor y trabajo) atraviesa sus fronteras, las que son impenetrables al flujo de masa. Se puede utilizar para entregar trabajo a sistemas externos, como lo hace el motor Stirling, o puede recibir trabajo de algún sistema externo y producir un efecto frigorífico, como en el caso de un refrigerador (Faires, 2003).

Con la definición de maquina termodinámica, se puede analizar el caso del efecto frigorífico. Efecto que se lleva a cabo con una maquina de refrigeración.

### **2.6.1. Primera y segunda ley de la termodinámica**

La ciencia de la ingeniería termodinámica se basa en dos principios empíricos llamados “primera y segunda ley de la termodinámica”.

La primera ley de la termodinámica establece que si un sistema experimenta un proceso durante el cual recibe o entrega calor o trabajo, ni el total ni parte de la energía recibida se destruye dentro del sistema y ni el total ni parte de la energía recibida se crea dentro del sistema. De acuerdo a la primera ley, calor y trabajo son transformables uno en otro (Threlkeld, 1973).

Otra definición de la primera ley de la termodinámica es la mostrada por Virgil Faires (2003), la cual menciona que “Cuando un sistema pasa por un cambio cíclico, el

calor neto que entra o sale del sistema es igual al trabajo neto que efectúa o admite el mismo”.

Es una realidad experimental que el calor no fluye espontáneamente de un sistema hacia otro de mayor temperatura. Para transferir el calor a un sistema de mayor temperatura necesitamos una máquina de refrigeración, la cual recibe energía de una fuente externa. Las anteriores afirmaciones conforman la segunda ley de la termodinámica que, de acuerdo con Clausius, establece que es imposible para una máquina, actuando por sí sola y sin ninguna acción o ayuda externa, transferir calor de un cuerpo hacia otro de mayor temperatura (Threlkeld, 1973).

Se ha analizado la segunda ley de la termodinámica según Clausius, sin embargo también es posible analizarla desde otra perspectiva de igual importancia como lo es la definición de Kelvin-Planck, la cual establece que: “es imposible construir una máquina termodinámica que, cuando opere según cierto ciclo, no produzca más efectos que efectuar trabajo e intercambiar calor con un solo depósito térmico” (Faires, 2003).

Así como la primera ley de la termodinámica proporcionó la base del concepto de la energía interna, la segunda ley aporta la base del concepto de la entropía, misma que es definida por la Real Academia de la Lengua Española como una magnitud termodinámica que mide la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema. La primera ley admite la posibilidad de que el calor y el trabajo son 100% intercambiables, sin restricción alguna; la segunda ley, a su vez, complementa a la primera restringiendo la cantidad de calor que se puede convertir en trabajo (Faires, 2003).

Como se explicó antes de entrar al tema 2.6, el sistema de refrigeración es un sistema termodinámico por lo cual es importante identificar e informarse sobre sus componentes.



## 2.7. Componentes del sistema de refrigeración.

En la siguiente sección se profundiza en los detalles de los componentes del sistema de refrigeración por absorción con solución Bromuro de Litio – Agua. El estudio de estos componentes ayudará a comprender el diseño integrado que posteriormente se realizará para cumplir con el objetivo de este trabajo.

### 2.7.1. El generador

La solución débil procedente del absorbedor se bombea hasta el generador mediante la bomba de la solución. Una fuente de calor, en este caso un serpentín de vapor, calienta la solución hasta alcanzar la temperatura a la cual el agua se evapora (210 °F – 98.88 °C), dejando una solución fuerte. Mediante un cambiador de calor, la solución débil se precalienta (de 105 a 175 °F) aprovechando la solución de retorno, la cual a su vez se enfría hasta llegar a 135 °F. La solución fuerte se mezcla con la solución débil en la succión de la bomba del absorbedor.

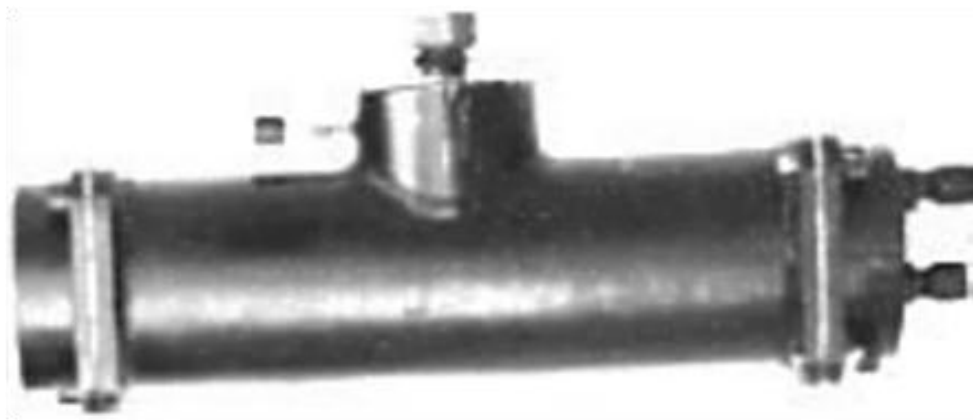


*Figura 2. 11. Generador de un sistema VAR instalado en un automóvil.*

### 2.7.2. El evaporador

El refrigerante líquido (agua) fluye desde el condensador, a través de la restricción del orificio, hasta el evaporador. Debido a la caída de presión, tiene lugar un poco de

evaporación súbita, y el refrigerante se enfría hasta 40°F (4.44°C). El refrigerante no evaporado cae al recipiente del evaporador. La bomba del evaporador hace circular continuamente esta agua hasta las boquillas de aspersión, que la extienden sobre el haz de tubos de agua fría del sistema. El calor procedente del sistema evapora el refrigerante, y a su vez el ambiente del sistema se enfría (Pita, 1999). En la figura 2.12 se puede observar una imagen del evaporador utilizado por G. Vicatos, J. Gryzagoridis y S. Wang en el 2008 en un sistema VAR de Amoniaco – Agua, el cual también puede ser utilizado para el sistema LiBr – H<sub>2</sub>O.



**Figura 2. 12.** Evaporador de un sistema VAR.

Tres requisitos importantes para el diseño y selección del evaporador son:

- El evaporador debe tener suficiente superficie para absorber la carga térmica sin una diferencia excesiva de temperatura entre el refrigerante y la sustancia por enfriarse.
- El evaporador debe proporcionar suficiente espacio para el refrigerante líquido y también un espacio adecuado para que el vapor de refrigerante se separe del líquido.
- Debe proporcionar espacio para la circulación de refrigerante sin excesiva caída de presión entre la entrada y la salida.

La capacidad de cualquier evaporador o serpentín de enfriamiento, es la razón por la cual pasa el calor a través de las paredes del evaporador proveniente del espacio o

producto refrigerado a la vaporización del líquido interior y generalmente se expresa en Btu por hora. Un evaporador seleccionado para cualquier aplicación específica deberá tener suficiente capacidad de transferencia de calor para permitir la vaporización del refrigerante, para absorber calor con la rapidez necesaria, para producir el enfriamiento requerido cuando está trabajando a las condiciones de diseño (Dossat, 1995).

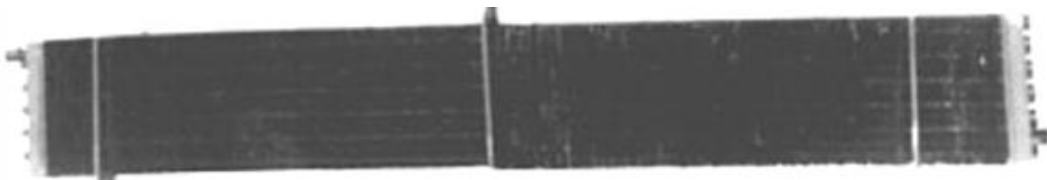
La capacidad para transmitir calor variará dependiendo de:

- La diferencia de temperatura
- El método para alimentar el serpentín
- La sustancia que se va a enfriar
- La velocidad con que la sustancia pasa por la superficie del serpentín y la velocidad del refrigerante del mismo y
- La relativa limpieza de ambas superficies

### 2.7.3. El condensador

Los condensadores remueven el sobrecalentamiento del refrigerante producido por el compresor y así licúan el refrigerante para otro ciclo a través del sistema (Elonka, 1988).

El condensador es el punto final para evacuar el calor del sistema de refrigeración. Con el fin de efectuar una operación confiable y eficiente deben conocerse los que actualmente se utilizan. Son seis tipos: 1) el de concha y tubos; 2) el de concha y serpentín; 3) el de tubos dobles; 4) el atmosférico; 5) el evaporativo y 6) el enfriado por aire. En la figura 2.13 se observa la imagen de un condensador de un sistema VAR, enfriado por aire.



*Figura 2.13. Condensador de un sistema VAR, enfriado por aire.*

Toda la energía absorbida por el sistema de refrigeración más el calor equivalente de la energía mecánica requerida para hacer funcionar el sistema debe eliminarse por el condensador. Por cada 200 Btu/min absorbidos por el evaporador, hasta 300 Btu/min deben ser disipados por el condensador. Esto depende de las presiones de succión y descarga y del tipo de refrigerante. El sistema promedio se diseña para disipar 250 Btu/min por cada 200 Btu de efecto de refrigeración (Elonka, 1988).

Estos son algunos puntos importantes que se tendrán que tomar en cuenta al seleccionar un condensador para un sistema de refrigeración:

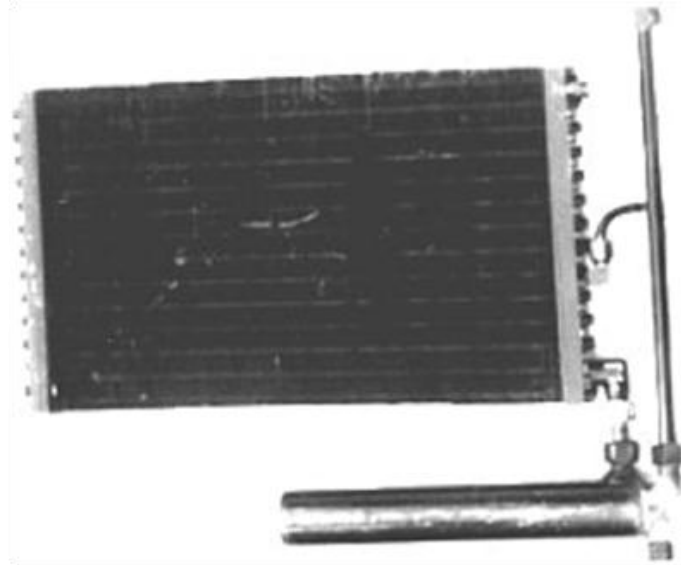
- El condensador debe tener suficiente superficie de transmisión de calor para pasar el vapor alimentado al estado líquido. Esto se realiza a una presión y a una temperatura de operación razonables.
- El condensador debe tener también suficiente volumen para almacenar vapor.
- Debe tenerse cuidado al seleccionar los condensadores con superficie con aletas. La superficie con aletas puede indicar bastante área para la disipación de calor sin proporcionar suficiente volumen.
- El condensador debe también tener espacio amplio para separar el líquido condensado del vapor y drenarlo al receptor de líquido.

#### **2.7.4. El absorbedor**

Una solución de concentración intermedia se rocía en el espacio del absorbedor, por medio de la bomba del absorbedor. La solución absorbe el vapor del agua refrigerante circundante, el cual llena el espacio abierto del evaporador y la parte de absorción del casco. Debido a la existencia de un pequeño gradiente de presión, el vapor refrigerante fluye continuamente hacia el absorbedor.

En el absorbedor se genera calor, de la condensación del refrigerante absorbido, del calor de dilución y del calor sensible de la solución fuerte. Este calor se remueve mediante el agua de enfriamiento que circula a través de un haz de tubos. La temperatura del absorbedor se mantiene a 105 °F (40.55 °C). El agua de

enfriamiento se calienta de 85 °F (29.44 °C) a 95°F (35 °C) (Pita, 1999). En la figura 2.14 se muestra un serpentín de evaporador conectado al absorbedor en donde se observa la conexión para fomentar la mezcla de la solución fuerte con el vapor de agua, en una instalación real.



*Figura 2. 14. Serpentín de evaporador conectado al absorbedor.*

## 2.8. Cristalización

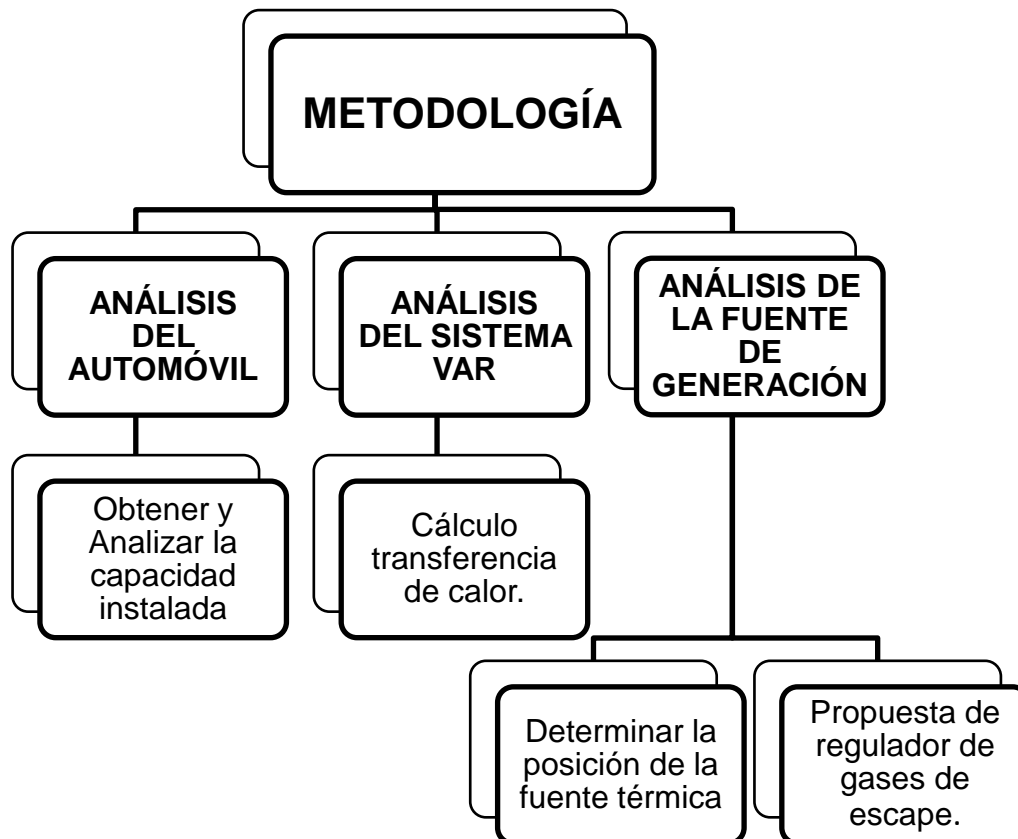
La solución de bromuro de litio y agua posee una propiedad que puede causar dificultades. Si se enfría una solución fuerte (concentrada) que se halla a una temperatura elevada, entonces de la solución se precipitan cristales sólidos. A este proceso se le llama cristalización. La mezcla resultante tiene una consistencia semejante a la del lodo. Si la cristalización tiene lugar en una maquina de absorción, la refrigeración cesa, puesto que las bombas no pueden operar con una mezcla semejante al lodo (Pita, 1999).

El agua es la que posee el mayor calor latente de vaporización a 0° C pero en combinación con el LiBr puede ocasionar cristalización debido a la inestabilidad de la temperatura causada por la fluctuación en los gases de escape (Vicatos et al., 2008). En el anexo 3 se muestra la gráfica del límite de cristalización del LiBr.

## CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA

Para un proyecto relacionado con el acondicionamiento de aire, el diseño de un sistema de refrigeración industrial o de confort requiere de procedimientos integrados. Para un problema dado el diseñador debe:

- Establecer las condiciones de diseño
- Estimar las cargas térmicas
- Establecer el tipo de sistema a utilizar incluyendo los métodos de control.
- Calcular las necesidades de capacidad de cada elemento.
- Seleccionar el equipo disponible comercialmente y/o diseñar equipo especial.
- Diseñar el sistema de distribución del aire y los varios sistemas de tuberías.
- Preparar dibujos y especificaciones del sistema (Threlkeld, 1973).



*Figura 3. 1. Cuadro ilustrativo de la estructura de la metodología.*

En la lista anterior se muestran los pasos para la selección y diseño de un sistema de aire acondicionado. Algunos de los puntos mostrados anteriormente coinciden con la metodología que se seguirá en este proyecto, sin embargo, hay algunos puntos que se deberán anexar y adecuar a la metodología como ideas propias, gracias a que no se ha encontrado una metodología específica para un proyecto similar. En la figura 3.1 se muestran el cuadro ilustrativo de la estructura de la metodología a seguir en este proyecto.

### **3.1. Análisis del automóvil**

En esta sección se llevará a cabo un análisis de cargas térmicas de una cabina de un automóvil para determinar la capacidad requerida de refrigeración, con la cual se comienza la siguiente etapa que es la del diseño de los componentes de el sistema VAR.

#### **3.1.1. Obtener y analizar la capacidad instalada**

La capacidad instalada de refrigeración en el automóvil es un dato clave para éste proyecto, ya que el sistema VAR diseñado tendrá que cumplir con al menos igualar la capacidad de refrigeración dentro de la cabina.

Para lograr lo siguiente se tomaran los datos del compresor del sistema VCR instalado y se analizarán sus características para determinar la capacidad de refrigeración instalada, su Coeficiente de Rendimiento COP y su eficiencia, datos que se tendrán que igualar posteriormente en el análisis del sistema VAR.

Es importante obtener y analizar las características de los componentes del equipo de refrigeración instalado en el automóvil para tomar un punto de referencia inicial. En este caso en específico, se analizará el desplazamiento volumétrico del compresor del sistema VCR instalado y las características termodinámicas del refrigerante HCFC-134a para determinar la capacidad de refrigeración máxima a la que éste componente está diseñado para trabajar.

## **3.2. Análisis del sistema VAR**

En este paso se desarrollará, basado en cálculos termodinámicos, todo un sistema VAR que cumpla con la capacidad requerida. Esto se llevará a cabo mediante la determinación de las características del sistema VCR instalado como eficiencia y COP. Los cuales darán una pauta para el inicio del análisis matemático de las características necesarias para que un sistema VAR cumpla con los mismos requisitos.

### **3.2.2. Calculo de transferencia de calor**

El flujo másico determinará la cantidad de agua (refrigerante) por unidad de tiempo que se tendrá que cumplir para desplazar la misma cantidad de calor que el sistema VCR actual. Este paso es fundamental para que el proyecto posteriormente pase a la fase de diseño, la cual ya se dijo al principio que no es parte de esta tesis.

## **3.3. Análisis de la fuente de Generación**

Se deberá analizar mediante técnicas de medición de temperatura, el lugar exacto de la tubería de gases de escape en donde se colocará la fuente térmica de generación y se deberá proveer una solución viable para mantener una fuente de energía estable y constante mientras el sistema VAR se encuentre funcionando.

### **3.3.1. Determinar la posición de la fuente térmica para generación**

La medición de temperatura se utilizará para determinar, en una primera instancia, si la temperatura de los gases exhaustos es adecuadamente alta como para utilizarse como fuente térmica de generación de vapor en el generador, tomando como referencia las mínimas RPM del MCI en cuestión. En caso de obtener un resultado positivo, la medición de la temperatura a través de la tubería de gases de escape también permitirá indicar el lugar donde puede ser instalada la fuente térmica de energía para llevar a cabo el ciclo de refrigeración por absorción.



Utilizando la técnica de medición de temperatura con termografía se verifica si realmente los gases exhaustos, aún en su mínimo flujo por la tubería de escape (mínimas revoluciones por minuto del MCI), cumplen con el requisito de rango de temperatura de generación.

### **3.3.2. Propuesta de regulador de gases de escape**

Una vez encontrado el punto de la tubería donde se establecerá la fuente térmica de generación, se debe tomar en cuenta la fluctuación del flujo de gases de escape que circulan por ese punto. Recordemos que la variación del flujo de gases presentará variación en la temperatura a lo largo de la tubería de escape, haciendo que la temperatura no sea constante, lo que presuntamente causará problemas tales como la cristalización del bromuro de litio principalmente.

La variación de la temperatura en cualquier punto de la tubería de escape se da gracias a la fluctuación del flujo de gases exhaustos dado que el MCI del automóvil no siempre trabaja con las mismas revoluciones por minuto (RPM). Estas variaciones de RPM son directamente proporcionales a la fuerza de empuje que ejerce el automóvil contra el suelo para alcanzar velocidades superiores o inferiores según sea el caso.

Para evitar ésta fluctuación del flujo de gases en la tubería de escape se debe instalar un sistema de control de flujo de gases, de esa manera se obtendrá un flujo constante en el punto de generación determinado anteriormente por el análisis de termografía.

## CAPITULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el desarrollo del presente capítulo se muestran la aplicación de la metodología y los análisis realizados para llevar a cabo los objetivos de este proyecto.

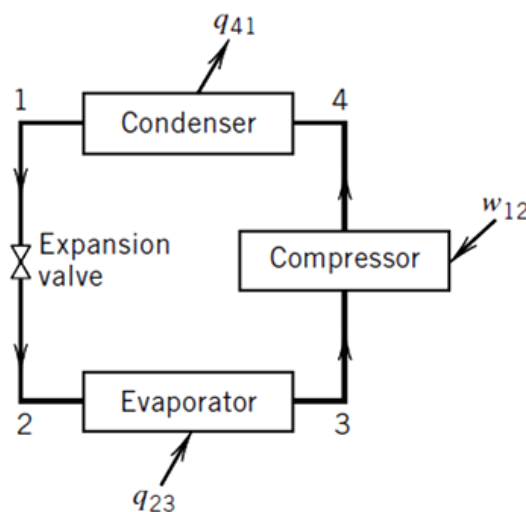
### 4.1. Análisis del sistema VCR instalado

Datos generales tomados del automóvil analizado:

- Refrigerante HCFC R-134a
- Desplazamiento volumétrico del compresor =  $210\text{cm}^3/\text{rev}$
- Se supone una compresión a volumen y entropía constante.
- Relación de poleas compresor-cigüeñal = 1:1.3
- Revoluciones mínimas del MCI = 800rpm
- Revoluciones del compresor a 800rpm del MCI = 1040rpm
- \*Temperatura de condensación =  $120^\circ\text{F}$
- \*Temperatura de evaporación =  $40^\circ\text{F}$

\*temperatura sugerida por el Ing. Rogelio Bonillas Olivas experto en el tema de refrigeración.

En la figura 4.1 se muestra el ciclo teórico del sistema VCR.



**Figura 4. 1.** Ciclo teórico de un sistema de refrigeración por compresión.

Procedimiento para determinar la capacidad de refrigeración del sistema instalado:

El primer paso es determinar el efecto refrigerante ( $E_R$ ) el cual se calcula por la fórmula 4.1, la cual se determina con la diferencia de entalpías del refrigerante a la entrada y salida del evaporador (el proceso de evaporación se lleva a cabo entre los puntos 2 y 3 de la gráfica de presión-entalpía del anexo 2):

$$E_R = q_{23} = i_3 - i_2 = i_3 - i_1 \quad (4.1)$$

$$E_R = 108 \text{ Btu/lb} - 53 \text{ Btu/lb} = 55 \text{ Btu/lb}$$

Lo siguiente será convertir las unidades del volumen desplazado a unidades inglesas, esto se hace con el fin de trabajar con las mismas unidades del diagrama presión-entalpía del refrigerante.

$$V = 210 \text{ cm}^3/\text{rev} = 0.00741 \text{ ft}^3/\text{rev}$$

El siguiente paso es determinar el flujo volumétrico del refrigerante según las revoluciones mínimas del MCI, para eso se utiliza la ecuación 4.2:

$$\dot{v} = V * \text{rpm} \quad (4.2)$$

$$\dot{v} = (0.00741 \text{ ft}^3/\text{rev}) * (1040 \text{ rev}/\text{min}) = 7.7064 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Es importante determinar el volumen específico. Este dato se encuentra en el gráfico presión-entalpía del refrigerante, a la salida del evaporador y es el siguiente:

$$v_e = 0.9 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

El flujo másico es la unidad que determina cuanta cantidad de masa esta fluyendo en ese punto en un espacio de tiempo, para esto se acude a la ecuación 4.3:

$$\dot{m} = \frac{\dot{v}}{v_e} \quad (4.3)$$

$$\dot{m} = \frac{7.7064 \text{ ft}^3/\text{min}}{0.9 \text{ ft}^3/\text{lb}} = 8.562 \text{ lb}/\text{min}$$

Los datos determinados anteriormente son esenciales para obtener el flujo de energía térmica en el evaporador (ecuación 4.4), este proveerá la capacidad instalada de refrigeración del equipo instalado.

$$\dot{q} = E_R * \dot{m} \quad (4.4)$$

$$\dot{q} = (55 \text{ Btu}/\text{lb}) * (8.562 \text{ lb}/\text{min}) = 470.91 \text{ Btu}/\text{min}$$

Dado que el factor de conversión a *Ton* de refrigeración es:

$$1 \text{ Ton de refrigeración} = 200 \text{ Btu}/\text{min}$$

entonces:

$$\dot{q} = 470.91 \text{ Btu}/\text{min} \left( \frac{1 \text{ Ton de refrigeración}}{200 \text{ Btu}/\text{min}} \right) = 2.35 \text{ Ton de refrigeración}$$

Por último se determina el coeficiente de rendimiento del sistema (COP):

$$COP = \frac{E_R}{W_C} \quad (4.5)$$

en donde  $W_C$  es la energía neta de entrada, es decir la energía de la cual hace uso el compresor para realizar su trabajo, y se calcula con la fórmula 4.6:

$$W_C = i_4 - i_3 \quad 4.6$$

Sustituyendo, se tiene:

$$W_C = 120 \text{ Btu/lb} - 108 \text{ Btu/lb} = 12 \text{ Btu/lb}$$

Se sustituye el valor  $E_R$  y el valor de  $W_C$  en la fórmula 4.5, y se tiene:

$$COP = \frac{55 \text{ Btu/lb}}{12 \text{ Btu/lb}} = 4.58$$

El equipo de refrigeración por compresión instalado en el automóvil analizado es de 2.35 toneladas de capacidad de refrigeración a 800rpm del cigüeñal, con un coeficiente de rendimiento de 4.58.

## 4.2. Análisis del sistema VAR propuesto.

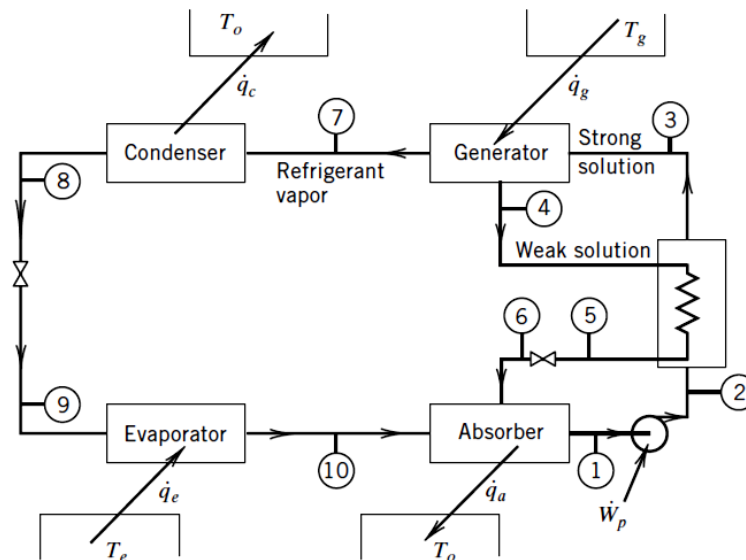
Para la capacidad requerida de 2.35 toneladas de refrigeración, se procede a hacer el análisis del sistema VAR con LiBr-H<sub>2</sub>O.

Datos:

- Temperatura  $t_g = 215^\circ F$  (tomado del diagrama incluido en el anexo 3 sobre un comportamiento típico de un sistema VAR con LiBr- H<sub>2</sub>O.)
  - \*Temperatura  $t_e = 40^\circ F$
  - \*Temperatura  $t_c = 120^\circ F$
- \*Valores tomados del sistema VCR para cumplir con similitud.

- Entalpía  $i_4 = -22 \text{ Btu/lb.}$  para  $215^\circ\text{F}$  de la salida del generador (tomado de diagrama concentración-entalpía mostrado en el anexo 4)
- Entalpía  $i_3 = -38 \text{ Btu/lb.}$  Para  $173^\circ\text{F}$  (temperatura tomada del punto 2 de la grafica del anexo 3) a la entrada del generador (tomado de diagrama concentración-entalpía mostrado en el anexo 4)
- Entalpía  $i_{10} = 1078.5 \text{ Btu/lb.}$  Tomado de la tabla de propiedades del refrigerante 718 (vapor de agua) para un valor de vapor a  $40^\circ\text{F}$  (Anexo 5)
- Entalpía  $i_9 = 88 \text{ Btu/lb.}$  Tomado del diagrama concentración-entalpía para un valor de 0 de concentración LiBr y una temperatura de  $120^\circ\text{F}$ , (Anexo 4).
- \*Concentración  $x_6 = 0.645$
- \*Concentración  $x_1 = 0.59$
- \*Los datos de concentraciones de solución son tomados del diagrama sobre un comportamiento típico de un sistema VAR con LiBr-  $\text{H}_2\text{O}$  (Anexo 3).
- Concentración  $x_{10} = 0$ , ya que se supone un ciclo ideal donde solo fluya vapor.
- Flujo másico  $\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$
- Flujo másico  $\dot{m}_4 = \dot{m}_6$

Para tener más clara la visualización del comportamiento en cada punto del sistema, se muestra en la figura 4.2 un sistema simple de refrigeración por absorción.



**Figura 4. 2.** Sistema simple de refrigeración por absorción.

La figura 4.2 muestra un esquema teórico de los componentes de un ciclo de absorción simple en el cual se asume que el absorbente (LiBr) no se evapora en el generador, por lo tanto solo el refrigerante ( $H_2O$ ) fluye por el condensador, válvula de expansión y evaporador. El vapor que sale del evaporador es absorbido por la solución débil en el absorbedor. La solución que se forma en el absorbedor es llevada por el trabajo de la bomba de nuevo al generador en donde se precalienta por el efecto del intercambiador de calor por el cual se transporta la solución débil proveniente del generador, así mismo la solución débil disminuye su temperatura para realizar un mejor efecto de absorción de vapor al ingresar al absorbedor.

Al analizar cada punto del esquema, se tiene:

Proceso 1-2: solución fuerte proveniente del absorbedor es bombeada con dirección hacia el generador. En este proceso se encuentra la bomba de circulación de la solución del sistema.

Proceso 2-3: La solución fuerte que pasa a través del intercambiador de calor aumenta su temperatura a modo de agilizar el proceso de transferencia de calor en el generador.

Proceso 3-4 y 3-7 (Entrada y salidas del generador): En el generador entra la solución fuerte cercana a un 60% de LiBr y el resto de  $H_2O$ . Teóricamente se asume que el absorbente (LiBr) no se evapora y es enviado hacia el intercambiador de calor (3-4), por lo tanto solo el refrigerante (Vapor de  $H_2O$ ) fluye hacia el condensador (3-7), dejando una solución débil de alrededor de 65% de LiBr y 35% de  $H_2O$ .

Proceso 5-6: La solución débil proveniente del intercambiador de calor, es forzada a pasar por una válvula de expansión la cual provoca que baje su presión y temperatura.

Proceso 7-8: El vapor de agua proveniente del generador es enviado al condensador para regresar a su estado líquido

Procedimiento para determinar las características necesarias del sistema VAR para igualar la capacidad instalada:

Primeramente se determina el flujo másico en el evaporador con la ecuación 4.7:

$$\dot{m}_9 = \frac{\dot{q}_e}{(i_{10} - i_9)} \quad (4.7)$$

$$\dot{m}_9 = \frac{2.35(200)}{1078.5 - 88} = 0.4745 \text{ lb/min}$$

El factor de conversión 200 que se muestra en la sustitución de la ecuación 4.7 se multiplica por las toneladas de refrigeración para convertir las toneladas en  $Btu/min$ .

Como segundo paso se determina el flujo másico en el absorbedor:

Para determinar el flujo másico en el absorbedor se deben sumar los flujos másicos entrantes  $\dot{m}_6 + \dot{m}_{10}$ . Habrá entonces que determinar el flujo masico  $\dot{m}_6$  ya que el valor de  $\dot{m}_{10} = \dot{m}_9$  porque la masa que entra al evaporador es la misma que sale.

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_{10} \frac{(x_1 - x_{10})}{(x_6 - x_1)} \quad (4.8)$$

$$\dot{m}_6 = \frac{0.4745(0.59)}{0.055} = 5.09 \text{ lb/min}$$

entonces:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} \quad (4.9)$$

$$\dot{m}_1 = 5.564 \text{ lb/min}$$



Después se determina el flujo de energía térmica del generador:

$$\dot{q}_g = \dot{m}_4 i_4 + \dot{m}_7 i_7 - \dot{m}_3 i_3 \quad (4. 10)$$

La entalpía del vapor de agua puro en el estado 7 ( $i_7$ ) puede ser calculado por la ecuación 4.11 porque se comporta como un gas ideal a baja presión.

$$i_v = i_g + c_{pv}t \quad (4. 11)$$

Según el comportamiento de gas ideal, para una entalpía de vapor saturado es igual a 1061.2 *Btu/lb* y el calor específico del vapor es 0.444 *Btu/(lbm \* F)*. Entonces, se sustituye el valor de la temperatura en el estado 7 en la ecuación 4.11:

$$i_v = i_7 = 1061.2 \text{ Btu/lb} + (0.444 \text{ Btu/(lb * } ^\circ\text{F)}) * 215 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$i_7 = 1156.66 \text{ Btu/lb}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.10, se tiene:

$$\dot{q}_g = 5.09(-22) + 0.4745(1156.66) - 5.564(-37)$$

$$\dot{q}_g = 642.723 \text{ Btu/min}$$

El flujo de energía térmica del generador junto con el del evaporador, ayudan a determinar el coeficiente de rendimiento del sistema (COP).

Despreciando el trabajo de la bomba, por ser solo una bomba de recirculación, se tiene:

$$COP = \frac{\dot{q}_e}{\dot{q}_g} \quad (4.12)$$

$$COP = \frac{200(2.35)}{642.723} = 0.7312$$

Como se puede deducir de su propia fórmula, el COP (coeficiente de rendimiento) es la relación entre el efecto refrigerante y el consumo de energía utilizado para obtenerlo. Cuanto más alto es el COP, mejor será el rendimiento del sistema.

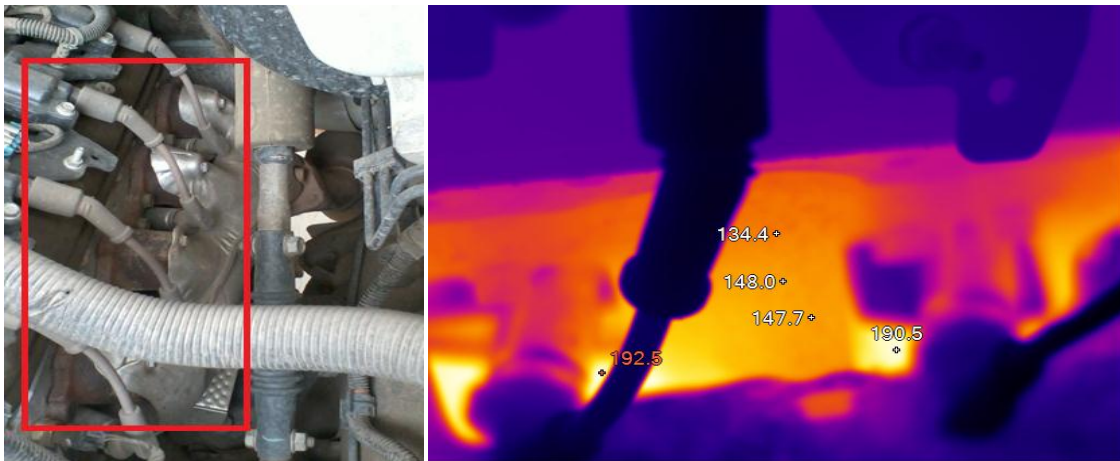
### 4.3. Análisis de la fuente térmica de generación

Como se mostró en el Capítulo 2, el sistema VAR requiere una fuente de calor constante como fuente de energía principal para su funcionamiento. En éste caso particular, se pretende utilizar la energía térmica de la temperatura de los gases de escape de un automóvil con MCI a gasolina.

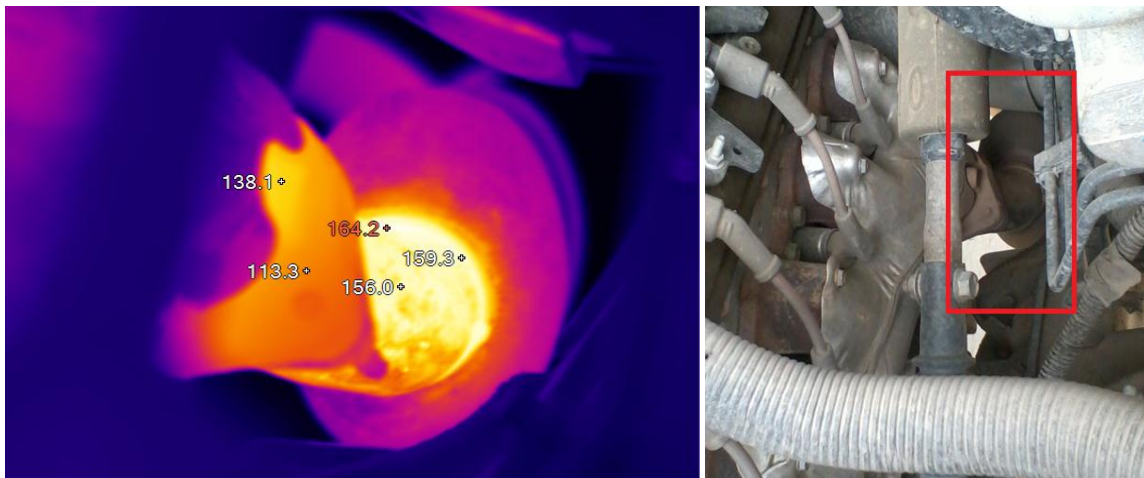
Se tomaron lecturas de la temperatura de los gases de escape de un MCI, 5.3L, 8 cilindros, instalado en una camioneta Chevrolet Silverado 2500 de año de edición 2008. La toma de temperatura se realizó con una cámara de termografía Fluke Ti32 mostrada en la figura 4.3.



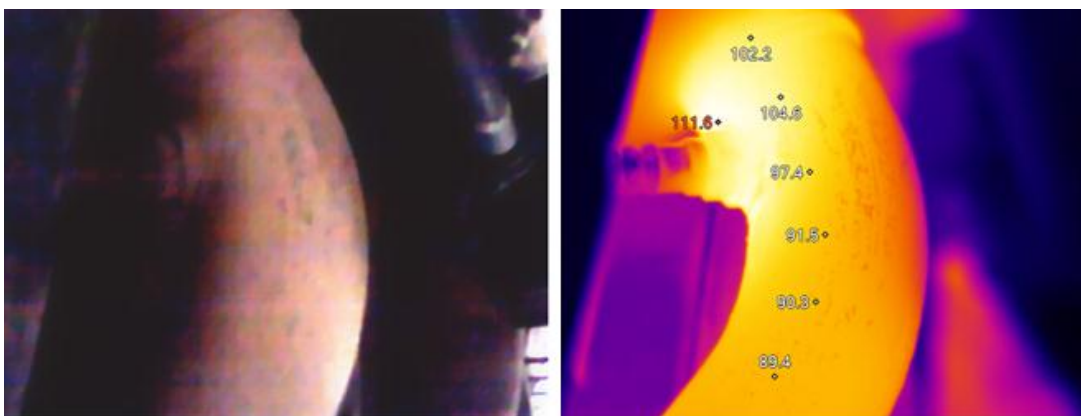
**Figura 4. 3.** Cámara de Termografía Fluke Ti32.



**Figura 4. 4.** Comportamiento de la temperatura del manifold de escape (el recuadro de la figura de la izquierda muestra el área de colocación del manifold de escape).



**Figura 4. 5.** Comportamiento de la temperatura antes del pre-silenciador (el recuadro de la figura de la izquierda muestra el área de pre-silenciador).



**Figura 4. 6.** Temperatura después del pre-silenciador.

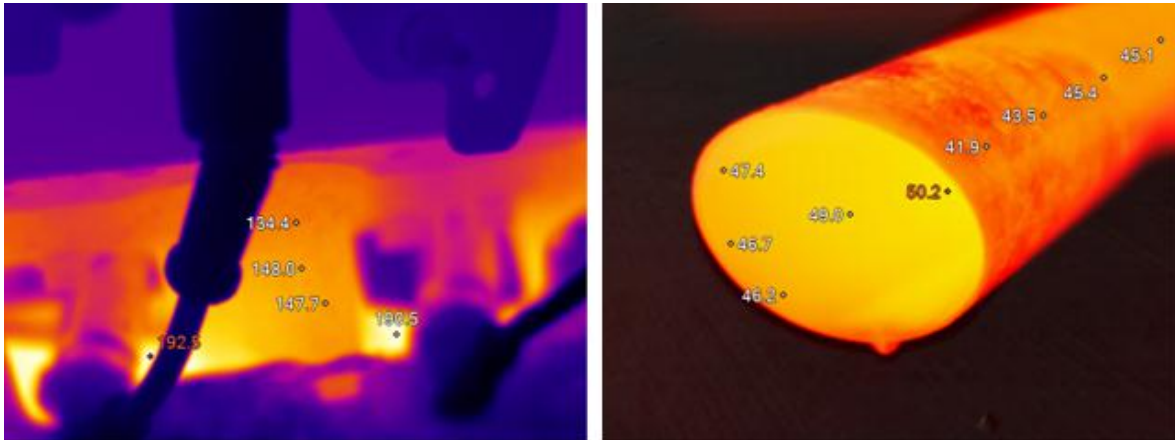
En la figura 4.6 se aprecia un rango aceptable de temperatura el cual oscila entre los 89.4°C y 111.6°C en el cual se puede encontrar la temperatura de generación aceptable para que el sistema VAR de LiBr-H<sub>2</sub>O desarrolle su función. Por lo tanto la fuente térmica de generación se tomaría en algún lugar entre esos puntos.

Se tomó una serie de imágenes térmicas del sistema completo de escape hasta la salida de los gases exhaustos a la atmósfera, las cuales muestran un comportamiento interesante. Uno de los importantes análisis relacionados con los beneficios de la instalación de un sistema VAR en un automóvil, se muestran en el siguiente subtema.

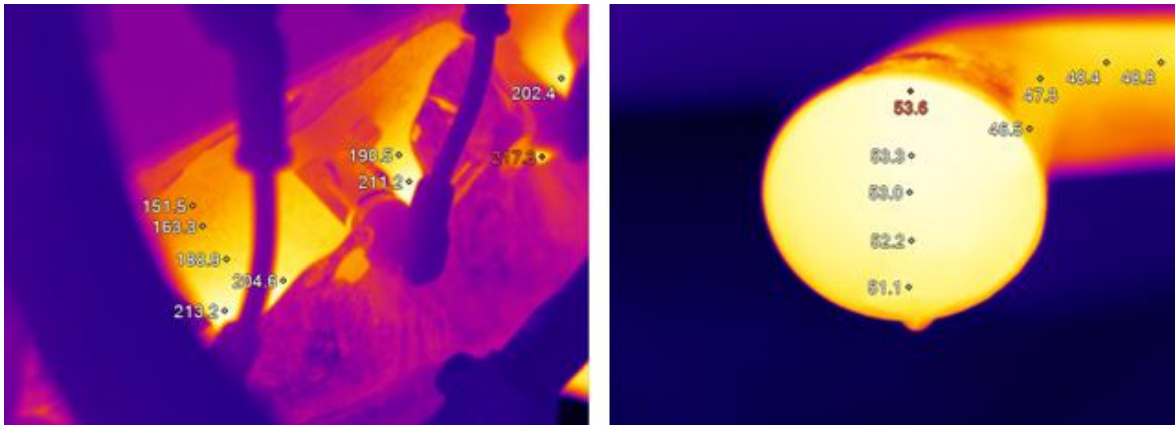
#### **4.3.1. Beneficios relacionados con la temperatura de los gases exhaustos**

Se decidió que es de gran importancia incluir una prueba de los beneficios que se relacionan con la instalación de un equipo VAR en un automóvil en lugar de un sistema VCR. Las pruebas y resultados arrojados en este subtema, coinciden con los beneficios vistos en el Capítulo 2.

Se realizaron dos series de toma de temperatura de los gases exhaustos con la técnica de termografía. Una de las series se realizó con el motor en marcha sin carga, en estado estático (mínimas revoluciones del MCI). La otra serie de toma de temperaturas se realizó en la misma condición, solo activando el sistema de refrigeración del automóvil, esto hace que el MCI aplique parte de su potencia en la puesta en marcha del compresor del sistema de refrigeración VCR utilizado en éste vehículo. A continuación se muestran los resultados en las figuras 4.7 y 4.8.



**Figura 4. 7.** Temperatura de los gases exhaustos sin carga del compresor del VCR.



**Figura 4. 8.** Temperatura de los gases exhaustos con carga del compresor del sistema VCR.

Se aprecia en las imágenes, el incremento de temperaturas de los gases de escape al activar y mantener funcionando el compresor del sistema VCR convencional del vehículo. Tanto en el *manifold* de escape como en la salida de los gases del escape a la atmósfera.

Sin duda, el aumento de temperatura del *manifold* de escape indica un aumento en el caudal de gases de escape que se encuentran fluyendo por esa parte. Esto da también por conclusión que dentro del motor se están produciendo más explosiones. El aumento de explosiones en el motor es debido al requerimiento de potencia del mismo MCI para realizar su trabajo. Para que exista un aumento de explosiones se debe aumentar la mezcla de Aire-Combustible (la chispa se mantiene en constante).

Esto lleva a suponer que es válido pensar que se aumenta el consumo de combustible a razón del requerimiento de potencia por parte del compresor del sistema VCR.

Con la utilización del sistema VAR como sustituto del sistema VCR, se asume que se recibirán dos beneficios:

- Se disminuirá la temperatura de los gases exhaustos enviados a la atmósfera, ya que no solo no se requerirá potencia directa del MCI para realizar su función, sino que se tomará parte de la energía calorífica de los gases de escape para utilizarse como fuente de generación.
- Gracias a que el sistema VAR no requiere potencia directa del MCI para realizar el trabajo, se evitará el aumento en el gasto de combustible al accionar el sistema de refrigeración del automóvil.

#### **4.3.2. Análisis de la propuesta de regulador de gases exhaustos**

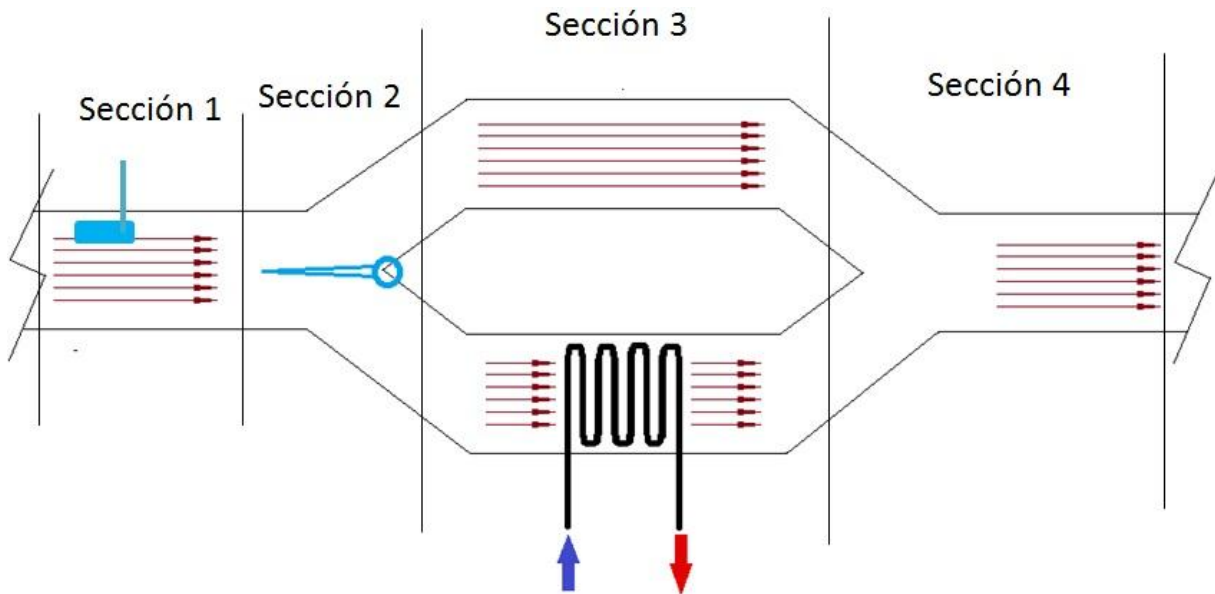
Un regulador de gases exhaustos procedentes del MCI es necesario gracias a la variación de flujo de gases que se presenta comúnmente en un sistema de ésta naturaleza. El regulador tendrá el objetivo de controlar el flujo de gases que circulen por un punto en específico determinado como fuente térmica de generación y conservar una temperatura constante en todo momento, tomando como referencia las RPM mínimas del MCI.

El sistema de control de flujo de gases se controlará con una válvula de 2 vías o también llamado “By Pass”, programando la válvula de dos vías para que ésta pueda adoptar la posición necesaria, en este caso la válvula cambiaría de nombre a “válvula multiposición” en donde la válvula responderá al movimiento dependiendo del flujo de gases que despidiera el motor de combustión interna.

Para llevar a cabo el monitoreo de gases exhaustos se instalará un sensor de flujo, poco antes de la válvula multiposición. El sensor mandará la señal a un “centro de

control” el cual a su vez controlará el movimiento de la válvula por medio de un “motor de pasos”, éste motor permitirá a la válvula tomar cualquier ángulo de posición.

En la figura 4.9 se muestra una propuesta del sistema de control del flujo de gases exhaustos, seguido de una breve explicación del funcionamiento, explicado por secciones.



**Figura 4. 9.** Diseño teórico del sistema de control de flujo de los gases de exhaustos.

La sección 1 indica la ubicación del sensor de caudal de gases exhaustos. Este sensor estará conectado a un controlador programado (computador), que mandará la señal de la cantidad de gases que fluyen en ese momento. Esto controlará la posición de la válvula de la sección 2.

La sección 2 está compuesta por la válvula multiposición, la cual obedece a la indicación del sensor de caudal de gases exhaustos por medio del controlador. Esta válvula se posicionará en cualquier ángulo dependiendo de la cantidad de gases de escape que circulen por la tubería. Para efectos de simplificación se considera que la

cantidad de gases de escape es directamente proporcional a la temperatura en cualquier punto de la tubería.

La sección 3 está compuesta por 2 vías. Una es la parte en la que se encuentra el serpentín de generación. Esta parte tiene que mantener una temperatura de gases exhaustos de entre 98.88°C (temperatura mínima de evaporación), y 101°C (temperatura máxima para evitar la cristalización del LiBr) para mantener la máxima eficiencia en el sistema. Dicha temperatura se regula con el flujo de gases exhaustos, mismos que se controlarán con la posición de la válvula presentada en la sección 2. La otra parte de la tubería es hacia donde se dirigirán el resto de los gases exhaustos.

La sección 4 muestra la continuación del camino de los gases exhaustos hacia la salida. Cabe destacar que se presume que al absorber calor de los gases de escape para utilizarlos en la fuente térmica de generación, los gases saldrán hacia la atmósfera con menor temperatura.



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

Con la investigación bibliográfica realizada se ha justificado la utilización de un sistema VAR en un automóvil utilizando la temperatura de gases de escape como fuente principal de energía para llevar a cabo el proceso, dando a conocer los problemas medioambientales relacionados con el uso excesivo de combustibles fósiles para llevar a cabo procesos como los de refrigeración, mostrando lo que algunos autores opinan al respecto, explicando el proceso de un sistema VAR y la diferencia con el sistema VCR y los beneficios que conlleva utilizar un sistema VAR sobre un sistema VCR.

Se logró determinar la capacidad instalada de un automóvil para utilizarse como punto de referencia para el análisis termodinámico de un sistema VAR que sustituya al sistema VCR instalado. Las características necesarias para un sistema VAR que cumpla con los mismos requerimientos que el sistema actualmente instalado también son mostrados en el análisis junto a una explicación de la procedencia de los datos.

La energía total utilizada para que el sistema VAR cumpla su objetivo, es mayor a la utilizada con el sistema VCR, por lo tanto el COP del sistema VAR es mucho menor que el del sistema VCR (Trott, 2000). El beneficio del sistema VAR está en que la energía contenida en los gases de escape es suficiente para cumplir con su función y no restar potencia al MCI.

Respecto al análisis térmico de los gases de escape, se concluye que los gases de escape son una posible fuente térmica de generación para un sistema VAR ya que en el análisis termográfico se obtuvieron temperaturas muy por encima de las necesarias para desarrollar la función de generador.

En segunda instancia, se pueden concluir algunos beneficios incluidos en los análisis de temperatura de los gases, con y sin el sistema de refrigeración funcionando. El resultado muestra un aumento en la temperatura de los gases cuando el sistema de refrigeración se encuentra en funcionamiento, esto quiere decir que se están produciendo más gases exhaustos gracias al aumento de combustiones en el MCI. Con un sistema VAR esto no sucedería ya que no se cuenta con compresor, incluso, los gases de escape tendrían menos temperatura a la salida gracias a que parte de esa temperatura se utilizaría como fuente térmica de generación para el sistema de refrigeración.

En cuanto al regulador de gases exhaustos, este instrumento es necesario para un buen funcionamiento en sistemas de gases con flujo variable. Se logró una propuesta de diseño que cubre los puntos principales a modo que el problema de flujo variable de gases exhaustos desaparezca, y se tenga una temperatura constante en el punto elegido para instalar la fuente térmica de generación.

## CAPÍTULO 6. FUTURAS INVESTIGACIONES

El proyecto global requiere de arduo trabajo para completar su objetivo final, el cual es suplir un sistema VCR. En párrafos anteriores de este documento se establecieron los alcances y las delimitaciones del proyecto, sin embargo aún queda mucho que desarrollar para encontrar resultados concluyentes sobre la eficiencia del sistema VAR y compararlo con el sistema VCR.

La investigación y el desarrollo que se acaban de realizar, deja preparado al proyecto para las siguientes fases:

- **Diseño:** En la fase de diseño se establecerán dimensiones de los equipos y materiales de construcción más eficientes para llevar a cabo su trabajo. El condensador y evaporador se construirán con los materiales que presenten mayor economía, mejor viabilidad en el mercado y mejor transferencia de calor posible. El generador se construirá con un material resistente a la temperatura de trabajo y lo más ligero posible para evitar adicionar una cantidad importante de peso al automóvil. El Absorbedor, al ser un equipo que maneja presión negativa, tendrá que ser construido con un material ligero pero resistente a la presión, para no adicionar peso al automóvil, al igual que el generador.
- **Instalación:** Se debe determinar el lugar de instalación de cada uno de los equipos, tomando en cuenta que el fabricante del automóvil, diseñó esos lugares para el equipo VCR y no para el equipo VAR. Por lo cual se cree que se deberían realizar adecuaciones o determinar lugares alternativos para la viabilidad de su instalación.
- **Experimentación:** una vez construido e instalado el sistema VAR propuesto, se debe someter a experimentación en un ambiente real de trabajo, esto con el fin de conseguir una retroalimentación y trabajar con la eficiencia del sistema completo, en caso de ser necesario.

## REFERENCIAS

Boukholda, S. El May, A. Bellagi, (2009). Effects of Incorporated Heat Exchangers on the Thermo Economic Analysis of a Water/LiBr Absorption Refrigeration System Part I: Formulations. *International Review of Mechanical Engineering*. Vol. 3 Num. 3. Praise Worthy Prize.

Cisneros C., (2002). Modelación de la transferencia de calor y masa en el absorbedor de una máquina de refrigeración por absorción. *Ingeniería Mecánica*. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. CUJAE. Facultad de Ingeniería Mecánica. Vol. 3. PP. 51-54.

Frers C., (2006). “El dióxido de carbón y su impacto en el cambio climático”. *Waste Magazine*. [Online]. Available at: <http://waste.ideal.es/dioxidodecarbono.htm>. Visitado el 19 Octubre 2011.

Faires V., Simmang C. (2003). *TERMODINÁMICA*. Editorial Limusa S.A. de C.V. Mexico D.F.

Horuz I., (1999). Vapor Absorption Refrigeration in Road Transport Vehicles. *Journal of Energy Engineering*. Vol. 125, No. 2.

Isaza C., Pilatowsky I., Romero R., Cortés F. (2010). Análisis termodinámico de un sistema de refrigeración solar por absorción usando soluciones de Monometilamina – Agua para la conservación de alimentos. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*. Vol. 8 No. 1.

James L. Threlkeld, (1973). *Ingeniería del Ámbito Térmico*. Ed. Prentice Hall International. Englewood Cliffs, New Jersey.

Jarraud M., (2010). *Declaración de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre el estado del clima mundial en 2010*. OMM – N° 1074. Ginebra, Suiza.

Laine J., (2009). *Ciento cincuenta años de combustión de hidrocarburos fósiles: las alternativas emergentes*. Ingeniería y ciencia. Universidad EAFIT.

Marcos J., (2008). *Tesis Doctoral: Prototipo de máquina frigorífica de absorción de LiBr/H<sub>2</sub>O de doble efecto condensada por aire, simulación, optimización y resultados experimentales*. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos.

Moragues J., Rapallini A., (2003). *Energía Eólica*. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”.

Pita E., (1994). *Acondicionamiento de Aire: Principios y sistemas*. Prentice Hall. New York, New York.

Pita E., (1999). *Principios y Sistemas de Refrigeración*. John Wiley and Sons, Inc. New York, New York.

R. Pachauri, A. Reisinger. (2007). *IPCC Cambio climático 2007, Informe de síntesis*. IPCC, Ginebra, Suiza.

S. Elonka, Q. Minich (1988). *Refrigeracion y aire acondicionado: Preguntas y respuestas*. 3er Edicion, Mc Graw Hill.

Zhong Y., Chen G., (2004). Theoretical and Experimental Study of a New Absorption Refrigeration Cycle. *ASHRAE Transactions: Symposia*.

F. McQuinston, J. Parker, J. Spitler, (2005). *Heating, Ventilating and Air Conditioning: Analysis and Design*. 6<sup>th</sup> Edition. John Wiley and Sons.

Mehrabian M., Shahbeik A., (2005). Thermodynamic modeling of a single-effect LiBr-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration cycle. *Process Mechanical Engineering*. IMechE, Vol.219 Parte E. Kerman, Iran.

ASHRAE Standard 55. (2003). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. Atlanta, USA.

Trott A., Wlech T., (2000). *Refrigeration and Air-Conditioning*. Butterworth-Heinemann, 3<sup>rd</sup> Edition, Oxford, UK.

Micallef, D., Micallef, C. (2010). Mathematical Model of Vapor Absorption Refrigeration Unit. *Int J Simul Model* 9. Vol. 2, pp 86-97.

Shah R., (2009).Automotive Air-Conditioning Systems: Historical Developments, the State of Technology, and Future Trends. *Heat Transfer Engineering*. Taylor and Francis Group, LLC. Vol. 30, No. 9, pp. 720-735. Bombay, India.

ANSI/ARI Standard 560. (2000). *Absorption Water Chilling And Water Heating Packages*. Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute. Arlington, Virginia, USA.

ASHRAE, (2001). *Fundamentals Handbook*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.

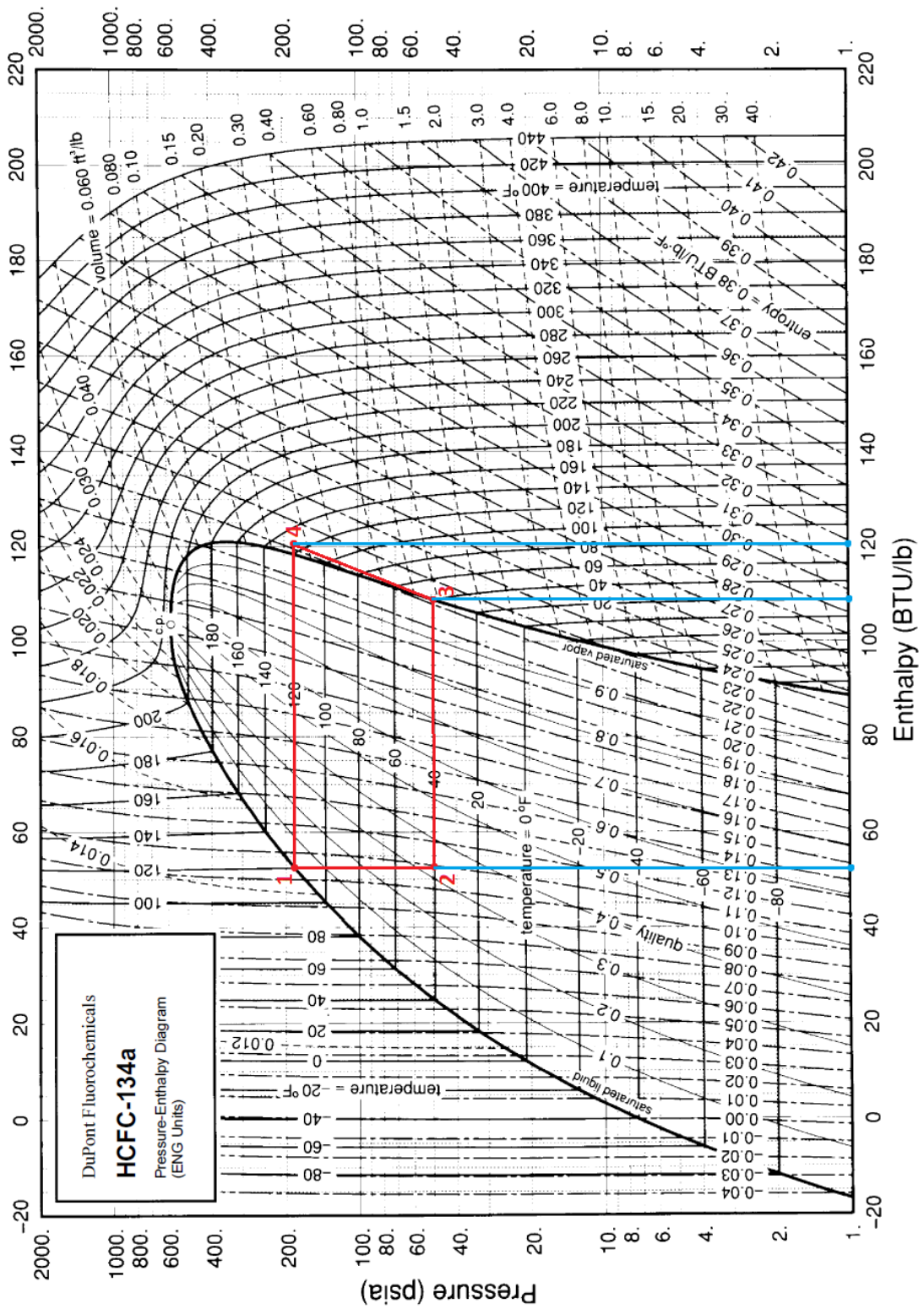
Novasina, (2006). Ficha de datos de seguridad: SAL-T6 (Bromuro de Litio). *Novasina: the art of precision measurement*. Conforme a la Directiva (CE) No. 1907/2006.

# ANEXOS

## Anexo 1. Tabla de rendimiento del A/C instalado tipo VCR.

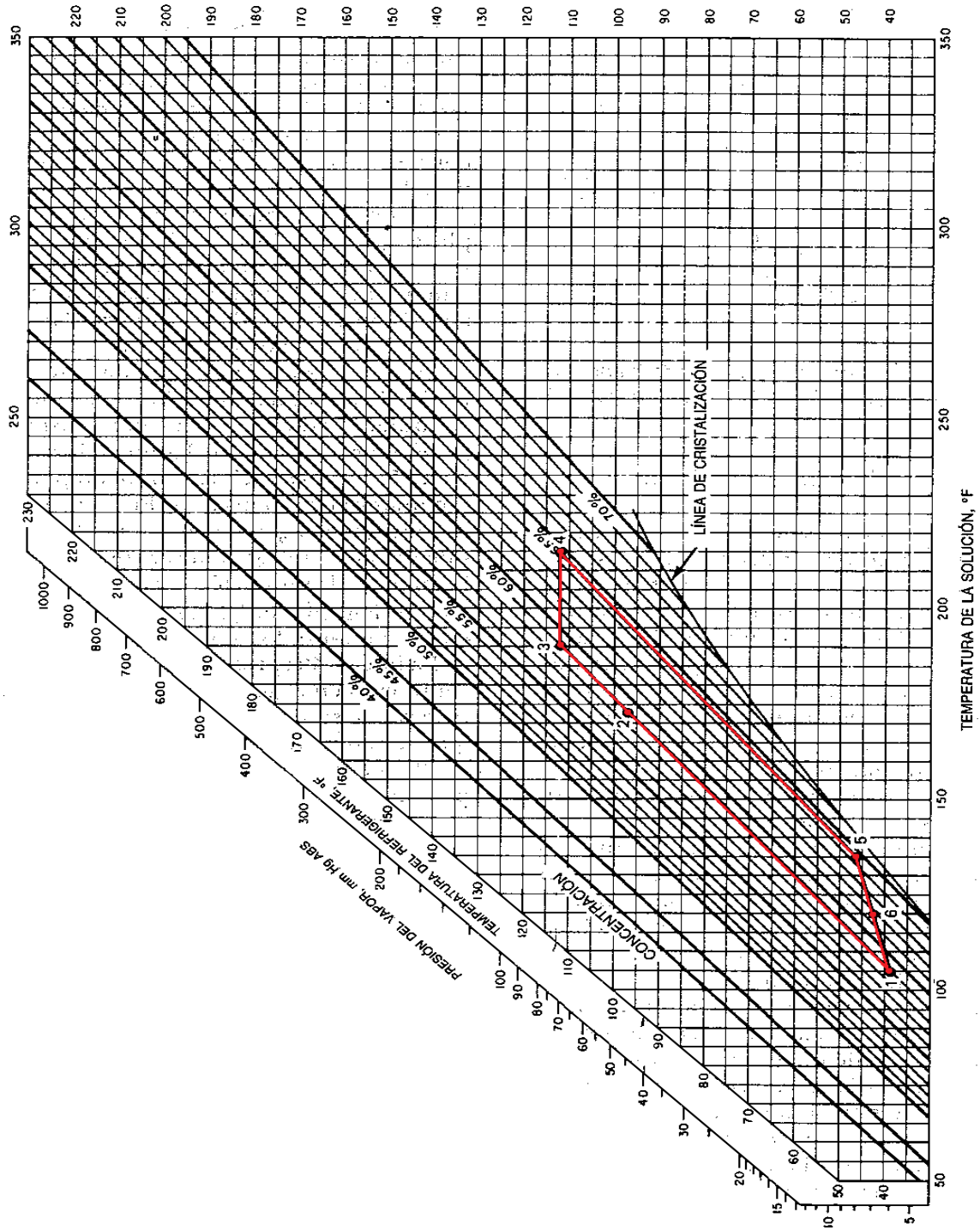
Tabla de rendimiento de A/C - Motor a gasolina con ventilador de enfriamiento eléctrico o RPO HP2				
Temperatura de aire del ambiente	Humedad relativa	Presión del puerto de servicio		Temperatura de aire de descarga máxima
		LATERAL BAJO	LATERAL ALTO	
13-18°C (55-65°F)	0-100%	165-257kPa (24-37 psi)	830-1180kPa (120-171 psi)	10°C (50°F)
19-24°C (66-75°F)	Por debajo de 40%	185-290kPa (27-42 psi)	1010-1340kPa (147-194 psi)	11°C (52°F)
	Sobre 40%	202-313kPa (29-45 psi)	990-1370kPa (144-199 psi)	13°C (55°F)
25-29°C (76-85°F)	Por debajo de 35%	225-319kPa (33-46 psi)	1180-1470kPa (171-213 psi)	14°C (57°F)
	35-50%	230-330kPa (35-48 psi)	1180-1470kPa (171-216 psi)	14°C (57°F)
	Sobre 50%	248-352kPa (36-51 psi)	1190-1520kPa (173-221 psi)	16°C (61°F)
30-35°C (86-95°F)	Por debajo de 30%	257-359kPa (37-52 psi)	1320-1520kPa (192-234 psi)	17°C (63°F)
	30-50%	267-375kPa (39-54 psi)	1340-1650kPa (194-239 psi)	18°C (64°F)
	Sobre 50%	281-399kPa (41-58 psi)	1360-1710kPa (197-248 psi)	20°C (68°F)
36-41°C (96-105°F)	Por debajo de 20%	290-393 kPa (42-57 psi)	1480-1760kPa (215-255 psi)	19°C (66°F)
	20-40%	298-411kPa (43-60 psi)	1500-1820kPa (218-264 psi)	21°C (70°F)
	Sobre 40%	313-429kPa (45-62 psi)	1540-1880kPa (224-273 psi)	22°C (72°F)
42-46°C (106-115°F)	Por debajo de 20%	327-428kPa (47-62 psi)	1650-1910kPa (239-277 psi)	21°C (70°F)
	Sobre 20%	336-448kPa (49-65 psi)	1680-1980kPa (244-287 psi)	23°C (73°F)
47-49°C (116-120°F)	Por debajo de 30%	367-474kPa (53-69 psi)	1830-2100kPa (266-305 psi)	25°C (77°F)

## Anexo 2. Diagrama Presión-Entalpía HCFC-134a

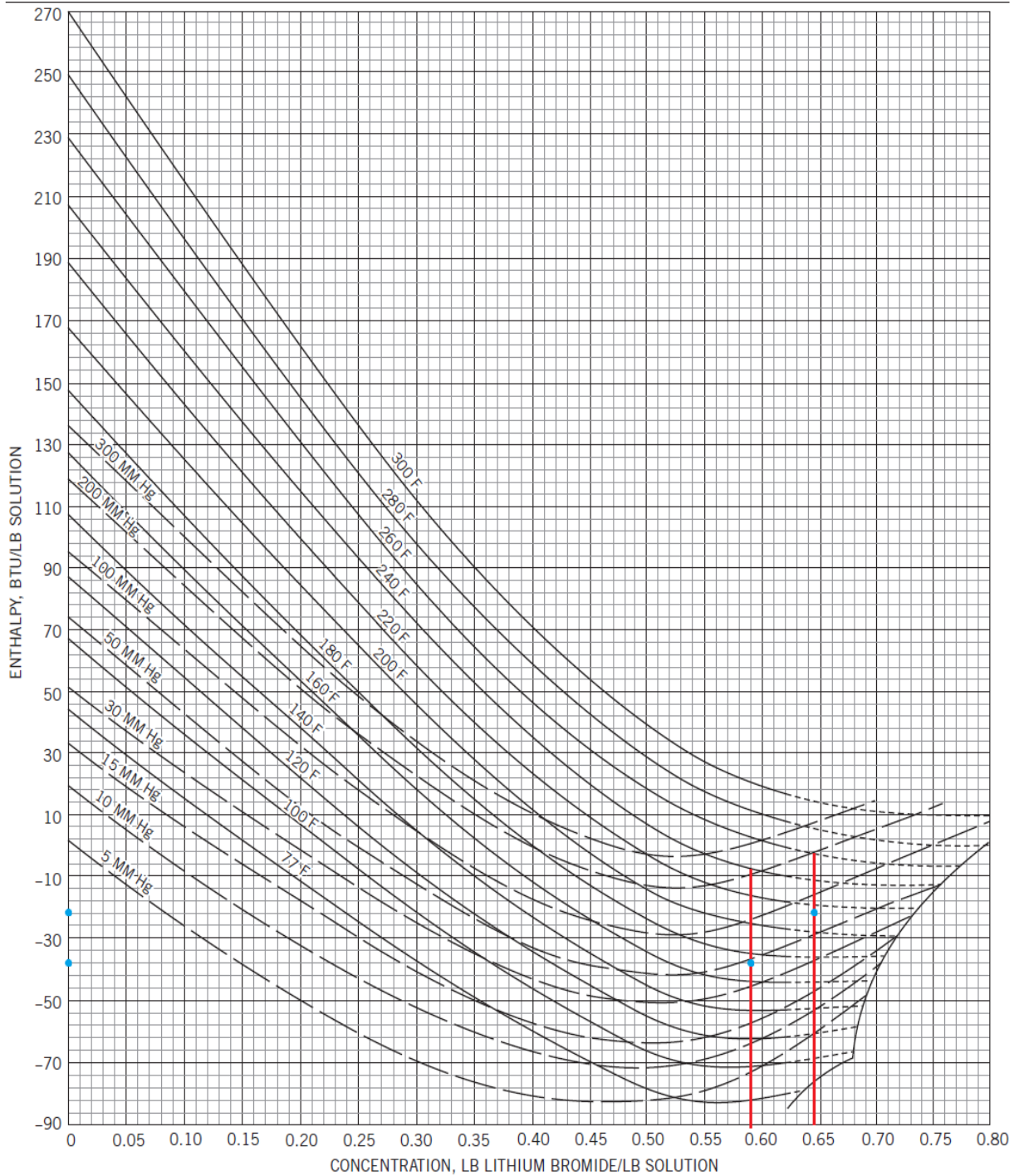




### Anexo 3. Diagrama de comportamiento típico de un sistema VAR con solución LiBr-H<sub>2</sub>O



## Anexo 4. Diagrama concentración-entalpia para soluciones de LiBr- H2O



## Anexo 5. Tabla de propiedades del refrigerante 718 (vapor de agua)

**Table A-1a** Properties of Refrigerant 718 (Water–Steam)—English Units

Temp., <sup>a</sup> F	Pressure, psia	Density, lb/ft <sup>3</sup>		Volume, ft <sup>3</sup> /lb		Enthalpy, Btu/lb		Entropy, Btu/(lb·F)		Specific Heat <i>c<sub>p</sub></i> , Btu/(lb·F)		Viscosity, lbm/(ft·hr)		Thermal Cond., Btu/(hr·ft·F)		Temp., <sup>a</sup> F
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
32.02	0.089	62.41	3299.6	0.0	1075.0	0.0000	2.1864	1.0100	0.4461	4.336	0.0223	0.3241	0.00986	32.02		
<b>40.00</b>	<b>0.122</b>	<b>62.42</b>	<b>2443.5</b>	<b>8.0</b>	<b>1078.5</b>	<b>0.0162</b>	<b>2.1586</b>	<b>1.0037</b>	<b>0.4467</b>	<b>3.740</b>	<b>0.0226</b>	<b>0.3290</b>	<b>0.01000</b>	<b>40.00</b>		
50.00	0.178	62.41	1703.1	18.1	1082.9	0.0361	2.1254	1.0003	0.4476	3.161	0.0229	0.3351	0.01018	50.00		
60.00	0.256	62.37	1200.3	28.0	1087.3	0.0555	2.0938	0.9993	0.4480	2.713	0.0232	0.3411	0.01037	60.00		
70.00	0.363	62.30	867.45	38.0	1091.7	0.0745	2.0637	0.9992	0.4497	2.360	0.0236	0.3469	0.01057	70.00		
80.00	0.507	62.21	632.67	48.0	1096.0	0.0932	2.0351	0.9992	0.4511	2.075	0.0240	0.3524	0.01078	80.00		
90.00	0.699	62.11	467.66	58.0	1100.3	0.1116	2.0078	0.9991	0.4525	1.842	0.0244	0.3576	0.01100	90.00		
100.00	0.950	61.99	350.05	68.0	1104.6	0.1296	1.9818	0.9990	0.4542	1.648	0.0248	0.3625	0.01123	100.00		
110.00	1.276	61.86	265.16	78.0	1108.9	0.1473	1.9569	0.9989	0.4560	1.486	0.0252	0.3670	0.01147	110.00		
120.00	1.694	61.71	203.11	88.0	1113.2	0.1646	1.9332	0.9988	0.4580	1.348	0.0256	0.3710	0.01171	120.00		
130.00	2.224	61.55	157.23	98.0	1117.4	0.1817	1.9105	0.9988	0.4602	1.230	0.0260	0.3747	0.01197	130.00		
140.00	2.891	61.38	122.93	108.0	1121.6	0.1985	1.8888	0.9990	0.4627	1.129	0.0264	0.3781	0.01224	140.00		
150.00	3.720	61.19	97.021	118.0	1125.7	0.2150	1.8680	0.9995	0.4654	1.040	0.0269	0.3810	0.01252	150.00		
160.00	4.743	61.00	77.262	128.0	1129.8	0.2313	1.8481	1.0002	0.4683	0.963	0.0273	0.3836	0.01281	160.00		
170.00	5.994	60.80	62.046	138.0	1133.9	0.2473	1.8290	1.0011	0.4715	0.894	0.0278	0.3859	0.01311	170.00		
180.00	7.513	60.58	50.224	148.0	1137.9	0.2631	1.8107	1.0023	0.4750	0.834	0.0282	0.3879	0.01342	180.00		
190.00	9.341	60.36	40.962	158.0	1141.9	0.2787	1.7930	1.0036	0.4788	0.781	0.0287	0.3896	0.01374	190.00		
200.00	11.526	60.12	33.546	168.1	1145.8	0.2940	1.7761	1.0052	0.4829	0.733	0.0291	0.3910	0.01408	200.00		
210.00	14.122	59.88	27.826	178.2	1149.6	0.3091	1.7598	1.0069	0.4873	0.690	0.0296	0.3922	0.01443	210.00		
212.00	14.696	59.83	26.809	180.2	1150.4	0.3121	1.7566	1.0072	0.4882	0.682	0.0297	0.3924	0.01450	212.00		
220.00	17.184	59.63	23.159	188.2	1153.4	0.3241	1.7441	1.0087	0.4921	0.651	0.0300	0.3931	0.01478	220.00		
230.00	20.774	59.37	19.393	198.3	1157.0	0.3388	1.7289	0.0108	0.4973	0.616	0.0305	0.3939	0.01516	230.00		
240.00	24.960	59.10	16.332	208.5	1160.6	0.3534	1.7143	0.0129	0.5029	0.585	0.0310	0.3944	0.10555	240.00		
250.00	29.814	58.82	13.830	218.6	1164.1	0.3678	1.7001	0.0153	0.5089	0.556	0.0314	0.3948	0.01595	250.00		
260.00	35.411	58.54	11.772	228.8	1167.6	0.3820	1.6861	0.0177	0.5155	0.530	0.0319	0.3950	0.01636	260.00		
270.00	41.835	58.24	10.069	239.0	1170.9	0.3960	1.6732	0.0203	0.5225	0.506	0.0324	0.3950	0.01679	270.00		
280.00	49.173	57.94	8.6520	249.2	1174.1	0.4099	1.6603	0.0231	0.5301	0.484	0.0328	0.3949	0.01723	280.00		
290.00	57.516	57.63	7.4677	259.5	1177.2	0.4237	1.6478	0.0261	0.5383	0.464	0.0333	0.3946	0.01769	290.00		

<sup>a</sup> Temperatures are on the IPTS-68 scale.

Source: Reprinted by permission from ASHRAE Handbook, Fundamentals Volume, 1997.

## Anexo 6. Datos de seguridad de la SAL-T6 (LiBr).



### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Conforme a la Directiva (CE) No. 1907/2006

#### SAL-T 6

#### 1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad/empresa

Uso de la sustancia/del preparado	Fuente de humedad para el control del captador
Código del producto	SAL-T 6 : 1116453
Identificación de la sociedad/empresa	Novasina AG Neuheimstrasse 12 CH-8852 Lachen  +41 55 642 67 67 / <a href="http://www.novasina.com">www.novasina.com</a>
Teléfono de urgencias	145 / +41 44 251 51 51 (Swiss Toxicological Information Center - 24h)
Fecha de revisión	11.04.2008
Versión	1

#### 2. Identificación de peligros



Xn - Nocivo.

Nocivo en caso de ingestión.

#### 3. Composición/Información sobre los componentes

Características químicas Solución acuosa de sales de metales.

Componentes		Símbolo(s)	Frase (s) de riesgo	CAS	EINECS
Bromuro de Litio	> 25%	Xn	R-22	7550-35-8	231-439-8

#### 4. Primeros auxilios

Inhalación	No presenta ningún riesgo a la inhalación
Contacto con la piel	Lavar con agua y jabón
Contacto con los ojos	Aclarar con abundante agua incluso debajo de los párpados. Si persiste la irritación ocular, consulte un médico especialista.
Ingestión	Enjuagar la boca con agua y beber abundante agua . No provocar vómitos sin haber consultado el médico.

#### 5. Medidas de lucha contra incendios

Medios de extinción adecuados	No existen precauciones especiales.
Riesgos específicos	Este producto no es inflamable

#### 6. Medidas en caso de liberación accidental

Precauciones personales	No existen precauciones especiales.
Precauciones para la protección del medio ambiente	No requiere precauciones especiales para el medio ambiente.
Métodos de limpieza	Diluir con una gran cantidad de agua

#### 7. Manipulación y almacenamiento

Manipulación	Évitar el contacto con la piel y los ojos :
Almacenamiento	Almacenar a temperatura ambiente en el recipiente original.

#### 8. Controles de exposición /Protección personal

Control de exposición profesional	Manipular conforme a las normas de higiene industrial y a las consignas de seguridad.
Protección personal	
Protección respiratoria	No se necesita equipamiento protector especial.
Protección de las manos	Guantes de protección conformes a la EN 374. Guantes de latex. Tiempo de rotura: 1 h.
Protección de los ojos	Gafas de seguridad con protecciones laterales conforme a la EN 166. Frasco para aclarar los ojos con agua pura.
Protección de la piel y del cuerpo	Bata

SAL-T 6

300'001'077.00

2 / 4

Version 1 -

Esta traducción ha sido realizada directamente del MSDS oficial (ficha de datos de seguridad) en lengua inglesa y no ha sido adaptado al vocabulario local MSDS.

### 9. *Propiedades físicas y químicas*

Estado físico	Solución acuosa.
Color	Incolora.
Olor	Inodoro.
Propiedades físicas y químicas	pH: neutro. Punto de destello, no hay punto de destello Solubilidad en agua : soluble. Solubilidad en grasas : insoluble. Densidad: 1.5 g/ml. Punto/intervalo de fusión – no determinado Límites de explosión: no aplicable.

### 10. *Estabilidad y reactividad*

Estabilidad	Higroscópico
Condiciones a evitar	Reacción exotérmica con ácidos fuertes.

### 11. *Informaciones toxicológicas*

Toxicidad aguda	No existe información disponible para este producto.
Efectos locales	Puede irritar la piel ó los ojos de las personas sensibles.
Toxicidad a largo término	No existe información disponible para este producto.
Sensibilización	Desdeñable

### 12. *Informaciones ecológicas*

Efecto ecotóxico	No existe información disponible para este producto.
Resultados de la evaluación PBT	Este preparado no contiene sustancias consideradas como persistentes, ni bioacumulables ni tóxicos (PBT).
Otros efectos nocivos	Baja contaminación del agua, clasificación(WGK-D : 1 – por el propio fabricante).

### 13. Consideraciones relativas a la eliminación

Residuo de producto / producto no utilizado	Eliminar el producto según las regulaciones locales en vigor.
Embalajes contaminados	Limpiar el recipiente con agua.

### 14. Informaciones relativas al transporte

Otras informaciones	Producto no peligroso según las reglamentaciones de transporte
---------------------	--

### 15. Informaciones reglamentarias

Simbolo(s)	Xn - Nocivo
Frase(s) de riesgo	R22: Nocivo en caso de ingestión
Frase(s) de seguridad	S7: Conservar el recipiente bien cerrado S45: En caso de accidente ó de malestar consultar inmediatamente al médico (si es posible, mostrarle la etiqueta).
Informaciones reglamentarias	Clasificado y etiquetado conforme a las Directivas de la CE. Componentes peligrosos que tienen que estar listados en la etiqueta: ref. capítulo 3 VOC (CH) = 0%

### 16. Otras informaciones

Utilización recomendada	Reservado para usuarios profesionales.
Texto de frases R mencionadas en el artículo 3	R22: Nocivo en caso de ingestión. R36/38: Irritante para los ojos y la piel.
Otras informaciones	Leer el modo de empleo.
Cláusula de no-responsabilidad	Las informaciones contenidas en esta ficha de seguridad han sido establecidas sobre la base de nuestros conocimientos en la fecha de publicación de este documento. Estas informaciones solo se facilitan de modo indicativo para permitir operaciones de manipulación, fabricación, almacenamiento, transporte, distribución, utilización y eliminación en condiciones satisfactorias de seguridad.

## Anexo 7. Datos de seguridad del Hidruro de Nitrógeno - NH<sub>3</sub> (Amoniaco).



### Hoja de datos de seguridad del producto

INFRA S.A. DE C.V. FELIX GUZMÁN NO. 16 53398 NAUCALPAN DE JUÁREZ EDO. DE MÉXICO TEL. DE CONMUTADOR : 53-29-30-00 TELS. DIRECTOS VENTAS. GASES ESPECIALES: 53-29-30-39 GASES INDUSTRIALES: 53-29-30-44 GASES MEDICINALES: 53-29-30-42	NOMBRE DEL PRODUCTO Amoniaco	No. CAS: 7664-41-7
	NOMBRE COMERCIAL Y SINÓNIMOS Amoniaco, Amoniaco Anhidro	
FECHA: JULIO 2008 NO. DE REVISIÓN: 4	NOMBRE QUÍMICO Y SINÓNIMOS Amoniaco, Amoniaco Anhidro	
TELÉFONO PARA EMERGENCIAS (24 HRS.) 01800-221-98-44 (01-55) 5310-6799 SERVICIO AL CLIENTE : 01 800 221 98 44 01-800 712 2525	FÓRMULA= NH <sub>3</sub>	FAMILIA QUÍMICA Hidruro de Nitrógeno
ANOTE AQUÍ EL TELÉFONO LOCAL DE LA SUCURSAL INFRA MAS CERCANA PARA CUALQUIER EMERGENCIA		

#### INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD

<b>LÍMITE DE EXPOSICIÓN</b> OSHA: PEL = 50 ppm, ACGIH: = 25 ppm, STEL = 35 ppm
<b>SÍNTOMAS DE EXPOSICIÓN</b> Corrosivo e irritante a la piel, a los ojos, al sistema respiratorio superior y membranas mucosas. Dependiendo de la concentración inhalada, puede causar sensaciones de quemadura, tos, falta de respiración, pérdida de aliento, dolor de cabeza, náuseas con eventual desvanecimiento. A bajas concentraciones el vapor puede causar dermatitis (inflamación de la piel) ó conjuntivitis (inflamación de los ojos). A altas concentraciones el contacto del vapor ó el líquido causa quemaduras e inflamación de la piel, hinchazón de los ojos con posible pérdida de la visión. La rápida evaporación del líquido en contacto con la piel o los ojos causa quemaduras criogénicas o congelamiento. Los síntomas de congelamiento incluyen el cambio en la coloración de la piel al gris o blanco posiblemente seguido de ampollamiento.
<b>PROPIEDADES TOXICOLÓGICAS</b> Inhalación: Afecta el tracto respiratorio (laringe y bronquios) por causar quemaduras caústicas resultado de la formación de fluido anormal y enumonitis química (inflamación profunda de los pulmones). Si llega a entrar profundamente a los pulmones causa edema pulmonar (exceso de formación de fluido en los pulmones). La exposición a niveles tóxicos causa quemaduras caústicas y lesiones profundas resultando en la destrucción y cicatrización de la piel. Las quemaduras en los ojos resultan en lesiones con posible pérdida de la visión. El amoniaco no está catalogado por las Asociaciones IARC, NTP u OSHA Subparte Z como material carcinógeno o potencialmente carcinógeno.
<b>TRATAMIENTO Y PRIMEROS AUXILIOS RECOMENDADOS</b> <b>ATENCIÓN MÉDICA INMEDIATA ES REQUERIDA EN TODOS LOS CASOS DE SOBREEXPOSICIÓN A AMONIACO. EL PERSONAL DE RESCATE DEBE ESTAR EQUIPADO CON EQUIPO DE PROTECCIÓN APROPIADO (EQUIPO DE RESPIRACIÓN AUTÓNOMO, ETC.) PARA PREVENIR EXPOSICIÓN INNecesaria.</b> Inhalación: Traslade a la persona hacia un área descontaminada. Si no respira, aplique respiración artificial y quieta. Coloque a la víctima en una posición adecuada para evitar que la mucosa o el material vomitado sea aspirado. Bríndele atención médica inmediata. Contacto con los ojos: PERSONAS CON EXPOSICIÓN POTENCIAL A AMONIACO NO DEBEN USAR LENTES DE CONTACTO. Enjuague cuidadosamente los ojos con grandes cantidades de agua. Abra completamente los párpados para asegurar el enjuague completo. Continúe por un mínimo de 15 minutos. Contacto con la piel: Enjuague el área afectada con grandes cantidades de agua. Elimine la ropa afectada tan rápida y cuidadosamente como sea posible. Continúe enjuagando con agua. Contacto con la piel o congelamiento: Remueva la ropa contaminada y enjuague las áreas afectadas con agua tibia. NO USE AGUA CALIENTE. Deberá brindarse la atención inmediata de un médico en caso de que la "quemadura" criogénica provoque ampollamiento de la superficie de la piel o congelamiento profundo del tejido.



# NH<sub>3</sub>

## MEZCLAS PELIGROSAS DE OTROS LÍQUIDOS, SÓLIDOS O GASES

El Amoniaco es inflamable sobre un rango estrecho en aire. Reacciona vigorosamente con flúor, cloro, ácido clorhídrico, ácido bromhídrico, cloruro de nitrosilo, cloruro de dicromilo, difluoruro de trioxígeno, dióxido de nitrógeno, tricloruro de nitrógeno y otros ácidos fuertes ó agentes oxidantes.

## PROPIEDADES FÍSICAS

PUNTO DE EBULLICIÓN -28.1°F (-33.4°C)	DENSIDAD DEL LÍQUIDO AL PUNTO DE EBULLICIÓN 42.7 lb/ft3 (684 kg/m3)
PRESIÓN DE VAPOR a 70° F (21.1°C) 129.1 psia (889 kPa)	DENSIDAD DEL GAS a 70°F, 1 ATM. 0.044 lb/ft3 (0.713 kg/m3)
SOLUBILIDAD EN AGUA Muy soluble con liberación de calor	PUNTO DE CONGELAMIENTO -107.91°F (-77.7°C)
APARIENCIA Y OLOR Gas incoloro con olor picante	

## INFORMACIÓN SOBRE RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN

PUNTO DE IGNICIÓN (MÉTODO USADO) Gas	TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN 1,274°F (690°C)	LÍMITES DE INFLAMABILIDAD % POR VOLUMEN Inferior 16 Superior 25
MÉTODOS DE EXTINCIÓN Agua		CLASIFICACIÓN ELÉCTRICA Clase 1 Grupo D
PROCEDIMIENTOS ESPECIALES PARA COMBATIR INCENDIOS Si es posible sin riesgo, detenga el flujo del gas. Ya que el amoniaco es soluble en agua, este es el mejor medio de extinción, no sólo por extinguir el fuego, sino también por absorber el gas que escapa. Use chorro de agua para enfriar los contenedores circundantes hasta que el fuego se apague completamente.		
PELIGROS INUSUALES DE FUEGO Y EXPLOSIÓN Los cilindros expuestos al fuego o al calor pueden ventearse rápidamente o explotar. Los gases que son desprendidos de las llamas pueden causar contaminación. Al combinarse con mercurio puede formar compuestos.		

## DATOS DE REACTIVIDAD

ESTABILIDAD		CONDICIONES A EVITAR
INESTABLE	ESTABLE X	Debe evitarse cualquier sistema que contenga mercurio.
INCOMPATIBILIDAD (MATERIALES A EVITAR) Vea mezclas peligrosas de otros líquidos, sólidos o gases.		PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN PELIGROSOS Hidrógeno a muy altas temperaturas (1,544°F: 840°C)
RIESGO DE POLIMERIZACIÓN		CONDICIONES A EVITAR
PUEDA OCURRIR	NO OCURRE X	Ninguna



# NH<sub>3</sub>

## PROCEDIMIENTOS EN CASO DE FUGA O DERRAME

### MEDIDAS DE SEGURIDAD EN CASOS DE FUGAS O DERRAMES.

Evacue a todo el personal del área afectada. Use equipo de protección apropiado. Si la fuga existe en equipo en uso, asegúrese de purgar la tubería con un gas inerte antes de realizar alguna reparación. Si la fuga se presenta en el contenedor o en su válvula, llame al teléfono de emergencia mencionado en este folleto.

### MÉTODO DE ELIMINACIÓN DE DESECHOS

Deben respetarse todas las reglamentaciones federales, estatales o locales con respecto a la salud y a la contaminación para el desecho de estos materiales. Contacte a INFRA para recomendaciones específicas. No deseche cantidades que no sean usadas. Regrese el cilindro adecuadamente etiquetado a INFRA para su desecho con las válvulas cerradas, el tapón de seguridad colocado y los capuchones bien enroscados.

## INFORMACIÓN PARA PROTECCIÓN ESPECIAL

### PROTECCIÓN RESPIRATORIA

Equipo de respiración autónomo deberá estar disponible en caso de emergencia.

### VENTILACIÓN

Utilice una campana con ventilación forzada y/o extracción local para prevenir la acumulación a niveles superiores al TWA.

### GUANTES DE PROTECCIÓN

De plástico o hule.

### PROTECCIÓN OCULAR

Goggles o lentes de seguridad, protector facial.

### OTRO EQUIPO DE PROTECCIÓN

Zapatos de seguridad, regadera de seguridad, fuente para lava ojos, ropa de protección resistente a productos químicos.

## PRECAUCIONES ESPECIALES

### INFORMACION ESPECIAL DE CLASIFICACION

El amoníaco está clasificado como un gas tóxico e inflamable. Debe especificarse en la calcomanía "GAS TOXICO" y "GAS INFLAMABLE". El nombre adecuado para transportación es Amoníaco Anhidro Licuado. El número U.N. es 1005.

### RECOMENDACIONES ESPECIALES PARA EL MANEJO

Usese únicamente en áreas bien ventiladas. Deben mantenerse los capuchones bien colocados a menos que el contenedor se encuentre en uso. No arrastre, deslice o role los cilindros. Use un transportador adecuado para el movimiento de los cilindros. Use un regulador para disminuir la presión cuando el cilindro sea conectado a un sistema o tubería de menor presión (menor a 500 psig). No caliente el cilindro por cualquier medio para aumentar la velocidad de descarga. Use una válvula check o trampa en la línea de descarga para evitar el retroceso de flujo al cilindro. Para recomendaciones adicionales consulte la información técnica proporcionada por INFRA o el folleto P-1 de la Compressed Gas Association (CGA).

### RECOMENDACIONES ESPECIALES PARA EL ALMACENAMIENTO

Proteja al cilindro de daños físicos. Almacénelo en áreas frías, secas, bien ventiladas de construcción no combustible y lejos de áreas de tráfico intenso y salidas de emergencia. No permita que la temperatura donde se almacena los cilindros exceda de 125°F (51.7°C). Los cilindros deben almacenarse en posición vertical y firmemente asegurados para evitar su caída o que les caigan objetos. Separe los cilindros llenos de los vacíos. Use un sistema de inventarios de primeras entradas primeras salidas para evitar que los contenedores llenos sean almacenados por excesivos periodos de tiempo. Coloque señales de "NO FUMAR o NO ENCENDER FLAMAS" en el área de almacenamiento. Se deben evitar fuentes de ignición. Para recomendaciones adicionales consulte el folleto P-1 de la CGA.



**RECOMENDACIONES ESPECIALES PARA EL ENVASADO**

En presencia de trazas de agua el amoníaco ataca vigorosamente al cobre, plata, zinc y sus aleaciones. El hierro o el acero son los materiales más recomendables. Se combina con el mercurio para formar compuestos explosivos. Conserve los sistemas de amoníaco anhidro escrupulosamente secos.

**OTRAS PRECAUCIONES O RECOMENDACIONES**

Conecte a tierra todas las líneas y equipo asociado con sistemas de amoníaco. El equipo eléctrico debe ser a prueba de explosión y sin generación de chispas eléctricas. Los cilindros de gases comprimidos no deben ser rellenados excepto por productores calificados de gases comprimidos.

