



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

## **SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN CON BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE**

**Miguel Angel Armas Echeverría**

Asesorado por el Ing. Esdras Miranda Orozco

Guatemala, noviembre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN CON  
BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**MIGUEL ANGEL ARMAS ECHEVERRÍA**

ASESORADA POR EL ING. ESDRAS MIRANDA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultan Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

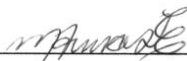
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Osmar Omar Rodas Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Figueroa Vasquez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi Trabajo de Graduación titulado:

### **SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN CON BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el día 24 de abril de 2009.



---

Miguel Ángel Armas Echeverría

Ingeniero  
Julio César Campos Paiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ing. Campos:

Respetuosamente me dirijo a usted, con el propósito de informarle, que luego de haber revisado el trabajo de graduación titulado:

**SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN CON BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE**

El cual fue presentado por el estudiante MIGUEL ÁNGEL ARMAS ECHEVERRÍA, y después de haber realizado las correcciones pertinentes, considero que cumple con los objetivos que le dieron origen.

Por lo tanto, hago de su conocimiento, que en mi opinión, dicho trabajo llena los requisitos necesarios para ser sometido a discusión en su examen General Público y recomiendo su aprobación para el efecto.

Atentamente,



Ing. Esdras Miranda Orozco  
COLEGIADO 4637

---

Ing. Esdras Miranda Orozco  
Ingeniero Mecánico  
Colegiado No. 4637

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA**

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN CON BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE, del estudiante Miguel Angel Armas Echeverría, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Julio César Molina Zaldaña  
Coordinador de Área

Guatemala, octubre de 2009.

/behdei

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Térmica, al Trabajo de Graduación titulado SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN CON BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE, del estudiante Miguel Angel Armas Echeverría, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, noviembre de 2009

JCCP/bhdei

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.489.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN CON BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE**, presentado por el estudiante universitario **Miguel Angel Armas Echeverría**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, noviembre de 2009

/cc



## **DEDICATORIA A:**

### **Dios y la Virgen María**

Por ser la luz de mi vida.

### **Mis padres**

Miguel Ángel y Zoila. Por sus consejos, amor y apoyo incondicional.

### **Mis Abuelos**

Por su cariño.

### **Jackeline**

Mi esposa. Por su amor y su apoyo.

### **Mi hermana**

Rosario. Por su apoyo y ser el ejemplo en mi vida.

### **Mis amigos**

Por estar siempre presentes.

## **AGRADECIMIENTO A:**

**Ing. Esdras Miranda Orozco**

Por sus consejos, asesoría y apoyo incondicional.

**Escuela de Ingeniería Mecánica**

Por contribuir con mi formación académica.

**María Salaverría**

Por su apoyo incondicional.

**Sra. Blanqui de Imeri**

Por el apoyo brindado.

**Dra. Ana Beatriz Vidal**

Por su apoyo incondicional.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	VII
<b>GLOSARIO</b>	XI
<b>RESUMEN</b>	XXI
<b>OBJETIVOS</b>	XXV
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXVII
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
1.1. Atmósfera	1
1.1.1. Estructura vertical de la atmósfera	2
1.1.2. Las capas de la atmósfera	3
1.1.3. Composición	4
1.2. Ambiente	7
1.2.1. Contaminación ambiental	7
1.2.1.1. Tipos de contaminación ambiental	9
1.2.1.2. Contaminación ambiental según el contaminante	10
1.2.1.3. Efectos de la contaminación ambiental	11
1.2.1.4. Efectos de la radioactividad en el ambiente	12
1.2.1.5. Cambios climáticos por la contaminación ambiental	13
1.2.2. Destrucción del ozono	14
1.3. Refrigeración	15
1.3.1. Funcionamiento	16
1.3.2. Aplicaciones	17

1.3.3. Refrigerantes	20
1.3.4. Identificación de refrigerantes	21
1.3.5. Requerimientos de los refrigerantes	23
1.3.6. Propiedades termodinámicas	24
1.3.7. Propiedades físicas y químicas	25
1.3.8. Refrigerantes y la capa de ozono	25
1.3.9. Identificación de los refrigerantes por números y código de colores	26
1.3.9.1. Refrigerantes CFC	27
1.3.9.2. Refrigerantes HCFC	28
1.3.9.3. Refrigerantes HFC	28
1.3.9.4. Mezclas de refrigerantes (azeotrópica-zeotrópica)	29
1.3.10. Requerimientos para refrigerantes	29
1.3.11. Agrupación y clasificación de los refrigerantes	30
1.3.11.1. Refrigerantes del grupo A	31
1.3.11.2. Refrigerantes del grupo B	32
1.3.11.3. Refrigerantes combustibles	33
1.3.11.4. Refrigerantes para desperdicio	33
1.3.11.5. Agua como refrigerante	34
1.3.11.6. Congelantes de alimentos	34
1.3.11.7. Fluidos criogénicos	35
1.3.12. Impacto de los refrigerantes en el ambiente	35
<b>2. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN NO CONVENCIONAL</b>	<b>37</b>
2.1. Refrigeración magnética	37
2.1.1. Definición	37
2.1.2. Termodinámica del efecto magnetocalórico	37
2.1.3. Principios termodinámicos	40

2.1.4. Funcionamiento	44
2.1.5. Materiales magnetocalóricos	46
2.2. Refrigeración por absorción	47
2.2.1. Principios y antecedentes	47
2.2.2. Funcionamiento del ciclo a llama directa de gas con solución de H <sub>2</sub> O y NH <sub>3</sub>	49
2.2.3. Funcionamiento del ciclo de absorción reversible en bombas de calor con solución de amoníaco y agua, a llama directa de gas combustible	52
2.2.4. Funcionamiento del ciclo de absorción de doble efecto con bromuro de litio (LiBr) y agua (H <sub>2</sub> O), a llama directa de gas (natural o GLP)	60
2.2.5. Ciclo de calefacción	63
2.2.6. Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua, alimentado por agua caliente	64
2.3. Refrigeración evaporativa	67
2.3.1. Antecedentes y desarrollo de la técnica	67
2.3.2. Principios básicos de la técnica	69
2.3.3. Aplicaciones del enfriamiento evaporativo	70
2.3.4. Condensadores de las máquinas frigoríficas utilizadas en climatización	72
2.3.5. Enfriadores evaporativos de aire	73
2.3.6. Refrigerador evaporativo cerámico	74
2.3.7. Refrigeración evaporativa combinada con energía solar pasiva	76
2.3.8. La Legionella y su problemática	77
2.3.9. Principio de funcionamiento del enfriamiento evaporativo	80

2.3.10. Principales aplicaciones	81
<b>3. LOS HIDROCARBUROS (HC) COMO REFRIGERANTES</b>	<b>83</b>
3.1. Propiedades de los hidrocarburos	84
3.2. Propiedades físicas	86
3.3. Comparación de las propiedades ambientales	86
3.4. Curva de la presión del vapor del isobutano, Care 30, R12, R134A	87
3.5. Curva de la presión del vapor del propano, Care 50, R22, R502, amoníaco	87
3.6. Inflamabilidad de los HC	88
3.7. Pureza de los HC como refrigerantes	89
3.8. Hidrocarburos disponibles como refrigerantes	90
3.9. Isobutano (R-600 A)	90
3.9.1. Carga de refrigerante	91
3.9.2. Seguridad	91
3.10. Propano (R-290)	92
3.11. Presión	93
3.12. Capacidad	95
3.13. Pureza	96
3.14. Inflamabilidad y seguridad	97
3.15. Buenas prácticas en el uso de los HC como refrigerantes	98
3.15.1. Mantenimiento de sistemas con refrigerantes HC	98
3.15.2. Carga de refrigerante HC	99
3.15.3. Puesta en funcionamiento	100
3.15.4. Baja del servicio	101
3.15.5. Detección de fugas de refrigerantes HC	102

3.15.6. Componentes eléctricos	103
3.15.7. Manejo de los cilindros	103
3.15.8. Almacenamiento de los cilindros	104
3.15.9. Unión de tuberías para sistemas de refrigeración con HC	105
3.15.9.1. Soldadura ultrasónica	105
3.15.9.2. Soldadura ultrasónica de metales	105
3.15.9.3. Aplicaciones de la soldadura ultrasónica	108

<b>4. ANÁLISIS DE VENTAJAS ENERGÉTICAS Y ECOLÓGICAS DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN CONVENCIONAL Y NO CONVENCIONAL</b>	<b>111</b>
4.1. Ventajas de la refrigeración magnética	111
4.2. Ventajas de la refrigeración por absorción	112
4.2.1. Interés energético	112
4.2.2. ¿Cuál es la razón para que los ciclos de absorción tengan actualmente una aplicación práctica?	113
4.2.3. Reducción de consumos primarios	113
4.2.4. Impacto ambiental	114
4.2.5. Sistemas de absorción vs. Sistema de vapor-compresión	114
4.3. Beneficios del enfriamiento evaporativo	116
4.3.1. Ventajas de la refrigeración evaporativa	116
4.3.2. Ahorro energético	117
4.3.3. Inversión más reducida	120
4.3.4. Impacto ambiental menor	121
4.3.5. Menor impacto por efecto invernadero	121
4.3.6. Menor consumo de agua	122

4.3.7. Menor impacto acústico	123
4.3.8. Seguridad frente a la legionella	123
4.4. Ventajas de la tecnología de hidrocarburos	124
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>127</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>129</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>131</b>



## ÍNDICE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Sistema de refrigeración convencional	16
2. MCE en transformaciones de segundo orden. Curvas isomagnéticas de la entropía en función de la temperatura	39
3. MCE en transformaciones de primer orden.	39
4. Ciclo de refrigeración magnética	46
5. Funcionamiento del ciclo a llama directa de gas con solución de agua (H <sub>2</sub> O) y amoníaco (NH <sub>3</sub> )	52
6. Funcionamiento del ciclo de absorción reversible en bombas de calor con solución de amoníaco y agua, a llama directa.	53
7. Válvula inversora	55
8. Funcionamiento del ciclo de absorción en modo de calefacción	56
9. Válvula inversora	57
10. Funcionamiento del ciclo de absorción de doble efecto con bromuro de litio (LiBr) y agua (H <sub>2</sub> O), a llama directa de gas (natural o GLP)	60
11. Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua, alimentado por agua caliente	65
12. Diagrama temperatura-entropía	71
13. Torre de enfriamiento y condensador evaporativo	73
14. Superficie exterior de los tubos cerámicos	75
15. Enfriador evaporativo sin operar y funcionando	77
16. Presión de vapor para diferentes refrigerantes frente a temperatura	94

17. Capacidad volumétrica del R290, R134a, R404A y R600a, en relación al R22, respecto a temperatura de evaporación, temperatura de condensación de 45°C y temperatura de aspiración de 32°C.	95
--	----

## TABLAS

I.	Valores medios de la composición química de la atmósfera seca, excluido el vapor de agua y las partículas en suspensión	5
II.	Refrigerantes y su fórmula química.	21
III.	Principales aplicaciones de los equipos de enfriamiento evaporativo.	82
IV.	Pureza de los HC como refrigerantes	89
V.	Hidrocarburos disponibles como refrigerantes	90
VI.	Tabla comparativa entre los refrigerantes R-12, R-134A, y el R-600A en relación al ODP y GWP	91
VII.	Comparación entre propano y otros refrigerantes	93
VIII.	Especificaciones de R290 de acuerdo con DIN 8960 – 1998	97
IX.	Inflamabilidad del propano	97
X.	Comparación de consumos energéticos (kW) en una instalación de aire acondicionado típica (capacidad frigorífica = 1.200 kW).	119



## **GLOSARIO**

### **ADIABÁTICO**

Indica un proceso total (compresión, expansión, otro.) donde no existe intercambio de calor entra los alrededores y la sustancia o sistema que atraviesa por este proceso (gases o vapores).

### **ADSORBENTE**

Sustancia que tiene la propiedad de tomar moléculas de un gas o de un líquido por medio de la adhesión superficial.

### **AGENTE REFRIGERANTE**

Es la sustancia de trabajo utilizada en la instalación de refrigeración para absorber calor a baja temperatura y ceder calor al medio circundante a una temperatura más alta. Se distingue entre agentes refrigerantes primarios y agentes refrigerantes secundarios.

**AGUA DE ENFRIAMIENTO**

Agua utilizada para enfriar máquinas y aparatos. Tiene que tener propiedades determinadas que se han de controlar continuamente (concentración salina, poco contenido de impurezas, tratamiento, medios contra la formación de algas, etc.). En caso necesario se aplica agua de reposición.

**AIRE**

Mezcla de gases, fundamentalmente, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> (alrededor de 20,93 y 78,10 %) en volumen, respectivamente, y menos de 1% de otros gases.

**AISLANTE**

Materiales para el aislamiento térmico. Propiedades principales: bajo coeficiente de conductibilidad térmica, baja densidad, reducida capacidad higroscópica, modesto costo, sencilla elaboración. Aislantes usuales.

**AMONÍACO**

Sustancia utilizada como refrigerante en las instalaciones industriales. Gas incoloro, olor penetrante, con una curva de presión y temperatura favorable. Es completamente insoluble en aceite y venenoso.

**ANTROPOGÉNICO**

Efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana.

**ARI**

Air-Conditioning and Refrigeration Institute.  
Instituto Americano de Refrigeración.

**ASHRAE**

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Sociedad Americana de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire.

**BROMURO DE METILO**

Sustancia química compuesta por carbono, hidrógeno y bromo que se utiliza principalmente como plaguicida y fumigante agrícola. El bromuro de metilo tiene un PAO elevado.

**CALOR ESPECÍFICO**

Es la cantidad de calor que se requiere aplicar a la unidad de peso para aumentar su temperatura en un grado.

<b>COMPRESOR</b>	Máquina específica, con o sin accesorios, para comprimir los vapores de refrigerante.
<b>CONDENSADOR</b>	Parte del sistema diseñado para licuar el vapor de refrigerante mediante la eliminación de calor.
<b>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA</b>	Representa el flujo de calor referido a la unidad de tiempo en un medio homogéneo, de superficie perpendicular a la dirección del flujo, y considerando el gradiente de temperatura entre las superficies de entrada y salida.
<b>COMPRESIÓN</b>	Término usado para denotar el aumento de presión de un fluido a través de la energía mecánica.
<b>COP</b>	Coficiente de Operación de un equipo.
<b>ENERGÍA</b>	Capacidad para realizar un trabajo (algunas veces se expresa como la capacidad para producir un efecto).



**ENTALPÍA**

La suma de la energía interna más  $pV/J$ .

**ENTROPÍA**

Propiedad de una sustancia. Como es una propiedad, sólo depende de los estados finales de un proceso y no de la trayectoria del mismo.

**GWP**

Global Warming Potential. Potencial de calentamiento global.

**HIDROCARBUROS**

Compuesto químico que consta de uno o más átomos de carbono, rodeados solamente por átomos de hidrógeno. Los HC se usan comúnmente para sustituir a los CFC que se emplean como propulsores de productos en aerosol y en mezclas de refrigerantes.

**HUMEDAD ABSOLUTA**

Peso de vapor de agua por libra de aire seco en una mezcla de aire húmedo.

**HUMEDAD RELATIVA**

Relación entre la presión parcial del vapor y la presión de saturación del mismo a la misma temperatura, en una mezcla de aire húmedo.

**LEGIONELLA**

Bacteria Gram negativa con forma de bacilo. Viven en aguas estancadas con un amplio rango de temperatura. Su crecimiento se ve favorecido por la presencia de materia orgánica. Requiere oxígeno para respirar y posee un flagelo para desplazarse.

**MEZCLA AZEOTRÓPICA**

Mezcla de líquidos que en su fase líquida y en su fase vapor (también en ebullición y condensación) se comporta como una sustancia pura, o sea, que no se deja separar por destilación.

**MISCIBILIDAD**

Propiedad de gases o líquidos, valor límite de la relación de la mezcla posible. Distintos gases son miscibles unos con otros ilimitadamente y en cualquier relación. Los líquidos son miscibles o ilimitadamente, limitadamente (por ejemplo, agua y éter) o inmiscibles (por ejemplo, agua y aceite).

**MOLÉCULA DE OZONO**

Molécula que contiene tres átomos de oxígeno y cuya presencia en la estratosfera constituye la capa de ozono.

**ODP**

Ozone Destruction Potential. Potencial de destrucción de Ozono.

**PUNTO DE CONGELAMIENTO**

Determina la temperatura a la que un líquido se solidifica. En los hidrocarburos, este aumenta con el peso molecular, no cumpliéndose en todos los casos.

**PROCESO REVERSIBLE**

Proceso en el que se hace que un fluido experimente un cambio de estado y, recorriendo la trayectoria en sentido inverso a la trayectoria original, se regresa a su estado original, y a su vez, todos los sistemas asociados son egresados de manera similar a sus estados originales.

## **PUNTO DE EBULLICIÓN**

Este se define como la temperatura a la cual un líquido puro, pasa al estado de vapor a una presión preestablecida en cualquier punto de su masa líquida. Para todas las series de hidrocarburos homólogos, el punto de ebullición se incrementa con el número de átomos de carbono que conforman la molécula.

## **PUNTO DE INFLAMACIÓN**

Temperatura a la que un líquido (bajo presión normal de aire) flamea brevemente al entrar en contacto con una llama (ignición externa), pero no sigue ardiendo automáticamente. Norma para determinar el peligro de incendio, más sin importancia en la técnica de combustión

## **RADIACIÓN**

La energía transferida desde el Sol hacia los objetos. La radiación viaja en ondas liberando su energía cuando es absorbida por un objeto.

**REFRIGERANTE**

Sustancia empleada para producir frío mediante su expansión o vaporización. Fluido de trabajo en un ciclo termodinámico invertido.

**TEMPERATURA CRÍTICA**

Temperatura en el punto en que los estados de líquido saturado y vapor saturado son idénticos.

**TEI**

Total Environmental Impact. Impacto Ambiental Total.

**VISCOSIDAD**

Es una magnitud física que mide la resistencia interna al flujo de un fluido, resistencia producto del frotamiento de las moléculas que se deslizan unas contra otras.



## RESUMEN

La contaminación ambiental se denomina a la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) o bien de una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que puedan ser nocivos para la salud.

Dentro de los principales problemas que se dan por la alta concentración de contaminantes en el ambiente, está el debilitamiento de la capa de ozono, que protege a los seres vivos de la radiación ultravioleta del Sol. La destrucción del ozono estratosférico se debe a la presencia de cloro (Cl) procedente de los refrigerantes, sustancias tóxicas y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que acompañan a la combustión masiva de materiales fósiles.

La única forma de frenar la modificación del clima es reducir drásticamente las emisiones de gases invernadero, como el CO<sub>2</sub>, CFCs y HFCs, por lo que es necesario que los gobiernos y empresas mundiales tomen conciencia de los cambios que se están dando, para que reduzcan el uso de estos contaminantes y llevar a cabo la implementación de nuevas tecnologías que no dañan el ambiente.

La refrigeración consiste en extraer la energía térmica de un cuerpo para reducir su temperatura. Por las propiedades termodinámicas dicha energía es transferida hacia otro cuerpo.

La refrigeración magnética aprovecha el efecto magnetocalórico, para reemplazar los procesos de compresión y expansión de los sistemas convencionales, por procesos de magnetización y desmagnetización de un material magnetocalórico, en este sistema el refrigerante es un sólido, y no se puede bombear a través de intercambiadores de calor. Por lo tanto; se emplea un fluido que transfiere la energía entre el refrigerante magnético y los depósitos.

El ciclo termodinámico de enfriamiento por absorción, al igual que el de compresión, se basa en el uso de un fluido como refrigerante para extraer el calor del líquido a enfriar, para poder pasar del estado líquido al de vapor al reducirse la presión a la que está sometido. Los sistemas de absorción no sólo hacen posible la utilización de energías térmicas que serían liberadas a la atmósfera, sino que además, al mismo tiempo evitan el consumo de energías más caras, para su utilización en la producción de refrigeración.

El enfriamiento evaporativo es un proceso de transferencia de calor y masa basado en la conversión del calor sensible en latente. El aire no saturado es enfriado por la evaporación de agua sin intercambio de energía con el entorno. En estas condiciones, parte de la carga de calor sensible del aire se convierte en calor latente para la evaporación del agua, consiguiendo reducir la temperatura seca del aire mediante un aumento de su humedad.

Los refrigerantes son los fluidos vitales en cualquier sistema de refrigeración. Cualquier sustancia que cambie de líquido a vapor y viceversa, puede funcionar como refrigerante, y dependiendo del rango de presiones y temperaturas a que hagan estos cambios, así será su aplicación comercial. Son sustancias naturales obtenidas por destilación en las refinerías. Los



hidrocarburos refrigerantes están disponibles para una amplia gama de aplicaciones, tienen muy bajo impacto ambiental, son compatibles con el cobre y el aceite mineral.



# OBJETIVOS

## General

Dar a conocer las nuevas propuestas y procesos termodinámicos de sistemas de refrigeración no convencionales, tomando en cuenta los beneficios que estos traen al ambiente.

## Específicos

1. Conocer los beneficios y ventajas de los sistemas de refrigeración no convencionales propuestos.
2. Brindar los fundamentos teóricos de los nuevos sistemas de refrigeración y su aplicación en el entorno.
3. Determinar los niveles de contaminación como resultados basados en la aplicación de sistemas de refrigeración convencionales y no convencionales.
4. Analizar la importancia del uso de sustancias naturales como refrigerantes, haciendo énfasis en los hidrocarburos y su bajo impacto en el ambiente.



## INTRODUCCIÓN

Los sistemas industriales y domésticos de refrigeración se basan en la compresión y expansión de un gas de forma cíclica. Al comprimirse el gas pasa a la fase líquida y al expandirse se evapora de nuevo. Para evaporarse necesita calor, que lo extrae del medio al que toca y por tanto lo enfría.

Estos gases utilizados, que en procesos basados en compresión pueden escapar a la atmósfera y son los más adecuados para el proceso de refrigeración, causan efecto invernadero o destrucción de la capa de ozono. El protocolo de Kioto compromete a los países firmantes a reducir la tasa de emisión de dichos gases, por lo que en los últimos años se ha intensificado la búsqueda de tecnologías que mejoren la eficiencia de los equipos y tengan bajo impacto en el ambiente; y la utilización de los hidrocarburos como refrigerantes incluye la sustitución directa del CFC-12.

Como sustancias de reemplazo, los hidrocarburos han demostrado ser refrigerantes adecuados en diversas aplicaciones en cuanto a sus propiedades termodinámicas y fiabilidad. Se necesitan realizar muy pocos cambios en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado y sus componentes, sin embargo, se deben tomar las medidas de seguridad necesarias para evitar que la inflamabilidad sea un problema. El presente documento está dirigido a quienes deseen conocer sobre los sistemas alternativos de refrigeración que se están aplicando actualmente a nivel mundial.



# 1. ANTECEDENTES

## 1.1 La atmósfera

La atmósfera es la capa gaseosa que cubre la tierra y que se mantiene atrapada a ella por la fuerza de atracción gravitacional. En términos relativos al tamaño de la tierra, cuyo radio es alrededor de 6400 km (20997375.3 ft), el espesor de la atmósfera es muy pequeño considerando que el 99% de su masa se concentra en los primeros 30 km (98425.2 ft) sobre la superficie de la tierra.

La envoltura gaseosa de la Tierra no sirve solamente como un techo protector contra las radiaciones procedentes del Sol y de otros cuerpos celestes, sino que es la base de la vida terrestre, ya sea como fuente de oxígeno para el reino animal y de anhídrido carbónico para el vegetal, y como fuente de agua potable o como fuerza de presión vital sobre el organismo animal.

También es la atmósfera la que regula la temperatura terrestre, igualando, aproximadamente, la del día con la de la noche. Ella es la que evita que existan grandes contrastes entre los dos periodos; como sucede con los astros que carecen cobertura atmosférica, los cuales gozan de altas temperaturas cuando reciben la luz solar y llegan hasta 200°C (392°F) bajo cero con la llegada de la noche; la luna es un ejemplo de ello.

### 1.1.1 Estructura vertical de la atmósfera

El perfil vertical de la atmósfera se puede dividir en una serie de capas, que pueden ser determinadas por la variación de la temperatura del aire, por la concentración de gases o por sus propiedades eléctricas.

Antes de conocer estas capas, se introducirán dos conceptos importantes y variación con la altura en la atmósfera, siendo estos: presión y densidad.

Las moléculas de aire (como todo cuerpo) se encuentran cerca de la superficie terrestre debido a la fuerza de gravedad. Esta fuerza, hace que las moléculas de aire se compriman cerca de la superficie, haciendo crecer el número de las mismas por unidad de volumen. Dado que la densidad del aire es el número de moléculas por unidad de volumen, y por lo explicado anteriormente la densidad del aire es mayor sobre la superficie y desciende con la altura.

Las moléculas de aire tienen peso, de hecho el aire es muy pesado, todo el aire alrededor de la tierra tiene un peso aproximado de 5600 trillones de toneladas ( $11.2 \times 10^6$  trillones de libras). Este peso actúa como una fuerza sobre la tierra y esta fuerza por unidad de área se llama presión atmosférica. La presión atmosférica es el peso de la columna de aire que se encuentra por encima del nivel considerado. Es por esto que la presión desciende con la altura.

Tanto la densidad como la presión descienden con la altura, este decrecimiento es más rápido al principio y luego lo hacen más lentamente.



### **1.1.2 Las capas de la atmósfera**

La atmósfera tiene cuatro capas cuyas características son muy diferentes. Debido a la gravedad, la mayor parte de los gases y otros componentes de la atmósfera se acumulan en las capas más bajas.

La capa superior y la más gruesa es la ionosfera o termosfera. Su grosor es de entre 500 km (1640419.9 ft) y 1000 km (3280839.9 ft). Es la capa en la que se reflejan las ondas de radio, se producen las auroras, fenómenos que sólo se pueden observar desde zonas cercanas a los polos.

La mesosfera es una capa de unos 40 km (131233.6 ft) de espesor. No contiene ozono ni vapor de agua, pero sí cúmulos de hielo y polvo. En esta zona de la atmósfera, los meteoritos que llegan a la Tierra se vuelven incandescentes, formando lo que se conoce como estrellas fugaces.

La estratosfera tiene unos 30 km (98425.2 ft) de espesor. En ella se localiza la llamada capa de ozono. Se trata de una zona de la atmósfera en la que se acumula este gas, de fórmula  $O_3$ . Esta capa tiene la importante misión de filtrar las radiaciones ultravioleta procedentes del Sol, que son muy perjudiciales para los seres vivos. Debido a esta absorción, la temperatura aumenta en la parte superior de la estratosfera. La existencia de esta capa es una de las claves de la vida en la Tierra.

La troposfera es la capa que conecta con la superficie del planeta. Es la más fina, ya que tiene un espesor de sólo 14 km (45931.7 ft), pero contiene un 80 % del total de los gases atmosféricos y casi todo el vapor de agua. En esta

capa se producen los fenómenos meteorológicos. La temperatura desciende con la altitud, del orden de 0.65 °C (33.2 °F) por cada 100 m (328.1 ft) de altura.

Esta es la capa en la que se produce toda la actividad humana. Sólo las naves espaciales y algunos aviones son capaces de abandonarla temporalmente.

### **1.1.3 Composición**

La atmósfera constituye un sistema dinámico, en el que sus componentes están continuamente intercambiándose con la vegetación, el suelo, los océanos y los seres vivos. Se han diseñado una serie de ciclos relativos a los componentes más importantes de la atmósfera, en los que se describen los procesos físicos y las reacciones químicas más relevantes en las que participan dichos componentes, como una manera de sistematizar su estudio. En general, al describir la composición de la atmósfera, se suele distinguir entre componentes cuya proporción es prácticamente constante en cualquier momento y en cualquier zona, hasta unos 80 km (262467.2 ft) de altitud, y otros cuya composición varía continuamente, de los cuales el vapor de agua es el paradigma. En la Tabla I, se indica la abundancia media de los componentes de la atmósfera seca.

La concentración de vapor de agua puede variar enormemente entre menos de 1 % en zonas desérticas, hasta un 4 % en volumen en las regiones templadas y húmedas de los trópicos. Se acostumbra a expresar dicha concentración a través de la humedad relativa, que se define como el cociente entre la presión parcial de agua en la zona o instante en que se mide, y su

presión de saturación a la misma temperatura. La humedad relativa puede inducir a errores de concepto, debido a la gran variación de la presión de vapor de saturación del agua con la temperatura. Por ejemplo, una humedad relativa del 100 % en un lugar a 0°C (32°F) implica una cantidad de 3.5 g ( $7.72 \times 10^{-3}$  lb) de agua por kilogramo (2.2 lb) de aire seco, mientras que la misma concentración de agua en una zona a 20°C (68°F) indicaría una humedad relativa de sólo 20 %.

**Tabla I. Valores medios de la composición química de la atmósfera seca, excluido el vapor de agua y las partículas en suspensión.**

Constituyente	Relación de mezcla
N <sub>2</sub>	78.084
O <sub>2</sub>	20.946
Ar	0.934
CO <sub>2</sub>	0.035
En	18 ppm
He	5.2
CH <sub>4</sub>	1.7
Kr	1.1
H <sub>2</sub>	0.58
N <sub>2</sub> O	0.31
Xe	0.09
O <sub>3</sub>	0.1-0.01
NO, NO <sub>2</sub>	$10^{-2}$ - $10^{-6}$
NH <sub>3</sub>	$10^{-3}$ - $10^{-4}$
SO <sub>2</sub>	$10^{-4}$ - $10^{-5}$

Fuente: Noel de Nevers, "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire".

Otro de los elementos de concentración variable en la atmósfera está constituido por las partículas en suspensión. Estas partículas pueden provenir de fuentes naturales, como la erosión del terreno, sal marina, erupciones volcánicas, cuyas cenizas y finas partículas sólidas pueden extenderse durante meses por todo el planeta, bacterias, semillas, esporas, partículas de meteoritos, etc. y también de fuentes antropogénicas, como residuos de humo de chimeneas de fábricas, calefacciones, regeneradores de residuos, emisiones de vehículos, residuos de fertilizantes, etc. Las partículas sólidas más pesadas precipitan rápidamente, pero las más ligeras pueden permanecer largo tiempo, manteniéndose fundamentalmente en las zonas bajas de la atmósfera, por lo que sus efectos pueden llegar a ser especialmente dañinos para la salud humana. Las agencias medioambientales urbanas establecen límites de peligrosidad para una cierta cantidad de partículas en suspensión. En especial, las partículas de pequeño tamaño, de menos de  $2.5 \mu\text{m}$  ( $8.20 \times 10^{-6}$  ft), pueden penetrar más fácilmente en el sistema respiratorio humano, con mayor riesgo para la salud.

Durante el tiempo de permanencia en la atmósfera, una sustancia puede sufrir alteraciones químicas, fundamentalmente por dos motivos: por acción directa de radiación solar con suficiente energía para provocar ruptura de enlaces o iniciar una reacción química (procesos fotoquímicos), o por interacción directa entre moléculas, normalmente inducida por colisiones, dando lugar a la formación de nuevas especies. En este caso, las reacciones químicas atmosféricas pueden clasificarse como homogéneas, directamente entre gases, o heterogéneas, cuando la reacción se produce involucrando distintas fases, como gas-líquido, o gas-sólido.

Es importante destacar la existencia en la atmósfera de radicales libres, en muy pequeña concentración, pero cuya actividad química es muy elevada, el más importante de los cuales es el radical OH, que puede reaccionar con prácticamente cualquier componente atmosférico, siendo también destacable el papel que radicales halógenos juegan en importantes procesos atmosféricos.

## **1.2 Ambiente**

Es el conjunto de elementos abióticos (energía solar, suelo, agua y aire) y bióticos (organismos vivos) que integran la delgada capa de la Tierra llamada biosfera, sustento y hogar de los seres vivos.

### **1.2.1 Contaminación ambiental**

Se denomina contaminación ambiental a la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) o bien de una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, la seguridad o para el bienestar de la población, o bien, que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal o animal, o impidan el uso normal de las propiedades y lugares de recreación y goce de los mismos. La contaminación ambiental es también la incorporación a los cuerpos receptores de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, o mezclas de ellas, siempre que alteren desfavorablemente las condiciones naturales del mismo, o que puedan afectar la salud, la higiene o el bienestar del público.

A medida que aumenta el poder del hombre sobre la naturaleza y aparecen nuevas necesidades como consecuencia de la vida en sociedad, el medio ambiente que lo rodea se deteriora cada vez más. El comportamiento social del hombre, que lo condujo a comunicarse por medio del lenguaje, que posteriormente formó la cultura humana, le permitió diferenciarse de los demás seres vivos. Pero mientras ellos se adaptan al medio ambiente para sobrevivir, el hombre adapta y modifica ese mismo medio según sus necesidades.

El progreso tecnológico, por una parte y el acelerado crecimiento demográfico, por la otra, producen la alteración del medio, llegando en algunos casos a atentar contra el equilibrio biológico de la Tierra. No es que exista una incompatibilidad absoluta entre el desarrollo tecnológico, el avance de la civilización y el mantenimiento del equilibrio ecológico, pero es importante que el hombre sepa armonizarlos. Para ello es necesario que proteja los recursos renovables y no renovables y que tome conciencia de que la conservación del ambiente es fundamental para la vida sobre el planeta. La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, en cantidad tal, que cause efectos adversos en el hombre, en los animales, vegetales o materiales expuestos a dosis que sobrepasen los niveles aceptables en la naturaleza.

La contaminación puede surgir a partir de ciertas manifestaciones de la naturaleza (fuentes naturales) o bien debido a los diferentes procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas) que conforman las actividades de la vida diaria. Las fuentes que generan contaminación de origen antropogénico más importantes son: industriales (sistemas de refrigeración, mataderos, actividad minera y petrolera), comerciales (envolturas y empaques),

agrícolas (agroquímicos), domiciliarias (envases, pañales, restos de jardinería) y fuentes móviles (gases de combustión de vehículos). Como fuente de emisión se entiende el origen físico o geográfico donde se produce una liberación contaminante al ambiente, ya sea al aire, al agua o al suelo.

### 1.2.1.1 Tipos de contaminación ambiental

Tradicionalmente el medio ambiente se ha dividido, para su estudio y su interpretación, en tres componentes que son: aire, agua y suelo; sin embargo, esta división es solamente teórica, ya que la mayoría de los contaminantes interactúan con más de uno de los elementos del ambiente.

- **Contaminación del aire:** es la adición dañina a la atmósfera de gases tóxicos, CO<sub>2</sub> y otros que afectan el normal desarrollo de plantas, animales y que afectan negativamente la salud de los humanos.
- **Contaminación del agua:** es la incorporación al agua de materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales, y de otros tipos o aguas residuales. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para su utilización.
- **Contaminación del suelo:** es la incorporación al suelo de materias extrañas, como basura, desechos tóxicos, productos químicos, y desechos industriales. La contaminación del suelo produce un desequilibrio físico, químico y biológico que afecta negativamente las plantas, animales y humanos.

### 1.2.1.2 Contaminación ambiental según el contaminante

- **Contaminación química:** es en la que un determinado compuesto químico se introduce en el medio.
- **Contaminación radiactiva:** es aquella derivada de la dispersión de materiales radiactivos, como el uranio enriquecido, usados en instalaciones médicas o de investigación, reactores nucleares de centrales energéticas, municiones blindadas con metal aleado con uranio, submarinos, satélites artificiales, etc.; que se produce por un accidente (como el accidente de Chernóbil), por el uso ó por la disposición final deliberada de los residuos radiactivos.
- **Contaminación térmica:** se refiere a la emisión de fluidos a elevada temperatura; se puede producir en cursos de agua. El incremento de la temperatura del medio disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua.
- **Contaminación acústica:** es la contaminación debida al ruido provocado por las actividades industriales, sociales y de transporte, que puede provocar malestar, irritabilidad, insomnio, sordera parcial, etc.
- **Contaminación electromagnética:** es la producida por las radiaciones del espectro electromagnético que afectan a los equipos electrónicos y a los seres vivos.
- **Contaminación lumínica:** se refiere al brillo o resplandor de luz en el cielo nocturno producido por la reflexión y la difusión de la luz artificial en los gases y en las partículas del aire por el uso de luminarias o excesos



de iluminación, así como la intrusión de luz o de determinadas longitudes de onda del espectro en lugares no deseados.

- **Contaminación visual:** se produce generalmente por instalaciones industriales, edificios e infraestructuras que deterioran la estética del medio.

### **1.2.1.3 Efectos de la contaminación ambiental**

Expertos en salud ambiental y cardiólogos de la Universidad de California del Sur (EE.UU), han demostrado que la contaminación ambiental de las grandes ciudades afecta la salud cardiovascular. Se comprobó que existe una relación directa entre el aumento de las partículas contaminantes del aire de la ciudad y el engrosamiento de la pared interna de las arterias (la "íntima media"), que es un indicador comprobado de arterosclerosis.

El efecto persistente de la contaminación del aire respirado, en un proceso silencioso de años, conduce finalmente al desarrollo de afecciones cardiovasculares agudas, como el infarto. Al aspirar partículas ambientales con un diámetro menor de 2.5 micrómetros ( $8.20 \times 10^{-6}$  ft), ingresan en las vías respiratorias más pequeñas y luego irritan las paredes arteriales. Los investigadores hallaron que por cada aumento de 10 microgramos por metro cúbico ( $6.7 \times 10^{-12}$  lb por ft<sup>3</sup>) de esas partículas, la alteración de la pared íntima media de las arterias aumenta un 5.9 %. El humo del tabaco y el que proviene del sistema de escape de los autos producen la misma cantidad de esas partículas.

Otro de los efectos es el debilitamiento de la capa de ozono, que protege a los seres vivos de la radiación ultravioleta del Sol, debido a la destrucción del ozono estratosférico por cloro (Cl) y bromo (Br) procedentes de la contaminación; y el calentamiento global provocado por el aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico que acompaña a la combustión masiva de materiales fósiles. Los empresarios y sus gobiernos no consideran la naturaleza ni el ambiente que les rodea, ni toman conciencia de los daños que hacen al planeta directa e indirectamente, teniendo como consecuencias:

- El deterioro cada vez más a nuestro planeta.
- Atentan contra la vida de plantas, animales y personas.
- Generación de daños físicos en los individuos.
- Los suelos contaminados no permiten la siembra.

#### **1.2.1.4 Efectos de la radioactividad**

Los efectos de la radioactividad en los seres vivos son dañinos para su integridad física; pueden ser inmediatos o tardíos, según la dosis. Cuando el organismo humano recibe de golpe altas dosis de radiación, puede sobrevenir la muerte. Cantidades altas recibidas en fracciones pequeñas y espaciadas producen efectos tardíos, como la leucemia, cánceres, cataratas y otros procesos degenerativos. Dosis bajas y espaciadas en el tiempo pueden producir efectos tardíos o anomalías en las próximas generaciones.

El uso militar y comercial de la energía nuclear representa un peligro inaceptable tanto por sus emisiones rutinarias de radiactividad y los residuos que generan, como el riesgo de accidente que su funcionamiento supone.

#### **1.2.1.5 Cambios climáticos por la contaminación ambiental**

El cambio climático, inducido por la actividad del ser humano, supone que la temperatura media del planeta ha aumentado 0.6°C (33.08°F) en el Siglo XX. La temperatura media del planeta subirá entre 1.4 y 5.8°C (34.5 y 42.4°F) entre 1990 y 2100. En el mismo período, el nivel medio del mar aumentará entre 0.09 y 0.88 metros (0.29 y 2.88 ft). El aumento del Siglo XX no se ha dado en ninguno de los últimos diez siglos.

El cambio climático acelerará la aparición de enfermedades infecciosas, como las tropicales, que encontrarán condiciones propicias para su expansión, incluso en zonas del Norte. La Organización Mundial de la Salud advirtió que es probable que los cambios locales de temperaturas y precipitaciones creen condiciones más favorables para los insectos transmisores de enfermedades infecciosas, como la malaria o el dengue.

La atmósfera actúa como una trampa térmica y este efecto invernadero aumenta con la concentración de gases como el CO<sub>2</sub>. La actividad humana, la deforestación y, sobre todo, la quema de combustibles fósiles incrementan la presencia de este gas en el aire. La concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> se ha incrementado en un 31% desde 1750.

La cubierta de hielo ha disminuido en un 10% desde finales de 1960; igualmente, se observa una reducción de los glaciares a lo largo del Siglo XX. Ha aumentado la temperatura superficial del océano y el nivel del mar entre 0.1 y 0.2 m (0.328 y 0.656 ft) en el Siglo XX (y que irá en aumento amenazando de inundar a ciertos países). También se registran cambios en el régimen de lluvias, en la cubierta de nubes y en el patrón de ocurrencia de fenómenos como la corriente cálida de El Niño, que se ha vuelto más frecuente. Tal aumento puede conducir a una mayor incidencia de enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera, y de las relacionadas con toxinas, como el envenenamiento por mariscos.

La única forma de frenar la modificación del clima es reducir drásticamente las emisiones de gases invernadero, como el CO<sub>2</sub>. Es necesario presionar a los gobiernos y empresas mundiales, para que reduzcan las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La incineración de los residuos es una fuente muy importante de contaminación ambiental, pues emite sustancias de elevada toxicidad a la atmósfera. Al contaminar, el aire que respiramos, el agua que bebemos y nuestros alimentos, la incineración afecta gravemente a nuestra salud. Entre los compuestos tóxicos destacan principalmente, metales pesados y las dioxinas.

Estas últimas son extremadamente tóxicas, persistentes y acumulativas en toda la cadena alimentaria; son sustancias cancerígenas que alteran los sistemas inmunológico, endocrino, reproductor y nervioso.

### **1.2.2 Destrucción del ozono**

La destrucción del ozono debido a las actividades humanas ha llegado ya al punto en que los dañinos rayos solares, los ultravioletas B, llegan en grandes zonas de la superficie terrestre, a niveles capaces de causar extensos daños a la vida. Las dosis cada vez mayores de UV-B amenazan la salud y el bienestar humano, las cosechas, los bosques, las plantas, la vida salvaje y marina. Se ha producido una elevación de la tasa de cáncer de piel; la exposición a la radiación UV-B reduce la efectividad del sistema inmunológico.

La falta de agua, efecto del calentamiento del planeta, amenaza seriamente los medios de subsistencia de más de 1200 millones de personas, la cuarta parte de la población mundial. A pesar de las crecientes preocupaciones respecto a estos temas, las medidas de ámbito internacional encuentran obstáculos para su aplicación a causa del desarrollo incontrolado.

### **1.3 Refrigeración**

La refrigeración consiste en extraer la energía térmica de un cuerpo para reducir su temperatura. Por las propiedades termodinámicas dicha energía es transferida hacia otro cuerpo. Cabe destacar que el frío propiamente no existe, sino que la temperatura es el reflejo de la cantidad de energía que posee un cuerpo.

### 1.3.1 Funcionamiento

En los sistemas de refrigeración o climatización el calor es bombeado del interior al exterior del recinto. Los principios de funcionamiento de la refrigeración por compresión de vapor en forma simplificada pueden dividirse en cuatro operaciones: evaporación, compresión, condensación y expansión.

Durante la evaporación, el calor se absorbe del aire o del proceso que habrá de ser enfriado por el refrigerante que se evapora. Este refrigerante en estado gaseoso es aspirado por el compresor el cual obtiene su energía de un motor eléctrico o de otro medio mecánico motorizado. El compresor comprime el refrigerante gaseoso aumentando su presión, el gas a alta presión va al condensador donde por sus condiciones de presión y temperatura es condensado por la acción del aire ambiente o el agua. Este refrigerante líquido a alta presión es conducido hacia el evaporador nuevamente, a través de un dispositivo de expansión en el cual baja su presión disminuyendo su temperatura dejándolo listo para iniciar el ciclo.

**Figura 1. Sistema de refrigeración convencional.**



Fuente: Yunus Çengel, Michael A. Boles, "Termodinámica".

### **1.3.2 Aplicaciones**

La refrigeración puede utilizarse para tres fines, principalmente:

- Refrigeración para CONSERVACIÓN.
- Refrigeración para CONGELACIÓN.
- Refrigeración para CLIMATIZACIÓN.

Las dos primeras se aplican generalmente a alimentos, mientras que la última se refiere a la refrigeración de locales o vehículos para animales, personas o plantas. Además, de las aplicaciones más conocidas, tales como el acondicionamiento de aire para comodidad, así como el proceso de congelación, almacenamiento, transporte y exhibición de productos, se usa actualmente en el proceso de manufactura de casi todos los artículos que se encuentran en el mercado.

La refrigeración ha hecho posible la producción de plástico, hule sintético y muchos otros materiales. Gracias a la refrigeración mecánica las fábricas textiles y de papel pueden acelerar sus máquinas obteniendo mayor producción y se dispone de mejores métodos para el endurecimiento de los aceros para las máquinas y herramientas.

Por conveniencia en el estudio, las aplicaciones de refrigeración se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- **Refrigeración doméstica**

Tiene un campo de aplicación relativamente limitado y trata principalmente de refrigeradores y congeladores domésticos. Sin embargo, debido a la

cantidad de unidades en servicio, la refrigeración doméstica representa una porción muy significativa de la industria de la refrigeración.

Las unidades domésticas son generalmente de tamaño pequeño, con potencias entre 40 W y 400 W (136.3 y 1366.6 Btu/h).

- **Refrigeración comercial**

Trata del diseño, instalación y mantenimiento de aparatos de refrigeración del tipo usado por almacenes y tiendas, restaurantes, hoteles e instituciones, para el almacenaje, exhibición y procesado de artículos de todos los tipos que estén sujetos a deterioro.

- **Refrigeración industrial**

Se confunde frecuentemente con la refrigeración comercial ya que la división de las dos áreas no se ha definido claramente. Por regla general, las aplicaciones industriales son de mayor tamaño y tienen la característica de requerir un operario para su atención. Entre las aplicaciones industriales típicas se encuentran: plantas de hielo, plantas empacadoras de alimentos (carne, pescado, aves, alimentos congelados, etc.), cervecerías, cremerías y plantas industriales tales como: refinerías de aceite, plantas químicas, plantas de hule, etc.



- **Refrigeración marina y de transporte**

Las aplicaciones dentro de esta categoría, se pueden clasificar particularmente bajo refrigeración comercial e industrial.

La refrigeración marina se refiere a refrigeración a bordo de barcos e incluye; refrigeración para botes de pesca, embarcaciones de transporte y de cargamento sujeto a deterioro, así como refrigeración de los almacenes del barco, en toda clase de embarcaciones. La refrigeración de transporte se refiere a los equipos aplicados a transportes de cargas y pasajeros.

- **Acondicionamiento de aire**

Generalmente, involucra el control no solamente de la temperatura de un recinto, sino también de la humedad y movimiento del aire dentro del mismo, así como el filtrado y limpieza (Climatización).

- **Conservación de alimentos**

La conservación de alimentos es más importante en la historia del hombre. Las poblaciones urbanas requieren grandes cantidades de alimentos que, en su mayor parte deben ser producidas y procesadas en áreas distintas. Naturalmente, estos alimentos deben mantenerse en condiciones de conservación durante el transporte y almacenaje hasta que finalmente se consuman; esto puede ser cuestión de horas, días, meses y en ocasiones años. Un ejemplo claro son las frutas y legumbres que solamente se producen en

ciertas estaciones del año deben almacenarse y conservarse para poder ser consumidas durante todo el año.

### **1.3.3 Refrigerantes**

De manera general, un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúe como agente de enfriamiento, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. Desde el punto de vista de la refrigeración mecánica por evaporación de un líquido y la compresión de vapor, se puede definir al refrigerante como el medio para transportar calor desde donde lo absorbe por ebullición, a baja temperatura y presión, hasta donde lo rechaza al condensarse a alta temperatura y presión.

Los refrigerantes son los fluidos vitales en cualquier sistema de refrigeración mecánica. Cualquier sustancia que cambie de líquido a vapor y viceversa, puede funcionar como refrigerante, y dependiendo del rango de presiones y temperaturas a que haga estos cambios, así será su aplicación comercial.

Existe un número muy grande de fluidos refrigerantes fácilmente licuables; sin embargo, sólo unos cuantos son utilizados en la actualidad. Algunos se utilizaron mucho en el pasado, pero se eliminaron al incursionar otros con ciertas ventajas y características que los hacen más apropiados.

Recientemente, se decidió discontinuar algunos de esos refrigerantes antes del año 2000, tales como el R-11, R-12, R-113, R-115, etc., debido al deterioro que causan a la capa de ozono en la estratósfera.

### 1.3.4 Identificación de refrigerantes

Los refrigerantes se identifican por números después de la letra R, que significa "refrigerante". El sistema de identificación ha sido estandarizado por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers). Es necesario estar familiarizado con los números, así como con los nombres de los refrigerantes. En la tabla II, aparecen los refrigerantes más comunes. Cabe mencionar que las mezclas zeotrópicas son refrigerantes transitorios que se desarrollaron para sustituir al R-22 y al R-502, aunque algunas de estas, van a permanecer como sustitutos de estos refrigerantes.

**Tabla II. Refrigerantes y su fórmula química.**

No.	NOMBRE QUÍMICO	FÓRMULA QUÍMICA
<b>Serie Metano</b>		
10	Tetraclorometano (tetracloruro de carbono)	CCl <sub>4</sub>
11	Tricloromonofluorometano	CCl <sub>3</sub> F
12	Diclorodifluorometano	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
13	Clorotrifluorometano	CClF <sub>3</sub>
20	Triclorometano (cloroformo)	CHCl <sub>3</sub>
21	Diclorofluorometano	CHCl <sub>2</sub> F
22	Clorodifluorometano	CHClF <sub>2</sub>
23	Trifluorometano	CHF <sub>3</sub>
30	Diclorometano (cloruro de metileno)	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
40	Clorometano (cloruro de metilo)	CH <sub>3</sub> Cl
50	Metano	CH <sub>4</sub>
<b>Serie Etano</b>		
110	Hexacloroetano	CCl <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>
113	1,1, 2-triclorotrifluoroetano	

115	Cloropentafluoroetano	CCIF2CF3
123	2,2-Dicloro - 1, 1, 1-Trifluoroetano	CHCl2CF3
134a	1, 1,1, 2-Tetrafluoroetano	CH2FCF3
141b	1,1-Dicloro-1-fluoroetano	CH3CCl2F
150a	1,1-Dicloroetano	CH3CHCl2
152a	1,1-Difluoroetano	CH3CHF2
160	Cloroetano (cloruro de etilo)	CH3CH2Cl
170	Etano	CH3CH3

### Hidrocarburos

290	Propano	CH3CH2CH3
600	Butano	CH3CH2CH2CH3
600a	2-Metilpropano (isobutano)	CH(CH3)3

### Compuestos Inorgánicos

702	Hidrógeno H2	
704	Helio	He
717	Amoníaco	NH3
718	Agua	H2O
720	Neón	Ne
728	Nitrógeno	N2
732	Oxígeno	O2
744	Bióxido de Carbono	CO2
764	Bióxido de Azufre	SO2

### Mezclas Zeotrópicas

400	R-12/114 (60/40)
401A	R-22/152a/124 (53/13/34)
401B	R-22/152a/124 (61/11/28)
402A	R-22/125/290 (38/60/2)
402B	R-22/125/290 (60/38/2)
404A	R-125/143a/134a (44/52/4)
407A	R-32/125/134a (20/40/40)

407B	R-32/125/134A (10/70/20)
407C	R-32/125/134a (23/25/52)
408A	R-125/143a/22 (7/46/47)
409A	R-22/124/142b (60/25/15)
410A	R-32/125 (50/50)

#### **Mezclas Azeotrópicas**

500	R-12/152a (73.8/26.2)
502	R22/115 (48.8/51.2)
503	R-223/13 (40.1/59.9)
507	R-125/143a (50/50)

Fuente: ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers).

### **1.3.5 Requerimientos de los refrigerantes**

Para que un líquido pueda ser utilizado como refrigerante, debe reunir ciertas propiedades, tanto termodinámicas como físicas. El refrigerante ideal, sería aquél que fuera capaz de descargar en el condensador todo el calor que absorba del evaporador, la línea de succión y el compresor.

Desafortunadamente, todos los refrigerantes regresan al evaporador arrastrando una cierta porción de calor, reduciendo la capacidad del refrigerante para absorber calor en el lado de baja.

Para comprender el funcionamiento de los refrigerantes, es básica la relación entre presión y temperatura; cómo absorbe, transporta y rechaza calor un refrigerante, al cambiar de líquido a vapor y volver a líquido, es igualmente

importante entenderlo. Estas son las propiedades en que los refrigerantes difieren de uno a otro. Un refrigerante ideal deberá reunir todas las propiedades siguientes:

### 1.3.6 Propiedades Termodinámicas

- **Presión** - Debe operar con presiones positivas.
- **Temperatura** - Debe tener una temperatura crítica por arriba de la temperatura de condensación. Debe tener una temperatura de congelación por debajo de la temperatura del evaporador. Debe tener una temperatura de ebullición baja.
- **Volumen** - Debe tener un valor bajo de volumen específico en fase vapor, y un valor alto de volumen en fase líquida.
- **Entalpía** - Debe tener un valor alto de calor latente de vaporización.
- **Densidad** - La mayoría de los refrigerantes en estado líquido, tienen una densidad más alta que el agua. La densidad de cada refrigerante varía con la temperatura. Puesto que por regla, los líquidos se expanden al calentarse, su densidad a altas temperaturas es menor que a bajas temperaturas.
- **Entropía** - La entropía es una relación que describe la energía relativa en el refrigerante, y se determina dividiendo la cantidad de calor en el líquido o en el vapor, por su temperatura absoluta.

### **1.3.7 Propiedades Físicas y Químicas**

- No debe ser tóxico ni venenoso.
- No debe ser explosivo ni inflamable.
- No debe tener efecto sobre otros materiales.
- Fácil de detectar cuando se fuga.
- Debe ser miscible con el aceite.
- No debe reaccionar con la humedad.
- Debe ser un compuesto estable.

Fácilmente se comprende que ninguno de los refrigerantes conocidos reúne todas estas cualidades; es decir, no existe un refrigerante ideal, por lo que con base a un balance de ventajas, deberá seleccionarse el que reúna el mayor número de estas características de acuerdo al diseño requerido.

### **1.3.8 Refrigerantes y la capa de ozono**

Una capa fina en la atmósfera alta de la Tierra contiene ozono. La capa de ozono actúa como filtro contra los rayos ultravioletas del sol, esta protege a los seres humanos, la vida silvestre, las plantas y la vida marina de los efectos dañinos de estos rayos.

Los científicos han encontrado que la ventilación de los clorofluorocarbonos (CFCs) de algunos refrigerantes puede dañar la capa de ozono. Los CFCs destruyen la capa protectora de la atmósfera de la Tierra. Este conocimiento ha llevado al desarrollo de lo concerniente a las regulaciones de EPA (Agencia de Protección Ambiental). Estas regulaciones identifican los

tipos de refrigerantes que pueden ser producidos y como pueden ser utilizados; la mayoría de los refrigerantes comúnmente utilizados hoy día están clasificados en cuatro áreas:

- Clorofluorocarbonos (CFCs).
- Hidroclorofluorocarbonos (HCFCs).
- Hidrofluorocarbonos (HFCs).
- Mezclas de refrigerantes (azeotrópicas y zeotrópicas).

### **1.3.9. Identificación de los refrigerantes por números y código de colores**

Los refrigerantes son identificados por números. Le sigue la letra R, que significa refrigerante. Este sistema de identificación ha sido implementado por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE). El técnico se familiarizará con los números de los refrigerantes así como con su nombre.

Los cilindros de los refrigerantes también están codificados por colores para permitir la fácil identificación del refrigerante que ellos contienen. Esto ayuda a prevenir la mezcla accidental de los refrigerantes en los sistemas. El código de colores no es un requerimiento para todos los fabricantes. Los cilindros para recuperar refrigerante son color gris con el extremo amarillo.



### **1.3.9.1 Refrigerantes CFC**

Los primeros refrigerantes a base de halógeno y fueron desarrollados sesenta años atrás. Estos refrigerantes estaban compuestos de cloro, flúor y carbón, y fueron llamados clorofluorocarbonos (CFCs).

Estos refrigerantes son bajos en toxicidad, no corrosivos y compatibles con otros materiales. Estos son no flamables o explosivos, pero en cantidades medidas no pueden ventilarse donde hay flamas o elementos eléctricos. El calor puede causar que se rompa en sus elementos, causando daño al tejido humano; estos son dañinos al sistema respiratorio.

Los refrigerantes comunes CFCs incluyen R-11, R-12, R-113, R-114, R-115, R-500, R-502 y R-503. R-500, R-502 y R-503 son mezclas azeotrópicas pero son clasificados como CFCs por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE).

Los CFCs se cree que son los mayores causantes del deterioro del ozono. Por acuerdo internacional, no se fabrican desde 1995, sin embargo, son utilizados en equipos residenciales. Debido a leyes que prohíben la ventilación de los CFCs a la atmósfera, nuevos procedimientos y equipos han sido desarrollados para recuperar, reciclar y restituir los refrigerantes que contienen CFCs.

### **1.3.9.2 Refrigerantes HCFC**

Los hidrocarburos (HCFCs) son compuestos moleculares de metano o etano en combinación con halógeno, esto hace una nueva molécula considerada parcialmente halógena. Los HCFCs tienen un período de vida más corto y causan menos daño a la capa de ozono que los completamente halogenados CFCs; pero tienen un potencial de reducción del calentamiento global. Los HCFCs R-22 y R-123 son considerados para ser refrigerantes interinos, que serán utilizados hasta que haya reemplazos disponibles. La EPA requiere el desfase de los HCFCs para el año 2030.

### **1.3.9.3 Refrigerantes HFC**

Los hidrocarburos (HFCs) incluyen refrigerantes como R-134a y R-23. Estos son diferentes de los clorofluorocarbonos (CFC) ya que estos contienen uno o más átomos de hidrógeno y no contienen átomos de cloro. El R-134a es típicamente usado en sistemas nuevos que han sido diseñados para el uso de este. Sin embargo, el concepto que el R-134a es un reemplazo fácil para el R-12 no es correcto. Cuando se usa R-134a en un sistema retroalimentado, numerosas cosas deben ser consideradas; la retroalimentación es poner al día un sistema con los nuevos estándares. El R-134a no se mezcla con aceites minerales o alquibencenos. El aceite sintético debe ser usado para la lubricación de los sistemas con hidrofluorcarbonos (HFC); los aceites existentes deben ser reemplazados. El uso de unidades propias de recuperación es necesario para la remoción del R-12. Hay otra cantidad de factores que deben ser considerados; estos incluyen el desempeño, cambio en componentes, material existente y compatibilidad con el aceite lubricante.

#### **1.3.9.4 Mezclas de refrigerantes (azeotrópica-zeotrópica)**

Otra categoría más reciente de los refrigerantes es la de mezclas, comúnmente conocidas como azeotrópicas y zeotrópicas. El uso de refrigerantes mezclas está incrementándose. Las mezclas azeotrópicas no cambian o se separan en composición cuando se usan en sistemas de refrigeración, los refrigerantes zeotrópicos son también mezclas consistentes de varios refrigerantes. Cuando se emplean en un sistema de refrigeración, su composición volumétrica y temperatura de saturación cambian.

#### **1.3.10 Requerimientos para refrigerantes**

Un fluido como refrigerante debe tener ciertas propiedades:

- Este debe seguir los estándares establecidos por EPA.
- No debe ser tóxico (si se inhala o cae sobre la piel) y ni venenoso.
- No debe ser explosivo.
- No puede ser corrosivo.
- Debe ser no flamable.
- Escapes fáciles de detectar y localizar.
- Deberá operar a una baja presión (teniendo un bajo punto de ebullición).
- Deberá ser un gas estable.
- Debe ser compatible con los aceites lubricantes.
- Poseer un alto volumen por libra de control refrigerante.
- Tener alto calor latente de evaporación por libra para producir buen efecto de enfriamiento por libra bombeada.

- Tener un bajo volumen de vapor por libra. Esto puede reducir el desplazamiento del compresor requerido.
- Poseer una pequeña diferencia posible entre la presión de evaporación y la presión de condensación. Esto aumenta la eficiencia de bombeo.

La presión normal en un sistema de refrigeración deberá mantenerse lo más cercano posible a la presión atmosférica. Una diferencia excesiva podrá causar escapes y sobre trabajo. La comparación estándar de los refrigerantes, usados en la industria de la refrigeración, está basada en las temperaturas específicas de evaporación y condensación. La temperatura de evaporación es de  $-15^{\circ}\text{C}$  ( $5^{\circ}\text{F}$ ) y la temperatura de condensación es de  $30^{\circ}\text{C}$  ( $86^{\circ}\text{F}$ ).

### **1.3.11 Agrupación y clasificación de los refrigerantes**

Los refrigerantes han sido catalogados por varias organizaciones. Estas han llegado a las mismas conclusiones a niveles de toxicidad y flamabilidad de los refrigerantes; toxicidad es la habilidad del refrigerante a ser dañino o fatal a su exposición crónica, esta exposición puede ser por contacto, inhalación o ingestión.

Algunas de estas organizaciones son: ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), HMIS (Hazardous Material Identification System), NFPA (National Fire Protection Association), NRSC (The National Refrigeration Safety Code) y NBFU (National Board of Fire Underwriters).

La clasificación de toxicidad de ASHRAE de los refrigerantes está indicada por la asignación de una letra, A o B. Los refrigerantes de clasificación A son aquellos en los que no ha sido identificado un nivel de toxicidad, los refrigerantes de clasificación B tienen un nivel de toxicidad que ha sido identificado. El estándar usado para determinar esta concentración es por debajo o por encima de 400 ppm. La clasificación de flamabilidad es indicada por números: 1 (no flamabilidad identificada), 2 (baja flamabilidad) o 3 (alta flamabilidad).

La clasificación general de la ASHRAE en base a estos criterios es de tres grupos:

1. No tóxicos, no explosivos y no flamables.
2. Semi-tóxicos, semi-explosivos y semi-flamables.
3. Altamente tóxicos, altamente explosivos y altamente flamables.

#### **1.3.11.1 Refrigerantes del grupo A**

Los refrigerantes de este grupo pueden ser utilizados en grandes cantidades en cualquier instalación. Las cantidades permitidas están especificadas por La “American Standard Safety Code for Mechanical Refrigeration”. Las cantidades son:

- Hasta 20 libras en cocinas de hospitales.
- Hasta 20 libras en sistemas residenciales de acondicionamiento de aire.
- Hasta 50 libras para uso residencial.
- Hasta 50 libras en montajes públicos.

Algunos refrigerantes en el grupo A son:

- R-11 Triclorofluorometano ( $\text{CCL}_3\text{F}$ ).
- R-12 Diclorodifluorometano ( $\text{CCL}_2\text{F}_2$ ).
- R-22 Clorodifluorometano ( $\text{CHClF}_2$ ).
- R-134A Tetrafluoroetano ( $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ ).
- R-500 73.8% R-12 y 26.2% R-152A.
- R-502 48% R-22 y 51.2% R-115
- R-507A 50% R-125 Y 50% r-134A.
- R-744 Dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ .

Los clorofluorocarbonos (CFC) en el grupo A están siendo reemplazados por los fabricantes. Los refrigerantes alternativos están siendo utilizados, de acuerdo con las regulaciones de EPA, concerniente al efecto de los CFCs sobre la capa de ozono de la Tierra.

### **1.3.11.2 Refrigerantes del grupo B**

El grupo B de refrigerantes es tóxico, son venenosos o letales. La exposición severa o crónica por contacto, inhalación o ingestión debe ser evitada. Algunos de los refrigerantes en este grupo incluyen: R-40 Cloruro de metilo ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), R-123 Diclorotrifluoroetano ( $\text{CHCl}_2\text{CF}_3$ ), R-717 Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y R-764 Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). El R-717 fue uno de los primeros refrigerantes utilizados. Sin embargo, con excepción de los refrigeradores de absorción, este es usado sólo en aplicaciones industriales grandes. Durante algún tiempo, el R-764 fue el refrigerante más usado en refrigeradores domésticos. El R-764 y el R-40 son raramente usados hoy día; sin embargo,

algunas unidades cargadas con dióxido de azufre (R-764) y cloruro de metilo (R-40) aún se mantienen en uso.

### **1.3.11.3 Refrigerantes combustibles**

Ciertos refrigerantes pueden formar una mezcla flamable cuando se mezclan con aire. La clasificación de seguridad de la ASHRAE es 2 (baja flamabilidad) o 3 (alta flamabilidad). Algunos de estos refrigerantes en este grupo son: R-30 Cloruro de metileno ( $\text{CH}_2\text{CL}_2$ )- grupo 2, R-40 Cloruro de metilo ( $\text{CH}_3\text{CL}$ )- grupo 2, R-50 Metano ( $\text{CH}_4$ )- grupo 3, R-170 Etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )- grupo 3, R-290 Propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )- grupo 3, R-406A Mezcla zeotrópica (R-22, R-600a, R-142b)- grupo 2, R-600 Butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )- grupo 3 y R-717 Amoníaco ( $\text{NH}_3$ )- grupo 2.

### **1.3.11.4 Refrigerantes para desperdicio**

Un refrigerante para desperdicio enfría una sustancia, y luego es ventilado a la atmósfera, el refrigerante es usado una sola vez. No se recupera y se condensa como en los sistemas por compresión usual. Los sistemas que usan refrigerantes para desperdicio son llamados como refrigeración química o de ciclo abierto de refrigeración, los refrigerantes de este tipo tienen una temperatura de bajo punto de ebullición. Los refrigerantes más comunes para desperdicio son: Nitrógeno líquido (R-728) que tiene una temperatura de ebullición a presión atmosférica de  $-320^\circ\text{F}$  ( $-195.55^\circ\text{C}$ ), Helio líquido (R-704) cuya temperatura de ebullición a presión atmosférica es de  $-452^\circ\text{F}$  ( $-268.88^\circ\text{C}$ )

y Dióxido de carbono (R-744) el cual tiene una temperatura tanto en estado sólido como líquido, y ebullición a presión atmosférica de  $-109^{\circ}\text{F}$  ( $-78.33^{\circ}\text{C}$ ).

#### **1.3.11.5 Agua como refrigerante**

El agua nunca es usada en ciclos de compresión en instalaciones de refrigeración. Sin embargo, es el refrigerante para los sistemas de acondicionamiento de aire por medio de inyectores de vapor. A presión atmosférica el agua hierve a  $212^{\circ}\text{F}$  ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Una libra de agua absorbe 970 Btu (0.284 KWh) al cambiar de líquido a vapor a  $212^{\circ}\text{F}$  ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Los rangos de temperatura usuales donde se usa agua como refrigerante están por encima de  $45^{\circ}\text{F}$  ( $7.22^{\circ}\text{C}$ ). El agua, cambiando de líquido a vapor absorbe una cantidad considerable de calor. A  $45^{\circ}\text{F}$  ( $7.22^{\circ}\text{C}$ ), una libra de agua se convierte en 2040 pies<sup>3</sup> (57.81 m<sup>3</sup>) de vapor. El agua que se evapora a 29.6"Hg produce una temperatura de refrigeración de  $45^{\circ}\text{F}$  ( $7.22^{\circ}\text{C}$ ).

#### **1.3.11.6 Congelantes de alimentos**

Cuando se procesan alimentos congelados, es mejor completar el proceso de congelación en el tiempo más corto posible. Muchas compañías de alimentos congelados sumergen los alimentos en refrigerante líquido para congelarlos, estos son altos en pureza y son designados como congelantes de alimentos. Este método es muy rápido; el calor se transfiere del alimento al líquido más rápido que si fuera rodeado por aire a la misma temperatura. El refrigerante usado de esta manera no afecta el alimento.

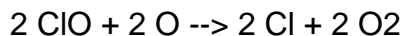
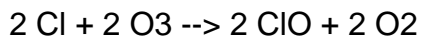
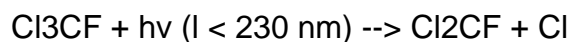


### 1.3.11.7 Fluidos criogénicos

El uso de fluidos criogénicos se está volviendo popular en la industria moderna. Los rangos en temperatura de estos fluidos van desde los  $-250^{\circ}\text{F}$  ( $156.67^{\circ}\text{C}$ ) hasta  $-459.69^{\circ}\text{F}$  ( $-273.2^{\circ}\text{C}$ ), y son llamados rangos criogénicos. Tales rangos de temperaturas pueden ser fácilmente alcanzados por la evaporación de fluidos criogénicos. Fluidos criogénicos comunes son: R-702 Hidrógeno, R-704 Helio, R-720 Neón, R-728 Nitrógeno, R-729 Aire, R-732 Oxígeno y R-740 Argón.

### 1.3.12 Impacto de los refrigerantes en el ambiente

Está probado que la capa de ozono de la atmósfera actúa a modo de escudo frente a la radiación ultravioleta procedente del sol. También es una realidad la reducción progresiva de la concentración de ozono, especialmente en determinadas zonas, motivada principalmente por la utilización de compuestos CFC (Clorofluorocarbonos) presentes tanto en aerosoles como en refrigerantes. El cloro de los CFC actúa como catalizador de las reacciones de destrucción del ozono (ciclo cloro catalítico del ozono), bajo la acción de la energía de la radiación solar, transformando dos moléculas de ozono en tres de oxígeno y dando lugar a una reacción en cadena.



Además, la presencia de estos compuestos en la atmósfera también contribuye al conocido efecto invernadero. Dada la gravedad de este problema, las diferentes naciones comenzaron a plantear restricciones legales a la producción y comercialización de estas sustancias. Desde la firma del Protocolo de Montreal, en 1989, en el que se adoptaron compromisos para reducir en un 50% las emisiones de gases CFC, hasta el Protocolo de Kyoto, de 1997, que propuso reducir a cero las emisiones de gases invernadero, se han ido adoptando compromisos cada vez más restrictivos a la utilización de estos compuestos.

Es evidente que, en el caso que nos ocupa, el R- 12 es un magnífico refrigerante; ahora bien, su poder de degradación y destrucción del ozono atmosférico le ha hecho ser sustituido, por el R-134a, de similar eficiencia pero mucho menos agresivo con el ambiente. No obstante, todos los HFC plantean problemas de efecto invernadero y han sido incluidos en el Protocolo de Kyoto, de modo que su utilización se encuentra también sujeta a restricciones.

La sustitución de los CFC por los HCFC (Hidroclorofluorocarbonos) y HFC supone una reducción drástica de los efectos negativos sobre el medio ambiente, en términos de degradación de la capa de ozono y de efecto invernadero.

## **2. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN NO CONVENCIONAL**

### **2.1 Refrigeración magnética**

#### **2.1.1 Definición.**

La refrigeración magnética aprovecha el efecto magnetocalórico (MCE), para reemplazar los procesos de compresión y expansión de los sistemas convencionales por procesos de magnetización y desmagnetización de un material magnetocalórico.

A diferencia del ciclo de vapor, en los sistemas de refrigeración magnética el refrigerante (material magnetocalórico) es un sólido, y no se puede bombear a través de intercambiadores de calor. Por lo tanto; se emplea un fluido que transfiere la energía entre el refrigerante magnético y los depósitos.

#### **2.1.2 Termodinámica del efecto magnetocalórico**

Los sistemas de refrigeración aprovechan el cambio en la entropía de un material debido a la variación de parámetros externos, como la presión o la magnetización, para producir frío. Estos fenómenos son conocidos como efecto elastocalórico (ECE) y efecto magnetocalórico (MCE), respectivamente.

Los sistemas convencionales transfieren calor, esto se debe al cambio en la presión ejercida sobre un material en un proceso donde la intensidad

magnética permanece constante (un campo magnético nulo es un caso particular). Los sistemas de refrigeración magnética emplean un principio inverso. En estos sistemas, la transferencia de calor se produce cuando cambia el campo magnético aplicado sobre el material, en un proceso en el que la presión permanece constante.

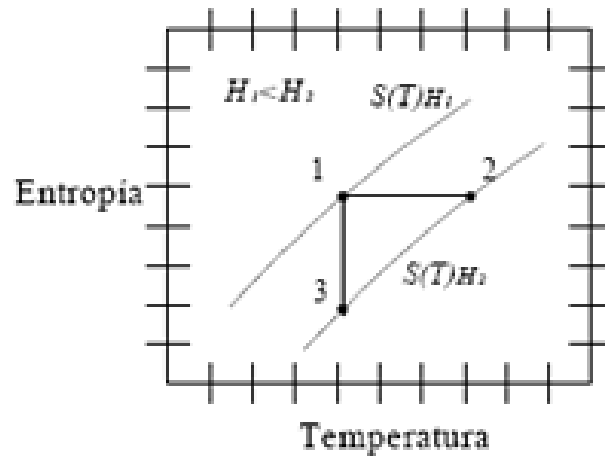
Durante un proceso adiabático podrían cambiar simultáneamente la presión y el campo magnético externo, produciendo el efecto magneto-elastocalórico (MECE). Actualmente no existen estudios sobre éste fenómeno y en las aplicaciones de la refrigeración magnética lo común es evitar al máximo los cambios de presión para despreciar el ECE y utilizar sólo el MCE.

Cuando se aplica un campo magnético externo a un material ferromagnético, a una temperatura cercana a su temperatura de transformación de fase magnética (temperatura de Curie), los momentos magnéticos de los electrones desapareados del nivel 3d (para hierro, níquel y cobalto) o del nivel 4f (para los lantánidos) se alinean paralelos a la dirección de la inducción del campo magnético aplicado. Esta alineación disminuye la entropía del material. Cuando se retira el campo magnético aplicado, los momentos magnéticos de los electrones se orientan libremente aumentando la entropía.

La magnetización y desmagnetización del material ferromagnético, a temperaturas cercanas a la temperatura de transformación magnética, favorecen el carácter reversible del proceso debido a los continuos cambios en el orden magnético. El MCE se manifiesta en dos formas; cuando el cambio en el campo magnético se produce en un proceso adiabático aparece como un cambio de temperatura isoentrópico, de lo contrario (si no es adiabático) se manifiesta como un cambio de entropía isotérmico.

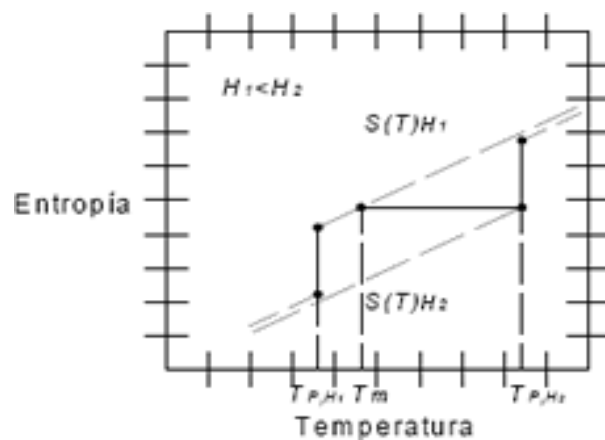
Existen dos tipos de MCE en los materiales ferromagnéticos, el MCE convencional y el MCE gigante (Figuras 2 y 3 respectivamente).

**Figura 2. MCE en transformaciones de segundo orden. Curvas isomagnéticas de la entropía en función de la temperatura.**



Fuente. Revista Frío Calor publicación No. 388, enero de 2007.

**Figura 3. MCE en transformaciones de primer orden. Curvas isomagnéticas de la entropía en función de la temperatura.**



Fuente. Revista Frío Calor publicación No. 388, Enero de 2007.

En el MCE convencional, la aplicación de un campo magnético externo en un proceso adiabático disminuye la entropía magnética. Como el proceso es adiabático aumenta la entropía de red, la cual está asociada a la distribución espacial de los átomos en la red cristalina (retícula), para mantener la entropía del sistema constante. El aumento de la entropía de red aumenta la temperatura del material (proceso 1-2 de la figura 2).

Cuando el material magnético intercambia calor con un medio externo, durante la aplicación del campo magnético externo, la temperatura permanece constante mientras la entropía cambia (proceso 1-3 de la figura 2). La principal característica de las transformaciones de primer orden es la discontinuidad en la entropía (Figura 3). Para cada curva isomagnética de la entropía en función de la temperatura, existe una temperatura a la cual se produce un cambio en la entropía. La combinación de esta discontinuidad con el cambio en la magnitud de la intensidad del campo magnético produce un mayor cambio de entropía magnética que el observado en las de segundo orden.

### 2.1.3 Principios termodinámicos

Los sistemas de refrigeración magnética, aprovechan el cambio en la entropía de un material, debido al cambio isobárico en la intensidad magnética, para producir frío. La entropía del material depende de la temperatura y la intensidad magnética. Por tanto, el diferencial total de la entropía se puede calcular con la ecuación 1.

$$dS(T, H) = \left( \frac{\partial S(T, H)}{\partial T} \right)_H dT + \left( \frac{\partial S(T, H)}{\partial H} \right)_T dH \quad (1)$$

Esta ecuación se puede obtener a partir de la segunda ley de la termodinámica y deduciendo las ecuaciones de Maxwell asociadas a la entalpía y la energía libre de Gibbs.

Los procesos de magnetización y desmagnetización se consideran reversibles y el cambio en el volumen del material magnetocalórico despreciable. Esto se puede considerar cuando la histéresis del cambio del orden magnético es despreciable, como en el gadolinio. El cambio de energía interna, la entalpía y la energía libre de Gibbs se expresan, respectivamente, con las ecuaciones 2, 3 y 4. Es importante resaltar que tanto la entalpía como la intensidad magnética tienen el mismo símbolo ( $H$ ), para evitar la confusión en esta investigación, la entalpía se representa como  $H^*$ , mientras para la intensidad magnética se emplea el símbolo  $H$ .

$$dU(S, M) = TdS + \mu_0 V H dM$$

$$H^*(S, H) = U - \mu_0 V H M$$

$$G(T, H) = U - TS - \mu_0 V H M$$

Ecuaciones (2), (3) y (4); respectivamente.

Los diferenciales de la entalpía y la energía libre de Gibbs se calculan empleando el diferencial de la energía interna.

$$dH^*(S, H) = TdS - \mu_0 V M dH$$

$$dG(T, H) = -SdT - \mu_0 V M dH$$

Ecuaciones 5 y 6; respectivamente

La energía libre de Gibbs depende de la temperatura y la intensidad del campo magnético. Por lo tanto, su diferencial total se calcula con la ecuación 7.

$$dG(T,H) = \left( \frac{\partial G(T,H)}{\partial T} \right)_H dT + \left( \frac{\partial G(T,H)}{\partial H} \right)_T dH \quad 7$$

Al considerar la energía libre de Gibbs una función continua, sus derivadas parciales mixtas son iguales y se obtiene la ecuación de Maxwell que relaciona la entropía con la magnetización (ecuación 8).

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial G(T,H)}{\partial T} \right)_H &= -S & (8) \\ \left( \frac{\partial G(T,H)}{\partial H} \right)_T &= \mu_o VM & (9) \\ \left[ \frac{\partial S(T,H)}{\partial H} \right]_T &= \left[ \frac{\partial (\mu_o VM)}{\partial T} \right]_H & (10) \end{aligned}$$

Ecuación 8, 9 y 10; respectivamente

Al aplicar la segunda ley de la termodinámica para procesos reversibles y reemplazando la ecuación anterior, en el diferencial total de la entropía se obtiene:

$$dS(T,H) = \frac{C(T,H)}{T} dT + \left( \frac{\partial (\mu_o VM(T,H))}{\partial T} \right)_H dH \quad 11$$



La ecuación 11 permite hallar el cambio de entropía isotérmico. Sin embargo, no permite calcular el cambio de temperatura adiabático de forma explícita. Este cálculo se obtiene teniendo en cuenta que la entropía total del material equivale a la suma de las entropías magnética, electrónica y de retícula (SM, SE, SL, respectivamente).

Un análisis riguroso señala que, a presión constante, estas entropías dependen de la temperatura y el campo magnético. Sin embargo, en el estudio del efecto magnetocalórico, se considera que la entropía magnética depende del campo magnético aplicado, mientras que las entropías electrónica y de retícula son independientes. Por tanto, al magnetizar o desmagnetizar el material la entropía magnética cambia mientras las entropías electrónica y de retícula permanecen constantes.

Cuando el proceso no es adiabático el cambio en la entropía total es igual al cambio en la entropía magnética. Cuando el proceso es adiabático, la entropía total permanece constante (ecuación 12).

$$S(T)_{H,P} = \left[ S(T \pm \Delta T_{ad}, (T)_{\Delta H})_{H,P} \right] \quad 12$$

Por tanto, el cambio en la entropía magnética induce un cambio en las entropías de retícula y electrónica, de igual magnitud pero de sentido opuesto. El cambio de entropía magnética se puede calcular con las ecuaciones 13 y 14.

$$\Delta S_M(T)_{P,\Delta H} = \left[ S_M(T)_{H_F} - S_M(T)_{H_I} \right]_P$$

$$\Delta S_M(T)_{P,\Delta H} = \int_{T_1}^T \left( \frac{[C(T)_{H_F} - C(T)_{H_I}]_P}{T} \right) dT$$

Ecuación, 13 y 14

De la segunda ley de la termodinámica, considerando la capacidad de calor en función de la temperatura y el campo magnético como una función continua, y reemplazando la ecuación 14 en la 12, se obtienen las ecuaciones para el cambio de temperatura adiabático durante la desmagnetización y magnetización (ecuaciones 15 y 16, respectivamente).

$$\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H,P} = -T \left\{ \exp \left[ -\frac{\Delta S_M(T)_{\Delta H,P}}{C(T_O)_{H_1,P}} \right] - 1 \right\}$$

$$\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H,P} = T \left\{ \exp \left[ -\frac{\Delta S_M(T)_{\Delta H,P}}{C(T_O)_{H_2,P}} \right] - 1 \right\}$$

Ecuación, 15 y 16

#### 2.1.4 Funcionamiento

En la refrigeración magnética se tiene un procedimiento para enfriar por debajo de la temperatura ambiente. Las etapas se esquematizan en la figura 4. La parte superior izquierda representa el material que contiene átomos con momento magnético, representados por flechas. Cada flecha es un imán

atómico con polos N-S que está a temperatura ambiente (representada por el color azul celeste) y apuntando en dirección aleatoria.

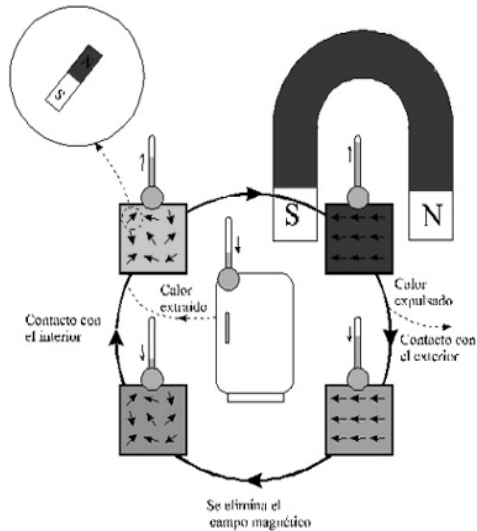
Primero se aplica un campo magnético, simbolizado en la segunda etapa por un imán de herradura: los momentos magnéticos se alinean con el campo externo y el material se calienta (simbolizado por el color rojo). A través del contacto térmico con el exterior y manteniendo el campo externo, el material se enfría hasta la temperatura ambiente (tercera etapa, en color verde).

Después se suprime repentinamente el campo: los momentos se desalinean y el material se enfría. Se alcanza una temperatura más baja que la temperatura ambiente (cuarta etapa, en color azul marino).

El material se pone en contacto térmico con el objeto a enfriar, simbolizado por un refrigerador. El objeto se enfría y el material se calienta hasta que ambos alcanzan una temperatura de equilibrio, inferior a la que tenía el objeto. El proceso puede repetirse y el resultado es que cada ciclo extrae una cantidad de calor del refrigerador, cediendo calor al exterior, de modo que todas las temperaturas excepto la verde van bajando.

Al final se alcanza un valor estable en el que la capacidad de refrigeración del material iguala las fugas de calor desde el exterior hacia el objeto. Las temperaturas del material en cada etapa están simbolizadas por los termómetros de mercurio grises.

**Figura 4. Ciclo de refrigeración magnética**



Fuente: <http://www.unizar.es>

### **2.1.5 Materiales magnetocalóricos**

Para aplicar el efecto magnetocalórico con alto rendimiento, se necesitan propiedades óptimas para los imanes y para los materiales magnetocalóricos. Para ello, se han de tomar en consideración diferentes familias que presentan un elevado GMCE.

El gadolinio puro puede considerarse como la sustancia ideal para la refrigeración magnética, al igual que el gas ideal lo es para la refrigeración convencional. Pero del mismo modo que los sistemas convencionales no funcionan con gases ideales, los sistemas de refrigeración magnéticos funcionan mejor con aleaciones diseñadas especialmente. Una ventaja del gadolinio puro es que sus propiedades físicas pueden describirse, mediante las

leyes físicas, tales como la función de Brillouin para la magnetización o la función de Debye para el calor específico, esto permite el cálculo numérico para los diagramas magneto-termodinámicos de alta precisión.

Gshneidner y Pecharsky han publicado la siguiente lista de prometedoras categorías de materiales magnetocalóricos para aplicación en sistemas de refrigeración magnética:

- Compuestos íter metálicos binarios y ternarios.
- Compuestos de gadolinio-silicio-germanio.
- Manganitas
- Compuestos basados en lantano-hierro.
- Arseniuro de antimonio manganeso.
- Fosfuros de hierro-manganeso-arsénico.
- Aleaciones amorfas cerámicas.

En la actualidad determinadas sustancias tóxicas en estos compuestos se encuentran en vía de sustitución por elementos más aceptables.

## **2.2 Refrigeración por absorción**

### **2.2.1 Principio y antecedentes**

El ciclo termodinámico de enfriamiento por absorción, al igual que el de compresión, se basa en la necesidad del fluido usado como refrigerante de obtener calor del líquido a enfriar, para poder pasar del estado líquido al de

vapor al reducirse la presión a la que está sometido. En los equipos de refrigeración, el fluido en estado líquido se encuentra a más alta presión en el condensador y se le hace fluir al evaporador a baja presión donde obtiene de su entorno el calor necesario para poder evaporarse. Este refrigerante en estado vapor se devuelve a alta presión al condensador donde se le sustrae el calor que ha obtenido volviendo al estado líquido para empezar de nuevo el ciclo. Con ello se logra el objetivo de sacar calor de un espacio.

Mientras que en el ciclo de compresión, la circulación del fluido y el efecto de la presión se obtienen con un compresor mecánico, en el ciclo de absorción se logra aportando calor al generador donde el refrigerante está mezclado con otro fluido cuya función es absorber el vapor en la zona de baja presión para poder devolverlo en forma líquida al generador.

El ciclo de absorción no es un descubrimiento reciente. Sus antecedentes pueden situarse en 1755, cuando el escocés William Cullen consiguió obtener una pequeña cantidad de hielo en una campana donde mantenía una presión reducida. Poco después, en 1777, otro escocés, Gerald Nairne, introducía ácido sulfúrico en la campana de Cullen, de manera que el vapor de agua fuera absorbido por este, dejando espacio para permitir una mayor evaporación de agua. Tiempo después, en 1810, John Leslie coloca dentro de la campana bajo vacío, un recipiente con el agua a evaporar y en el fondo otro recipiente con el ácido sulfúrico, logrando una producción de 3 kg (6.6 lb) de hielo por hora.

Pero es finalmente el francés Ferdinand Carré, quién construye y comercializa la primera máquina de absorción, destinada principalmente a la fabricación de hielo, utilizando amoníaco como refrigerante y agua como absorbente. Esta máquina fue patentada en 1859 y obtuvo el premio de la

Exposición Universal de Londres de 1862. En 1875 el buque Paraguay, equipado con máquinas de Carré, transportó por primera vez carne congelada desde Buenos Aires hasta el puerto de Le Havre.

Hasta los años sesenta del pasado siglo XX, esta técnica se desarrolló especialmente en los Estados Unidos, pero ha evolucionado particularmente en el Japón debido probablemente a la política energética seguida por éste país. Existen versiones de llama directa en las que el calor es aportado por un quemador de combustible y otras por agua caliente, donde se utiliza la energía contenida en agua caliente de origen solar o procedente de equipos de cogeneración u otras fuentes de calor gratuito o residual.

El desarrollo de esta tecnología se ha derivado en dos grandes grupos en función del refrigerante y del tipo de absorbente utilizado.

### **2.2.2 Funcionamiento del ciclo a llama directa de gas con solución de agua y amoníaco**

El fluido utilizado en el ciclo de refrigeración, es una solución de agua y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), siendo el amoníaco el refrigerante y el agua el absorbente. Una importante ventaja es que los agentes utilizados en la solución son totalmente inocuos para el medio ambiente. El ciclo aprovecha la gran afinidad del amoníaco con el agua, utilizado aquel como agente refrigerante dado que es fácilmente absorbido por esta. El  $\text{NH}_3$  es el más tradicional de los refrigerantes inorgánicos conociéndose como tal con la denominación de R-717.

Para explicar el funcionamiento del ciclo de refrigeración, se seguirá el curso de los fluidos y los cambios de estado de la figura 6. Empezando el análisis del ciclo en el generador, situado en el centro de la figura 6, la solución de agua y amoníaco se calienta en su interior por la aportación del quemador de gas, a una presión entre 14 y 24 bar (203.1 psi y 348.1 psi), hasta alcanzar una temperatura de 180°C (356°F) a la que por ebullición se separa, por un lado vapor con un elevada concentración de amoníaco (denominada solución concentrada o fuerte) y por otra una solución líquida con baja concentración de amoníaco, llamada solución diluida o pobre.

El vapor pasa a través del rectificador donde el contenido de agua es separado por condensación al contacto del serpentín por cuyo interior circula solución a una temperatura inferior al punto de rocío del vapor de agua en estas condiciones. El vapor de amoníaco depurado del agua, sale del rectificador a una temperatura aproximada de 75°C (167°F) y a una presión de unos 19 bar (275.6 psi), entrando en el condensador. Éste lo forma una batería de tubos aleteados por cuyo interior circula el amoníaco y por su cara externa el aire de la atmósfera exterior impulsado por un ventilador. El flujo de aire enfría el amoníaco hasta condensarlo y llevarlo al estado líquido, reduciendo su temperatura a unos 43°C (109.4°F).

A continuación, la presión del amoníaco líquido es reducida a unos 12 bar (174 psi) por un primer restrictor y luego enfriado en un intercambiador de calor, para seguidamente reducir aún más la presión a 4 bar (58 psi) a la cual entra en el evaporador donde, debido a la diferencia de presión, se evapora a 2°C (35.6°F) obteniendo el calor latente de vaporización del agua a refrigerar que circula en sentido inverso por el cuerpo del evaporador. Ésta agua que es la

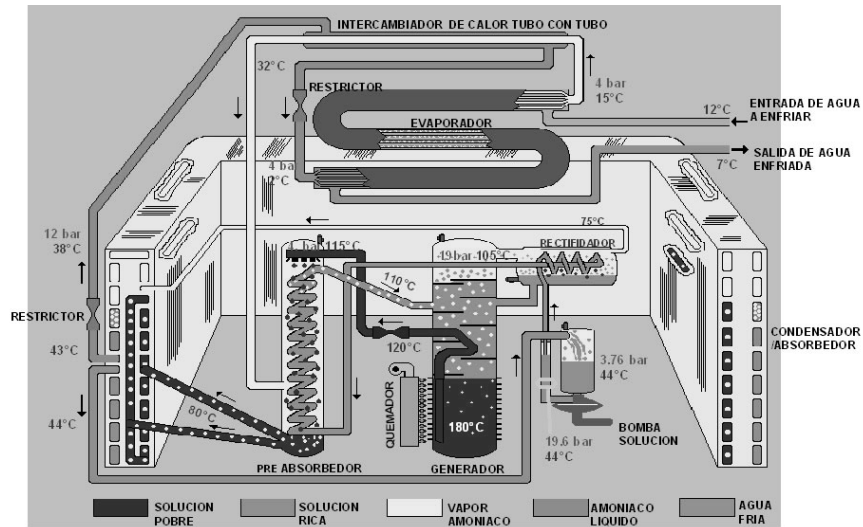


que circula por la instalación del usuario, sale refrigerada a una temperatura nominal de 7°C (44.6°F) entrando a una temperatura de 12°C (53.6°F).

A la salida del evaporador, el vapor de amoníaco circula por el secundario del intercambiador de calor, adquiriendo calor del amoníaco líquido que circula en sentido contrario por el circuito primario, elevando su temperatura a 32°C (89.6°F) En estas condiciones entra en el pre-absorbedor al que llega también la solución diluida o pobre procedente del generador después de atravesar un restrictor para reducir su presión a 4 bar (58 psi), igual a la del vapor de amoníaco. En éste dispositivo, en el cual se halla también un serpentín por el que circula solución rica a una temperatura de 105°C (221°F), el vapor de amoníaco es absorbido por el agua debido a su afinidad y calentado a unos 85°C (185°F) para dirigirse seguidamente al absorbedor. Este último está formado, al igual que el condensador, por una batería de tubos aleteados por cuyo interior circula la solución rica y por el exterior el aire ambiente forzado por el ventilador.

A lo largo del recorrido por el interior del absorbedor, el amoníaco es absorbido por el agua y seguidamente aspirado por la bomba de solución a una temperatura de 44°C (111.2°F). A esta temperatura, es impulsado por la bomba de solución hacia el serpentín del rectificador donde provoca la condensación del agua y al mismo tiempo obtiene calor de ella y del vapor de amoníaco caliente, que procede del generador aumentando su temperatura hasta 105°C (221°F). El próximo paso es circular por el interior del serpentín del pre-absorbedor para volver finalmente al generador donde el ciclo empieza de nuevo.

**Figura 5. Funcionamiento del ciclo a llama directa de gas con solución de agua (H<sub>2</sub>O) y amoníaco (NH<sub>3</sub>).**



Fuente: Absorsistem.

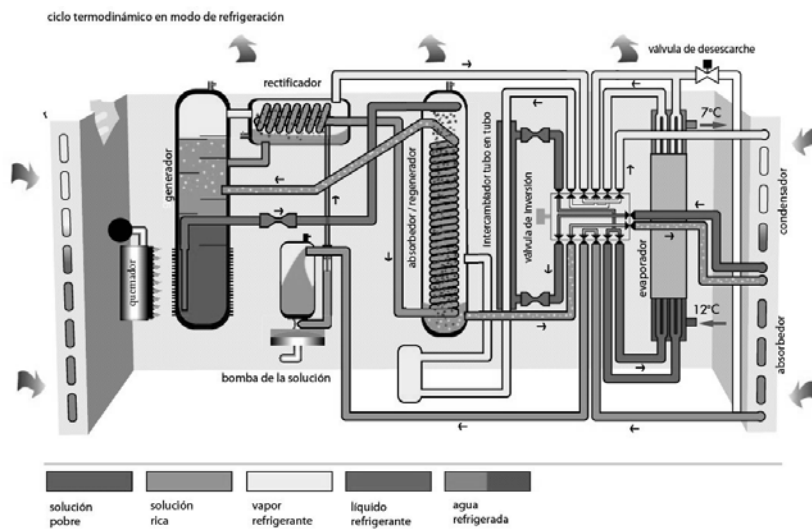
### **2.2.3 Funcionamiento del ciclo de absorción reversible en bombas de calor con solución de amoníaco y agua, a llama directa de gas combustible.**

Este ciclo utiliza como energía combustibles gaseosos (gas natural o GLP) y tiene la peculiaridad de ser el único reversible con tecnología de absorción y que por lo tanto, permite suministrar agua refrigerada para climatización en verano o agua caliente con una elevada eficiencia térmica para calefacción.

Empieza el proceso en el generador, situado en el lado izquierdo de la figura, éste es un recipiente de acero en cuyo interior se encuentra la solución de agua y amoníaco la cual recibe el calor aportado por el quemador de gas alcanzando una presión entre 14 y 24 bar (203.1 y 348.9 psi) y una temperatura

de 180°C (356°F). En estas condiciones, la solución hierve separándose vapor con una elevada concentración de amoníaco llamada solución concentrada o fuerte mientras el resto de la solución permanece en estado líquido pero con baja concentración de amoníaco puesto que la mayor parte de este se ha evaporado, esta es la llamada solución diluida o pobre.

**Figura 6. Funcionamiento del ciclo de absorción reversible en bombas de calor con solución de amoníaco y agua, a llama directa de gas combustible.**



Fuente: Absorsistem.

El vapor pasa a través del rectificador donde el contenido de agua es separado del amoníaco por condensación al contacto del serpentín por cuyo interior circula solución, a una temperatura inferior al punto de rocío del vapor de agua en estas condiciones. El vapor de amoníaco depurado del agua, sale del rectificador a una temperatura aproximada de 75°C (167°F) y a una presión de unos 19 bar (275.6 psi), dirigiéndose hacia la válvula de 14 vías de inversión

de ciclo, que dirigirá el fluido hacia donde corresponda según esté en modo de refrigeración o de calefacción.

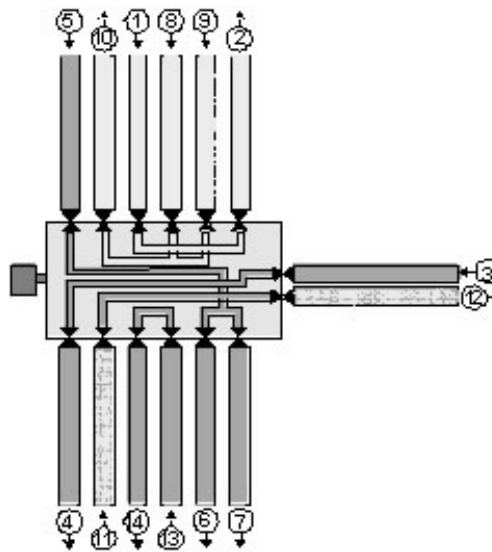
Desde este punto se seguirá el recorrido del amoníaco y la solución en modo de refrigeración, y posteriormente se seguirá el que corresponde en modo de calefacción (figura 9). En modo de refrigeración, el vapor de amoníaco entra en la válvula inversora por la boca 1 (figura 8) y es conducido hacia la boca 2 que lo envía al condensador consistente en una batería de tubo aleteado por cuya superficie circula aire del ambiente exterior forzado por un ventilador situado en la parte superior del espacio delimitado por la batería, lo que provoca el enfriamiento y condensación del amoníaco. A la salida del condensador, el amoníaco líquido accede a la válvula inversora a través de la boca 3 siendo conducido a la boca de salida 4.

Desde este punto, atraviesa por el espacio exterior de un intercambiador de calor, cediendo calor al flujo de vapor de amoníaco que circula en contracorriente por el tubo interno del intercambiador, procedente del evaporador. Una vez efectuado este intercambio térmico, accede de nuevo a la válvula inversora por la boca 5 para salir simultáneamente por las bocas 6 y 7 para entrar en los circuitos del evaporador a través de unos restrictores que reducen su presión a 4 bar (58 psi), lo que provoca su evaporación a una temperatura de 4°C (39.2°F) obteniendo el calor latente de evaporación del líquido que circula por el lado secundario del evaporador y que se distribuirá por la instalación del usuario.

Este líquido, generalmente agua, sale a una temperatura nominal de 7°C (44.6°F) entrando a 12°C (53.6°F). A la salida del evaporador, el amoníaco de nuevo en fase gaseosa, entra en la válvula inversora por las bocas 8 y 9 para

ser conducido a la salida por la boca 10 atravesando el interior del intercambiador, obteniendo el calor cedido por el amoníaco líquido y elevando su temperatura a 32°C (89.6°F).

**Figura 7. Válvula de inversión.**



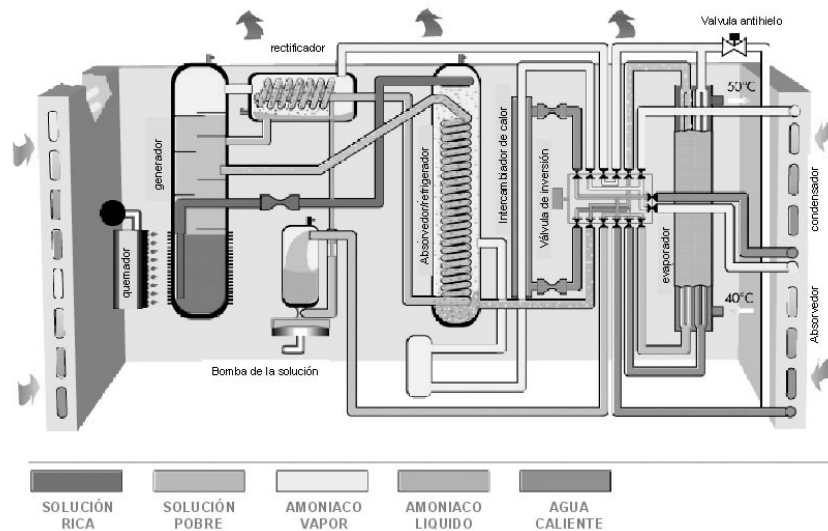
Fuente: Absorsistem.

En estas condiciones el vapor de amoníaco entra en el pre-absorbedor al que llega también la solución diluida o pobre procedente directamente del generador, después de atravesar un restrictor para reducir su presión a 4 bar (58 psi), igual a la del vapor de amoníaco. En éste dispositivo, en el cual se halla también un serpentín por el que circula solución rica a una temperatura de unos 105°C (221°F), el vapor de amoníaco empieza a ser absorbido por el agua y calentado a unos 85°C (185°F) para dirigirse seguidamente hacia la boca 11 de la válvula de inversión, saliendo de ésta por la boca 12 hacia el absorbedor. Este último está formado, al igual que el condensador, por una batería de tubos

aleteados por cuyo interior circula la solución rica y por el exterior el aire ambiente forzado por el ventilador. A lo largo del recorrido por el interior del absorbedor, el amoníaco es absorbido por el agua y el excedente de calor a sustraer para permitir el proceso de absorción, es disipado en el aire exterior.

Estado líquido de la solución rica, esta pasa a través de las bocas 13 y 14 de la válvula de inversión, para ser aspirada por la bomba de solución a una temperatura de 44°C (111.2°F). A esta temperatura, es impulsado por la bomba de solución hacia el serpentín del rectificador donde, provoca la condensación del agua y al mismo tiempo obtiene calor de ella y del vapor de amoníaco caliente que procede del generador aumentando su temperatura hasta 105°C (221°F). El próximo paso es circular por el interior del serpentín del pre-absorbedor, para volver finalmente al generador donde el ciclo empieza de nuevo.

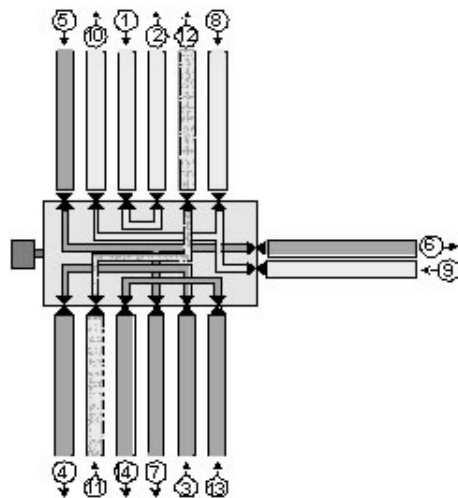
**Figura 8. Funcionamiento del ciclo de absorción en modo de calefacción.**



Fuente: Absorsistem.

El vapor de amoníaco procedente del generador y el rectificador, entra en la válvula inversora por la boca 1 (figura 10) y es conducido hacia la boca 2 que lo envía hacia el intercambiador de calor que antes actuaba como evaporador pero que ahora trabaja como condensador. El agua de la instalación que circula por el lado secundario del intercambiador de calor, enfría el vapor de amoníaco lo que provoca su condensación y el calor adquirido en este intercambio térmico eleva la temperatura del agua para que pueda ser utilizada en el circuito de calefacción del usuario.

**Figura 9. Válvula de inversión.**



Fuente: Absorsistem.

A continuación, el amoníaco líquido traspasa la válvula de inversión entrando en ella por la boca 3 para salir por la 4 para dirigirse al intercambiador de calor, donde cede calor al flujo de vapor de amoníaco frío que circula en contracorriente por el tubo interior del intercambiador. A continuación, el líquido enfriado entra de nuevo en la válvula de inversión por la boca 5 dividiéndose el flujo hacia las bocas 6 y 7 que lo conducen a las dos baterías exteriores de tubo

aleteado que antes servían de condensador y absorbedor respectivamente y que ahora trabajaran ambas como evaporador ya que es donde se evaporará el amoníaco al ser reducida su presión al entrar en ellas.

El calor necesario para pasar del estado líquido al de vapor, lo obtendrá del aire de la atmósfera exterior que barre las baterías por la acción del ventilador. Este calor se incorpora al ciclo y es lo que permite elevar drásticamente la eficiencia del equipo. El vapor de amoníaco a la salida de las baterías evaporadoras, se reunirá de nuevo al acceder a la válvula inversora por las bocas 8 y 9 para salir de ella por la 10.

Este vapor frío procedente del evaporador pasará a continuación por el tubo interior del intercambiador de calor, enfriando el líquido que circula por el exterior de aquel y por lo tanto, incorporando su calor al vapor cuya temperatura se eleva hasta aproximadamente 32°C (89.6°F). En estas condiciones el vapor de amoníaco, al igual que en el modo de refrigeración, entra en el pre-absorbedor al cual llega también la solución diluida o pobre procedente directamente del generador después de atravesar un restrictor para reducir su presión a 4 bar (58 psi), igual a la del vapor de amoníaco.

En éste dispositivo, en el cual hay el serpentín por el que circula solución rica a una temperatura de unos 105°C (221°F), el vapor de amoníaco empieza a ser absorbido por el agua debido y calentado a unos 85°C (185°F) para dirigirse seguidamente hacia la boca 11 de la válvula de inversión, saliendo de ésta por la boca 12 hacia el segundo circuito primario del intercambiador de calor donde parte del calor contenido en la solución líquida procedente del pre-absorbedor y también el generado al completarse el ciclo de absorción del amoníaco por



parte del agua, es transmitido al agua del circuito de utilización para calefacción.

Entonces, el agua de la instalación de calefacción recibe en este recipiente, que en verano sirve de evaporador, primero el calor obtenido de la combustión del gas transportado hasta él como vapor y cedido por condensación del mismo, y en este segundo circuito recibe el calor del aire exterior adquirido en las baterías evaporadoras y transmitido por la solución rica en fase de absorción. Esto permite alcanzar una eficiencia energética que alcanza, en condiciones nominales de temperatura exterior de 7°C (44.6°F), el 143% respecto a la energía del gas consumido.

A la salida de este circuito absorbedor, con el amoníaco ya totalmente absorbido por el agua, la solución rica traspasa de nuevo la válvula inversora por las bocas 13 y 14 para dirigirse, al igual que en el modo de refrigeración, hacia la bomba de solución que la enviará al rectificador para provocar la condensación del vapor de amoníaco, para pasar luego por el serpentín interno del pre-absorbedor y desde él volver a iniciar el ciclo en el generador.

Cuando en funcionamiento invernal se forma hielo en la batería evaporadora exterior, una válvula situada en el circuito permite aportar vapor de amoníaco caliente a la línea de líquido para asegurar el deshielo sin apoyos externos ni inversiones de ciclo como sucede con el ciclo de compresión, lo que permite el funcionamiento continuo de la unidad con temperaturas exteriores de hasta -20°C (-4°F).



Para explicar el funcionamiento del ciclo de refrigeración, se seguirá el esquema de la Figura 10.

Empezando en el generador que está situado en la parte inferior izquierda de la figura, donde la solución acuosa (denominada en este punto solución diluida) está a una temperatura de 135°C (275 °F) con un contenido del 54% de LiBr. Por efecto del calor aportado por el quemador de gas, la temperatura de la solución diluida asciende hasta un valor nominal de 147°C (296.6 °F) y a una presión a 75 kPa (10.87 psi), lo que provoca la ebullición del agua que asciende a través de la bomba de burbujas hasta alcanzar el separador principal el cual es atravesado únicamente por el vapor de agua.

Como resultado de la separación del vapor, la solución restante se concentra a un valor de 56% de LiBr en agua (solución semiconcentrada) la cual fluye del separador hacia el intercambiador de alta temperatura donde es enfriada por la solución diluida hasta 75°C (167°F), entrando a continuación en el generador de baja temperatura. Al mismo tiempo, el vapor de agua a la temperatura de 147°C (296.6 °F), después de atravesar el separador principal, circula por el circuito primario del generador de baja temperatura aportando calor a la solución semiconcentrada. Como consecuencia de este intercambio de calor, parte del agua de la solución semiconcentrada hierve liberando vapor refrigerante adicional a una temperatura de 78°C (172.4 °F) y una presión de 5,6 kPa (0.8122 psi). Esta segunda separación de vapor de la solución permite aumentar el rendimiento de la máquina y es la razón por la que esta variante del ciclo se denomine de doble efecto.

El vapor separado en el generador de baja temperatura atraviesa el separador secundario y alcanza el condensador donde se reúne con el vapor generado en la primera etapa, es decir, en el generador de alta temperatura.

En el condensador, se enfría el vapor hasta 41°C (105.8 °F) condensándolo y formando el agua que es el líquido refrigerante. Éste líquido entra en el evaporador debido a la diferencia de presión y al encontrarse en un espacio donde la presión absoluta es de solo 0,7 KPa (0.1015 psi) se evapora a una temperatura de 3,3°C (37.94 °F) adquiriendo el calor necesario del agua a refrigerar, que está circulando por un serpentín situado dentro del evaporador. Debido a esto el agua del circuito de refrigeración desciende a la temperatura de 7°C (44.6 °F).

Mientras, la solución semiconcentrada al reducir su contenido de agua por efecto de la evaporación en el generador de baja temperatura, concentra su contenido de LiBr hasta un 58% por lo que se denomina solución concentrada. En estas condiciones fluye a través del intercambiador de calor de baja temperatura donde cede calor a la solución diluida que circula por su circuito secundario reduciendo su temperatura hasta 40°C (104 °F).

A continuación, la solución concentrada entra en el absorbedor que es un espacio compartido con el evaporador y en el que se encuentra un serpentín por el que circula agua de enfriamiento a una temperatura máxima de 29,5°C (85 °F). Dentro del absorbedor el LiBr de la solución concentrada, absorbe el vapor producido en el evaporador lo que permite mantener constante la presión en éste. Al mismo tiempo, el agua de enfriamiento que circula por el serpentín del absorbedor elimina durante el proceso de absorción el calor aportado al vapor de agua en el evaporador.

Como toda el agua separada de la solución en los dos generadores, el de alta y el de baja temperatura, ha llegado finalmente al absorbedor, en este espacio la solución se diluye de nuevo hasta el 54% inicial, es decir, vuelve a ser solución diluida. Desde el absorbedor, dicha solución es aspirada por la bomba de solución haciéndola pasar primero por el intercambiador de baja temperatura calentándose con el calor cedido por la solución concentrada y a continuación por el intercambiador de calor de alta temperatura donde, adquiere el calor cedido por la solución semiconcentrada, entrando finalmente en el generador de alta temperatura donde de nuevo se inicia el ciclo.

Las temperaturas y los niveles de concentración del LiBr pueden sufrir algunas variaciones, el ciclo descrito es el circuito en serie ya que los fluidos circulan en serie a través de los distintos dispositivos. Se han introducido algunas variaciones a este circuito, especialmente en unidades de gran potencia, con el propósito de disminuir la cantidad de fluido a circular y el volumen de la máquina.

### **2.2.5 Ciclo de calefacción**

Para calentar el agua con el fin de cubrir con el mismo aparato las necesidades de calefacción, se procede a abrir la válvula de cambio de ciclo y se interrumpe la circulación del agua de enfriamiento. Debe también cambiarse el ciclo en el control electrónico del sistema con el fin de que adopte la lógica correspondiente a este servicio.

Al igual que en el proceso de refrigeración, al hervir la solución en el generador de alta temperatura el vapor asciende junto con gotas de solución

semidiluida a través de la bomba de burbujas, pero al estar abierta la válvula de cambio de ciclo, el vapor caliente accede al evaporador a través del tubo donde está colocada dicha válvula, ascendiendo dentro de él y condensándose en la superficie del serpentín por el que circula el agua de la instalación (el mismo por el que circula el agua a refrigerar en modo de refrigeración), cediendo a esta el calor de condensación y haciendo que aumente su temperatura. Al mismo tiempo, una parte del vapor fluye a través del generador de baja temperatura y el condensador, pero como por éste no circula el agua de enfriamiento, no puede producirse la condensación y accede también al evaporador en fase vapor condensándose igualmente sobre el serpentín del agua a calentar cediendo a ésta su calor latente.

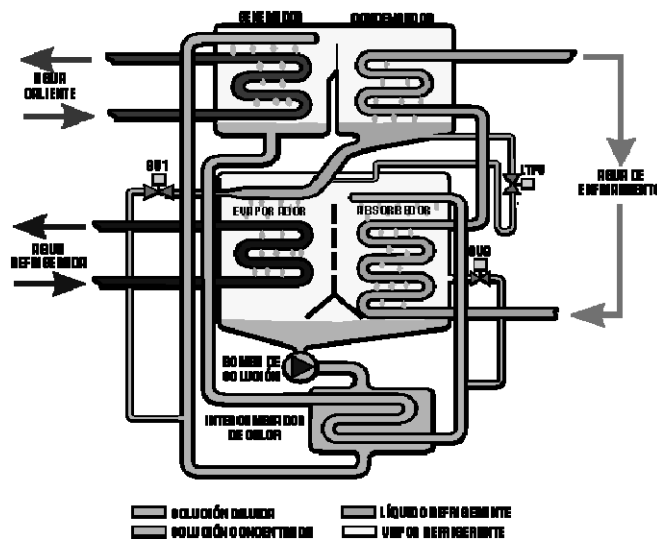
La solución diluida, se acumula en el colector inferior del absorbedor de donde la bomba de solución le obliga a circular por los intercambiadores de calor hasta alcanzar el generador de alta temperatura donde vuelve a iniciarse el ciclo.

### **2.2.6 Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio (LiBr) y agua (H<sub>2</sub>O), alimentado por agua caliente.**

El ciclo que se describe a continuación es el empleado por las unidades que utilizan como fuente de energía el calor contenido en un circuito de agua caliente procedente de un campo de paneles de captación solar térmica, del calor residual de una planta de cogeneración por motor térmico o turbina, o de cualquier otro sistema de recuperación de calor residual.

El fluido utilizado en el ciclo de refrigeración, es una solución de agua y Bromuro de litio (LiBr), siendo el agua el refrigerante y el LiBr el absorbente. El agua cuando se encuentra en un espacio en el que la presión absoluta está muy por debajo de la atmosférica y que en este caso es de únicamente de 0,9 kPa (9 mbar en vez de 1013 que es la presión atmosférica nominal), el agua se evapora a tan solo 3°C (37.4 °F).

**Figura 11. Funcionamiento del ciclo de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua, alimentado por agua caliente.**



Fuente: Absorsistem.

Para explicar el funcionamiento se utilizará el esquema de la Figura 11. Empezando en el generador que está situado en la parte superior izquierda del gráfico, donde la solución acuosa (denominada solución diluida) contiene un 52% de LiBr. Por el circuito primario del generador circula el agua caliente que aporta la energía necesaria para hacer funcionar el sistema. El agua caliente entra nominalmente a una temperatura de 88°C (190.4°F) en el circuito primario

del generador saliendo de él a 83°C (181.4 °F). Mientras, en el circuito secundario del generador, es decir, en el circuito de refrigeración, la presión absoluta es de 13 kPa (1.88 psi).

Como efecto del calor aportado por el circuito primario de agua caliente, el agua de la solución diluida entra en ebullición y el vapor formado se encamina hacia el recipiente contiguo que es el condensador. Debido a esta separación de vapor, la solución restante, denominada solución concentrada, se concentra hasta un 56% de LiBr dirigiéndose en estas condiciones hacia el intercambiador de calor situado en la parte inferior del esquema. En el condensador, el vapor de agua es enfriado hasta 36°C (96.8°F) debido al circuito de agua procedente. Este líquido refrigerante, es introducido por diferencia de presión en el evaporador donde se mantiene una presión absoluta de 0,9 kPa (0.1305 psi), por lo que se evapora a 3° C (37.4 °F) adquiriendo el calor necesario del circuito de agua a refrigerar, rebajando su temperatura a 7°C (44.6 °F) suponiendo que ha entrado de la instalación a 12°C (53.6 °F).

Al mismo tiempo, la solución concentrada al 56% de LiBr procedente del generador fluye en el absorbedor que comparte espacio y presión con el evaporador, siendo el vapor de agua contenido en este absorbido por el LiBr, diluyendo la concentración de LiBr de nuevo al 52%. Esto permite eliminar el vapor a medida que se produce y continuar manteniendo la presión de 0,9 kPa (0.1305 psi) en el espacio compartido por el evaporador y el absorbedor.



El fenómeno de la absorción produce calor que a su vez es eliminado por el mismo circuito de enfriamiento antes de dirigirse al condensador. Finalmente, la solución diluida al 52% de LiBr por la absorción del vapor, es aspirada por la bomba de solución (SP) para enviarla de nuevo al generador donde se reinicia el proceso, pasando previamente por un intercambiador de calor que permite aumentar el rendimiento del ciclo.

## **2.3 Refrigeración evaporativa**

### **2.3.1 Antecedentes y desarrollo de la técnica**

Muchas veces la cultura tradicional o simplemente los procesos naturales del entorno que nos rodea, pueden aportar las ideas que tradicionalmente se han utilizado para resolver alguno de los problemas que se plantean en la actualidad, esto ocurre cuando se analiza el proceso de enfriamiento evaporativo.

Existen muchos ejemplos en nuestro entorno, el hombre refrigera su cuerpo aprovechando el calor necesario para la evaporación de su sudor, algunos animales impregnan de barro húmedo su cuerpo, que entre otros efectos, permite mientras se seca refrigerar evaporativamente la piel del animal, o el típico enfriamiento en la tradicional vasija que proporciona agua más fría que la temperatura del ambiente como consecuencia de la evaporación del agua, que atravesando la estructura porosa de la cerámica, se produce desde la superficie exterior de la vasija al aire.

El enfriamiento evaporativo era el método más utilizado, antes de conocer los principios de la refrigeración. Se conoce que este efecto ya se utilizaba 2500 años antes de Cristo, difundándose principalmente en la India, Irán, Egipto y Persia, donde se conocía como uno de los procedimientos más efectivos, debido a la gran cantidad de calor latente que involucra la evaporación de agua.

Se pueden encontrar diferentes grabados y documentos que muestran cómo las clases dirigentes del antiguo Egipto y Mesopotamia incorporaron fuentes a sus palacios con fines no sólo estéticos, o sistemas que, provocando la circulación de aire alrededor de vasijas con agua, proporcionaban aire más fresco y húmedo en el interior de los locales.

En la Edad Media el Islam difunde estas técnicas por Occidente y son adaptados sistemas de enfriamiento evaporativo, principalmente en las zonas mediterráneas con baja humedad relativa. Por ejemplo se colocaba un estanque con una fuente en los jardines o en el exterior, con canales radiales representativos de los ríos del paraíso. Las fuentes de la Alhambra de Granada en España, como la del Patio de los Leones, o en los jardines de Irán, utilizan estos principios evaporativos y son claros ejemplos de esta tradición.

El primer análisis riguroso de los sistemas evaporativos, enumerando sus ventajas y desventajas, fijando sus aplicaciones y estableciendo consideraciones sobre el diseño lo realizó el Dr. John R. Watt en 1963 en su texto "Evaporative Air Conditioning Handbook". A partir de sus trabajos, el enfriamiento evaporativo queda establecido como un campo de investigación. Watt construyó y evaluó diferentes prototipos de enfriadores de placas, así como una torre de enfriamiento con serpentín.

En los años 90 en España aparecieron aplicaciones de sistemas evaporativos utilizando el enfriamiento por pulverización de agua en el interior de torres que provocaban la circulación natural del aire en su interior.

Muchos de estos sistemas se encuentran combinados con otras tecnologías, como tubos de calor como sistemas de intercambio de energía, o combinando con procesos de adsorción o absorción para reducir la humedad y posteriormente enfriar el aire evaporativamente. En todos los casos las aplicaciones desarrolladas pretenden reducir o eliminar, la dependencia de los sistemas de enfriamiento por compresión mecánica.

### **2.3.2 Principios básicos de la técnica**

El enfriamiento evaporativo es un proceso de transferencia de calor y masa basado en la conversión del calor sensible en latente. El aire no saturado es enfriado por la evaporación de agua sin intercambio de energía con el entorno.

En estas condiciones, parte de la carga de calor sensible del aire se convierte en calor latente para la evaporación del agua, consiguiendo reducir la temperatura seca del aire mediante un aumento de su humedad.

Este intercambio de calor sensible y latente idealmente tiene lugar hasta que el aire se satura y la temperatura del aire y el agua se igualan alcanzando el valor de la temperatura de saturación adiabática. En un enfriamiento evaporativo el proceso seguido por el aire es casi adiabático, ya que el único aporte energético es el procedente de la pequeña cantidad de agua aportada.

En estas condiciones, y eliminando efectos en el rango de condiciones de operación habituales para instalaciones en edificios, como las aportaciones de calor sensible del agua líquida o de los motores utilizados en los procesos, se puede plantear el siguiente balance energético por unidad de masa de aire seco tratado:

$$i_e = i_s + (x_s - x_e) \cdot i_w$$

donde:

$i_e$ : entalpía del aire a la entrada del proceso.

$i_w$ : entalpía del vapor de agua, (considera constante).

$i_s$ : entalpía del aire a la salida.

$x_s$ : humedad específica del aire húmedo a la salida.

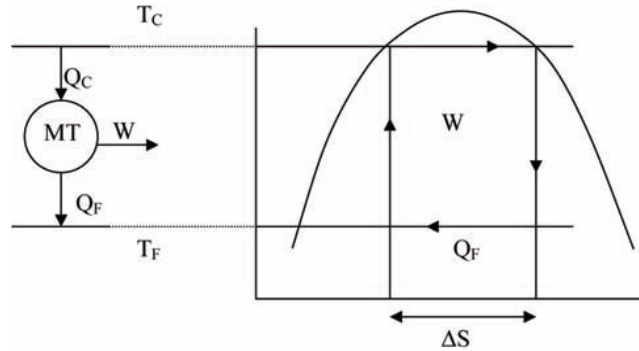
$x_e$ : humedad específica del aire a la entrada.

En la expresión se observa como la entalpía del aire a la salida, si se produce una humidificación adiabática ( $X_s > X_e$ ), es menor que la del aire a la entrada, o lo que es lo mismo, el aire sale más frío.

### **2.3.3 Aplicaciones del enfriamiento evaporativo**

Según se muestra en el diagrama TS y fórmula siguientes, el máximo rendimiento que puede proporcionar una máquina térmica (MT), establecido por el ciclo de Carnot muestra, cómo cuanto mayor sea el nivel térmico del foco caliente ( $T_C$ ) y menor el del foco frío ( $T_F$ ), que en este caso coincide con el ambiente donde se disipa la energía residual, mayor será el rendimiento de generación.

**Figura 12. Diagrama Temperatura-Entropía.**



$$\eta_{Carnot} = \frac{W}{Q_C} = \frac{Q_C - Q_F}{Q_C} = \frac{(T_C - T_F) \cdot \Delta s}{T_C \cdot \Delta s} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Fuente: Termodinámica, Yunus Çengel, Michael A. Boles.

Cuando se analiza termodinámicamente una máquina de refrigeración (MF), el ciclo ideal que establece el máximo rendimiento es el ciclo invertido de Carnot. En esta situación se aprovecha el calor extraído del foco frío, por lo que el rendimiento del ciclo, será definido por el cociente del calor extraído ( $Q_F$ ) y el trabajo ( $W$ ) utilizado.

En este caso el ambiente, que es el que actúa como foco caliente, cuanto más baja sea su temperatura (menor diferencia  $T_C - T_F$ ), mayor será el rendimiento del ciclo, extrayendo más cantidad de calor del foco frío por cada unidad de energía en forma de trabajo externo utilizado. Las aplicaciones del enfriamiento evaporativo, permiten utilizar agua más fría, que el aire del ambiente.

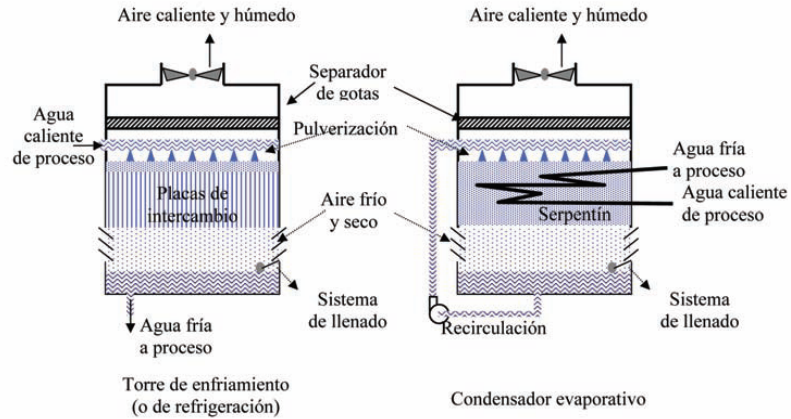
#### **2.3.4 Condensadores de los sistemas de refrigeración utilizados en climatización**

La utilización de un foco más frío, como el agua enfriada con aire para enfriar el condensador de un sistema de refrigeración, es más efectivo que si se utiliza directamente el aire ambiente; últimamente para evitar la Legionelosis, principal problema que puede derivarse de la utilización de estos sistemas, hace que se estén sustituyendo unidades enfriadas con agua por otras que utilizan aire, eliminando el riesgo de Legionella, pero también incrementando el consumo energético de las instalaciones para proporcionar los mismos objetivos.

Las principales ventajas del enfriamiento evaporativo de las unidades condensadoras son que proporcionan temperaturas de condensación inferiores, eliminan una cantidad de calor superior, ahorran energía, consumen menos recursos, provocan bajo impacto ambiental y tienen máxima seguridad ya que reducen el riesgo de fugas o escape de refrigerantes. El problema de la Legionella, no debe impedir el uso de condensadores evaporativos o torres de enfriamiento, si se hacen los procesos adecuados de limpieza y desinfección necesarios que, ya sea por aplicación de nuevas tecnologías, nuevos procesos, etc., hacen más rentable el uso de estos sistemas.

Sin embargo, en los balances de rentabilidad se deben contemplar los gastos, no sólo de consumo energético o de tratamiento en las instalaciones, sino también el valor del impacto ambiental que a lo largo de su vida útil ocasionarán. En la figura 13 se muestra una torre de enfriamiento y un condensador evaporativo.

**Figura 13. Torre de enfriamiento y condensador evaporativo.**



Fuente: García Ruiz, F. Revista Montajes e Instalaciones, Nº 411.

### 2.3.5 Enfriadores evaporativos de aire

Las condiciones más favorables para utilizar el enfriamiento evaporativo se presentan cuando hay en el aire baja humedad, donde la capacidad de evaporación es alta. En años muy secos, en climas continentales, o en zonas desérticas, la capacidad de enfriamiento de estas técnicas puede ser suficiente para proporcionar ambientes dentro de la zona de confort.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo directo, también poseen el problema de la Legionella cuando se generan aerosoles por contacto directo entre la cortina de aire y el agua utilizada en la evaporación. Para evitar los problemas asociados a la posible dispersión de Legionella en el aire de impulsión, una alternativa al enfriador evaporativo directo puede ser el indirecto, donde el enfriamiento del aire de impulsión se realiza mediante un intercambiador, evitando la contaminación del aire de impulsión.

Este sistema es menos eficaz, dado que no se aprovecha la capacidad de enfriamiento por evaporación en el aire primario, y se utiliza un intercambiador que reduce la eficacia del dispositivo. En los enfriadores indirectos hay que tomar también precauciones en el circuito de enfriamiento de agua, donde sí puede aparecer contaminación bacteriológica en los aerosoles transportados por el aire utilizado en el enfriamiento del agua. El aire de enfriamiento más adecuado será el que proporcione una temperatura de saturación adiabática inferior.

Una alternativa eficiente al enfriador indirecto consiste en utilizar el aire de retorno del local, idealmente en condiciones de confort, como aire de enfriamiento del agua, cuando proporcione temperaturas inferiores a las del aire exterior. Esta configuración, como recuperador de energía, permite aprovechar las características hidrotérmicas del aire de retorno antes de ser expulsado al exterior.

### **2.3.6 Refrigerador evaporativo cerámico**

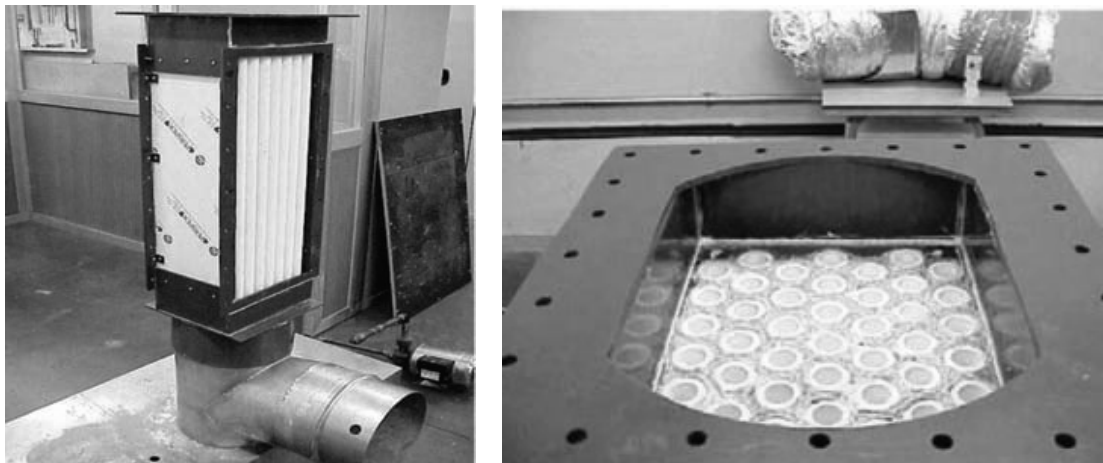
En la figura siguiente se muestran dos fotografías de un dispositivo construido con tubos cerámicos que, dependiendo de las condiciones hidrotérmicas del aire exterior, puede comportarse como enfriador evaporativo indirecto en modo recuperador utilizando los tubos como intercambiador, o como directo cuando haya transporte capilar de agua a través de la pared cerámica, permitiendo la humidificación del aire exterior.



Dado que la humidificación se realiza desde una superficie porosa, en este tipo de estructuras no es probable la aparición de aerosoles que dispersen la Legionella. Por otra parte, un diámetro de poro suficientemente pequeño puede actuar como filtro, evitando el paso de las bacterias desde el agua hasta el aire de impulsión.

Dado que el agua para ser enfriada utiliza el aire de retorno del local, igual que ocurre en un indirecto, cuando la temperatura de rocío del aire exterior es superior a la del agua enfriada, este sistema podría ser utilizado incluso para deshumidificar, según se muestra en la figura 14 la superficie exterior de los tubos cerámicos trabajando en condensación.

**Figura 14. Superficie exterior de los tubos cerámicos.**



Fuente: Rey, F. J.; Velasco E.; Herrero, and Varela, F. "Comparative study of two different evaporative systems: an indirect evaporative cooler and a semi-indirect ceramic evaporative cooler". Energy and Buildings, nº 36, 2004.

### 2.3.7 Refrigeración evaporativa combinada con energía solar pasiva

Existen diferentes aplicaciones para aprovechar la energía del sol en los edificios mediante técnicas pasivas, como colectores activos de aire caliente, los muros Trombe, o simplemente la utilización de las tradicionales galerías. Las aplicaciones para calentamiento largo de los locales acondicionados, como es el caso del muro Trombe o colectores de aire, también pueden ser utilizadas para reducir la carga de los locales en condiciones de verano. Tradicionalmente, con un sistema de compuertas se puede hacer que el efecto chimenea generado por el aire caliente, permita la entrada de aire fresco desde la zona periférica más adecuada.

Una solución alternativa puede ser utilizar un enfriador evaporativo que permita enfriar el aire exterior antes de ser introducido a los locales, de esta manera, en invierno el sistema de captación puede ser utilizado para aportar energía de origen solar reduciendo la carga necesaria de calefacción, y en verano aportar aire, inducido por el efecto chimenea generado en el mismo sistema, reduciendo la carga de refrigeración necesaria.

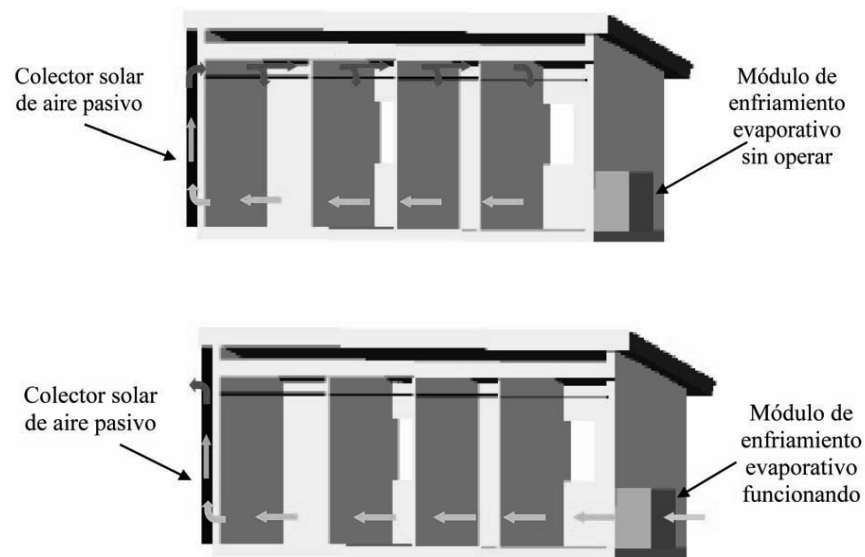
En la figura 15 se presenta esquemáticamente el concepto de utilización del sistema propuesto.

**Invierno:** El aire caliente, impulsado por tiro natural, se distribuye por el interior de los locales, reduciendo la carga de calefacción.

**Verano:** El aire enfriado evaporativamente, inducido por el efecto chimenea en el colector solar de aire, circula por los locales, reduciendo la carga de refrigeración. Para pasar de un modo de operación a otro, hay que actuar sobre

un sistema de compuertas que permitan o no la entrada de aire exterior a través del módulo de enfriamiento evaporativo o dirigir el flujo de aire caliente a la salida del colector hacia el interior de los locales o al exterior.

**Figura 15. Enfriador evaporativo sin operar y funcionando.**



Fuente: ANEFRYC. "Enfriamiento evaporativo y Legionella. Revista El Instalador, No. 431.

### 2.3.8 La Legionella y su problemática

La Legionella, que es una bacteria que comprende 39 especies y más de 50 subgrupos, se encuentra en aguas superficiales, como lagos, ríos, estanques, formando parte de su flora bacteriana, puede llegar a colonizar los equipos y sistemas de instalaciones domésticas o industriales que utilizan agua en su funcionamiento, y es responsable de la Legionelosis que provoca varias muertes todos los años.

La bacteria es capaz de sobrevivir en un amplio intervalo de condiciones físico-químicas, multiplicándose entre 20°C y 45°C (68°F y 113°F) y destruyéndose a partir de los 60°C (140°F). Su temperatura óptima de crecimiento es 35-37°C (95-98.6°F), que coincide con la temperatura corporal del hombre donde encuentra las condiciones más óptimas para que se produzca su proliferación.

La contaminación de las personas por Legionella sigue diferentes etapas encadenadas que, si en algún momento se corta la cadena, eliminaría el riesgo de contagio.

Estas etapas son:

1.- La instalación se contaminará con Legionella, por el agua de aporte o por atomización procedente de instalaciones contaminadas del entorno.

2.- La concentración de la bacteria debe ser suficientemente elevada. Para su proliferación se precisan nutrientes, aportados por la suciedad o un inadecuado mantenimiento de la instalación.

3.- La instalación debe producir atomización de agua que dispersen la bacteria.

4.- El ambiente debe ser el adecuado para permitir el transporte de la atomización, lo que no ocurre cuando la humedad relativa del ambiente es demasiado baja.

5.- La atomización contaminada, debe pasar al tracto respiratorio de las personas.

6.- En el interior del organismo humano se incuba la bacteria hasta concentraciones elevadas que provoquen la legionelosis.

7.- Las personas con mayor riesgo de contagio pertenecen a algún grupo de personas inmunodeprimidas, siendo los ancianos, enfermos del aparato respiratorio y fumadores los que mayor riesgo presentan. La legionelosis, que es una forma de neumonía, puede provocar la muerte entre el 10 y el 20 % de los casos. Existen varias alternativas para el tratamiento de las instalaciones, como tratamientos térmicos de la instalación, tratamientos de oxidación por cloración u ozonización, toxinas metálicas que eviten la proliferación de la bacteria y tratamientos por radiación ultravioleta o fotocátalisis. Todas las alternativas tienen sus aplicaciones, ventajas e inconvenientes, pero en todos los casos un diseño y mantenimiento adecuados, minimizan el riesgo de contaminación.

Finalmente, indicar que hay que evitar el riesgo de incrustaciones con los adecuados niveles de purga de agua, eliminando la sal introducida con el agua de aporte. El agua, como recurso escaso, debe ser utilizada de la manera más conveniente.

### **2.3.9 Principio de funcionamiento del enfriamiento evaporativo**

El enfriamiento evaporativo es un proceso natural que utiliza el agua como refrigerante y que se aplica para transmitir a la atmósfera el calor excedente de diferentes procesos y máquinas térmicas. En él se basa el funcionamiento de diferentes equipos, entre ellos, las torres de enfriamiento y los condensadores evaporativos, frecuentemente utilizados para la condensación del gas refrigerante en las instalaciones de refrigeración destinadas a diferentes aplicaciones; refrigeración industrial, comercial, aire acondicionado, calefacción (por bomba de calor), etc.

En estas instalaciones los equipos de enfriamiento evaporativo liberan el calor de condensación de los sistemas de refrigeración, transfiriéndolo a la atmósfera mediante la evaporación de una reducida cantidad de agua.

Este proceso se hace efectivo gracias al establecimiento de un contacto máximo y directo entre el agua en circulación y una corriente de aire mediante una sección (relleno, batería) con la que se intenta maximizar la superficie y tiempo de contacto entre dichos fluidos favoreciendo el intercambio de calor y masa entre ellos.

Los equipos de enfriamiento evaporativo, incorporan una superficie de intercambio de calor y masa, humedecida mediante un dispositivo de distribución de agua, un sistema de ventilación (natural o forzada) para guiar el paso del aire ambiente a través de la sección de intercambio de calor y masa, y diferentes componentes auxiliares tales como el colector de agua, bomba de recirculación, eliminadores de gotas e instrumentos de control.

Existe una variedad de equipos de enfriamiento evaporativo que permiten a cualquier usuario elegir la combinación de rendimientos, disipación de energía y vida útil que mejor se ajuste a sus necesidades.

Se trata de una amplia gama de productos de diferentes dimensiones que utilizan diversos materiales de construcción, con variadas disposiciones y tipos de ventiladores conforme a necesidades específicas y que incorporan los accesorios necesarios para su correcto funcionamiento.

### **2.3.10 Principales aplicaciones**

Los equipos de enfriamiento evaporativo se utilizan en aplicaciones industriales que requieren refrigeración en la medida que facilitan y optimizan muchos de los procesos y operaciones llevados a cabo en la industria, incrementan el ahorro de energía y proporcionan importantes beneficios, todo esto con bajo impacto en el ambiente.

En la tabla a continuación se detallan algunas de sus aplicaciones.

**TABLA III. Principales aplicaciones de los equipos de enfriamiento evaporativo.**

ÁREA DE NEGOCIO	PRINCIPALES APLICACIONES
<b>Uso industrial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalaciones de refrigeración industrial, comercial y hotelera</li> <li>• Industrias alimenticias</li> <li>• Industrias automovilísticas</li> <li>• Industrias siderometalúrgicas</li> <li>• Industrias electrónicas</li> <li>• Centrales eléctricas</li> <li>• Refrigeración de maquinaria diversa (compresores o motores de combustión interna)</li> <li>• Plantas de cogeneración</li> </ul>
<b>Uso no industrial</b>	<p>Sistemas de aire acondicionado y de climatización (bombas de calor).</p> <p>Sistemas de aire acondicionado y de climatización (bombas de calor).</p>

Fuente: ANEFRYC



### 3. LOS HIDROCARBUROS (HC) COMO REFRIGERANTES

Son sustancias naturales obtenidas por destilación en las refinerías. Los hidrocarburos refrigerantes están disponibles para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la sustitución directa del CFC-12. Tienen muy bajo impacto ambiental en comparación con los anteriores, y son compatibles con el cobre y el aceite mineral. Como sustancias de reemplazo se necesitan realizar muy pocos cambios en el sistema y en sus componentes, sin embargo, se deben tomar las medidas de seguridad necesarias para evitar que la inflamabilidad sea un problema. Los más importantes como refrigerantes son el metano, etano, butano, propano (R-290), etileno e isobutano (R-600a).

Los HC son muy buenos refrigerantes por varias razones:

- Se desempeñan muy bien, con buena capacidad y eficiencia.
- Los HC están disponibles para una amplia gama de aplicaciones. Son una excelente alternativa como reemplazo directo del CFC 12.
- Tienen un impacto ambiental muy bajo en comparación con los CFC, HCFC y los HFC.
- Son compatibles con el cobre y los aceites minerales comunes.
- Pueden usarse procedimientos de limpieza similares a los usados con el CFC-12.
- El servicio de mantenimiento es el mismo que el de los refrigerantes CFC-12 y HCFC-22, excepto por las consideraciones de seguridad.

- Se necesitan muy pocos cambios en un sistema y sus componentes para poder usarlos como refrigerantes. Sin embargo, se necesita cuidado para que la inflamabilidad no presente problemas de seguridad.
- Los sistemas que usan HC deben diseñarse de manera tal que la fuga no sea peligrosa.
- Debe usarse el equipo apropiado durante la fabricación para cargar los sistemas y la carga aérea debe elegirse con cuidado.
- Los técnicos del servicio de mantenimiento y reparación deben estar capacitados para manejar hidrocarburos como refrigerantes con seguridad.

Particularmente para refrigeración doméstica existe la opción de utilizar Isobutano (R-600 a) o mezcla de Isobutano (R-600 a) y Propano (R-290) para reemplazar al CFC-12 como refrigerante.

### **3.1 Propiedades de los Hidrocarburos**

La mayor parte de los productos de origen petrolífero son mezclas sencillas en el caso de los gases, pero muy complejas al tratarse de fracciones líquidas. Además, los productos comerciales, los cuales deben responder a determinadas especificaciones, son generalmente mezclas de fracciones complejas: naftas, carburantes para reactores y aceites. Las principales características son:

- Tensión de vapor de los hidrocarburos puros, de las fracciones del petróleo y de sus mezclas.

- Propiedades críticas. Temperatura y presión críticas.
- Densidad.
- Propiedades térmicas: calor específico; coeficiente de compresión adiabática; calor latente de vaporización; entalpía y conductividad térmica
- Viscosidad.
- Potencia calorífica o poder calorífico.
- Número de octano.
- Índice de cetano.
- Puntos de congelación.
- Límites de explosividad y punto de inflamación.
- Tensión superficial.
- Solubilidad de los hidrocarburos y de los hidrocarburos en el agua.
- Penetración y reblandecimiento de los asfaltos.
- N- Curvas de destilación.

### 3.2 Propiedades físicas de los hidrocarburos

PROPERTY, METRIC UNIT, WEIGHT BASIS	CARE 10	R12	R134a	CARE 30	R22	CARE 40	R502	CARE 50
Boiling point at 1 atmosphere, °C	-11.8	-29.8	-26.1	-31.5	-40.8	-42.1	-45.4	-49
Specific heat of liquid at 30°C, kJ/kg K	2.49	0.99	1.45	2.54	1.27	2.80	1.26	3.01
Specific heat of vapour at constant pressure at 30°C, kJ/kg K	1.86	0.62	0.86	1.7	0.91	2.12	0.69	1.71
Ratio of specific heats (C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub> ) at 1atm.,30°C	1.10	1.136	1.118	1.116	1.18	1.10	1.13	1.10
Density of liquid at 30°C, Mg/m <sup>3</sup>	0.545	1.292	1.187	0.517	1.17	0.484	1.19	0.475
Density of saturated vapour at boiling point, kg/m <sup>3</sup>	2.81	6.3	5.3	2.6	4.7	2.40	6.2	2.22
Latent heat of vaporisation at boiling point, kJ/kg	362	165	217	405	233	426	172	444
Thermal conductivity of liquid at 20°C, W/m°C	0.098	0.07	0.08	0.1	0.09	0.094	0.068	0.097
Thermal conductivity of vapour at 30°C, 1 atm., W/m°C	0.017	0.010	0.015	0.018	0.013	0.019	0.012	0.020
Surface tension at 25°C, mN/m	9.55	8.5	8.4	8.6	8.1	7.03	5.44	7.92
Viscosity of liquid at 30°C, centipoise	0.14	0.19	0.20	0.11	0.15	0.09	0.17	0.08

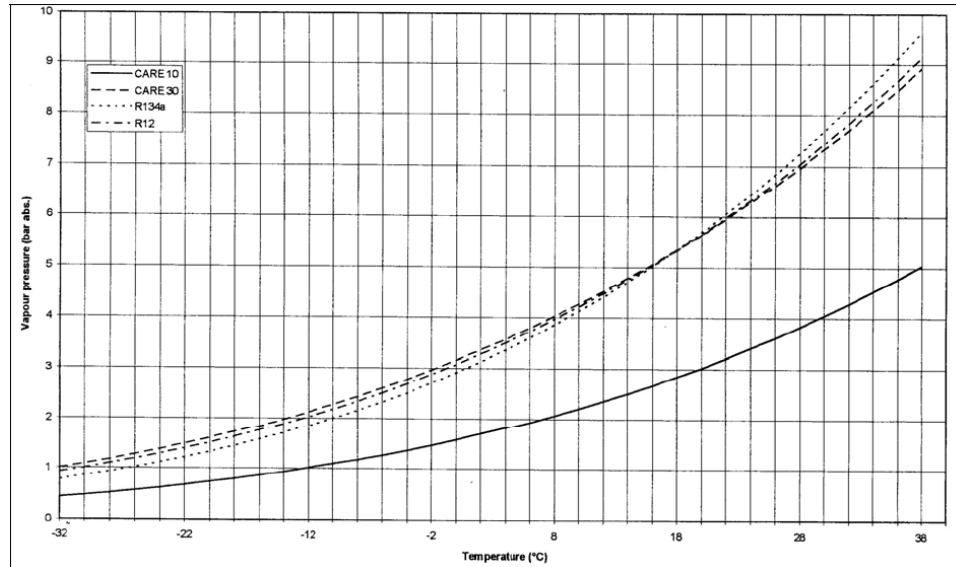
Fuente: Comisión Técnica Gubernamental de Ozono Montevideo, Uruguay [www.ozono.gub.uy](http://www.ozono.gub.uy)

### 3.3 Comparación de las propiedades ambientales de los hidrocarburos

Refrigerant	GWP (500year basis)*	ODP**
CARE 10	<4	0
CARE 30	<4	0
R12	4500	1.0
R134a	420	0
CARE 40	<3	0
CARE 50	<3	0
R22	510	0.05
R502	4000	0.33
R404A	1400	0

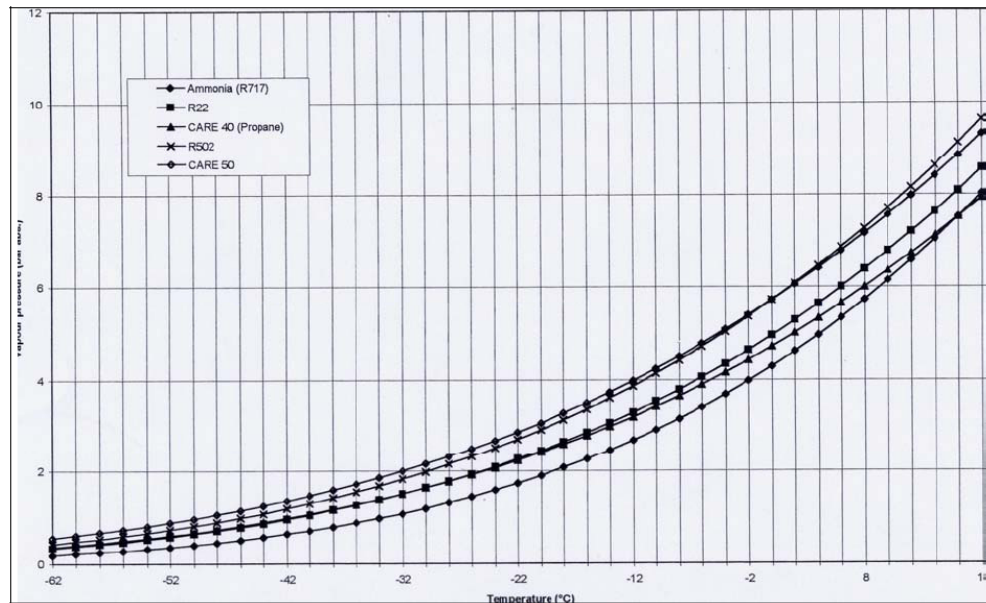
Fuente: Comisión Técnica Gubernamental de Ozono Montevideo, Uruguay [www.ozono.gub.uy](http://www.ozono.gub.uy)

### 3.4 Curva de la presión del vapor del isobutano, CARE 30, R12, R134a



Fuente: Comisión Técnica Gubernamental de Ozono Montevideo, Uruguay [www.ozono.gub.uy](http://www.ozono.gub.uy)

### 3.5 Curva de la presión del vapor del propano, CARE 50, R22, R502, amoníaco



Fuente: Comisión Técnica Gubernamental de Ozono Montevideo, Uruguay [www.ozono.gub.uy](http://www.ozono.gub.uy)

### 3.6 Inflamabilidad de los HC

Los HC son inflamables cuando se mezclan con el aire. Para que dicha mezcla se encienda, la proporción de ambos debe estar comprendida entre dos valores conocidos como límite de inflamabilidad, el límite de inflamabilidad inferior (LFL) y el límite de inflamabilidad superior (UFL).

Para el caso de la mezcla de HC, con menos de 1.95% (LFL) de volumen de la misma en el aire hay poco combustible para la combustión. Si hay más de 9.1% (UFL) en volumen hay poco oxígeno (del aire) para la combustión. Para el caso del isobutano los límites de inflamabilidad son 1.8% (LFL) para el inferior y 8.4% (UFL) para el superior.

Esto debe considerarse ya que el refrigerante que se fuga no se diseminará en el espacio en forma homogénea, sino que tenderá a acumularse a bajo nivel. Para la combustión se necesita una fuente de ignición para encender la mezcla aire/hidrocarburo, la fuente de ignición debe poseer una temperatura superior a 460°C (869°F). Las siguientes son fuentes de ignición potenciales:

- Una llama de una antorcha encendida, de una lámpara de haluro, de un fósforo o de un encendedor.
- Una chispa de un componente eléctrico.
- Electricidad estática.

Cuando se aplican y se usan los hidrocarburos como refrigerantes deben evitarse las condiciones necesarias para la combustión.

### 3.7 Pureza de los HC como refrigerantes

La calidad y pureza del refrigerante es muy importante. El refrigerante debe contener niveles extremadamente bajos de contaminación, fundamentalmente humedad y estar desodorizado. El uso de los HC impuros causará los siguientes problemas en un sistema de refrigeración:

- Un alto nivel de humedad saturará el filtro secador, se congelará en el dispositivo de expansión y en presencia de otras impurezas, acelerará la producción de ácidos en el sistema, lo cual conducirá al daño metálico del cobre en el compresor.
- Un agente odorante puede dañar el aislamiento del serpentín del motor del compresor.

Ya que los cilindros pueden contener HC con mezcla de otros, de humedad, odorantes e impurezas, sólo deben usarse HC grado refrigerante que tengan bajos niveles de contaminación y humedad, y que sean de una composición muy controlada. La tabla muestra la especificación de los HC:

**Tabla IV. Pureza de los HC como refrigerantes**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Grado de pureza	Superior al 99.5%
Contenido de agua	Máximo 10 ppm
Contenido de otros HC	Máximo 5000 ppm
Impurezas cloradas y fluoradas	No debe contener (0 ppm)

Fuente: Manual Buenas Prácticas, Oficina del Ozono; Argentina.

### 3.8 Hidrocarburos disponibles como refrigerantes

Hay tres refrigerantes con base en HC que están disponibles actualmente en el mercado internacional y que pueden ser usados en el reemplazo del CFC-12 en sistemas nuevos. Estos aparecen listados en la siguiente tabla:

**Tabla V. Hidrocarburos disponibles como refrigerantes**

<b>Refrigerante</b>	<b>Punto de ebullición</b>	<b>Aplicación</b>
Isobutano (R-600 a)	-12°C (53.6°F)	Nuevo equipo doméstico
Mezcla 50/50 de Propano e Isobutano	-31.5°C (-24.7°F)	Reemplazo del CFC-12 en equipos nuevos y existentes.
Propano (R-290)	-42°C (-43.6°F)	Equipos nuevos de alta, media y baja temperatura.

Fuente: Manual Buenas Prácticas, Oficina del Ozono; Argentina.

### 3.9 Isobutano (R-600 A)

El R-600A (Isobutano) es muy utilizado en Europa, en especial en Alemania, donde más de 90% de los refrigeradores domésticos son fabricados con este fluido como refrigerante. Las características positivas del R-600A son que no ataca la capa de ozono (ODP= 0), posee contribución despreciable en el calentamiento global (GWP) y tiene su origen en fuentes naturales de gas, pues se trata de hidrocarburo, lo que lo deja disponible casi mundialmente.



**Tabla VI. Tabla comparativa entre los refrigerantes R-12, R-134A, y el R-600A en relación al ODP (Potencial de destrucción de la capa de ozono) y GWP (potencial de calentamiento global).**

<b>Fluido refrigerante</b>	<b>Poder de destrucción de la capa de ozono (ODP)</b>	<b>Poder de calentamiento global (GWP)</b>
R-12	100	8500
R-134A	0	1300
R-600A	0	11

Fuente: Revista Fic-Frío No.72, Abril de 2007.

Es importante citar que el R-600A (Isobutano) es un hidrocarburo siendo, por lo tanto, inflamable y debe ser manipulado con mucho cuidado.

### **3.9.1 Carga de refrigerante**

La carga de R-600A en gramos (masa), considerándose un mismo sistema de refrigeración, será de aproximadamente 40% de la carga en comparación con el refrigerante de R-12.

### **3.9.2 Seguridad**

Los fabricantes de refrigeradores que aplican el R-600A como fluido refrigerante siguen varias normas para producir refrigeradores seguros, que

comienza desde el diseño y todos los componentes de un refrigerador.

Son proyectados teniendo presente la utilización de un fluido inflamable, no siendo recomendado utilizar R-600A en operación de sistemas que fueron diseñados originalmente para el uso con R-12 o R-134A.

### **3.10 Propano (R-290)**

El refrigerante R290, o propano, es un posible sustituto para otros refrigerantes con gran impacto ambiental, en sistemas herméticos pequeños, como los refrigeradores y congeladores domésticos y comerciales. Tiene un potencial cero de destrucción de ozono ODP y un potencial de calentamiento global GWP insignificante. Dado que procede del petróleo, se le considera un refrigerante natural.

El R290 se ha utilizado anteriormente en plantas de refrigeración y todavía se sigue utilizando en algunas plantas industriales. Debido a su disponibilidad en todo el mundo ha sido debatido ampliamente para reemplazar a los CFC.

El propano, R290 es un posible refrigerante para esta aplicación, con buen rendimiento, pero debe tratarse con cuidado debido a su inflamabilidad.

**Tabla VII. Comparación entre propano y otros refrigerantes**

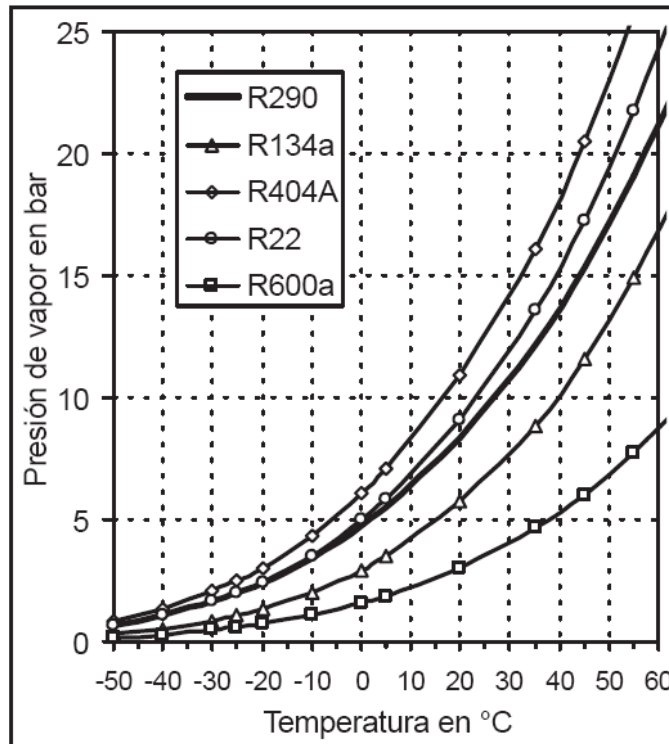
Refrigerante	R 290	R 134a	R 404A	R 22	R 600a
Nombre	Propano	1,1,1,2-Tetra-flouro-etano	Mezcla R 125 R 143a R 134a	Cloro-difluoro-metano	Isobutano
Formula	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CF <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> F	44/ 52/ 4	CHF <sub>2</sub> Cl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> CH
Temperatura crítica en °C	96.7	101	72.5	96.1	135
Peso Molecular en kg/kmol	44.1	102	97.6	86.5	58.1
Punto normal de ebullición en °C	-42.1	-26.5	-45.8	-40.8	-11.6
Presión a -25°C en bar (absoluto)	2.03	1.07	2.50	2.01	0.58
Densidad del líquido a -25°C en kg/l	0.56	1.37	1.24	1.36	0.60
Densidad vapor a to -25/+32°C en kg/m <sup>3</sup>	3.6	4.4	10.0	7.0	1.3
Capacidad volumétrica a -25/55/32°C en kJ/m <sup>3</sup>	1164	658	1334	1244	373
Entalpía de vaporización a -25°C en kJ/kg	406	216	186	223	376
Presión a +20°C en bar (absoluto)	8.4	5.7	11.0	9.1	3.0

Fuente: Información técnica documento CN.60.F1.05, Compresores Danfoss 2001.

### 3.11 Presión

Una diferencia entre el R290 y el R134a es el nivel de presiones, el R290 está más cerca al R22 y R404A. Por ejemplo, una presión de evaporación a – 25°C (-13°F) corresponde aproximadamente a un 190% de R134a, el 81% del R404A, 350% del R600a o casi igual para R22. En relación con esto el punto de ebullición normal es cercano al R22. Por lo tanto, el diseño del evaporador debe ser similar a los diseñados para R22 y R404A.

Figura 16. Presión de vapor para diferentes refrigerantes frente a temperatura.



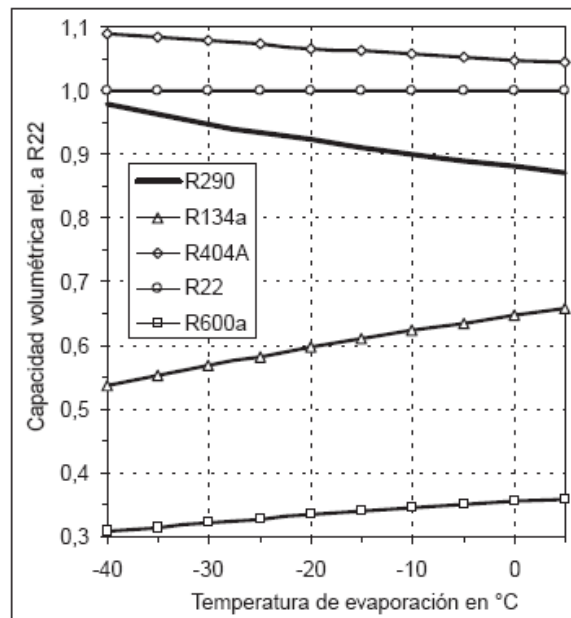
Fuente: Información técnica documento CN.60.F1.05, Compresores Danfoss 2001.

El nivel de presión y la temperatura crítica son casi como las del R22. Sin embargo, la temperatura de descarga es mucho más baja. Esto da la oportunidad de trabajar a relaciones de presión más altas, lo cual significa temperaturas de evaporación más bajas o temperaturas de gas de aspiración más altas.

### 3.12 Capacidad

El R290 tiene aproximadamente un 90% de la capacidad volumétrica del R22 y un 150% del R134a a una temperatura de condensación de 45°C (113°F). Es necesario, por lo tanto, un compresor con un desplazamiento volumétrico cercano al de R22, y de un 10 a un 20% mayor que para R404A. La capacidad volumétrica aproximada es de 2.5 a 3 veces la de R600a. Es por esto, que la elección de estos refrigerantes, R600a y R290, lleva a diseños de sistemas diferentes debido a los diferentes flujos volumétricos necesarios para la misma necesidad de refrigeración.

**Figura 17. Capacidad volumétrica del R290, R134a, R404A y R600a, en relación al R22, respecto a temperatura de evaporación, temperatura de condensación de 45°C (113°F) y temperatura de aspiración de 32°C (89.6°F), sin subenfriamiento.**



Fuente: Información técnica documento CN.60.F1.05, Compresores Danfoss 2001.

### **3.13 Pureza**

Las especificaciones para el R290 no se encuentran en los estándares internacionales. Algunos datos están incluidos en la norma alemana DIN 8960 de 1998, la cual es una versión ampliada de la ISO 916.

La pureza del refrigerante se considera según su química y su estabilidad, según la vida del compresor y del sistema, y desde el lado termodinámico considerando el comportamiento y el control del sistema de refrigeración.

La especificación DIN 8960 es una especificación general sobre la seguridad de los hidrocarburos, adoptada de un catálogo de criterios sobre refrigerantes y convertido al propano, isobutano, n-butano y otros. Algunos conceptos pueden ser aceptados para refrigerantes específicos y combinaciones no puras después de una evaluación exhaustiva.

El gas licuado del petróleo GLP para aplicaciones como carburantes con grado de pureza técnico de un 95 % no es suficiente para sistemas de refrigeración herméticos. El denominado refrigerante técnico de 99.5%, también conocido como 2,5 se utiliza ampliamente.

**Tabla VIII. Especificaciones de R290 de acuerdo con DIN 8960 – 1998**

	Especificación	Unidad
Contenido en refrigerante <sup>1</sup>	≥ 99.5	% masa
Impurezas orgánicas <sup>2</sup>	≤ 0.5	% masa
1,3-Butadieno <sup>3</sup>	≤ 5	ppm por masa
n-hexano	≤ 50	ppm por masa
Benceno <sup>4</sup>	≤ 1	ppm por sustancia
Azufre	≤ 2	ppm por masa
Deslizamiento de temperatura evap.	≤ 0.5	K (desde 5 a 97 % destil)
Gases no condensables	≤ 1.5	% vol. Fase vapor
Agua <sup>5</sup>	≤ 25	ppm por masa
Contenido en ácidos	≤ 0.02	mg KOH/g neutralización
Residuos de evaporación	≤ 50	ppm por masa
Partículas/Sólidos	no	Revisión visual

Fuente: Información técnica documento CN.60.F1.05, Compresores Danfoss 2001.

### 3.14 Inflamabilidad y seguridad

La principal desventaja en relación con el R290 es el riesgo de inflamabilidad, causa por la que se deben tomar precauciones de seguridad especiales para su manejo.

**Tabla IX. Inflamabilidad del propano**

Límite mínimo de explosión (LEL)	2.1%	Aprox. 39 g/m <sup>3</sup>
Límite máximo de explosión (UEL)	9.5%	Aprox. 177 g/m <sup>3</sup>
Temperatura mínima de ignición	470°C	

Fuente: Información técnica documento CN.60.F1.05, Compresores Danfoss 2001.

Son necesarias precauciones de seguridad en concentraciones grandes de propano debido a su inflamabilidad, en sus aplicaciones y en los procesos de producción. Los riesgos en estas situaciones son muy diferentes. Para que se produzca un accidente se tienen que cumplir dos condiciones. Una es la mezcla inflamable de gas y aire, y la otra es el tipo de ignición a ciertos niveles de energía o temperatura.

Estas dos condiciones se deben presentar juntas para la combustión, luego se debe evitar esta combinación.

### **3.15 Buenas prácticas en el uso de los HC como refrigerantes**

#### **3.15.1 Mantenimiento de sistemas con refrigerantes HC**

Cuando se abre un circuito de refrigeración para realizar reparaciones, o por cualquier otro motivo, se utilizan procedimientos convencionales. Sin embargo, es importante que se sigan las mejores prácticas ya que debe considerarse la inflamabilidad. Deberán respetarse los siguientes procedimientos:

- Eliminar el refrigerante.
- Purgar el circuito con gas inerte.
- Evacuar.
- Purgar nuevamente con gas inerte.
- Abrir el circuito mediante la realización de cortes o soldaduras.



La carga del refrigerante deberá recobrase en los cilindros de recuperación correctos. Luego, deberá purgarse el sistema con nitrógeno para que la unidad esté segura. Es posible que este proceso tenga que repetirse varias veces. No se debe utilizar oxígeno o aire a presión para realizar esta tarea. Para realizar la purga debe romperse el vacío del sistema con nitrógeno y llenarse hasta que se alcance la presión de trabajo. Luego, se debe despresurizar hacia la atmósfera y por último, eliminarse para recuperar el vacío. El proceso deberá repetirse hasta que exista la seguridad de que no hay refrigerante de hidrocarburo en el sistema.

Cuando se utilice la última carga de nitrógeno, se podrá despresurizar el sistema hasta alcanzar la presión atmosférica para permitir la realización del trabajo. Este procedimiento es de vital importancia si se realizarán soldaduras en el sistema de tuberías. Verificar que la salida de la bomba de vacío no se encuentre próxima a alguna fuente de ignición y que exista ventilación.

### **3.15.2 Carga de refrigerante HC**

La carga de los sistemas de refrigeración con refrigerantes de HC es similar a aquellas que se realizan con refrigerantes halocarbonados. Al igual que con todos los refrigerantes mezclados, las combinaciones de refrigerantes de HC también deberán cargarse en estado líquido, y mantener la composición correcta de la mezcla. Se deberán cumplir los siguientes requisitos adicionales:

- Verificar que no se contaminen los distintos refrigerantes cuando utilice el equipo de carga. Las mangueras o tuberías deben ser lo más cortas posible para minimizar la cantidad de refrigerante en ellas.

- Se recomienda mantener los cilindros en posición vertical y cargar el refrigerante en estado líquido.
- Verificar que el sistema de refrigeración presente una conexión a tierra antes de cargarlo con el refrigerante.
- Colocar una etiqueta en el sistema una vez que se haya completado la carga. La etiqueta debe indicar que los refrigerantes de HC se han cargado en el sistema y que el refrigerante es inflamable. Coloque la etiqueta en un lugar llamativo del equipo.
- Verificar que el equipo de carga es seguro para los refrigerantes a base de hidrocarburos. Se deberá tener extremo cuidado de no llenar excesivamente el sistema de refrigeración.
- Evacuar el sistema antes de abrir o soldar las juntas.

Antes de efectuar la recarga del sistema, debe realizarse una prueba de presión. Se debe realizar una prueba de fugas en el sistema al finalizar la carga, pero antes de la puesta en funcionamiento. Siempre, antes de abandonar el lugar, deberá llevarse a cabo una prueba de fugas.

### **3.15.3 Puesta en funcionamiento**

Los sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes de HC se ponen en funcionamiento exactamente de la misma manera que los sistemas que emplean refrigerantes de CFC, HCFC y HFC. Se debe de señalar correctamente el sistema.

### 3.15.4 Baja del servicio

Antes de llevar a cabo este procedimiento, es esencial tener un conocimiento completo del sistema y su funcionamiento. Antes de realizar esta tarea, deberá tomarse una muestra de aceite y refrigerante y efectuar un análisis antes de la reutilización del refrigerante recuperado.

- 1) Conocer el equipo y su funcionamiento.
- 2) Aislar eléctricamente el sistema.
- 3) Antes de intentar efectuar el procedimiento verificar:
  - Disponibilidad de equipos mecánicos para manipular los cilindros del refrigerante.
  - Disponibilidad de equipo de protección personal y su utilización correcta.
  - Que se encuentre un supervisor durante el proceso de recuperación.
- 4) De ser posible, vaciar con la bomba el sistema de refrigeración.
- 5) Si no se puede realizar un aspirado, utilizar un colector múltiple para que se pueda eliminar el refrigerante desde varios sectores del sistema.
- 6) Verificar que el cilindro esté ubicado sobre la balanza antes de que se efectúe la recuperación.
- 7) Encender la máquina de recuperación y operarla de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- 8) No llenar excesivamente los cilindros (no más de 80% del volumen de carga líquida).
- 9) No sobrepasar, ni siquiera temporalmente, la presión máxima de trabajo del cilindro.

- 10) Cuando se hayan llenado correctamente los cilindros y se haya completado el proceso, verificar que se retiren rápidamente del lugar los cilindros y el equipo, y se cierren todas las válvulas de aislamiento del equipo.
- 11) No podrá cargarse el refrigerante recuperado en otro sistema de refrigeración salvo que se haya controlado.

### **3.15.5 Detección de fugas de refrigerantes HC**

Para detectar fugas de refrigerante se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Las salas de máquinas deben estar provistas de detectores de vapor de refrigerante para activar una alarma y encender automáticamente los ventiladores si la concentración de la emisión de refrigerante supera el límite práctico.
- Los detectores deben utilizarse para aislar el equipo eléctrico que no cumple con los requisitos eléctricos y para advertir a las personas que se ha producido una fuga.
- Los puntos de muestreo deben instalarse en lugares estratégicos dentro de las salas de máquinas.
- Los puntos deben ubicarse de manera tal que puedan dar señales inmediatas en caso de una fuga y que el efecto de la circulación del aire no reduzca su efectividad.
- Los detectores de fugas de refrigerante deben calibrarse para el refrigerante específico a detectar.
- Cuando el refrigerante sea más pesado que el aire, los puntos de muestreo deberán ubicarse al nivel del suelo.

### **3.15.6 Componentes eléctricos**

Se deben tomar precauciones para evitar la posibilidad de que existan fuentes de ignición directas provenientes de contactos eléctricos descubiertos. Se debe prestar especial atención a los artículos eléctricos que puedan producir chispas durante el funcionamiento, deben modificarse por representar posibles fuentes de ignición. Se pueden aplicar los siguientes métodos:

- Aislar las terminales.
- Ubicarlos dentro de recintos apropiados o en el exterior.
- Reemplazarlos por componentes en estado sólido.
- Reemplazarlos por componentes a prueba de explosiones, los motores, incluidos los ventiladores, las bombas y los compresores, deben ser de un modelo sin escobillas para evitar posibles chispas.
- Al sustituir componentes eléctricos, emplear otros del mismo tipo y no volver a utilizar los ya usados.

### **3.15.7 Manejo de los cilindros**

El manejo de los cilindros con precaución presenta escasas diferencias con respecto al manejo de otros cilindros para refrigerante. Dichas precauciones consisten en:

- No eliminar ni ocultar las etiquetas oficiales de un cilindro.
- Siempre colocar nuevamente la tapa de la válvula del cilindro cuando éste no se utilice.
- Utilizar y almacenar los cilindros en posición vertical.

- Verificar el estado de la rosca y asegurarse de que ésta esté limpia y no se haya dañado.
- Almacenar y utilizar los cilindros en áreas secas, bien ventiladas y que se encuentren alejadas de todo riesgo de incendio.
- No exponer los cilindros a fuentes directas de calor, tales como el vapor o radiadores eléctricos.
- No reparar ni modificar los cilindros o sus válvulas.
- Siempre utilizar equipo apropiado para trasladar los cilindros, aunque se trate de una distancia corta. Nunca hacer rodar los cilindros por el suelo.
- Tomar las precauciones necesarias para evitar que ingrese aceite, agua o alguna sustancia externa en el cilindro.
- Siempre tomar el peso del cilindro para verificar si se encuentra vacío. La presión no es una indicación precisa de la cantidad de refrigerante que contiene el cilindro.
- Sólo utilice cilindros de recuperación especiales para la recuperación de refrigerantes de HC.

### **3.15.8 Almacenamiento de los cilindros**

Los cilindros deberán almacenarse en el exterior y nunca en establecimientos residenciales. Los cilindros pueden conservarse en establecimientos comerciales o industriales de acuerdo con las siguientes pautas de almacenamiento:

- Las cantidades que se almacenen deberán colocarse en áreas o cajas especiales y específicas.

- El acceso a las zonas de almacenamiento deberá estar restringido “únicamente para personal autorizado”. Estos lugares deberán señalizarse con avisos que prohíban fumar y la utilización de fuentes potenciales de ignición.
- Los cilindros que contengan refrigerantes deberán almacenarse al nivel del suelo, nunca en sótanos. Los cilindros deberán almacenarse en posición vertical y deberán contar con un fácil acceso.
- Deberá evitarse la acumulación de electricidad estática.

### **3.15.9 Unión de tuberías para sistemas de refrigeración con HC**

#### **3.15.9.1 Soldadura ultrasónica**

Cuando se unen materiales por medio de soldadura ultrasónica, a las partes a ser unidas se les aplican simultáneamente una fuerza estática, la cual mantiene en posición las piezas y facilita la unión, y una fuerza dinámica (vibración ultrasónica), la cual genera la fricción que produce el calor necesario para “soldar” los materiales a unir. Este procedimiento es usado en las industrias tanto para unir plásticos como para unir metales.

#### **3.15.9.2 Soldadura ultrasónica de metales**

Mientras que en la unión ultrasónica de plásticos las vibraciones de alta frecuencia son usadas para incrementar la temperatura y así lograr la plastificación del material; la unión ultrasónica de metales es un proceso completamente diferente: las vibraciones mecánicas son introducidas

horizontalmente, las partes a ser soldadas no son calentadas hasta el punto de fusión, sino que son conectadas gracias a la aplicación de presión y vibraciones mecánicas de alta frecuencia.

Durante la soldadura ultrasónica de metales, un proceso complejo es iniciado el cual involucra fuerzas estáticas, fuerzas cortantes de oscilación y un moderado incremento de temperatura en el área a soldar. La magnitud de estos factores depende del grosor de las piezas a unir, de su estructura superficial y de sus propiedades mecánicas. Las piezas de trabajo son localizadas entre una pieza fija, esto es, el yunque, y el dispositivo generador de las vibraciones ultrasónicas denominado "Sonotrode" o "horn", el cual oscila horizontalmente a alta frecuencia (usualmente 20, 35 o 40 kHz) durante el proceso de soldado.

La frecuencia de oscilación más comúnmente usada (frecuencia de trabajo) es 20 kHz. Esta frecuencia está sobre el rango audible del oído humano y permite el mejor uso posible de la energía. Para procesos de soldadura en los que se requiere sólo una pequeña cantidad de energía, puede ser usada una frecuencia de trabajo de 35 ó 40 kHz. El sonotrode y el yunque tienen superficies ásperas o tienen generalmente superficies fresadas con estrías cruzadas para apretar las piezas que se ensamblarán y prevenir deslizamientos indeseables.

Se aplica presión estática perpendicularmente a la interfaz a soldar. Luego se sobrepone la fuerza cortante oscilante de alta frecuencia (ultrasonido). Las fuerzas dentro de los objetos deben mantenerse por debajo del límite de elasticidad para que las piezas no se deformen. Si las fuerzas sobrepasan un valor de umbral dado, ocurrirá una deformación local en los materiales a unir.



Las piezas se compactan ligeramente en la superficie debido a la fuerza de sujeción antes de conectar la energía ultrasónica; el intervalo durante el cual sucede esto se llama tiempo de exprimido. Después de apagar la energía ultrasónica y aflojar la fuerza de sujeción, se aplica una breve ráfaga de la primera para evitar que el ensamble soldado se pegue a la herramienta o al yunque.

Las vibraciones de alta frecuencia inducen fuerzas cortantes que disminuyen la contaminación superficial de los materiales a unir y producen un enlace puro entre los metales en la interfase. La oscilación posterior hace que el área de la soldadura crezca. Al mismo tiempo lleva a cabo una difusión atómica en el área de contacto y el metal se recristaliza en una estructura de grano fino similar al que caracteriza a los metales trabajados en frío.

La soldadura ultrasónica del metal es local y limitada a las fuerzas de corte y al desplazamiento de las capas intermedias. Sin embargo, una fusión no ocurre si la fuerza de presión, la amplitud y el tiempo de la soldadura son ajustados correctamente. Los análisis microscópicos usando microscopios ópticos y electrónicos hacen evidente la recristalización, la difusión y otros fenómenos metalúrgicos. Sin embargo, no proporcionan ninguna evidencia de fusión (interfaz fundida). El uso de sensores térmicos altamente sensibles en las capas intermedias muestran un aumento inicial de la temperatura con una posterior disminución constante de la misma.

La temperatura máxima obtenida depende de los ajustes que se hagan a los controles del equipo de soldadura. Un aumento en la energía ultrasónica conduce a un aumento de la máxima temperatura posible. Un aumento en la fuerza estática conduce a un aumento de la temperatura inicial, pero al mismo

tiempo limita la posible temperatura máxima. Por lo tanto, el perfil de temperatura puede ser manejado, dentro de ciertos límites, haciendo los ajustes apropiados en la máquina.

La temperatura en la capa intermedia es, por supuesto, también una función de las características del material. La regla básica es que la temperatura obtenida es mayor en los materiales con una conductividad térmica baja, tal como el hierro, y menor para los metales con una conductividad térmica más alta, tal como el cobre y el aluminio. Las medidas de temperatura efectuadas en diversos materiales, con puntos de fusión que varían ampliamente, han mostrado que la temperatura máxima en la interfase de la soldadura no excede de un 35 a 50% de la temperatura que derrite al metal individual, cuando se han seleccionado los parámetros de la soldadora apropiadamente. La soldadura ultrasónica de metales no produce una adhesión superficial en los metales. Se ha probado que las uniones son sólidas, homogéneas y duraderas.

### **3.15.9.3 Aplicaciones de la soldadura ultrasónica**

Las aplicaciones de la soldadura ultrasónica crecen y la oferta en el mercado de máquinas adecuadas al uso industrial aumenta cada año. Algunas de estas aplicaciones son:

- Industria: Refrigeración. Corte y soldado de tubos de cobre.
- Industria: Aparatos domésticos. Disco de aluminio unido a elemento de calentamiento de aluminio.

- Industria: Automotriz. Cable de cobre 20 AWG unido a una terminal de latón recubierta de níquel. Cable de cobre 20 AWG unido a un cable de cinta plana.
- Industria: Eléctrica-comunicaciones. Cable de cobre 12 AWG unido a una placa de latón recubierta de níquel. Alambres de cobre 18 AWG unidos a terminales de placas de latón recubiertas de oro.
- Industria: Electrónica-cableado. Alambre de cobre 14 AWG unido a terminal de cobre. Alambre de cobre 10 AWG unidos a terminales de latón.
- Industria: Acero/fundición. Alambre de cobre unido a un anillo de cobre.



## **4. VENTAJAS ENERGÉTICAS Y ECOLÓGICAS DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN NO CONVENCIONAL**

### **4.1 Ventajas de la refrigeración magnética**

Este sistema de refrigeración presenta grandes ventajas ambientales y energéticas. Al suprimir el compresor, aumenta la eficiencia y reduce la emisión de CO<sub>2</sub>. También disminuye el efecto invernadero causado por los CFC y HFC, porque reemplaza los refrigerantes del ciclo de vapor por un refrigerante magnético y un fluido, que puede ser agua o helio dependiendo de la temperatura de aplicación. Las ventajas que se tienen con la refrigeración magnética son:

- Tecnología verde, no utiliza refrigerantes convencionales.
- Tecnología silenciosa (sin compresor).
- Mayor eficiencia energética. Los ciclos termodinámicos próximos al proceso de Carnot son posibles gracias a la reversibilidad del MCE.
- Diseño sencillo de las máquinas, por ejemplo sistemas de refrigeración con intercambiador de calor rotativo poroso.
- Bajo costo de mantenimiento.

## **4.2 Ventajas de la refrigeración por absorción**

### **4.2.1 Interés energético**

En todo proceso de definición de las posibles soluciones a un determinado problema de aprovechamiento energético, el aspecto económico es el más influyente en la decisión para la utilización de esta tecnología, aunque hoy en día se toman en cuenta las consideraciones de impacto ambiental que tienen una importancia prioritaria.

El costo inicial de una planta de refrigeración por absorción resulta, en la mayoría de los casos, superior al de un equipo de compresión mecánica de la misma capacidad.

La razón para esta diferencia está en la cantidad de materiales metálicos que son necesarios para la fabricación de los intercambiadores de calor, en equipos que se basan en procesos termodinámicos sin prácticamente aportación del equivalente térmico del trabajo mecánico.

Sin embargo, cuando se analizan los costos de explotación a partir del valor de las energías consumibles, la balanza puede desplazarse a favor de los equipos de absorción, si se dan las condiciones necesarias.

#### **4.2.2 ¿Cuál es la razón para que los ciclos de absorción tengan actualmente una aplicación práctica?**

La respuesta es bastante sencilla: El costo de producir el trabajo mecánico necesario para obtener un kW de refrigeración por ciclo de compresión mecánica de vapor es, normalmente, superior al costo necesario para recuperar la cantidad de calor a aplicar para obtener el mismo kW en un ciclo de absorción. El costo de la energía básica es el único factor que determina la posible competitividad de los sistemas de absorción frente a los de compresión mecánica.

#### **4.2.3 Reducción de consumos primarios**

Teniendo en cuenta que los sistemas de absorción son de gran beneficio económico, porque cuánto más barata es la energía térmica disponible para el accionamiento de las máquinas, está claro que este tipo de equipos son especialmente útiles para recuperar calor de desecho, esto permite enfocar el problema de aprovechamiento energético desde otro punto de vista. Los sistemas de absorción no sólo hacen posible la utilización de energías térmicas que serían liberadas a la atmósfera, de no utilizarse estos sistemas para su recuperación y aprovechamiento, sino que además, al mismo tiempo evitan el consumo de energías más caras (fósiles o eléctricas), para su utilización en la producción de refrigeración. Es decir, que dan lugar a un doble ahorro de energía; por la recuperación de energías desechables y por la reducción de consumo en la producción de energía eléctrica.

#### **4.2.4 Impacto ambiental**

La utilización de los ciclos Amoníaco-Agua están más condicionados en su efecto medioambiental por la presencia del Amoníaco como refrigerante, y su divulgación ha sido más amplia por esta razón, al ser este agente refrigerante plenamente ecológico, sobre todo en lo relativo a su ODP (Potencial de Destrucción de Ozono) y GWP (Efecto Invernadero).

#### **4.2.5 Sistemas de absorción vs. Sistema de vapor-compresión**

Entre los sistemas de absorción y los de compresión mecánica de vapor, existen diferencias muy significativas en cuanto a la influencia de su utilización sobre el medio ambiente.

Los expertos en esta materia, han coincidido en que el factor que determina con mayor exactitud la incidencia sobre el medio ambiente de una máquina o proceso, es el que se ha denominado TEI (Impacto Ambiental Total, Total Environmental Impact) que engloba todos los parámetros de influencia:

- ODP (Potencial de destrucción de Ozono).
- GWP (Potencial de calentamiento global-Efecto Invernadero)
- Consumo de los equipos (COP).
- Vida atmosférica.
- Carga de los equipos (Refrigerante).
- Emisiones de los equipos.



De todos estos parámetros el de mayor importancia, es el consumo de los equipos, englobando tanto los consumos directos de energía de cada máquina como los de energías primarias y fósiles necesarios para la producción de la energía eléctrica que después se va a consumir en ella, e incluyendo las emisiones de gases invernadero (CO<sub>2</sub>, principalmente) que van combinadas con la producción de esta energía.

La Agencia Internacional del Medio Ambiente ha determinado que el 98% del TEI de un sistema de refrigeración se debe a la emisión de gases invernadero que se originan en la producción de la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento. Sólo el 2% restante se debe a las emisiones originadas por la propia máquina. Considerando que el consumo eléctrico de una planta de absorción es un 7% del correspondiente a un equipo de compresión mecánica, y que la energía térmica que consume, salvo en las aplicaciones de combustión directa, es decir, que su impacto ambiental se debe a otras necesidades ajenas a las de la producción de refrigeración, se concluye que el TEI de una planta de absorción es tan solo el 7,15% respecto al equipo de compresión mecánica equivalente.

Este valor se reduce hasta el 7% tomando en cuenta que un equipo de absorción no origina emisiones propias, ya que su interior, se encuentra en depresión frente a la atmósfera, y suponiendo que por una avería se produjera una emisión de sus fluidos interiores al exterior, esto no tendría ningún efecto contaminante para el ambiente, dadas las características de estas sustancias.

### **4.3 Beneficios del enfriamiento evaporativo**

El principio de refrigeración evaporativa, materializado en las torres de enfriamiento de agua y en los condensadores evaporativos, desempeña un papel fundamental en la industria moderna. Entre sus ventajas se cuenta el ahorro energético, el respeto hacia el medioambiente, la seguridad y una inmejorable relación entre la inversión y el rendimiento.

Este procedimiento de enfriamiento se aplica en la industria desde hace más de 100 años; se viene utilizando desde la antigüedad para obtener en los recintos habitados condiciones hidrotérmicas de bienestar. Fue utilizado extensamente por los romanos y por los árabes en sus palacios, con sus fuentes de agua, no solo en los patios sino incluso en el interior de algunos recintos. Se trata, por lo tanto, de un proceso técnicamente bien conocido y sencillo de aplicar.

#### **4.3.1 Ventajas de la refrigeración evaporativa**

Los equipos de enfriamiento evaporativo, son adecuados para casi todas las aplicaciones en las que se requiere refrigeración. Sin ellos muchos de los procesos generados en estas instalaciones no podrían realizarse o lo harían con un rendimiento sensiblemente inferior. De manera que se produciría un mayor consumo de recursos naturales como el petróleo, gas natural, agua y una mayor amenaza para el medioambiente, como consecuencia del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero por las centrales térmicas de producción de energía eléctrica y por incremento de la contaminación acústica.

### **4.3.2 Ahorro energético**

La cantidad de agua evaporada en el proceso de enfriamiento evaporativo y, como consecuencia, la transferencia de calor, está condicionada por la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente que, precisamente en verano, cuando las necesidades de refrigeración son más elevadas es sensiblemente inferior a la temperatura de bulbo seco.

De esta forma, los equipos de refrigeración evaporativa consiguen temperaturas de agua inferiores a las logradas con los equipos enfriados por aire, cuyo rendimiento se ve limitado de acuerdo con la temperatura del bulbo seco del ambiente.

La posibilidad de conseguir temperaturas de enfriamiento de agua de hasta 25°C o incluso inferiores, permite el empleo de intercambiadores de calor intermedios lo que significa que el fluido procesado puede enfriarse en circuito cerrado hasta 30°C o menos. Mientras que con los equipos de enfriamiento refrigerados por aire, que dependen de la temperatura ambiente de bulbo seco, las temperaturas mínimas que pueden lograrse son muy superiores, pudiendo llegar hasta los 50°C.

En muchos casos, estas temperaturas son tan elevadas que el proceso es inviable o lo es con un rendimiento muy bajo y además requieren mayores cantidades de energía para la evacuación o disipación del calor del proceso. En efecto, los equipos de enfriamiento evaporativo ahorran energía.

En primer lugar, las temperaturas más bajas de enfriamiento del agua aseguran el funcionamiento del proceso y reducen el consumo de energía del mismo; en segundo lugar, el equipo es altamente eficaz energéticamente debido al uso de transferencia de calor latente de evaporación, lo que permite, la eliminación de una cantidad superior de calor a la lograda con el uso de una transferencia tradicional de calor sensible, es decir, requiere un caudal de aire hasta cuatro veces menor que el que necesita un proceso de enfriamiento por aire.

Así, con esta tecnología la condensación de las instalaciones frigoríficas de refrigeración y de aire acondicionado cabe realizarla a una temperatura que puede oscilar entre 6 y 18K (-267 y -255°C, -448.87 y -427.27°F) menos que en el caso de condensación por aire.

Esto hace que la presión en el sector de alta del circuito frigorífico sea muy inferior y disminuya la relación de compresión. Por consiguiente, disminuye el trabajo de compresión y la energía eléctrica absorbida por el motor de accionamiento del compresor.

La energía necesaria para hacer funcionar una máquina frigorífica con unas prestaciones concretas que condensa con un equipo evaporativo, puede reducirse del 20 al 80 por ciento, e incluso, más que si esa misma máquina condensara por aire.

En la Tabla X se realiza una comparación de consumos de energía eléctrica entre diferentes sistemas de aire acondicionado.

**Tabla X. Comparación de consumos energéticos (kW) en una instalación de aire acondicionado típica (capacidad frigorífica = 1.200 kW).**

Elemento	Enfriadora de agua con condensación mediante enfriamiento con aire	Roof-Tops	Enfriadora de agua con condensación mediante enfriamiento con agua y Torre de recuperación	Enfriadora de agua con condensación mediante condensadores evaporativos
Compresor	406	374	220	165
Ventiladores del condensador	63,5	43	19	19
Climatizadores	112	150	112	112
Bomba de agua del sistema fancoils	15	--	15	15
Bomba del circuito de recuperación de agua	--	--	12	12
Total	596	567	378	323

Fuente: ANEFRYC.

Consumo enfriadores de agua con condensación por agua y torres de recuperación: 378 kW. Ahorro = 36% respecto de enfriadores con condensación por enfriamiento con aire.

Consumo enfriadores de agua con condensadores mediante condensación evaporativa: 323 kW. Ahorro = 45% respecto de enfriadores con condensación por enfriamiento con aire. Por otra parte, como se requiere impulsar, aproximadamente, una cuarta parte de aire, en comparación con un equipo de enfriamiento por aire, el consumo de energía de los motores de accionamiento de ventiladores es muy inferior.

Por último, cabe señalar que se producen menos pérdidas energéticas en el transporte desde la central generadora hasta el punto de consumo, al ser menor la energía eléctrica necesaria.

#### **4.3.3 Inversión más reducida**

Las instalaciones de refrigeración que condensan con esta tecnología requieren una inversión menor en comparación con aquellas que condensen por aire y tengan que conseguir idénticas prestaciones. Al disminuir la temperatura de condensación aumenta la producción de refrigeración volumétrica. Lo cual significa que para producir el mismo efecto refrigerante se requieren componentes menos caros: un compresor menor, un motor eléctrico de accionamiento menor, un condensador menor, menos ventiladores (menor producción de ruido y menor costo de aislamiento). Además, estos equipos son de 4 a 5 veces menos voluminosos y pesados que los condensadores por aire lo cual abarata la estructura de soporte y su ubicación.

Para producir el mismo efecto refrigerante se requerirá un valor de demanda de energía eléctrica menor, lo que supone un ahorro de inversión en centrales generadoras y en las correspondientes líneas de distribución.

#### **4.3.4 Impacto ambiental menor**

El enfriamiento evaporativo utilizado en las instalaciones de refrigeración y de aire acondicionado con condensación por agua, resulta ser una tecnología respetuosa con el entorno ya que produce un impacto medioambiental menor que sus alternativas.

#### **4.3.5 Menor impacto por efecto invernadero**

El menor consumo energético en el lugar de destino y las menores pérdidas de energía en el transporte de dicha energía acarrearán menos emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de la correspondiente energía eléctrica. Es el denominado efecto invernadero indirecto de las instalaciones de refrigeración. Teniendo en cuenta que 1 kWh de energía eléctrica consumida procedente de centrales térmicas puede suponer, si se utiliza carbón, cerca de 1 kg de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera; en el caso de una central de ciclo combinado producir 1 kWh serían 0,4 Kg de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera. Supone, además, menor riesgo de fugas de refrigerantes fluorados de efecto invernadero como consecuencia de la menor temperatura y consiguiente menor presión de condensación, es decir, el denominado efecto invernadero directo, producido por la fuga de refrigerantes fluorados (HCFC y HFC).

La menor temperatura de condensación posibilita, además, la aplicación de tecnologías de bajo impacto ambiental utilizadas extensa y tradicionalmente en la industria (instalaciones de refrigeración con NH<sub>3</sub>, aplicación del CO<sub>2</sub> a bajas temperaturas asociado con NH<sub>3</sub> en sistemas de producción de frío en cascada).

#### **4.3.6 Menor consumo de agua**

En cuanto a las pérdidas de agua, en el lugar de la aplicación, los equipos evaporativos utilizados en instalaciones de refrigeración reutilizan más del 95% del agua que movilizan en su funcionamiento. Una pequeña cantidad se evapora, disipando el calor de condensación, otra se evacua para evitar la concentración de sales, y una parte ínfima es arrastrada, por el aire impulsado, en forma de aerosoles.

El agua consumida indirectamente, es decir, en origen es menor que en el caso de la condensación por aire, puesto que una central generadora de electricidad consume aproximadamente 100 L de agua por cada kWh producido. Considerando ambos consumos de agua (directo e indirecto), para producir el mismo frío una instalación que condensa por aire consume del orden del 55% más de agua que en el caso que se utilice condensación por enfriamiento con agua recuperada por una torre de refrigeración. Bajo ciertas condiciones climáticas, cuando el aire de salida de la torre se descarga húmedo y templado, en el aire ambiente más frío se genera un penacho visible. Éste es producido por el vapor de agua puro condensado y en suspensión, similar a las nubes y totalmente inofensivo. La industria dispone de varios medios para minimizar o incluso eliminar dicho penacho.



#### **4.3.7 Menor impacto acústico**

La contaminación acústica por estos equipos de refrigeración evaporativa es reducida debido a que requieren un menor caudal de aire que los equipos de condensación por aire.

#### **4.3.8 Seguridad frente a la Legionella**

Las torres de refrigeración de agua y condensadores evaporativos (mantenidos adecuadamente desde el punto de vista mecánico y sanitario) constituyen una tecnología segura. La injustificada vinculación de diferentes brotes de Legionella a los equipos de enfriamiento y condensación evaporativos, están propiciando el uso indiscriminado de los dispositivos de condensación por aire.

Sin embargo, los equipos de refrigeración evaporativa sólo son susceptibles de desarrollar la bacteria "Legionella Pneumophila", aumentando la concentración de la misma en el agua que recircula; si el agua que recibe de la red está contaminada y el equipo no se mantiene de forma adecuada. Para que uno de estos equipos sea responsable de un brote de Legionella se debe producir una cadena de acontecimientos muy improbable:

- Llegada de una colonia virulenta de Legionella Pneumophila a través de la red de suministro de agua.
- Funcionamiento en condiciones incontroladas, tales que permitan la multiplicación de la bacteria hasta umbrales peligrosos.

- Descarga de una corriente de aire con microgotas contaminadas en suspensión, que puedan llegar hasta donde se encuentran personas.
- Que un número suficiente de estas microgotas sean inhaladas por personas susceptibles de contraer la enfermedad (inmunodeprimidas).

#### **4.4 Ventajas de la tecnología de hidrocarburos**

- No afecta la capa de ozono. La propiedad de no afectar la capa de ozono es un requisito básico para los refrigerantes sustitutos de los CFC.
- No tiene efecto invernadero. El efecto de calentamiento de la Tierra es despreciable.
- Es una alternativa permanente. No es el caso de las alternativas transitorias como el HFC 134a que requiere de una segunda reconversión para su eliminación.
- Ahorro energético. Se logra una disminución del consumo energético con respecto a los refrigerantes CFC y HFC, esto contribuye a la disminución del calentamiento de la tierra.
- Disminución de ruido. Cuando un refrigerador emplea hidrocarburo se logra el efecto conocido como susurro.
- Mayor disponibilidad. Los hidrocarburos por su bajo costo de producción y los niveles de producción pueden estar más disponibles que los otros refrigerantes como es el caso del HFC 134a.

- Técnicamente simple de adoptar. Son compatibles con los materiales usados en sistemas de CFC, como el cobre y los aceites minerales, facilitando su aplicación y disminuyendo el costo de la conversión.
- Su potencial de destrucción del ozono es nulo, y el de efecto invernadero casi nulo.
- Su eficacia es ligeramente mejor que otras alternativas del CFC-12.
- Baja viscosidad, baja y alta conductibilidad térmica.
- Son miscibles con aceites.
- Calor latente de vaporización mucho mayor que el CFC-12.
- Alta estabilidad química.
- Son compatibles con los materiales usados con refrigerantes tradicionales: componentes de metal y aceites.
- Su densidad es aproximadamente un tercio del CFC-12.



## CONCLUSIONES

1. La refrigeración magnética se constituye en una de las tecnologías más importantes y con mayor potencial debido al bajo impacto ambiental y sus ventajas energéticas, la razón es que este sistema no utiliza compresor y con ello se tiene un funcionamiento silencioso.
2. Los sistemas de refrigeración por absorción utilizan calor de desecho y evitan el consumo de energías más caras, para su utilización en la producción de refrigeración; a esto se le suma la ventaja que los refrigerantes (amoníaco, agua) que utilizan no son dañinos al ambiente.
3. Los equipos de enfriamiento evaporativo son adecuados para casi todas las aplicaciones en las que se requiere refrigeración. Ya que con estos sistemas se reduce el uso de recursos naturales (petróleo, gas natural, agua), y se logran reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
4. El enfriamiento evaporativo utilizado en las instalaciones de refrigeración y de aire acondicionado con condensación por agua, resulta ser una tecnología respetuosa con el entorno, ya que produce un impacto medioambiental menor que otras alternativas.
5. Con el uso de sistemas de refrigeración con hidrocarburos se logra una disminución del consumo energético con respecto a los refrigerantes CFC y HFC, esto contribuyendo con los esfuerzos para la reducción del uso de sustancias nocivas al ambiente.



## RECOMENDACIONES

1. Promover el uso de sistemas de refrigeración no convencionales para frenar el deterioro de la capa de ozono, ya que esto conlleva a problemas ambientales dentro de los cuales destaca el calentamiento global.
2. Implementar el uso de la refrigeración magnética en lugares donde el silencio es primordial, ya que ésta es de funcionamiento silencioso, el sistema no utilizó compresor para su operación.
3. Impulsar el uso de sistemas de refrigeración evaporativa, ya que esta utiliza su energía de desecho para la realización de nuevos procesos y así se tendría una reducción en el consumo de recursos energéticos y naturales.
4. En los sistemas de refrigeración evaporativa, tomar en cuenta el uso adecuado de los métodos vigentes, para evitar la propagación de la bacteria de la Legionella.
5. Promover el uso de Hidrocarburos como refrigerantes, porque debido a su naturaleza no se necesitan hacer mayores cambios en los sistemas convencionales.





## BIBLIOGRAFÍA

1. ASHRAE, **Refrigeración 2002**, I-P Edición. ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers Inc. 1719 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329
2. Çengel, Y. **Termodinámica**. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. México 2006.
3. Danfoss, **Información técnica**. Documento CN.60.F1.05, Compresores Danfoss 2001.
4. Difinizio, T. **“Soldadura: Uniones ultrasónicas”**, Manufactura, año 7, número 67, enero 2001, México, D.F.
5. De Nevers, N. **Ingeniería de la Contaminación del Aire**. McGraw-Hill Inteamericana Editores, S.A. de C.V. México 1998.
6. Hoyos, J. **Refrigeración magnética**. Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2004.
7. McQuiston, F. **Calefacción, ventilación y aire acondicionado**. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México 2003.

8. Meyersen, K. **HYDROCARBON TECHNOLOGY II**, Anuario 1996 de GTZ  
Dr. Klaus Meyersen, Dr. Peter Stormer y Dirk Legatis  
PROKLIMA@GTZ.de. Eschborn, 1996
9. Pecharsky, V., Geschneidner, K. **Thermodynamics of the magnetocaloric effect**. Physical review B, Vol. 64 2001.
10. PNUMA, **Buenos procedimientos en refrigeración**, Manual de Instrucción. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
11. Revista AC/R Latinoamérica, **Refrigeración de Carga Reducida**, vol. 8 No. 4, Julio-Agosto de 2005, Colombia.
12. Revista AC/R Latinoamérica, **Refrigerantes**, vol. 4 No. 3 Mayo-Junio de 200, Colombia.
13. Revista Fic-Frío, **Isobutano: entendiendo las diferencias**, año 15 No. 72, abril de 2007, Brasil.
14. Revista Frío-Calor aire acondicionado, Publicación Técnica Mensual No. 381 mayo de 2006, Madrid, España.
15. STAPLA, **“Ultrasonic metal Welding: Principles and application of high-grade bonding technology”**, Libro electrónico editado por STAPLA Ultrasonics Corporation.
16. © 2008 **Refrigerantes Ecológicos S. A. de C. V.** Andrés de La Concha  
Número 9, Col. San José Insurgentes, México D.F., CP 03900