

Ministerio de Ambiente y Energía
Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

MANUAL Refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global

2020



Marcas Comerciales

Todas las marcas comerciales que se usaron en este documento son marcas comerciales de sus respectivas empresas.

Reproducción de este documento

Queda autorizada la reproducción total o parcial de este documento, sin previo consentimiento por escrito, siempre y cuando se haga constar que la parte reproducida pertenece al PNUD y se haga constar las fuentes consultadas.

Nota:

Los procedimientos descritos son para uso exclusivo de personas que posean la pericia y capacitación técnica apropiadas y para ser aplicados por su propia cuenta y riesgo.

Cuando los procedimientos descritos difieren a los procedimientos de los fabricantes de determinados equipos, deberán seguirse las instrucciones de dicho fabricante.

Documento compilado por:

- Ing. Kenneth Román Campos
 - Ing. Yoltic Zúñiga Gamboa
 - Asesores técnicos del Plan de Gestión de Eliminación de HCFC en Costa Rica
-

Revisado por:

Ing. Rodolfo Elizondo Hernández, Coordinador HPMP PNUD-MINAE

San José, Costa Rica. 2021



Contenido

Abreviaturas	vii
1. Justificación	1
2. Objetivo General	1
3. Objetivos específicos:	1
4. Generalidades	2
5. Calendario de eliminación y reducción de refrigerantes	3
6. Clasificación de refrigerantes	4
6.1. Halocarbonados:	4
6.2. Mezclas	6
6.3. Refrigerantes Inorgánicos	7
6.4. Refrigerantes Orgánicos	7
7. Nomenclatura de los refrigerantes	9
8. Propiedades de refrigerantes	10
9. Selección adecuada de refrigerantes:	11
10. Lubricantes	12
11. Sustitutos de refrigerantes comerciales por refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global.	16
11.1. Refrigerantes Naturales	16
11.2. Amoníaco, R-717	17
11.2.1. Ventajas del amoníaco	17
11.2.2. Restricciones del Amoníaco	17
11.2.3. Sistemas con Amoníaco	18
11.2.4. Seguridad con sistemas de amoníaco	19
11.2.5. Procedimiento en caso de fuga	20
11.3. Dióxido de Carbono CO ₂ , R-744	21
11.3.1. Sistemas Subcríticos	21
11.3.3. Ventajas del Dióxido de Carbono	23
11.3.4. Restricciones del CO ₂	24
11.3.5. Seguridad con CO ₂	24
11.3.6. Procedimiento en caso de fuga	24
11.4. Hidrocarburos	25
11.4.1. Ventajas de los Hidrocarburos	25

11.4.2. Restricciones de los HC	25
11.4.3. Sistemas con HC	25
11.4.4. Seguridad con HC	26
11.4.5. Procedimiento en caso de fuga	27
11.4.6. Procedimiento en caso de incendio	28
11.4.7. Consideraciones de seguridad al trabajar con sistemas con refrigerantes Hidrocarburos	28
11.4.8. Equipo de protección personal durante el mantenimiento, instalación o reparación de sistemas RAC.	29
11.4.9. Manipulación y almacenamiento de cilindros	29
11.4.10. Instalación de Equipos de Hidrocarburos	30
11.5. Purezas de refrigerantes naturales e hidrocarburos	33
12. Resumen de sustitutos de refrigerantes	33
12. Anexos	35
<hr/>	
A. Protección y análisis de riesgo ante explosión.	35
B. Propiedades y Características del Refrigerante R-290	35
Referencias	37
<hr/>	

Figuras

Figura 1. Proceso de destrucción de la Capa de Ozono	2
Figura 2. Agujero de Ozono en el polo sur	3
Figura 3. Calentamiento global. Fuente (Spagnuolo, 2019)	3
Figura 4. Calendario de reducción de consumo de HCFC	5
Figura 5. Calendario de eliminación de consumo de HFC	5
Figura 6. Codificación del refrigerante R-22	9
Figura 7. Codificación del refrigerante R-404A	10
Figura 8. Codificación del refrigerante R-507A	10
Figura 9. Codificación del refrigerante R-717	10
Figura 10. Instrucciones para realizar la prueba de acidez	15
Figura 11. Sistema de amoniaco mono etapa	19
Figura 12. Efectos del amoniaco sobre las personas en función de la concentración en ppm	20
Figura 13. Dos sistemas de una etapa = Sistema en Cascada	22
Figura 14. Diagrama de Sistema Booster Compresión Paralela	23
Figura 15. Triángulo del fuego	26
Figura 16. Señal de advertencia apropiada	27
Figura 17. Temperatura del refrigerante y espacio interno de expansión para el cilindro	30
Figura 18. Área de seguridad	31
Figura 19. Etiqueta de Servicio para un Aire acondicionado con R-290	32

Tablas

Tabla 1. Clasificación de los refrigerantes según ANSI / ASHRAE 34.	9
Tabla 2. Potencial de Agotamiento de Ozono y Potencial de Calentamiento Global de los refrigerantes según la IPCC.	11
Tabla 3. Clasificación de seguridad de refrigerantes según su flamabilidad y toxicidad.	12
Tabla 4. Compatibilidad y miscibilidad de lubricantes con refrigerantes	14
Tabla 5. Nivel de acidez según el tipo de aceite	16
Tabla 6. Elementos del sistema de amoníaco de Figura 11	19
Tabla 7. Componentes del Sistema Booster Compresión Paralela	23

Abreviaturas

AC	Aire Acondicionado
CFC	Clorofluorocarbonos
EPP	Equipo de protección personal
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
mbar	Unidad de presión (milibar)
LFL	Lower Flammability Limit (Límite mínimo de flamabilidad)
Pa	Unidad de presión (Pascales)
PAO	Potencial de agotamiento de ozono
PCG	Potencial Calentamiento Global
psi	Unidad de presión (libra por pulgada cuadrada)
psig	Unidad de presión (libras por pulgada cuadrada manométricas)
RAC	Refrigeración y aire acondicionado



Foto: vecteezy_industrial-cooling-towers_1986823



1. JUSTIFICACIÓN

El cambio climático es uno de los mayores retos ambientales, es complejo y requiere la comprensión de los riesgos involucrados. Desde 1985, en el Convenio de Viena, a nivel internacional se han tomado decisiones para eliminar los gases refrigerantes que dañan el medio ambiente, se acuerda el Protocolo de Montreal en el año 1987 el cual es firmado por todos los países, entrando en vigor el 1 de enero de 1989, aprobado en Costa Rica por la Ley 7223 del año 1991, producto del cual se eliminó el uso de CFC en el año 2010.

Actualmente se está llevando a cabo la reducción de HCFC proyectada hasta el año 2040 donde se eliminará el 100% de los mismos. Dentro de las acciones adicionales para reducir el impacto ambiental que generan los gases refrigerantes de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, en el año 2016 se incluye la Enmienda de Kigali, la cual entra en rigor en el año 2019, enmienda que acuerda la reducción de un 80% el consumo de HFC para el año 2045, en relación con el consumo de HFC de los años 2020, 2021 y 2022 más el 65% de la línea base de HCFC (La línea base corresponde al promedio de refrigerante consumido en el país, para los HCFC corresponde al promedio de los años 2009 y 2010), con lo anterior se vuelve indispensable el impulso y la implementación de refrigerantes con muy bajo potencial de calentamiento Global y nulo potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono, cómo son los hidrocarburos HC y los refrigerantes inorgánicos.

2. OBJETIVO GENERAL

Aportar a la población técnica relacionada con el campo de refrigeración y aire acondicionado, información, conocimientos y criterios referentes al uso de sustancias alternativas para el retiro y desuso de los refrigerantes Hidroclorofluorocarbonados (HCFC) e Hidrofluorocarbonos (HFC), mostrando la tendencia que existe para el proceso de cambio con otras sustancias refrigerantes a mediano y largo plazo.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ▶ Identificar las sustancias limitadas por el Protocolo de Montreal y la Enmienda de Kigali.
- ▶ Identificar y dimensionar los efectos negativos que tienen los HCFC y HFC en la Capa de Ozono y cambio climático.
- ▶ Conocer los calendarios de eliminación a los que están sometidos las sustancias refrigerantes agotadoras de la Capa de Ozono según el Protocolo de Montreal y la enmienda de Kigali.
- ▶ Definir las familias en las que se clasifican las sustancias refrigerantes y las características generales de cada grupo.
- ▶ Estudiar los tipos de aceites lubricantes disponibles para usar con refrigerantes.
- ▶ Conocer las generalidades de los refrigerantes alternativos, sus potenciales aplicaciones, así como los cuidados y precauciones que se deben considerar para su uso.
- ▶ Conocer que consideraciones de mantenimiento e instalación implica el uso de refrigerantes alternativos en equipos de Refrigeración y Aire Acondicionado.
- ▶ Identificar los riesgos y las consideraciones de seguridad que se deben tener en el uso de refrigerantes naturales.
- ▶ Estudiar cada una de las alternativas disponibles en el mercado para los procesos de sustitución.

4. GENERALIDADES

Compuestos de refrigerantes como los Clorofluorocarbonados (CFC) e Hidrofluorocarbonados (HCFC) contienen en su estructura átomos de cloro, las moléculas de estos rompen sus enlaces al ser expuestos a la radiación solar en la estratosfera; separando los átomos de cloro de la molécula del refrigerante (ver Figura 1, marcador 1), Los átomos de cloro liberados, forman nuevas moléculas de óxido de cloro (OCl, ver parte 4), descomponiendo las moléculas de Ozono (compuesta por 3 tomos de oxígeno, ver parte 2), como subproducto de la reacción se forman moléculas de oxígeno O_2 (ver parte 3, figura 1). Debido a la poca estabilidad del cloro, esta molécula de óxido de cloro se separa dejando un átomo de oxígeno libre, y un átomo de cloro libre (parte 5 y 6), al quedar libre este átomo de cloro vuelve a comenzar el ciclo rompiendo los enlaces de otra molécula de Ozono. Es así como los gases refrigerantes que contienen cloro dañan y reducen la Capa de Ozono.

Producto de las corrientes bajo las cuales está influenciada la atmósfera, los compuestos son transportados al polo sur entre los meses de septiembre y octubre, generándose grandes concentraciones de monóxido de cloro en esta región, apreciándose como un área con muy bajo nivel de Ozono, a este hecho se le conoce como el hueco en la Capa de Ozono (ver Figura 2).

El Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO) es un indicador que cuantifica la capacidad de destruir el Ozono en la atmosfera de la tierra en relación con el refrigerante R-11. El PAO para el R-11 es 1.

Los refrigerantes HFC cómo el R-134a no agotan la Capa de Ozono, no obstante, tienen un alto potencial de calentamiento global (PCG, ver Tabla 2), lo anterior corresponde a la capacidad que tiene un gas de retener la energía infrarroja irradiada por el sol y reflejada en la superficie de la tierra, en relación con la capacidad de retención del dióxido de carbono (CO_2) (ver Figura 3). Por tanto, al evitar que la energía reflejada en la superficie de la tierra salga, aumenta la temperatura. Estos gases pueden persistir en la

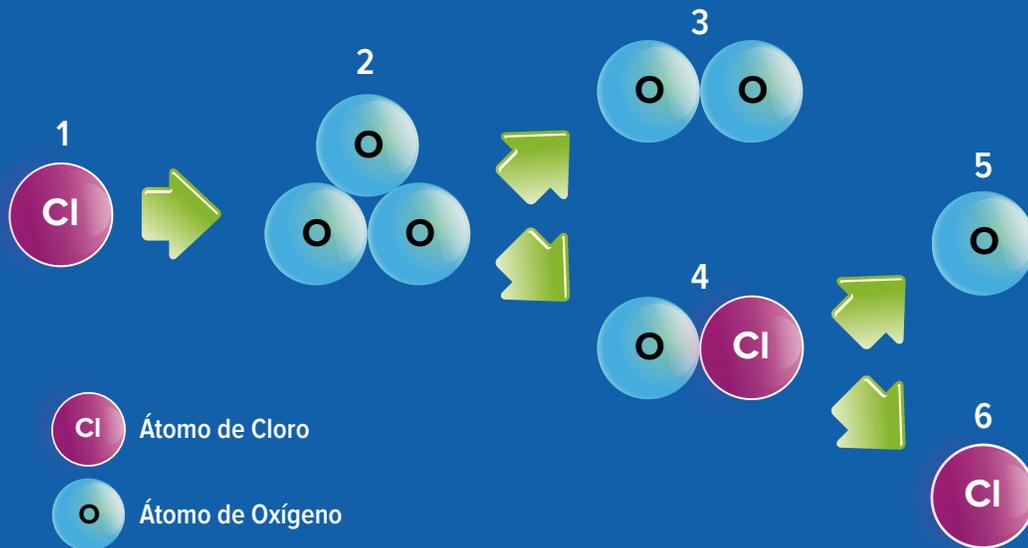


Figura 1. Proceso de destrucción de la Capa de Ozono. Fuente: elaboración propia.

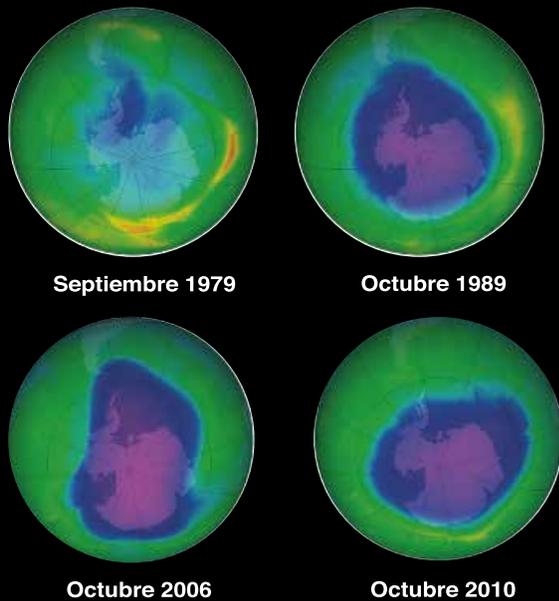


Figura 2. Agujero de Ozono en el polo sur.
Fuente (NASA, 2011).

atmosfera durante diferentes períodos de tiempo. El potencial de calentamiento global (PCG) de un gas de efecto invernadero depende tanto de la eficiencia de la molécula para retener energía infrarroja irradiada por el sol de vuelta al espacio, como de su vida útil atmosférica (US EPA, 2016); por lo que un gas con alto grado de retención con una vida corta tendrá un PCG grande en una escala de 20 años, pero pequeño en una escala de 100 años, por el contrario, una molécula con una vida atmosférica más larga que el CO₂ tendrá un PCG alto.

5. CALENDARIO DE ELIMINACIÓN Y REDUCCIÓN DE REFRIGERANTES

Costa Rica como país participante de las iniciativas del Protocolo de Montreal Relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono, debe seguir de forma obligatoria el calendario establecido para los países del Artículo 5 grupo 1 de este acuerdo, con el fin de cumplir con la eliminación paulatina de sustancias

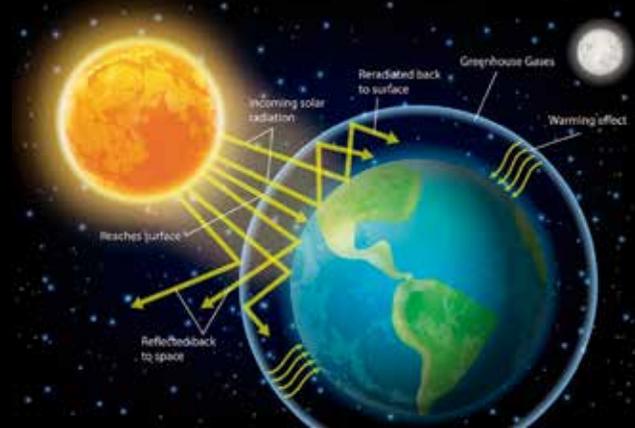


Figura 3. Calentamiento global. Fuente (Spagnuolo, 2019)

que agotan la Capa de Ozono y sustancias con potencial de calentamiento global.

El calendario de eliminación progresiva de HCFC (Figura 4) se resume de la siguiente manera:

- ▶ Se establece la línea base en función a los consumos de los años 2009 y 2010.
- ▶ Congelación: entre los años 2013 y 2014.
- ▶ Reducción del 10%: Año 2015
- ▶ Reducción al 35% Año 2020
- ▶ Reducción al 67.5% año 2025
- ▶ Reducción al 100% entre los años 2030 y 2040 en “reducciones paulatinas del 2.5% del consumo de referencia, calculado sobre el promedio del período de diez años 2030-2040, hasta el 1 de enero de 2040, para los usos estipulados en el artículo 5, párrafo 8 ter e i), y posibles exenciones para usos esenciales” (UNEP, 2019).

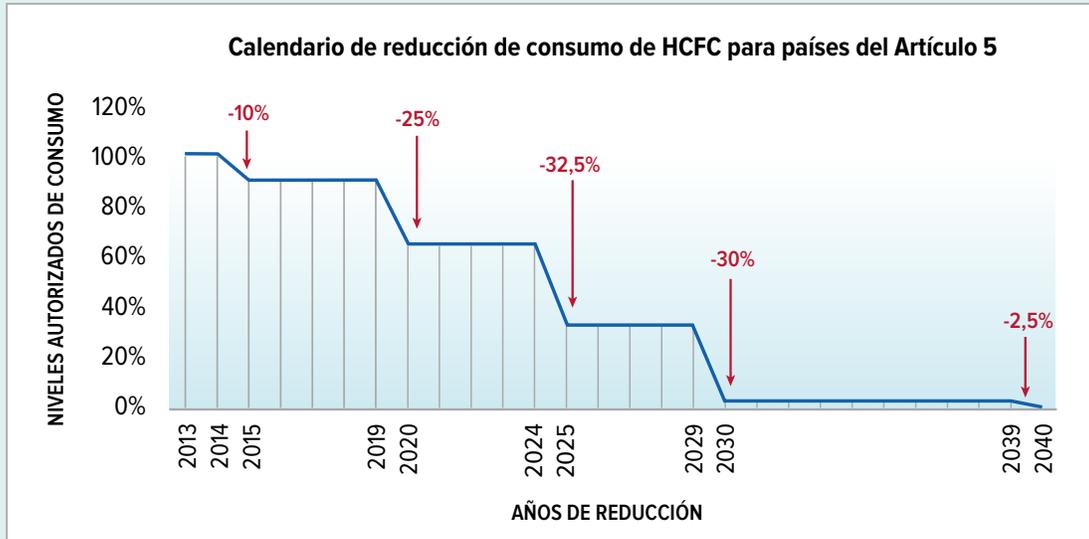


Figura 4. Calendario de reducción de consumo de HCFC. Fuente (UNEP, 2019)

El calendario de reducción de los HFC para Costa Rica, quien se encuentra bajo el amparo del artículo 5 grupo 1 (ver Figura 5), se resume de la siguiente manera:

- ▶ Se establece la línea base en función a los consumos de los años 2020 al 2022
- ▶ Congelación: Año 2024-2028
- ▶ Reducción del 10% Año 2029-2034
- ▶ Reducción del 30% Año 2035-2039
- ▶ Reducción del 50% Año 2040-2044
- ▶ Reducción del 80% Año 2045

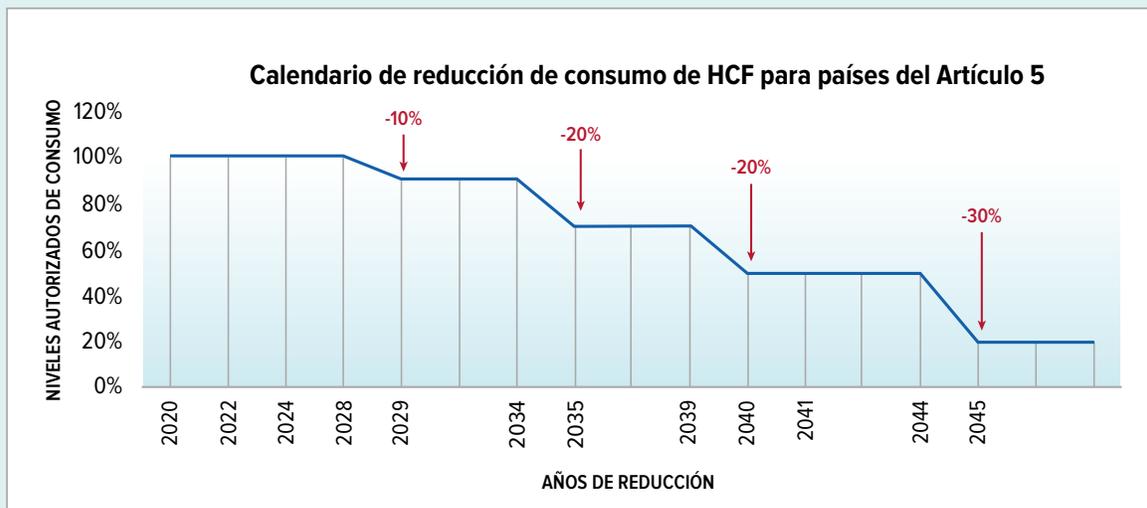


Figura 5. Calendario de eliminación de consumo de HFC. Fuente (UNEP, 2019)



6. CLASIFICACIÓN DE REFRIGERANTES

Un fluido refrigerante es una sustancia capaz de absorber y transportar grandes cantidades de calor, el refrigerante libera calor estando a altas presiones, y absorbe calor estando a bajas.

Se puede agrupar en:

Refrigerantes primarios: aquellos que absorben calor al evaporarse a cierta temperatura y presión para transferirlo hacia la atmosfera.

Refrigerantes secundarios: Cualquier fluido enfriado mediante un refrigerante primario que circula como fluido de transferencia de calor para retirar la carga térmica del sistema.

Las clases de refrigerantes que existen son las siguientes;

6.1. Halocarbonados:

Son compuestos químicos o combinaciones de átomos que consisten en una estructura de carbono a la que se unen átomos del grupo 17 (VII A) de la tabla periódica, conocidos como halógenos (flúor, cloro y/o bromo). Los refrigerantes pertenecientes a este grupo se dividen en tres grupos básicos así: clorofluorocarbonos (CFC), hidroclofluorocarbonos (HCFC), hidrofluorocarbonos (HFC) y mezclas entre ellos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

CFC: Los refrigerantes clorofluorocarbonos o CFC son sustancias derivadas de los hidrocarburos saturados, contienen átomos de cloro y flúor en lugar

de átomos de hidrógeno. Su estabilidad química y volatilidad hacen que se acumulen fácilmente en la atmósfera, alcanzando la estratósfera y permaneciendo en ella hasta por 100 años. Utilizados como agentes propulsores en aerosoles y aislantes, han tenido gran aplicación en la refrigeración doméstica y el acondicionamiento de aire automotriz. Los refrigerantes más representativos de esta familia son el R-11 y el R-12. La afectación ambiental con el ataque a la Capa de Ozono generó su control y posterior eliminación de uso a nivel mundial.

HCFC: Los hidroclofluorocarbonos o hidroclofluorocarbonos son derivados de los hidrocarburos que contienen átomos de hidrógeno, cloro y flúor. El átomo de hidrogeno en su molécula les permite oxidarse con mayor rapidez en la parte baja de la atmósfera y afectar menos la Capa de Ozono. Fueron sustitutos a mediano plazo de los CFC.

Los refrigerantes de esta familia más utilizados son el R-22 en aplicaciones de aire acondicionado, bombas de calor y refrigeración comercial y el R-123 en enfriadores centrífugos (Chillers) de aire acondicionado.

HFC: Los hidrofluorocarbonos o hidrofluorocarbonos son derivados de los hidrocarburos que contienen átomos de hidrógeno y flúor, no contienen cloro en su molécula, oxidándose con gran rapidez en capas bajas de la atmósfera. Su uso aparece como una alternativa para sustituir los CFC puesto que no afectan la Capa de Ozono, sin embargo, los refrigerantes de esta familia son “gases de efecto invernadero”, que ocasionan problemas de calentamiento global.

El R-134a, en equipos de aire acondicionado y en refrigeración doméstica y comercial, es el refrigerante más conocido de esta familia. El uso de R-134a,

conocido erróneamente en el comercio como “refrigerante ecológico”, ocasiona serios problemas ambientales debido a su elevado valor de PCG.

HFO: Las Hidrofluorolefinas son refrigerantes HFC orgánicos saturados, con bajo potencial de calentamiento global y baja inflamabilidad. Este refrigerante se desarrolló como una alternativa a los HFC, sin embargo, son regulados por la Enmienda de Kigali debido a que la mayoría utiliza R-32 en sus mezclas. Los refrigerantes más utilizados de estas familias son el R-1234yf y el R-1234ze (CTCN).

6.2. Mezclas

Mezclas: Son la unión de dos o más sustancias refrigerantes distribuidas uniformemente en proporciones variables. Las mezclas se emplean para alcanzar propiedades que cumplen con muchos propósitos útiles en refrigeración y surgen como alternativas transitorias adicionales para ayudar a acelerar el abandono de las sustancias destructoras de ozono. Por ejemplo, una mezcla de componentes inflamables y no inflamables puede resultar en un producto no inflamable.

Las mezclas pueden dividirse en dos categorías: zeotrópicas y azeotrópicas;

- ▶ **Mezclas Zeotrópicas:** se llama así a las mezclas formadas por dos o más componentes (refrigerantes puros) de diferente volatilidad. Cuando estas mezclas se evaporan o se condensan en un sistema de refrigeración, su composición y su temperatura de saturación cambian. Al hervir esta mezcla en un evaporador, la composición del líquido remanente cambia. Esto es, al empezar a hervir el líquido, se evapora un porcentaje más elevado del componente más volátil. Por lo tanto, conforme continúa hirviendo la mezcla, el líquido remanente tiene menor concentración del componente más volátil, y mayor concentración del menos volátil. El cambio de composición del líquido da como resultado un cambio en el punto de ebullición.

- ▶ A las mezclas zeotrópicas comerciales, se les debe asignar un número de identificación en la serie 400. La mezcla zeotrópica más utilizada en refrigeración comercial es el R-404A mientras que en aire acondicionado se utilizan el R-407C y el R-410A.

- ◆ **Punto de burbuja (bubble point):** Se conoce como la temperatura a la cual empieza a hervir el líquido refrigerante (líquido saturado).
- ◆ **Punto de rocío (dew point):** Temperatura a la cual se evapora la última gota de refrigerante líquido (vapor saturado).
- ◆ **Deslizamiento de temperatura (glide):** Es el fenómeno en el cual, a una misma presión, la temperatura del punto de burbuja es más baja que la del punto de rocío para cualquier mezcla zeotrópica. En otras palabras, es la diferencia expresada en grados Celsius, entre la temperatura en la que empieza a cambiar de fase un refrigerante y la temperatura a la que termina el cambio de fase, a una misma presión; esta diferencia puede variar dependiendo de la mezcla, desde 1° o 2 °C hasta varias decenas de grados. Este deslizamiento de temperatura también ocurre en el condensador, pero aquí, la temperatura de condensación disminuye en lugar de aumentar.

- ▶ **Mezclas Azeotrópicas:** se llama así a las mezclas formadas por dos o más componentes (refrigerantes puros) con similar volatilidad. Cuando estas mezclas se evaporan o se condensan en un sistema de refrigeración, su composición y su temperatura de saturación no cambian. Al hervir estas mezclas en un evaporador, la composición del líquido remanente no cambia, se comportan como si estuvieran formadas por un solo componente.
- ▶ A las mezclas azeotrópicas comerciales, se les debe asignar un número de identificación en la serie 500. Las mezclas azeotrópicas más utilizadas son R-503 y R-507.

6.3. Refrigerantes Inorgánicos

Son compuestos químicos o combinaciones de los elementos de la tabla periódica que no contienen carbono, excepto el CO₂. Los refrigerantes inorgánicos más comunes son el agua R-718, el amoníaco R-717 y el dióxido de carbono R-744 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Agua, R-718: El agua es comúnmente utilizada como refrigerante secundario, la misma se mezcla con anticongelantes como el glicol para bajar la temperatura de congelamiento, esto permite distribuir el agua helada con temperaturas cercanas o inferiores a 0 °C, el agua se utiliza para enfriar los espacios de las instalaciones por medio de intercambiadores de calor, que son los equipos de aire acondicionado de agua helada. El agua es enfriada con refrigerantes comunes como el amoníaco o el R-404. En algunas instalaciones se utilizan bancos de hielo para mejorar la eficiencia energética del sistema.

Amoníaco, R-717: Es un gas incoloro, corrosivo, irritante, tóxico y de olor sofocante. Su fórmula química es NH₃. Se emplea como refrigerante en la industria en general, en la producción de fertilizantes y en productos de limpieza, entre otros. Aunque no afecta metales ferrosos como el aluminio y el bronce fosfórico, en la presencia de humedad destruye los metales no ferrosos como el zinc, el cobre, y sus aleaciones. Por sus cualidades termodinámicas, el amoníaco es uno de los mejores refrigerantes, supera considerablemente a los demás y tiene más alto coeficiente de transferencia de calor en comparación con refrigerantes convencionales, lo que permite usar tuberías de menor diámetro en sistemas con capacidades similares.

Dióxido de carbono, R-744: Es un gas incoloro e incombustible. Su fórmula química es CO₂. El R-744 tiene varias propiedades convenientes como refrigerante: disponibilidad, bajo o nulo PCG, baja toxicidad, nulo PAO y costo reducido. Aunque se le atribuye una baja eficiencia energética, es usado como refrigerante alternativo, especialmente en grandes compañías con amplios programas ambientales. Es probable también que los sistemas fabricados con

R-744 sean de menor tamaño que los que usan refrigerantes comunes. Sin embargo, estas ventajas se ven compensadas por el hecho que el uso del R-744 en las aplicaciones de aire acondicionado exige altas presiones de funcionamiento, lo que reduce la eficiencia operativa y por ende contribuye a producir un mayor nivel de emisiones indirectas de CO₂ a causa del mayor consumo de energía.

El R-744 tiene aplicación en sistemas industriales como refrigerante de baja temperatura y en sistemas configurados en cascada, con R-717 en la fase superior y R-744 en la fase inferior. La eficiencia energética de los sistemas que funcionan con R-744 puede ser similar a la de los que usan R-22, R-717 y R-410A, con un rango de evaporación de -40°C y -50°C. El R-744 también se usa como fluido termo portador en los sistemas indirectos. Algunos fabricantes de vehículos están utilizando el R-744 en los sistemas de aire acondicionado.

6.4. Refrigerantes Orgánicos

Son compuestos químicos o combinaciones de los elementos de la tabla periódica que contienen carbono, excepto el R-744 que contiene carbono, pero es un refrigerante inorgánico. Los refrigerantes orgánicos más comunes son los hidrocarburos HC, los halocarbonados y combinaciones entre ellos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Los Halocarbonados son la primera clase de refrigerantes, vistos en la página 7 del presente documento.

Hidrocarburos, HC: Se conoce con este nombre a los compuestos bioquímicos formados únicamente por carbono e hidrógeno. Químicamente, consisten en una estructura de carbono a la que se unen átomos de hidrógeno. Refrigerantes pertenecientes a este grupo son: el etano (R-170), el propano (R-290) y el isobutano (R-600a)

- ▶ **Etano, R-170:** gas inflamable, incoloro e inodoro. El etano es más pesado que el aire; puede alcanzar largas distancias, localizar una fuente de ignición y regresar en llamas.



Puede formar mezclas inflamables con el aire. Los escapes de este gas pueden ocasionar asfixia por desplazamiento de oxígeno.

- ▶ **Propano, R-290:** gas inflamable, incoloro, con un ligero olor en altas concentraciones. Se utiliza como materia prima para diversos procesos químicos como reformación de vapor, cloración y nitruración. Los hidrocarburos HC o sus mezclas utilizadas en refrigeración requieren niveles de pureza altos y prácticas de mezcla que sólo puede garantizar el fabricante. El R-290 es utilizado en equipos de AC en Europa y Asia, actualmente se está buscando abrir el mercado para estos equipos en Latinoamérica.
- ▶ **Isobutano, R-600a:** es un gas licuado comprimido, incoloro, de olor característico, es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo con posible ignición en punto distante. Este refrigerante es uno de los principales sustitutos de los CFC especialmente en el sector de refrigeración doméstica. Al igual que los demás Hidrocarburos, en los procesos de diseños, fabricación y mantenimiento se debe tener en cuenta su carácter inflamable. Ello exige la adopción de medidas tales como la adecuada ventilación, el uso del equipo eléctrico apropiado, la prevención de fugas de refrigerante y del acceso a los componentes eléctricos, el uso de materiales eléctricos sellados o con dispositivos anti chispas cuando se tiene acceso a fugas de refrigerante y el uso de técnicas apropiadas de soldadura, preferentemente evitando las operaciones de soldadura con llama, en sistemas ya cargados.

Los hidrocarburos HC y sus mezclas, que han tenido un uso limitado, presentan propiedades termodinámicas adecuadas y muy similares a las del R-134a y las del R-12 y permiten lograr un alto y mejor nivel de eficiencia energética comparativa. La sustitución de refrigerantes sintéticos por hidrocarburos HC se realiza con productos que contienen propano R-290, en mayor proporción y mezclas con isobutano R-600a y etano R-170. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

7. NOMENCLATURA DE LOS REFRIGERANTES

La nomenclatura corresponde a algunas características de su origen, las cuales conforman las series que se conocen universalmente, en la siguiente tabla se muestra la clasificación según el estándar 34 de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE).

Tabla 1. Clasificación de los refrigerantes según ANSI / ASHRAE 34*.

Serie	Nombre	Refrigerante
000	Metanos	R-12, R-23
100	Etanos	R-134a, R-141b
200	Propanos	R-290
400	Zeotropos	R-407C, R-410A
500	Azeotropos	R-502, R-507
600	Orgánicos	R-600, R-600a
700	Inorgánicos	R-717, R-744

*Ejemplos de los refrigerantes más comunes de esta serie.

El estándar americano ANSI/ASHRAE 34 asignó un código que identifica cada refrigerante, el cual consiste una letra seguida por un número el cual se establece a partir de su fórmula química:

- ▶ La letra minúscula denota un gas isómero, la cual indica simetría en pesos atómicos. El más simétrico no tiene letra, según aumente la asimetría se colocan las letras a, b, c. Ejemplo R-134a.
- ▶ La letra mayúscula denota una mezcla zeotrópica y queda dentro de la serie 400. Ejemplo R-410A. Las letras A, B, C a la derecha del número se utilizan para diferenciar mezclas con los mismos componentes, pero en diferente proporción. Ejemplo: R-401A, R-401B y R-401C.
- ▶ Si la mezcla es azeotrópica quedan en la serie 500 y el número es arbitrario, responde al orden de aparición del refrigerante. Ejemplos R-502, R-507.

- ▶ Los compuestos orgánicos misceláneos tienen asignada la serie 600, por ejemplo, R-600a para isobutano.
- ▶ Los refrigerantes inorgánicos se reserva la serie 700 agregando la masa molecular. Ejemplo R-717 Amoniaco.

Esta codificación se apoya en la norma internacional ISO 817:

- ▶ Símbolo R surge de la palabra refrigerante.
- ▶ Primer dígito comenzando por el lado izquierdo representa el número de átomos de carbono menos 1. No se usa si es igual a cero.
- ▶ El segundo dígito de izquierda a derecha indica el número de átomos de hidrógeno más 1.
- ▶ El tercer dígito de izquierda a derecha designa el número de átomos de flúor del compuesto.
- ▶ En el caso de que estén presentes dobles enlaces de carbono, un cuarto dígito indica el número de tales enlaces precediendo a los demás.
- ▶ Cuando hay bromo se adiciona una B posterior a los números y el número de átomos de bromo.

Ejemplo: R-22 o clorodifluorometano (CHClF_2)

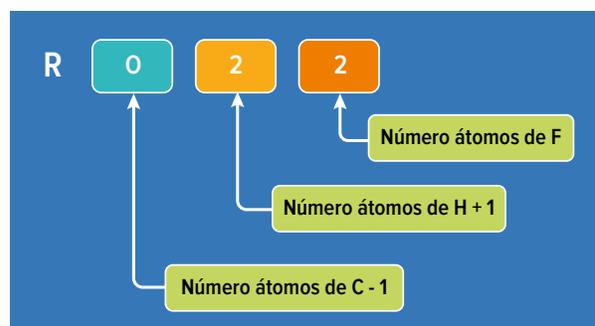


Figura 6. Codificación del refrigerante R-22. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

En los códigos de las mezclas zeotrópicas (serie 400), a la cifra 4 se le adicionará un número arbitrario de la mezcla, en general por orden de aparición, más la letra A, B..., dependiendo de las diversas proporciones de la mezcla.

Ejemplo: R-404A

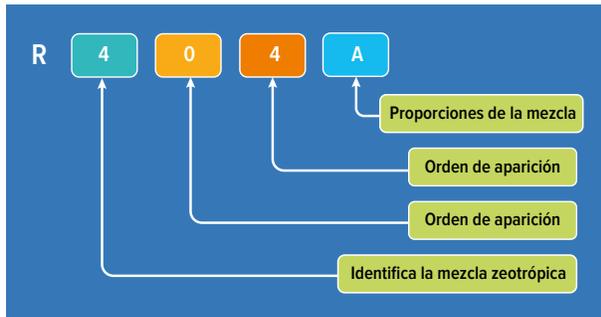


Figura 7. Codificación del refrigerante R-404A. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

En los códigos de las mezclas azeotrópicas (serie 500), a la cifra 5 se le adiciona un número arbitrario de la mezcla, más la letra A, B ..., dependiendo de las diversas proporciones de la mezcla.

Ejemplo: R-507A

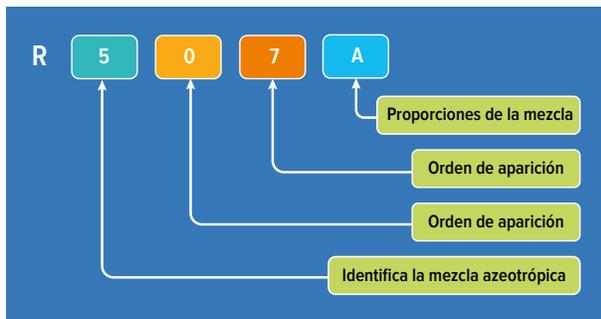


Figura 8. Codificación del refrigerante R-507A. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

En los códigos de las composiciones inorgánicas (serie 700), a la cifra 7 se les adiciona la masa molecular

Ejemplo: R-717 o NH_3 amoníaco.

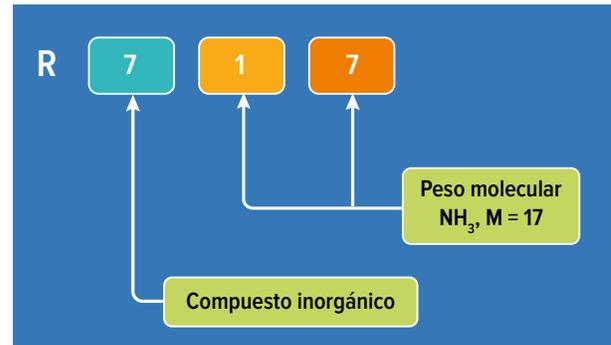


Figura 9. Codificación del refrigerante R-717. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

A los códigos de los compuestos orgánicos cíclicos se les coloca una C antes del número, por ejemplo, C316 ($\text{C}_4\text{Cl}_2\text{F}_6$).

En cuanto a los compuestos orgánicos insaturados de la serie 1000, al número del código se le adiciona el número 1 antes de los 3 dígitos, por ejemplo, R-1150 para el etileno o R-1270 para el propileno. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

8. PROPIEDADES DE REFRIGERANTES

La siguiente tabla indica algunas de las propiedades de los refrigerantes que más se utilizan en el mercado. La clasificación de seguridad se basa en la Designación de Seguridad de Refrigerantes del Standard 34 de ASHRAE.



Tabla 2. Potencial de Agotamiento de Ozono y Potencial de Calentamiento Global de los refrigerantes según la IPCC.

Designación de refrigerante ASHRAE	Componentes	PAO	PCG	Seguridad
R-11	CFC-11	1	3500	A1
R-12	CFC-12	1	7300	A1
R-22	HCFC-22	0,05	1500	A1
R-134a	HFC-134a	0	1300	A1
R-290	Propano	0	3	A3
R-404a	R-125/R-143/R-134a	0	3260	A1
R-410A	R-32/R-125	0	1725	A1
R-422A	R-125/R-134a/R-600 (85,1/11,5/3,4)	0	3100	A2
R-422B	R-125/R-134a/R-600 (55,1/42/3)	0	2500	A2
R-600a	Isobutano	0	3	A3
R-717	NH ₃ Amoníaco	0	0	B2
R-718	H ₂ O Agua	0	0	A1
R-744	CO ₂ Dióxido de Carbono	0	1	A1

9. SELECCIÓN ADECUADA DE REFRIGERANTES:

La selección adecuada de refrigerantes se debe realizar en función de:

1. Características ambientales del refrigerante:

- Potencial de calentamiento global (PCG) compara el efecto de recalentamiento en un lapso para diferentes gases, en comparación con emisiones iguales de CO₂ por peso.
 - ◊ Directo
 - ◊ Indirecto
- Duración del refrigerante en la atmósfera. Referido al tiempo requerido para convertir o eliminar el 60% de un gas. Para los principales gases con cloro y bromo el periodo de tiempo oscila entre uno y cien años.
- Potencial de agotamiento de la Capa de Ozono (PAO). Definido como la capacidad destructiva de los compuestos químicos sobre el ozono estratosférico.

2. Seguridad del refrigerante

- Nivel de toxicidad, según el Standard 34 de ASHRAE los refrigerantes se clasifican en dos grupos:
 - ◊ Clase A: (Toxicidad crónica baja), con un límite de exposición de 400ppm o más.
 - ◊ Clase B (Mayor toxicidad crónica), un límite de exposición ocupacional de menos de 400 ppm.

- Nivel de inflamabilidad, según Standard 34 de ASHRAE, hay cuatro clases según el límite inferior de inflamabilidad obtenido en conformidad con la norma ASTM E681.
 - ◊ Clase 1 (Sin propagación de llama): No muestran propagación de llama cuando se prueban en aire a 60°C y 101,3kPA.
 - ◊ Clase 2L (Inflamabilidad inferior): Presenta propagación de la llama a 60 oC y 101.3kPA. Tiene un LFL < 19 000kJ/kg, Tiene una velocidad máxima de combustión ≤ 10 cm/s cuando se somete a ensayo a 23 oC y 101,3kPA con aire seco.
 - ◊ Clase 2 (Inflamable): Presenta propagación de llama cuando se somete a 60 oC y 101,3 kPa, Tiene un LFL >3,5% en volumen, Tiene un calor de combustión < 19 000kJ/kg.
 - ◊ Clase 3 (Mayor inflamabilidad): Exhiben propagación de llama a 60< y 101,3kPA, Tienen un LFL ≤ 3,5% en volumen o calor de combustión ≥ 19 000 kJ/kg.

LFL: Lower Flammability Limit (Límite mínimo de flamabilidad)

Las clasificaciones de toxicidad e inflamabilidad dan como resultado las siguientes clasificaciones de seguridad para refrigerantes:

Tabla 3. Clasificación de seguridad de refrigerantes según su flamabilidad y toxicidad.

Clasificación			Toxicidad	
			Clase A	Clase B
			Baja toxicidad	Alta toxicidad
Flamabilidad	Clase 1	Sin propagación de llama	A1	B1
	Clase 2L	Inflamabilidad baja	A2L	B2L
	Clase 2	Inflamable	A2	B2
	Clase 3	Inflamabilidad alta	A3	B3

3. Características termodinámicas

- Presión
- Volumen
- Entalpía
- Densidad
- Entropía

4. Características físicas:

- Baja temperatura de ebullición
- Alto calor latente de vaporización
- Bajo punto de congelación
- Alta temperatura crítica

5. Compatibilidad con los materiales del sistema (Elastómeros, lubricantes...)

6. Compatibilidad y miscibilidad con el lubricante

La miscibilidad es la capacidad de los refrigerantes y lubricantes de mezclarse y separarse sin afectar las propiedades físicas y químicas de cada uno, permitiendo al lubricante realizar el recorrido por todo el sistema de refrigeración y volver al compresor.

7. Disponibilidad nacional del refrigerante

8. Costo del refrigerante

9. Capacidad y conocimiento técnico del personal de servicio.



Foto: Freepick image

10. LUBRICANTES

Las principales funciones de los lubricantes en los sistemas RAC son; crear una película de aceite entre las partes móviles del compresor para evitar el desgaste mecánico debido al rozamiento, disipar el calor obtenido en los componentes y crear un sello en la cámara de compresión de válvulas del compresor (Cruz, 2015).

El aceite empleado en refrigeración está especialmente formulado para esta aplicación, ya que debe satisfacer ciertos requisitos como hacer su función a bajas y altas temperaturas, altas y bajas presiones, además tienen aditivos para reducir la oxidación e inhibir la corrosión.

Los lubricantes utilizados para RAC deben ser miscibles con el refrigerante, esto permite que el lubricante que es impulsado junto con el refrigerante del compresor pueda recorrer todo el sistema y volver al compresor, si el lubricante no es miscible el lubricante no puede volver al compresor, lo que provoca serios daños en el mismo.

Al existir variedad de refrigerantes, existe también variedad de lubricantes, no todos son miscibles entre sí; los lubricantes existentes en sistemas de lubricación son los siguientes;

- ▶ **Aceite Mineral (Mo):** El aceite mineral se obtiene a partir de la destilación de petróleo, es adecuado para el uso de CFC, HCFC y amoniaco.
- ▶ **Aceite Alquibencénico (AB):** El aceite alquibencénico son modificaciones de los aceites minerales, son compatibles con los HCFC, no son compatibles con refrigerantes libres de cloro (HFC).
- ▶ **Aceite Polioléster (POE):** El aceite polioléster se obtiene a partir de una reacción que consiste en unir alcohol con un ácido, dando como resultado agua y éter. Este aceite es compatible con la mayoría de los refrigerantes. Es altamente higroscópico (absorbe muy rápido la humedad) por lo que se debe manejar con rapidez cuando es abierto, ya que absorbe la humedad de la atmosfera.
- ▶ **Aceite Polialquiglicol (PAG):** Los aceites PAG son totalmente sintéticos e higroscópicos con una base de polialquiglicol. Con sus diferentes viscosidades, los emplean numerosos fabricantes de vehículos y de compresores en sistema de climatización junto con el refrigerante R-134a (Hella S.A.).
- ▶ **Aceite poli-alfa-olefinas (PAO):** son hidrocarburos ramificados obtenidos mediante

procesos de síntesis química. Por los métodos de obtención empleados, son aceites sintéticos de elevadísima pureza.

Su estructura química confiere a las PAO propiedades de interés como el bajo punto de congelación, la elevada lubricidad y mejores respuestas frente a elevadas presiones y temperaturas extremas de trabajo (Hella S.A.).

El aceite PAO 68 no es higroscópico, es decir, a diferencia de otros aceites, no absorbe la humedad del ambiente.

A continuación, se muestra una tabla que indica la compatibilidad de algunos refrigerantes con estos lubricantes;

Tabla 4. Compatibilidad y miscibilidad de lubricantes con refrigerantes Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Refrigerante	Mo	AB	POE	PAG	PAO
R-22	Compatible	Compatible	Compatible*	No compatible	Compatible*
R-134a	No compatible	No compatible	Compatible	Compatible*	No compatible
R-290	Compatible	Compatible*	Compatible	Compatible*	Compatible
R-404	No compatible	No compatible	Compatible	Compatible*	No compatible
R-410	No compatible	No compatible	Compatible	Compatible*	No compatible
R-422	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible	No compatible
R-507	No compatible	No compatible	Compatible	Compatible*	No compatible
R-600a	Compatible	Compatible*	Compatible	Compatible*	Compatible
R-717	Compatible	Compatible*	No compatible	Compatible*	No compatible
R-744	No compatible	No compatible	Compatible	Compatible	Compatible
R-1234yf	No compatible	No compatible	Compatible	Compatible	No compatible
R-1234ze	No compatible	No compatible	Compatible	No compatible	No compatible

*Aplicaciones con algunas limitaciones

Para seleccionar el aceite lubricante en un sistema RAC, se debe tomar en cuenta el tipo de refrigerante y los materiales que componen el sistema, tales como empaques o juntas tóricas (o-rings), fabricados con elastómeros expuestos al aceite, una mala selección del aceite con los elastómeros puede ocasionar una reacción, perdiendo las propiedades de los empaques provocando fugas en el sistema (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

La degradación de los aceites se da por la presencia de contaminantes como aire y humedad en una cantidad apreciable. Cuando existen contaminantes en el lubricante, el aceite produce todo tipo de reacciones químicas, pierde sus propiedades lubricantes y se forman ácidos corrosivos y sedimentos o corrosión ligera en superficie metálicas.

Los principales factores que degradan los aceites utilizados en RAC son los siguientes;

- ▶ **Calor excesivo:** todos los aceites de lubricación pueden ser descompuestos por el calor, cuando esto sucede se genera problemas como; formación de lodos, ácidos, restos de gomas, lacas y barnices. Estos residuos afectan la válvula de descarga, aceleran el desgaste e interfieren con la operación del motor.
- ▶ **Humedad:** El agua es uno de los contaminantes que más incide en la reducción de la vida de los lubricantes mediante la oxidación y acidificación de este.
- ▶ **Oxidación acelerada:** La estabilidad a la oxidación es la capacidad que tiene un aceite

para mantenerse estable en presencia de oxígeno. La combinación de aire, humedad y aceite, con las altas temperaturas del compresor, producirá ácidos y lodos. Dada la naturaleza química de los productos a la oxidación, la mayor parte de estos no pueden ser eliminados mediante el filtrado simple de aceite. Solo con métodos avanzados se pueden eliminar estas sustancias. Los ácidos y otras sustancias insolubles (como el barniz) pueden eliminarse solo mediante separadores electrostáticos, resinas de intercambio de iones o alúmina activada.

La prueba de acidez es un procedimiento de verificación que se puede realizar tanto en la instalación como en el taller de servicio, sirve para determinar si el contenido de ácido en el aceite se encuentra dentro de los parámetros de operación segura para un sistema RAC. La prueba se basa en la reacción química de soluciones con una muestra de aceite tomada del sistema de refrigeración.

En el mercado existen diferentes presentaciones de esta prueba, si sospecha de la presencia de acidez se debe hacer la prueba antes de que ocurra un daño como la quema del motor del compresor.

El kit para realizar la prueba consta de dos soluciones, una solución es para hacer la prueba

a los aceites mineral o alquilbencénicos, y la otra solución para aceites polioléster.

Para realizar la prueba de acidez se debe sacar una muestra de aceite al compresor y seguir los siguientes pasos:

- ◆ **Paso 1:** Determinar el tipo de aceite en el sistema y utilizar la solución adecuada para el aceite, en el caso de la Figura 10, la prueba se realiza al aceite POE o polioléster.
- ◆ **Paso 2:** Verter la solución seleccionada en el paso 1 en un recipiente de mayor tamaño, el recipiente “grande” debe ser de al menos el doble de tamaño del recipiente donde viene la solución. Al pasar la solución de recipiente, la misma cambia de color, la solución se tornará morada o roja.
- ◆ **Paso 3:** Pasar la muestra de aceite al recipiente inicial donde venía la solución, se debe llenar el recipiente por completo.
- ◆ **Paso 4:** Agregue el aceite (aceite del paso 3) que se encuentra en el recipiente inicial de la solución al recipiente “grande”, mezclando la solución con el aceite.
- ◆ **Paso 5:** Tape el recipiente “grande” y agite el recipiente por 15 segundos, observe el color inmediatamente después de agitar.



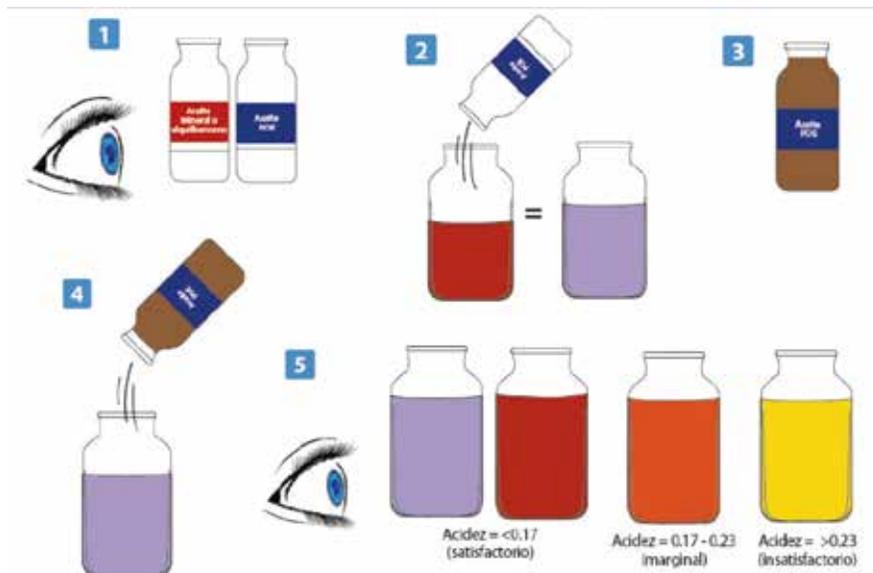


Figura 10. Instrucciones para realizar la prueba de acidez. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Tabla 5. Nivel de acidez según el tipo de aceite. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Tipo de Aceite	Nivel de acidez Satisfactorio		Nivel de acidez marginal		Insatisfactorio	
	Color de Solución	Número de ácido	Color de Solución	Número de ácido	Color de Solución	Número de ácido
Mineral o Alquibencénico	Morado o Rojo	Menor que 0.05	-	-	Naranja o Amarillo	0.05 o mayor
Polioléster	Morado o Rojo	Menor que 0.17	Naranja	0.17 a 0.23	Amarillo	0.23 o mayor

11. SUSTITUTOS DE REFRIGERANTES COMERCIALES POR REFRIGERANTES CON BAJO POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL.

11.1. Refrigerantes Naturales

Los refrigerantes naturales son una alternativa sostenible a los refrigerantes sintéticos, estos refrigerantes se llaman así debido a que son compuestos que se presentan de forma natural en el ambiente. Estas sustancias son los Hidrocarburos (HC), Dióxido de Carbono (CO₂), Amoníaco (NH₃), Agua (H₂O). La característica más importante de estos refrigerantes

es que sus emisiones directas no tienen impacto o tienen impacto insignificante en el ambiente. (Refrigerants Naturally, s.f.)

Las empresas Haier y Godrej han incrementado su producción de equipos de refrigeración basada en hidrocarburos el cual tiene un rendimiento superior. Más compañías se están uniendo a la producción e investigación del uso de refrigerantes naturales e hidrocarburos. Varias compañías pequeñas deciden adoptar el concepto de refrigerantes naturales, convencidos de que la tecnología no solo es mejor desde un punto de vista físico y ambiental sino desde el punto de vista de seguridad con interpretaciones razonables. (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2008).

Lo más importante para las empresas es que el uso de refrigerantes naturales en realidad ayuda a ahorrar dinero a través de una mayor eficiencia energética y costos de servicio reducidos.

El mayor reto para los siguientes años es establecer la tecnología con refrigerantes naturales para sustituir aires acondicionados y equipos de refrigeración comercial que trabajan con HCFC y HFC, durante los últimos años en el sector de alimentos y bebidas en Europa y Australia han empezado a convertir sus equipos comerciales de refrigeración a refrigerantes naturales, ellos saben que el uso de refrigerantes naturales es una buena señal de responsabilidad corporativa con sus consumidores. (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2008)

Este documento tiene el objetivo de ser una guía ante la toma de decisiones, mostrando que alternativas están en desarrollo en el mercado y cómo debería utilizarlas. Se espera brindar evidencias exhaustivas y convincentes para el uso de sistemas de refrigeración alternativos.

Los refrigerantes HFO o Hidrofluorefinas, no se contemplan de lleno en este material, debido a que Costa Rica y el mundo buscan evitar el uso de tecnologías “lock in”, este término se refiere a tecnologías de “paso”, es decir, tecnologías con potencial de calentamiento global mejores que los refrigerantes HFC, pero no son tecnologías con bajo y en algunos casos cero potenciales de calentamiento global, como los refrigerantes naturales.

Las tecnologías “lock in” se evitan debido a que son emisiones comprometidas para el año 2050, perjudicando la meta del Plan de Descarbonización del Gobierno de Costa Rica (Gobierno de Costa Rica, 2018).

11.2. Amoníaco, R-717

El amoníaco (NH_3), perteneciente al grupo de seguridad B2L (ASHRAE, 2019), se empleó por primera vez como refrigerante en el año 1876, cuando Karl Von Linde lo aplicó en una máquina de compresión de vapor. Otros refrigerantes como, por ejemplo, el dióxido de carbono (CO_2) y el dióxido de azufre (SO_2),

también se usaron habitualmente hasta los años 20 del siglo pasado. Sin embargo, durante esos años se desarrollaron los clorofluorocarbonos (CFC) en Estados Unidos, los cuales fueron ampliamente extendidos y usados hasta que fueron prohibidos por el Protocolo de Montreal.

El éxito de los CFC implicó que el amoníaco se enfrentara a un duro rival; aun así, mantuvo su posición especialmente en grandes instalaciones industriales y el sector de conservación de alimentos (Danfoss, 2015).

11.2.1. Ventajas del amoníaco

- ▶ Eficiencia energética: es uno de los refrigerantes más eficientes, apto para aplicaciones de alta y baja temperatura, con una eficiencia mayor que la del R-134a y el propano R-290.
- ▶ Mejor rendimiento.
- ▶ Los sistemas de amoníaco inundado son entre 15% a 20% más eficiente que su homólogo de expansión directa con R-404A.
- ▶ Los sistemas $\text{NH}_3\text{-CO}_2$ en cascada son muy eficientes para aplicaciones a bajas y muy bajas temperaturas (por debajo de los -40°C).
- ▶ Los sistemas $\text{NH}_3\text{-CO}_2$ con salmuera son hasta un 20% más eficiente que las salmueras tradicionales.
- ▶ Medioambiente: es el refrigerante más respetuoso con el medioambiente en términos de potencial de calentamiento global (PCG) y potencial de agotamiento del ozono (PAO), con valor cero en ambos índices.
- ▶ Tuberías más pequeñas: Requiere tuberías de diámetros inferiores con relación a la mayoría de los refrigerantes químicos.
- ▶ Mejor transferencia de calor: Tiene mejores propiedades de transferencia de calor que la mayoría de los refrigerantes químicos, razón por la que permite usar áreas más pequeñas para la transferencia de calor, reduciendo costos en materiales e instalación, aumentando

la eficiencia termodinámica del sistema a menor costo de funcionamiento.

- ▶ Lubricación: No es miscible con aceites comunes, es más ligero que el aceite, lo que simplifica los sistemas de retorno de aceite al compresor, evitando daños en el mismo.
- ▶ Sistema de circulación mediante bomba o gravedad donde se puede reducir el recalentamiento a 0K (cero Kelvin), aumentando la eficiencia del evaporador sin riesgo de arrastre de líquido en el compresor.
- ▶ Puede trabajarse con cargas de refrigerante relativamente bajas en sistemas de recirculación por gravedad.

11.2.2. Restricciones del Amoniaco

- ▶ Clasificado en el grupo 1 de la directiva PED (Tóxico, corrosivo y moderadamente inflamable)
- ▶ Requiere drenaje del aceite.
- ▶ El amoniaco en determinadas concentraciones es tóxico, corrosivo e inflamable, por tanto, debe manipularse con cuidado y todos los sistemas con amoniaco deben diseñarse pensando en la seguridad. Los diseños de plantas con amoniaco deben basarse en la norma EN 378 y la directiva PED.
- ▶ El amoniaco no es compatible con el cobre ni el latón, por lo que se debe usar tuberías de acero o acero inoxidable.
- ▶ Se requiere usar compresores abiertos
- ▶ Para bombas se suelen usar el motor con tubo de separación. Algunas soluciones especiales requieren costosos motores de acoplamiento magnético.

11.2.3. Sistemas con Amoniaco

En esta sección se explica cómo trabaja un sistema con amoniaco.

El compresor aspira el gas seco (resultante del evaporador y el flash gas) del separador a la temperatura de evaporación, lo comprime hasta la temperatura de condensación y lleva el gas de descarga recalentado hasta el condensador. El condensador licua el refrigerante a la vez que disipa el calor del gas refrigerante mediante el sistema de enfriamiento. Desde el condensador, el líquido refrigerante llega hasta el dispositivo de expansión a la presión de condensación, y próximo a la temperatura de esta. En el dispositivo de expansión, el amoniaco se expande hasta la temperatura de evaporación y, a continuación, pasa al separador. En el separador se separa el gas líquido del flash gas.

El líquido refrigerante, a la temperatura y presión de evaporación, es aspirado por la bomba y enviado hasta el evaporador. La tasa de circulación es, generalmente, de 1:3; es decir, un tercio del flujo másico se evapora en el evaporador, absorbiendo la capacidad calorífica.

En el evaporador se produce el intercambio de calor. Hasta el separador retorna una mezcla de gas y líquido; el líquido se separa del gas y el compresor puede aspirar el gas seco. De este modo se cierra el circuito (Figura 11).

El aceite del compresor no suele ser soluble en amoniaco, por lo que permanece en el sistema y es recogido en el evaporador. Ello limita la capacidad y origina averías que se pueden evitar mediante un dispositivo de drenaje de aceite en el colector de aceite del separador (Danfoss, 2015).

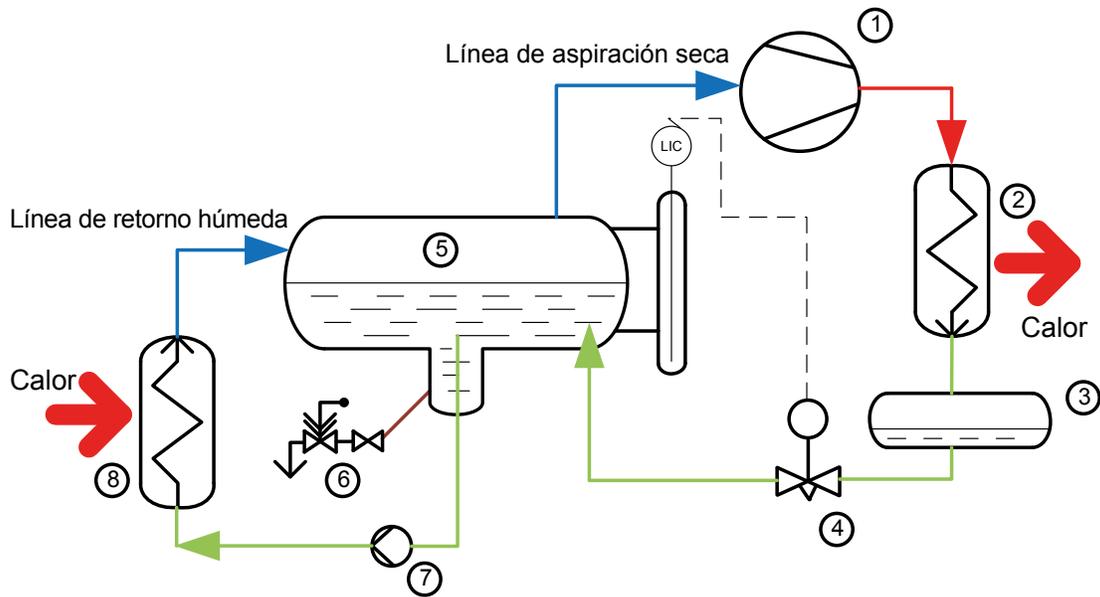


Figura 11. Sistema de amoníaco mono etapa. Fuente (Danfoss, 2015)

Tabla 6. Elementos del sistema de amoníaco de Figura 11.

#	Elemento
1	Compresor
2	Condensador
3	Recipiente
4	Dispositivo de expansión
5	Separador de líquidos
6	Drenaje de aceite
7	Bomba de refrigerante
8	Evaporadores

11.2.4. Seguridad con sistemas de amoníaco

Hay tres aspectos que conciernen a la seguridad de una planta de amoníaco:

- ▶ La seguridad interna intrínseca de la propia planta mecánica en función de las reglas de diseño dispuesta por las distintas normas. En Europa, estas son la norma EN 378 y la directiva PED (Directiva sobre Equipos a Presión).
- ▶ La seguridad exterior durante la reparación y el mantenimiento de la planta. En este punto

la norma EN 378 dispone que solo personal formado y certificado puede realizar estas tareas.

- ▶ La seguridad exterior en caso de accidentes, teniendo en cuenta los trabajadores de la planta y a las personas que vivan en sus alrededores.

Los aspectos que se deben considerar en instalaciones de amoníaco son las siguientes:

Toxicidad: El amoníaco tiene un nivel de toxicidad conocido como concentración máxima permisible (MAC) de 20 ppm en Europa y 25 ppm en EE. UU., como valor máximo de concentración media ponderada en el tiempo que no resulte perjudicial para las personas durante una exposición de 8h al día, 40 h a la semana.

Una sustancia se considera muy tóxica si su concentración MAC sobrepasa las 400 ppm, el amoníaco debe tratarse siempre como un refrigerante muy tóxico (ver Figura 12).

Inflamabilidad: El amoníaco es de baja inflamabilidad, a baja temperatura un charco de amoníaco no arde de forma espontánea. Para su ignición es necesario usar una fuente de calor externa, y el fuego se detendrá una

vez que esta se retire. Esto se debe al bajo nivel de calor radiado desde las llamas hasta el charco.

Explosión: Las mezclas amoniaco y aire seco al 15-28% de volumen de amoniaco son explosivas. La energía de ignición necesaria para iniciar la explosión es elevada, y el amoniaco líquido no puede arder bajo presión atmosférica. Su rango explosivo está muy por encima de las 100.000 ppm, por lo que ninguna persona podría trabajar en un entorno

con riesgo de explosión de amoniaco. Una humedad del aire elevada, así como cualquier mezcla de aire, amoniaco y vapores de aceite, reduce el límite de concentración, lo cual obliga a reconsiderar el límite explosivo utilizado para calcular la capacidad de la ventilación de emergencia.

Aceite: Comúnmente se emplean aceites no solubles en amoniaco, por lo que deben drenarse.

Efectos en función de la concentración en ppm:	
1-5 ppm:	Olor detectable por la mayoría de las personas.
20 ppm:	Valor de concentración MAC (en Europa, 25 ppm en EE.UU.).
50 ppm:	Valor de concentración MAC para un breve periodo (15 minutos).
100-200 ppm:	Transcurrido un minuto se producirá cierta irritación ocular. No habrá visión defectuosa ni dificultad para respirar.
400 ppm:	Efecto lacrimógeno inmediato en los ojos y visión defectuosa. Problemas en nariz y garganta que no serán de gravedad si la exposición es inferior a una hora.
1.000 ppm:	Ojos permanentemente llorosos, ausencia de visión y gran dificultad para respirar.
2.000-4.000 ppm:	Peligro grave en 30 minutos.
5.000 - 10.000 ppm:	Rápidamente mortal

Figura 12. Efectos del amoniaco sobre las personas en función de la concentración en ppm. Fuente (Danfoss, 2015).

11.2.5. Procedimiento en caso de fuga

Cualquier acción en caso de fuga debe ser llevada a cabo por personal autorizado, formado y equipado con los elementos adecuados de protección, máscaras de gas, guantes y botas. Una fuga puede ir desde el olor de amoniaco, hasta el chorro de amoniaco líquido.

Las fugas pueden ser provocadas por desgaste, vibraciones, error humano y accidentes externos.

Fuga menor, no se activa ninguna alarma: para identificar la fuga basta con rastrear el olor con una máscara de protección a mano, este tipo de fugas suelen estar ocasionadas por fallos en las juntas (bridas, conexiones roscadas, cubiertas de los dispositivos de control, empaquetaduras de las válvulas de cierre...). Compruebe las posiciones de las válvulas de cierre anteriores y posteriores al área sospechosa

(según el sentido de flujo) en caso de que la fuga empeore. Un papel de tornasol humedecido, colocado en cada junta, mostrará la ubicación precisa de la fuga. En presencia de amoniaco, el color del tornasol pasa de rojo a azul. En la mayoría de los casos basta con volver a apretar la junta para detener la fuga. De no ser así, debe inspeccionarse la propia pieza de conformidad con el procedimiento de revisión habitual.

Fuga por error humano, se activa la alarma de bajo nivel: Este tipo de fugas accidentales pueden producirse durante la revisión y el mantenimiento al dejar piezas flojas de forma inadvertida. Ello pone de relieve la preferencia de trabajar siempre en parejas, de modo que la segunda persona se encargue de apretar las válvulas de cierre.

Fuga catastrófica, se activa la alarma de alto nivel: La rotura de una tubería por causas externas o internas es un ejemplo de liberación catastrófica de grandes cantidades de amoniaco. En este caso se

debe seguir el procedimiento habitual de alarma. Si la fuga se produce en la sala de máquinas, la ventilación de emergencia se encargará de extraer el gas de amoníaco. Dependiendo del tamaño de la planta, se procederá automáticamente a aplicar otras medidas de seguridad tales como el aislamiento de partes de dicha planta por medio de válvulas de cierre automáticas. Tan pronto como el amoníaco de la planta alcance la presión atmosférica, la temperatura descenderá hasta $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la evaporación se ralentizará enormemente. La acción óptima en este caso consiste en inspeccionar la zona equipado con un traje a prueba de gases. Si no fuera posible, la única opción será ventilar la zona hasta que se haya evaporado todo el amoníaco.

11.3. Dióxido de Carbono CO_2 , R-744

El Dióxido de Carbono (CO_2), perteneciente al grupo de seguridad A1 según (ASHRAE, 2019), es un refrigerante natural que no es inflamable, no daña el ozono y tiene un PCG bajo (el PCG del R-744 es 1). El R-744 es tóxico solo a concentraciones muy altas. Sin embargo, según (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2008) la temperatura crítica del R-744 es de $31\text{ }^{\circ}\text{C}$; esto provoca que los sistemas con CO_2 sean utilizados en lugares con climas fríos o sistemas en cascada, donde se utiliza el R-744 como refrigerante secundario. Esto debido a que si la temperatura ambiente supera los $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ o está cercana a esta temperatura, el refrigerante no se condensará en el condensador, por lo que no absorberá suficiente energía en el evaporador y el sistema no trabajará adecuadamente.

Debido a la baja temperatura crítica del CO_2 , se han desarrollado dos tipos de sistemas de refrigeración, los **Sistemas Subcríticos** y **Sistemas Transcríticos**.

“Los sistemas subcríticos son aquellos donde la temperatura del CO_2 en la etapa isotérmica después de la compresión del fluido está por debajo de la temperatura crítica” (Bernard Refrigeración).

“Los sistemas transcríticos son donde el CO_2 se enfría, sin llegar a condensarse en la salida del condensador (en este caso Gas Cooler debido a que el refrigerante

no se condensa) manteniéndose por encima de la temperatura crítica” (Bernard Refrigeración).



Foto: <https://frimorife.com/instalacion-de-co2-transcritico-con-multievector/>

11.3.1. Sistemas Subcríticos

El R-744 ha es un refrigerante utilizado en Europa y en algunos sitios de USA, recientemente se está implementando en algunos proyectos en Costa Rica, donde se instala en cascada utilizando otros refrigerantes como el R-717 en el lado de alta de temperatura.

Una de las empresas que han utilizado por muchos años el CO_2 como refrigerante es Nestlé (Nestlé, 2006), este refrigerante reemplaza el R-134a y el R-404A en aplicaciones de bajas temperatura.

11.3.1.1. Sistemas en Cascada

Un sistema en cascada consta de dos sistemas independientes de una etapa, donde el sistema con temperatura de evaporación más baja utiliza un intercambiador como condensador para rechazar el calor de este, utilizando el evaporador del sistema con temperatura de evaporación más alta (ver Figura 13). Normalmente se usan refrigerantes diferentes y su aplicación es mayormente para aplicaciones de baja o ultra baja temperatura (Mundo HVACR).

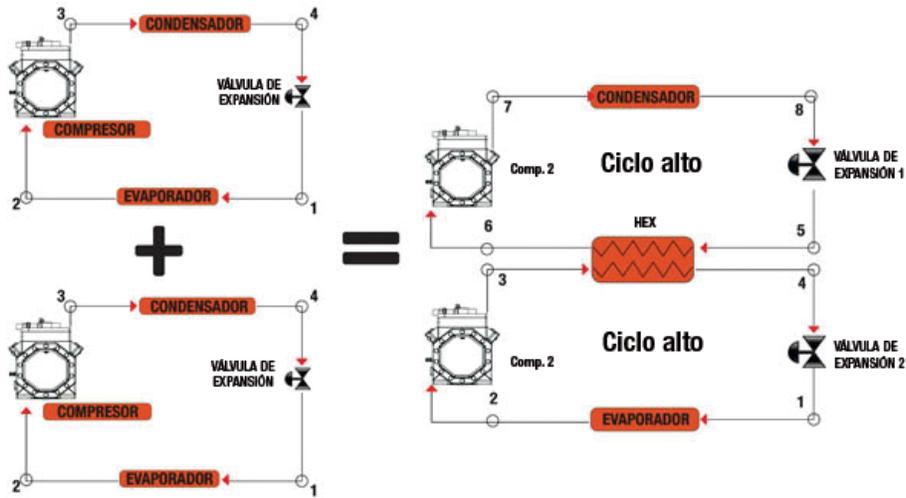


Figura 13. Dos sistemas de una etapa = Sistema en Cascada. Fuente (Mundo HVACR).

Beneficios

Al utilizar un sistema en cascada se disminuye la relación de compresión de cada sistema, lo que hace que la eficiencia volumétrica aumente en cada una de las etapas y, por lo tanto, el sistema en su totalidad sea más eficiente por lo que también se necesita menos desplazamiento de los compresores. Así mismo, la temperatura de descarga disminuye en comparación a un sistema de una sola etapa, lo cual beneficia la temperatura del aceite y a la buena lubricación del compresor (Mundo HVACR).

11.3.2.1. Refrigeración con CO₂ Transcrítico

Un sistema de CO₂ transcrítico es un sistema de refrigeración con CO₂ trabajando por encima de la temperatura crítica (31 °C), los sistemas que trabajan en la zona transcrítica son los Sistema Booster con compresión paralela.

11.3.2.2. Sistema Booster Compresión Paralela

Los sistemas booster con compresión paralela son un sistema altamente eficiente para CO₂ en climas cálidos.

Este sistema reduce en gran medida el trabajo de los compresores de media temperatura y mejora la

eficiencia, pues el vapor flash o flash gas, que es el refrigerante en forma de vapor que queda en el tanque de líquidos, se comprime directamente a la presión del tanque, en lugar de realizar la expansión y reducción hasta la succión de la presión en media temperatura, lo que puede marcar hasta 180 psi de diferencia.

Utilizar el sistema con compresor en paralelo permite obtener mejores eficiencias comparadas contra sistemas tradicionales de R-404A, con temperatura ambiente de hasta 38 °C. (García, 2018).

En la Figura 14 se muestra el diagrama de este sistema, cada componente está enumerado y se indica que es en la Tabla 7.

El ciclo se va a explicar iniciando en el elemento 4, los compresores de media temperatura, estos comprimen el CO₂ subiendo la presión y temperatura por encima de los valores críticos, el refrigerante pasa al Gas Cooler, señalado con el número 1, en este elemento se enfría el refrigerante, pero no cambia de estado, el refrigerante entra como un gas y sale como gas. La válvula de alta presión disminuye la presión del refrigerante, de un rango de 90 a 100 bar a un rango de 32 a 37 bar en el lado de baja presión, esta disminución de la presión y de temperatura condensa el refrigerante y pasa al componente 3. El recipiente de líquidos separa el refrigerante líquido del refrigerante en forma de gas o flash gas. El gas que hay en el sistema viaja al compresor de media

temperatura (compresión paralela), el cual comprime el refrigerante e inicia de nuevo el ciclo enviándolo al gas cooler.

El refrigerante líquido del recipiente de líquidos viaja al componente 5, una válvula de expansión y regulación que alimenta tanto el evaporador de media temperatura como al evaporador de baja temperatura.

La diferencia de temperatura de un evaporador al otro, conlleva también en una diferencia de presión del refrigerante, por lo que en la salida del evaporador de baja temperatura, componente 7, el refrigerante viaja a los compresores de baja temperatura, elemento 8, los mismos se encargan de subir la presión a la de succión de los compresores de media temperatura (elemento 4), que es la misma presión del refrigerante a la salida del evaporador de media temperatura (elemento 6 de la Figura 14).

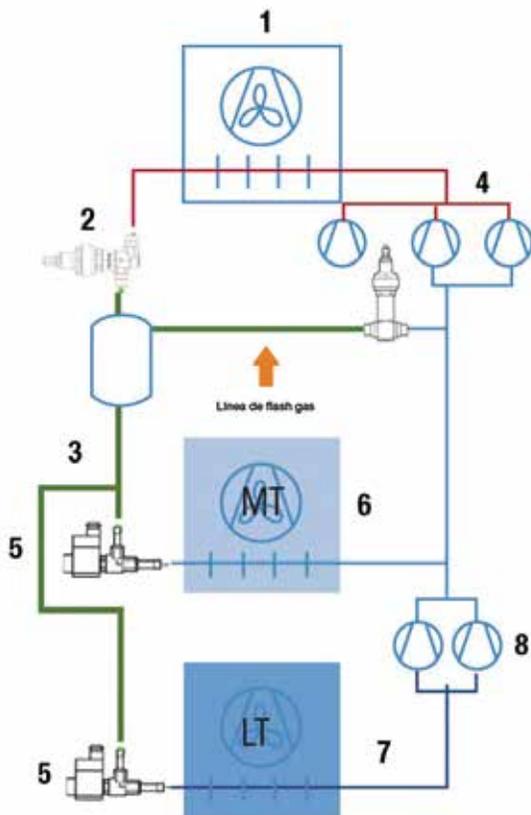


Figura 14. Diagrama de Sistema Booster Compresión Paralela. Fuente (García, 2018)

Una aplicación común para estos sistemas son supermercados que mantienen frutas, vegetales y bebidas con una temperatura “media”, en este caso es el evaporador de media temperatura que se encarga de estos sistemas, los evaporadores de baja temperatura se encargan de los alimentos congelados como carnes y pescados.

Tabla 7. Componentes del Sistema Booster Compresión Paralela. Fuente: Elaboración propia.

No	Componente
1	Gas Cooler
2	Válvula de alta presión
3	Recipiente de líquido
4	Compresores de media temperatura
5	Válvulas de control
6	Evaporador de media temperatura
7	Evaporador de baja temperatura
8	Compresores de baja

11.3.3. Ventajas del Dióxido de Carbono

- ▶ Disponibilidad
- ▶ No es inflamable, con clasificación de seguridad A1
- ▶ Excelentes propiedades termodinámicas y bajo consumo de energía
- ▶ Bajo PCG y no daña la Capa de Ozono (PAO=0)
- ▶ Es compatible con la mayoría de los aceites de refrigeración
- ▶ Físicamente los equipos son más compactos que los convencionales
- ▶ Los sistemas $\text{NH}_3\text{-CO}_2$ en cascada son muy eficientes para aplicaciones a bajas y muy bajas temperaturas (por debajo de los $-40\text{ }^\circ\text{C}$).

11.3.4. Restricciones del CO₂

- ▶ Altas presiones de trabajo comparado con otros refrigerantes, por lo que los componentes del sistema deben operar de manera segura a dichas presiones.
- ▶ Requiere un contenido de humedad muy bajo, menor a 5 ppm. El alto contenido de agua puede formar ácido carbónico y su acumulación dará como resultado la corrosión del equipo (A-GAS).
- ▶ Temperatura crítica baja, lo que hace se utilicen en climas fríos o en sistemas con cascada.

11.3.5. Seguridad con CO₂

Manipulación: Asegúrese de que la habitación tenga una buena ventilación también a nivel del suelo.

Riesgos por reactividad: El contacto puede causar quemaduras por frío o congelaciones. El gas liberado en la evaporación puede ser asfixiante a altas concentraciones (mayor a 30 000 ppm).

Grupo de seguridad A1: (Ningún o insignificante efecto venenoso o corrosivo).

Informaciones toxicológicas: Irritación primaria en la piel o en los ojos: Son posibles congelaciones por salpicaduras de gas líquido. El producto desencadena rápidamente trastornos circulatorios y dolores de cabeza, malestar, vómitos y es asfixiante por desplazamiento del aire a altas concentraciones. La falta progresiva de oxígeno se expresa en somnolencia y dificultades respiratorias.

11.3.6. Procedimiento en caso de fuga

Si la persona afectada está inconsciente:

- ▶ Llame inmediatamente a un médico, así como a una ambulancia que esté equipada con un aparato respirador.
- ▶ Mientras se espera la llegada de la ambulancia y en la medida en que esto no suponga ningún peligro, deberá llevarse a la persona

afectada a una habitación ventilada o bien fuera del edificio. Acueste de lado al afectado.

- ▶ Debe informar al médico de que la persona afectada ha estado expuesta al refrigerante R-744. Es preferible que el herido lleve la etiqueta correspondiente consigo.
- ▶ Afloje la ropa que ciñe el pecho para así facilitar la respiración.
- ▶ Las personas que hayan inhalado grandes cantidades de vapor deberán ser tratadas de manera urgente con oxígeno por una persona experta en la materia. Además, deberá conservar la tranquilidad en la medida de lo posible.
- ▶ En ningún caso deben administrarse agua u otros fluidos, excepto cuando sea por indicación del médico.
- ▶ No administrar catecolamina.

Si la persona presenta lesiones oculares:

- ▶ No frotar nunca los ojos.
- ▶ Si las hubiese, retirar, las lentes de contacto.
- ▶ Levantar el párpado y lavar el ojo durante al menos 20 minutos con mucha agua.
- ▶ Llevar inmediatamente a la persona afectada a un oculista o a una clínica de urgencias.

En caso de contacto con la piel

- ▶ Lavar durante al menos 20 minutos con abundante agua corriente las zonas de la piel afectadas, mientras tanto y al mismo tiempo quitar la ropa.
- ▶ No tapar nunca con ropas, vendajes, aceite u otros las zonas de la piel afectadas.
- ▶ Tras el lavado, llevar a la persona afectada tan rápido como sea posible a un médico o a una clínica de urgencias.

Lesiones por ingestión de líquido refrigerante

- ▶ Dar a beber a la persona afectada, mientras se mantenga consciente, tanta agua o bebida caliente como sea posible. (GEA, 2014)

11.4. Hidrocarburos

Los hidrocarburos (HC) son refrigerantes limpios favorables al medio ambiente, que emergen como la alternativa ante la acelerada eliminación de los HCFC y una previsible regulación de emisiones de gases fluorados, bajo un futuro acuerdo de cambio climático en las áreas de Montreal y Kyoto. (GIZ, 2014).

Es ampliamente conocido que los hidrocarburos son excelentes refrigerantes en términos de rendimientos y su insignificante impacto ambiental, sin embargo, se reconoce que su principal obstáculo está relacionado a su inflamabilidad. (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2008).

El impacto de los HC ha sido marcado en las aplicaciones de refrigeradores y congeladores domésticos, donde el isobutano (R-600a) se utiliza a escala global. La refrigeración comercial ha seguido su ejemplo, principalmente eligiendo propano (R-290) para reemplazar los refrigerantes que dañan el ozono y contribuyen con el calentamiento global.

Los principales Hidrocarburos que se utilizan como refrigerantes son; Propano R-290, Isobutano R-600a y el Propileno R-1270.

Estos refrigerantes tienen una clasificación A3 según el Standard 34 de ASHRAE, debido a que los refrigerantes no son tóxicos, pero presentan una alta inflamabilidad.

La IEC 60335-2-89, designa un límite máximo de carga de refrigerante inflamable en sistemas de RAC, el límite para los refrigerantes A3 es de 500g, para los refrigerantes con inflamabilidad baja A2L y los inflamables A2 el límite es de 1200g. (Danfoss, 2019).

Los límites de carga de refrigerante inflamable son por circuito, es posible tener una carga mayor en un sistema si hay múltiples circuitos. Esto se considera seguro, ya que el riesgo principal es una fuga en lugar de una ignición en el sistema.

11.4.1. Ventajas de los Hidrocarburos

- ▶ Bajo potencial de calentamiento global.
- ▶ No afecta el ozono.
- ▶ No son tóxicos.
- ▶ Son eficientes.
- ▶ Buena compatibilidad con materiales (metales y plásticos).
- ▶ Son miscibles con aceites existentes para RAC.
- ▶ Son gases naturales, por lo que las emisiones no son reguladas.

11.4.2. Restricciones de los HC

- ▶ Alta inflamabilidad.
- ▶ Costo adicional para la seguridad del equipo y personal.
- ▶ Aumento en el tamaño y costo del compresor.
- ▶ El sistema de refrigeración debe de estar diseñado de tal manera que el refrigerante HC quede confinado en caso de fuga en el interior del sistema (Calor y frío, 2018).

11.4.3. Sistemas con HC

Los equipos fabricados para trabajar con refrigerantes inflamables deben ser construidos con componentes sellados, utilizando dispositivos de estado sólido, se debe asegurar adecuadamente las terminales y conexiones eléctricas de forma que se proporcione suficiente aislamiento para evitar cortocircuitos.

Es importante mencionar que los sistemas con HC funcionan con el mismo ciclo de refrigeración que los refrigerantes sintéticos. Por lo que en algunos países convierten un sistema diseñado para un tipo de refrigerante sintético, en un sistema con HC, estas conversiones no son recomendadas, ya que se deben cambiar la mayoría de los elementos del

sistema por elementos diseñados para trabajar de forma segura con HC.

11.4.4. Seguridad con HC

La seguridad es una preocupación cuando se aplica cualquier refrigerante, con respecto a los peligros derivados de la toxicidad, asfixia, explosiones por presión y lesiones mecánicas. El uso de HC representa un riesgo adicional de inflamabilidad.

Diferentes líquidos o gases inflamables se pueden encontrar en la mayoría de los lugares de trabajo, domicilios y otros entornos; los ejemplos incluyen gas de cocina, gasolina, pinturas y alcohol. En todos los casos, estas sustancias deben ser envasadas, manipuladas y utilizadas de forma adecuada, ya que de lo contrario pueden representar un peligro. Por lo tanto, se siguen ciertos principios de seguridad para garantizar que se mantenga un nivel de seguridad aceptablemente alto. Para utilizar los refrigerantes HC de forma segura, es esencial comprender los riesgos de inflamabilidad y los medios correspondientes para alcanzar un nivel adecuado de seguridad.

Hay tres aspectos principales a considerar cuando se trata de refrigerantes HC:

- ▶ Asegurarse de que el sistema es sellado y suficientemente robusto a lo largo de su vida útil.
- ▶ Garantizar la seguridad de los equipos que se utilizan al entrar en contacto con atmósferas inflamables.
- ▶ Protección de los trabajadores que pueden entrar en contacto con atmósferas inflamables en el lugar de trabajo.

Cuando es posible crear una atmósfera inflamable, los responsables de la colocación o instalación del equipo deberán garantizar que no sea posible la ignición de dicha atmósfera inflamable.

Cualquier persona involucrada en el uso de sustancias inflamables, debe tener en cuenta lo siguiente:

- ▶ Saber que se está utilizando una sustancia inflamable y cuáles son sus características.

- ▶ Estar al tanto de las prácticas para el manejo y almacenamiento seguro de sustancias inflamables.
- ▶ Introducir procedimientos de seguridad y hacer un análisis de riesgos para prevenir accidentes derivados de las sustancias inflamables.

Es esencial entender el concepto básico de inflamabilidad. Tres ingredientes son necesarios para un incendio: un combustible a la concentración correcta, un suministro de oxígeno normalmente desde el aire y una fuente de ignición. La forma más común de ilustrar esto es por medio del triángulo del fuego (ver Figura 15). Si se controlan estos componentes, por ejemplo, eliminando al menos uno, pero preferiblemente dos, se puede evitar el fuego. Para conseguirlo, deben seguirse tres directrices generales: contención de la sustancia, evitar las fuentes de ignición y uso de la ventilación. (Godrej).

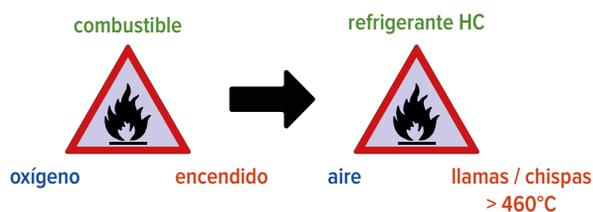


Figura 15. Triángulo del fuego. Fuente (Godrej)

Contención: Las sustancias inflamables deben mantenerse dentro de un “contenedor” adecuadamente diseñado y construido, ya sea un cilindro o un sistema de refrigeración. Si la sustancia se filtra, debe evitarse que se extienda a otras zonas.

Fuentes de ignición: Asegúrese de que todas las fuentes de ignición obvias y no obvias hayan sido retiradas o aisladas del equipo y de las áreas de manipulación. Las fuentes de ignición pueden variar mucho, y estas fuentes pueden incluir chispas de equipos eléctricos o herramientas de soldadura y corte, superficies calientes, llamas abiertas de equipos de calefacción y materiales humeantes.

Ventilación: Debe haber un flujo de aire adecuado en los lugares donde se almacenan y utilizan sustancias inflamables. Una buena ventilación significará

que cualquier vapor que surja de una fuga se dispersará rápidamente.

Además de esto, también es importante considerar la gravedad de las consecuencias de encender la sustancia inflamable. En algunos casos, el resultado de la ignición puede ser menor, como una llama momentánea. Otras situaciones pueden dar lugar a una explosión grave. Por lo tanto, la cantidad de sustancia inflamable y el entorno en el que se encuentra

debe ser observada para comprender el significado de un accidente (Godrej).

Los equipos que trabajen con hidrocarburos como refrigerantes deben estar debidamente etiquetados como: “gas inflamable” en entradas del recinto del equipo, puntos de acceso de refrigerante y en la tubería expuesta, así como una señal de advertencia (ver Figura 16).



Figura 16. Señal de advertencia apropiada. Fuente construcción propia

11.4.5. Procedimiento en caso de fuga

En caso de contacto con la piel: Descongele la parte afectada con agua. Retire la ropa contaminada. Cuidado: la ropa puede adherirse a la piel en caso de quemaduras por el frío. Después de contacto con la piel, lavar inmediata y abundantemente con agua tibia. Si se produce una irritación o formación de ampollas solicitar atención médica.

En caso de contacto con los ojos: Lavar inmediata y abundantemente con agua corriente, con los párpados abiertos, por lo menos durante 10 minutos; luego proteja los ojos con gasa estéril o un pañuelo limpio y seco. CONSULTE A UN MÉDICO.

En caso de ingestión: Ruta de exposición improbable. No provocar el vómito. En el supuesto que el paciente esté consciente, lavar la boca con agua y dar a beber 200-300 ml de agua. Acudir al médico inmediatamente.

En caso de inhalación: Retirar al paciente de la zona de exposición. Si se detiene el corazón, el personal capacitado debe comenzar de inmediato la resucitación cardiopulmonar. En caso de dificultad respiratoria, dar oxígeno. Llevar al paciente al aire libre y mantenerlo en reposo y abrigado.

Principales síntomas y efectos, agudos y retardados: El contacto directo con el líquido puede provocar congelaciones. El contacto directo con los ojos puede provocar irritación, lagrimeo, riesgo de quemaduras por congelación. La inhalación en altas

concentraciones puede provocar riesgos de narcosis, alteraciones del ritmo cardiaco, asfixia por falta de oxígeno, vértigo y náuseas (Gasservei, 2018).

11.4.6. Procedimiento en caso de incendio

- ▶ **Medios de extinción apropiados:** En caso de incendio, utilizar agua pulverizada (Tipo A), espuma o polvo seco (Tipo ABC).
- ▶ **Medios de extinción que no se deben utilizar por motivos de seguridad:** Dióxido de carbono. No usar agua a chorro.
- ▶ **Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla:** No inhalar los gases producidos por la explosión y por la combustión: Los vapores pueden originar una mezcla inflamable con el aire. Aumento de presión: El fuego o el calor intenso pueden provocar la ruptura violenta de los embalajes. La combustión incompleta puede formar monóxido de carbono.
- ▶ **Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios:** Utilizar equipos respiratorios apropiados. Recoger por separado el agua contaminada utilizada para extinguir el incendio. No descargarla en la red de alcantarillado. Si es posible, desde el punto de vista de la seguridad, retirar de inmediato del área los contenedores no dañados. Los bomberos deben usar ropa y equipo de protección contra incendios y sistemas de respiración individuales (Gasservei, 2018).

11.4.7. Consideraciones de seguridad al trabajar con sistemas con refrigerantes Hidrocarburos

A continuación, se incluyen consideraciones generales de seguridad a las que se debe prestar atención cuando se trabaja en sistemas que utilizan hidrocarburos

- ▶ Si el sistema tiene fugas de gas refrigerante durante la reparación o el servicio, ventile el área de inmediato. El gas refrigerante es inflamable. En caso de accidente, una fuga masiva podría provocar un incendio que podría provocar lesiones graves o la muerte.
- ▶ No purgue el refrigerante en una habitación cerrada.
- ▶ No inicie o detenga el funcionamiento del aire acondicionado enchufando o desenchufando el cable de alimentación. Si enchufa o desenchufa el cable de alimentación para hacer funcionar el equipo, podría producirse un arco eléctrico, lo cual es una fuente de ignición.
- ▶ Utilice las herramientas adecuadas para realizar los trabajos de reparación, asegurándose de que se mantengan en buenas condiciones y de que se hayan sometido a una calibración periódica. El uso de herramientas inadecuadas puede causar una descarga eléctrica, un incendio o un mal funcionamiento del aire acondicionado.
- ▶ Utilice únicamente las piezas de repuesto originales o de calidad superior que figuran en la lista del manual de servicio que le suministra los fabricantes de los equipos.
- ▶ Desconecte la corriente antes de desmontar el equipo para su reparación. Trabajar en el equipo que está conectado a la fuente de alimentación puede causar una descarga eléctrica.
- ▶ El condensador de corriente suministra electricidad de alta tensión a los componentes eléctricos de la unidad exterior. Descargue el condensador antes de realizar trabajos de reparación.
- ▶ Antes de desconectar la tubería de succión o descarga de la unidad exterior, primero se debe bombear el gas refrigerante en un lugar bien ventilado.
- ▶ No mezcle aire o gas con ningún otro refrigerante que no sea el especificado. Si el aire entra en el sistema de refrigerante, puede causar una presión excesivamente alta, lo que puede ocasionar daños y lesiones al equipo.

- ▶ Cargue el refrigerante según el peso especificado. El sistema no debe ser sobrecargado en ninguna circunstancia.
- ▶ Asegúrese de que siempre haya un detector de gas disponible y utilícelo para la comprobación de fugas.
- ▶ Siempre que sea posible, evite las conexiones de antorcha y minimice las uniones soldadas; asegúrese de que todas las uniones estén bien hechas.
- ▶ Cuando se realice uniones soldadas, se debe asegurar que no haya refrigerante en el sistema, para esto se debe hacer un barrido con nitrógeno después de retirar el refrigerante.
- ▶ Utilizar una balanza digital para medir la carga de refrigerante.
- ▶ Manipular, almacenar y controlar los cilindros de gas, reguladores y tuberías de manguera correcta para evitar fugas de refrigerante en grandes cantidades (Godrej).

11.4.8. Equipo de protección personal durante el mantenimiento, instalación o reparación de sistemas RAC

No toque las partes móviles. No toque ninguna parte del sistema sin el uso de ropa y equipo de protección personal adecuado para evitar lesiones por: el compresor (superficie caliente), el condensador de refrigerante (superficie caliente, aletas afiladas) y los tubos de refrigeración (superficies frías y calientes, puntos puntiagudos) (Godrej).

El equipo de protección personal mínimo es:

- ▶ Gafas.
- ▶ Guantes.
- ▶ Mangas.
- ▶ Zapatos de seguridad.
- ▶ Ropa de trabajo.

Además, siempre que la instalación o mantenimiento se realice en alturas, se debe utilizar el EPP adecuado. (Arnés, casco, línea de vida, equipo retráctil, andamios, escaleras fijas...)

La instalación o mantenimiento siempre debe ser realizada por una persona certificada o por técnicos formales de aire acondicionado, con actualización profesional en Buenas Prácticas de Servicio a equipos RAC, además ser personal autorizado para realizar trabajos en altura cuando los pies del técnico superen 1,80 m de altura con el nivel del piso.

11.4.9. Manipulación y almacenamiento de cilindros

Según (Godrej), mientras se manipulan los cilindros de refrigerante, el técnico debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ▶ Mantener el recipiente cerrado.
- ▶ Usar el cilindro sólo con ventilación adecuada.
- ▶ Mantener alejado del calor, las chispas y las llamas.
- ▶ Para evitar el fuego, minimice las fuentes de ignición. Utilizar equipos eléctricos a prueba de explosiones (ventilación, iluminación y manipulación de materiales).
- ▶ No perforar o incinerar el contenedor.
- ▶ Use equipo clasificado para la presión del cilindro.
- ▶ Cierre la válvula después de cada uso y cuando esté vacía.
- ▶ Proteja los cilindros de daños físicos; no los arrastre, ruede, deslice o deje caer.
- ▶ Utilizar una carretilla de mano adecuada para el movimiento de los cilindros.
- ▶ No sobrecargue el cilindro (sólo el 80% del valor de capacidad recomendado debe ser cargado en el cilindro).

Por ejemplo, si la capacidad del cilindro es de 100 lb, el cilindro se debe cargar hasta un máximo de 80 lb no más, esto porque el refrigerante se expande al calentarse, y puede ocasionar el estallido del cilindro al cargarse en exceso, ver Figura 17.

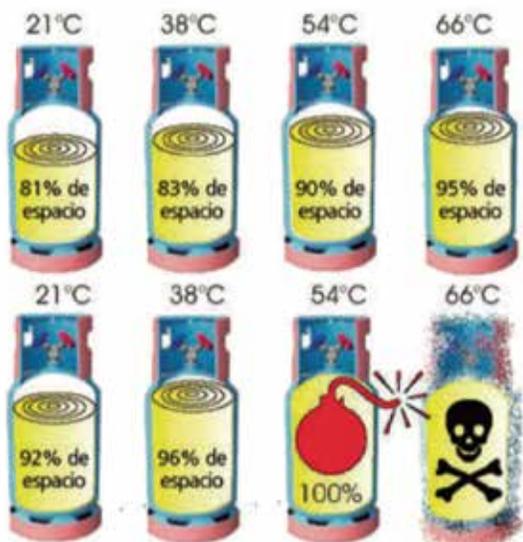


Figura 17. Temperatura del refrigerante y espacio interno de expansión para el cilindro. Fuente: Proklima International, 2010

Según (Godrej), durante el almacenamiento de los cilindros, tenga en cuenta lo siguiente:

- ▶ Mantener el recipiente bien cerrado.
- ▶ Los cilindros deben almacenarse en posición vertical, con la tapa de protección de la válvula en su lugar, y firmemente asegurados para evitar que se caigan o se vuelquen.
- ▶ Los cilindros deben almacenarse en zonas o jaulas específicas, preferiblemente en el exterior, pero en una zona seca y bien ventilada, alejada del riesgo de incendio.
- ▶ El acceso a las zonas de almacenamiento está restringido exclusivamente a personal autorizado, y dichos lugares deberán estar señalizados con carteles que prohíban fumar y el uso de llamas.
- ▶ Deben almacenarse a nivel del suelo.
- ▶ Los cilindros deben estar fácilmente accesible.

- ▶ Nunca almacene los cilindros en locales residenciales.
- ▶ La temperatura del cilindro no debe exceder los 50°C (122°F)

11.4.10. Instalación de Equipos de Hidrocarburos

La selección de la ubicación para la instalación del aire acondicionado se basará en las siguientes consideraciones básicas:

- ▶ Comprobación del tamaño de la sala en relación con el tamaño de la carga de refrigerante.
- ▶ Posicionamiento más adecuado de la unidad interior.
- ▶ Posicionamiento más adecuado de la unidad exterior.
- ▶ Recorrido adecuado para la interconexión de tuberías.
- ▶ Esquema de distribución de las tuberías de drenaje de condensados.

Una consideración importante para la aplicación de refrigerantes HC es la limitación de la cantidad de refrigerante permitida dentro de un sistema para un determinado tamaño de sala. En general, la masa de refrigerante HC dentro de un circuito de refrigerante está limitada, según el tipo de sistema, el tipo de ubicación y el tamaño del espacio, especialmente con respecto a las zonas ocupadas. En el caso de instalaciones para el confort humano, se aplica un tamaño mínimo de sala para un sistema con un tamaño de carga de refrigerante determinado.

Estos tamaños de carga permitidos y el área mínima de la sala se basan típicamente en el supuesto de que, en el peor de los casos, toda la carga de refrigerante de un sistema puede filtrarse a un espacio casi instantáneamente; dado que el vapor es más denso que el aire, se estratificará parcialmente, es decir, la concentración en el suelo será mayor que en cualquier otro lugar. Por lo tanto, la cantidad de refrigerante es limitada, de modo que en estas

circunstancias la concentración de refrigerante será mucho menor que la de LFL (Límite mínimo de flabilidad) y, por lo tanto, no se puede formar una concentración inflamable (Godrej).

Según (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2011), para realizar la instalación de los equipos se deben seguir los siguientes pasos;

- ▶ **Paso 1:** identifique que la unidad exterior esté en zonas bien ventiladas y la instalación general esté sobre el nivel del suelo.
- ▶ **Paso 2:** verifique que los límites de carga estén por debajo del límite según el uso y el área de la sala a acondicionar.
- ▶ **Paso 3:** Verifique que el área de trabajo es segura y ventilada, elimine toda fuente potencial de ignición (Transformadores, pantallas Led, motores giratorios, motor de ventilador, bloque de conexión, PCB (Relés micro interruptor, conexiones sueltas (falsos contactos)).

Estos equipos tienen las fuentes de ignición aisladas, debidamente encapsuladas en cajas certificadas. Fuentes como: contactores, capacitores, conexiones eléctricas, terminales del compresor.

La zona de trabajo debe tener etiquetas de “Gas Inflamable”, “No se permiten llamas”, “No fumar” y “Solo personal autorizado”.

- ▶ **Paso 4:** Verifique que estén todas las herramientas necesarias para la instalación, y asegúrese de contar con un extintor de incendios para fuego tipo C en el área de trabajo.
- ▶ **Paso 5:** Planifique estratégicamente el cronograma de trabajo para contar con herramientas y equipos disponibles directamente y para evitar tener que cambiar el equipo y las interconexiones de manguera de refrigerante durante el mantenimiento de la unidad AC con HC.
- ▶ **Paso 6:** Prueba de hermeticidad (presión/resistencia): Es necesario realizar pruebas de hermeticidad y resistencia de presión, la cual

se realiza simultáneamente presurizando el sistema con nitrógeno seco libre de oxígeno (OFDN) a la máxima presión de trabajo (PS) del sistema como se indica en la placa de datos, más el 10% (de acuerdo con EN 378-2)

- ▶ **Paso 7:** Zonas inflamables temporales: Cuando sea necesario realizar actividades de reparación o servicio en la unidad de interior (interrupción en el sistema que transporta el refrigerante), bajo cualquier razón o circunstancia se aplicará la zona de seguridad designada de 2m, así como en la unidad exterior.



Figura 18. Área de seguridad. Fuente (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2011)

- ▶ **Paso 8:** Evacuación y carga del sistema: Es importante respetar las zonas inflamables temporales, tal como se ha indicado anteriormente, para realizar actividades de trabajo previstas y configuración del área de seguridad. El proceso de evacuación requiere el uso de una bomba de vacío adecuada y de vacuómetros electrónicos; el sistema debe mantener un vacío de 200 micrones (0.5 mbar, 50 Pa) durante al menos 15 minutos sin cambiar la presión.

El proceso de carga de los sistemas de AC con Hidrocarburos es similar al de otros refrigerantes. Como el R-290 es un refrigerante puro, la carga puede hacerse en estado gaseoso o líquido. Para pequeñas cantidades de refrigerante, ejemplo 0.280 kg, la carga de este

sistema se puede hacer tomando en cuenta el vapor del cilindro de refrigerante y cargando a la línea de succión del compresor, midiendo el peso del refrigerante con una balanza con precisión de al menos +3%. Si se carga en forma líquida, al lado de la succión del sistema, se debe evaporar antes de que llegue al sistema, interconectando un dispositivo de expansión entre la manguera y el sistema, para permitir la evaporación del refrigerante. La carga debe

monitorearse mediante el uso de una balanza sensible y precisa. Por motivos de seguridad y para proporcionar una carga precisa, se debe usar los cilindros de refrigerantes más pequeños disponibles.

- **Paso 9:** aplique marcas de sistema y documentación correspondiente, signo de advertencia en el compresor (inflamable), tal como se muestra en la Figura 16 y en la Figura 19.

Etiqueta de servicio refrigerante inflamable R-290	
Empresa:	
Nombre del técnico:	
Dirección:	
Teléfono:	
No. Registro:	
 Refrigerante inflamable	Este sistema está cargado con refrigerante natural R-290
Carga de refrigerante en kg:	
Tipo de lubricante y cantidad:	
Fecha:	
Firma:	

Figura 19. Etiqueta de Servicio para un Aire acondicionado con R-290. Fuente Construcción Propia

- **Paso 10:** con un detector de gas HC, revise cada unión, conexión y componente para verificar que no haya presencia de refrigerante. Usando una prueba de burbuja, revise cada unión, conexión y componente verificando que no haya burbujas usando agua jabonosa o algún otro fluido similar.

Cuando se trabajan con refrigerantes inflamables, el técnico debe considerar determinados lugares como “Zonas inflamables temporales”. Estas son regiones donde se considera al menos alguna emisión de refrigerante, durante los procedimientos de funcionamiento normales, como recuperación, carga, entre otros; generalmente donde se conectan y desconectan mangueras.

El cronograma de trabajo para la manipulación de refrigerante durante las actividades de servicio y reparación se debe coordinar de forma que la liberación de refrigerante no sea necesaria, por ejemplo, moviendo el refrigerante al lado de alta. En anticipación a la cantidad máxima de refrigerante que se puede liberar durante dicho procedimiento, como conexión y desconexión de mangueras mientras están llenas de refrigerante líquido. Se deben fijar al menos 2 m de distancia mínima en todas direcciones en relación con el área de trabajo ocupada donde se coloca el equipo de servicio (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2011).

11.5. Purezas de refrigerantes naturales e hidrocarburos

La pureza de los refrigerantes naturales es muy importante. Al existir otros usos para el propano y CO₂, las personas tienden a creer que el mismo producto puede funcionar como refrigerante, sin embargo, la humedad junto con otras sustancias daña los lubricantes, produciendo ácidos y lodos en el sistema (Ospina, 2019).

Los fluidos utilizados como refrigerante en sistemas RAC, deben ser de grado Refrigerante, esto garantiza la pureza requerida para no afectar la eficiencia y el desgaste de los equipos. La pureza requerida por los Hidrocarburos es de 99,5% o superior, la humedad no debe sobrepasar las 10 ppm, y la presencia de otros hidrocarburos no deben sobrepasar las 5000 ppm (Godrej).

12. Resumen de sustitutos de refrigerantes

La siguiente tabla muestra un resumen de los refrigerantes y sus sustitutos naturales.

Refrigerante	Nombre	PAO	PCG	Sustituye
R-717	Amoniac	0	0	R-22 , R-404 , R-502
R-744	Dióxido de Carbono	0	1	R-22 , R-134a , R-404 , R-502
R-290	Propano	0	3	R-22 , R-410 , R-404 , R-502
R-600a	Isobutano	0	3	R-134a

Es importante recordar que esta sustitución es en la aplicación, NO se debe confundir en que se puede reemplazar solamente el refrigerante por uno natural en un sistema que no ha sido diseñado para trabajar con refrigerantes naturales.





Foto: Freepick image

13. ANEXOS

A. Protección y análisis de riesgo ante explosión

Clasificación de peligrosidad del área según directiva 99/92/CE.

Aplicación de la directiva:

- ▶ Identificar la sustancia inflamable usada en el proceso
- ▶ Aplicar el estándar EN 60079-10-1 de atmósferas explosivas.
- ▶ Emitir un documento en el cual las áreas peligrosas estén indicadas en función de:
 - ▶ El estado físico de la sustancia
 - ▶ Frecuencia y duración de la presencia de la sustancia en una atmósfera explosiva
 - ▶ Tipo y velocidad de ventilación
- ▶ Generalmente el documento consiste en un reporte emitido por un experto, acompañado con un diseño y plano indicando las áreas peligrosas.

Las áreas peligrosas se clasifican por el tipo de gas inflamable, vapor o niebla presente.

Las áreas están divididas en tres:

Zona 0: área en la cual es consistente una atmósfera explosiva presente por largos periodos de tiempo o una mezcla frecuente entre aire y sustancias inflamables en forma de gas, vapor o niebla.

Zona 1: área en la que ocasionalmente se forma una atmósfera explosiva consistente en una mezcla de aire y sustancia inflamable en forma de gas, vapor o neblina.

Zona 2: Área en la que normalmente no debería haber una mezcla explosiva de sustancias inflamables en forma de aire y gas, vapor o niebla, pero puede darse en caso de problemas de operación o y por periodos cortos de tiempo.

Una vez se identifique el área peligrosa, se debe de evaluar el riesgo de explosión.

B. Propiedades y Características del Refrigerante R-290

Propiedad/características	Valor	Observación
Nombre químico	Propano	-
Fórmula molecular	C_3H_8	Compuesto por tres átomos de carbono y ocho átomos de hidrógeno
Punto de ebullición normal (NBP)	-41,8°C (-43,2°F)	La temperatura a la que el refrigerante se vaporizará a la presión atmosférica estándar.
Punto de fusión/congelación	-186°C (-303°F)	La temperatura a la que el refrigerante se solidifica
Temperatura crítica	96,6°C (205,9°F)	La temperatura por encima de la cual ya no puede producirse la condensación

Propiedad/características	Valor	Observación
Presiones de succión a 35°C (95°F)	4,48 bar,g (65 psig)	Aproximadamente un 10% más bajo que el R22
Presión de descarga a 35°C (95°F)	15,2 bar,g (220 psig)	Aproximadamente un 15% más bajo que el R22
Peso molecular	44,1 kg/kmole (97,2 lb/kmole)	La suma de los pesos atómicos de los átomos contenidos en una molécula.
Peso específico del vapor a 25°C (77°F) y presión atmosférica	1,5 (aire=1)	El vapor de refrigerante es más pesado que el aire
Densidad de vapor a 25°C (77°F) a presión atmosférica	1,8 kg/m3 (0,114 lb/ft3)	Aproximadamente la mitad que el R22
Relación de expansión líquido-vapor a 25°C (77°F)	270	1 litro de líquido se vaporiza para producir 270 litros de vapor
Toxicidad	No tóxico	En concentraciones estándar, no hay efectos tóxicos significativos.
Potencial de agotamiento de la Capa de Ozono (PAO)	0	El refrigerante no causa el agotamiento de la Capa de Ozono
Potencial de calentamiento global (100 años)	0	El refrigerante tuvo un impacto insignificante en el calentamiento global, R22 = 2100
Color	Ninguno	El líquido refrigerante y el vapor son incoloros
Olor	Ninguno	El líquido refrigerante y el vapor son inodoros

Referencias

- A-GAS. (s.f.). A-GAS. Obtenido de A-GAS Together we can: <https://www.agas.com/eu/products-services/products-refrigerants/natural-refrigerants/r744-co2/>
- ASHRAE. (2019). Standard 34 ASHRAE. Recuperado el 04 de Marzo de 2020, de ASHRAE: https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_34-2019
- Bernard Refrigeración. (s.f.). *Bernard Refrigeración*. Obtenido de <https://www.josebernad.com/4-puntos-clave-clave-en-el-sistema-transcritico-de-co2/>
- Calor y frío. (24 de Mayo de 2018). *Refrigerantes Naturales, ventajas y desventajas*. Obtenido de Calor y Frío: <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/refrigerantes-naturales-caracteristicas-ventajas-desventajas-uso-infografia.html>
- Chaverra, D. (09 de Marzo de 2020). *ACR Latinoamérica*. Obtenido de <https://www.acrlatinoamerica.com/202003099219/articulos/refrigeracion-comercial-e-industrial/aceites-para-compresores-i.html>
- Cruz, J. (04 de Octubre de 2015). *SlideShare*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/CruzJorgeHD1/clasificacin-y-seleccin-de-lubricantes-refrigeracin-y-aire-acondicionado>
- CTCN. (s.f.). *Climate Technology Centre & Network*. Recuperado el 04 de Marzo de 2020, de Climate Technology Centre & Network: <https://www.ctc-n.org/technologies/shift-coolants-and-refrigerants-lower-gwp>
- Danfoss. (2015). *De los HFC/HCFC al amoníaco en la refrigeración industrial*. Obtenido de http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/01/DKRCI.EE.000.E1.05_HFC_to_Ammonia.pdf
- Danfoss. (2019). *IEC 60335-2-89 flammable refrigerant limit change*. Obtenido de Danfoss Engineering Tomorrow: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/refrigerant-faq-iec/>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2011). *Operation of split air conditioning*. Eschborn, Germany: German International Cooperation. Recuperado el 01 de Abril de 2020, de www.giz.de/proklima
- Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. (2008). *Natural Refrigerants*. (D. V. Hasse, Ed.) Eschborn, Frankfurt, Deutsche: GTZ Proklima - a programme to save the ozone layer. Recuperado el 03 de Marzo de 2020, de <https://mia.giz.de/esearcha/browse.tt.html>
- Emerson. (2 de Julio de 2015). *Emerson*. Obtenido de Emerson: <https://emersonclimateconversations.com/2015/07/02/co2-as-a-refrigerant-five-potential-hazards-of-r744/>
- FríoOnline. (2010). *Frionline*. Obtenido de <https://www.frionline.net/articulos-tecnicos/208-los-aceites-lubricantes-en-refrigeracion-y-aire-acondicionado.html>
- García, A. (2018). *Mundo HVAC*. Obtenido de mundohvacr.com.mx/2019/04/co2-para-refrigeracion-comercial/
- Gasservei. (Junio de 2018). *Fichas de Seguridad: Gasservei*. Obtenido de Gas-Servei: <https://www.gas-servei.com/biblioteca/#documentacion>
- GEA. (24 de Junio de 2014). *GEA.com*. Obtenido de GEA Refrigeration Germany GmbH: https://www.gea.com/docnav/Product%20Documents/Grasso%20safety%20instructions/O_784013_si_km_r744_esp_3-A4.pdf
- GIZ. (2014). *Guía de reconversión de la producción de refrigeradores domésticos: de refrigerantes halogenados a refrigerantes de hidrocarburo*. Bon y Eschborn, Alemania: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Obtenido de <https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/resources/giz2014-10-28-es-guideline-production-conversion-domestic-refrigerators.pdf>
- GIZ. (2014). *Operación de equipo de aire acondicionado tipo split con hidrocarburos*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Obtenido de <https://www.ctc-n.org/resources/operaci-n-de-equipo-de-aire-acondicionado-tipo-split-con-hidrocarburos-una-gu-de>

- Gobierno de Costa Rica. (2018). *Dirección de Cambio Climático de Costa Rica*. Obtenido de Plan Nacional de Descarbonización: <https://cambioclimatico.go.cr/plan-nacional-de-descarbonizacion/>
- Godrej. (s.f.). *Manual de Servicio para Godrej Aire-Acondicionado*. Mumbai: Godrej & Boyce Mfg. Ltd - División de Electrodomésticos.
- Hella S.A. (s.f.). *Territorio Hella*. Obtenido de Documentos de Productos: http://www.territoriohella.es/storage/gama_productos_documentos/dae0e4ab4dd74c795307bf6b8df6786d.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Manual de Buenas Prácticas en Refrigeración*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/Manual-Buenas-Practicas-Refrigeraci%C3%B3n.pdf>
- Mundo HVACR. (s.f.). *Mundo HVAC&R*. Obtenido de Mundo HVAC&R: <https://www.mundohvacr.com.mx/2010/12/sistema-en-cascada-y-sus-aplicaciones/>
- NASA. (01 de Febrero de 2011). *Earth Observatory*. Recuperado el 12 de Febrero de 2020, de Earth Observatory: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/49040/ozone-hole-through-the-years>
- Nestlé. (26 de Mayo de 2006). *Nestlé*. Obtenido de Omnic Engineering: http://www.omnic-engineering.com/Nestle-The_CO2_Freezer_Story.pdf
- Ospina, A. (13 de Junio de 2019). *Slide Share*. Obtenido de Slide Share: <https://www.slideshare.net/ANTONIOFAVIOOSPINOMA/capitulo-v-refrigerantes>
- Proklima International. (2010). *Buenas Prácticas de Refrigeración*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Refrigerants Naturally. (s.f.). *Refrigerants Naturally*. Recuperado el 03 de Marzo de 2020, de Refrigerants Naturally: <https://www.refrigerantsnaturally.com/natural-refrigerants/>
- SECOP. (s.f.). *Solutions SECOP*. Obtenido de SECOP: <https://www.secop.com/solutions/natural-refrigerants>
- Spagnuolo, E. (23 de Enero de 2019). *PennState*. Recuperado el 12 de Febrero de 2020, de <https://sites.psu.edu/eddiecivicissues/2019/01/23/the-greenhouse-effect/>
- UNEP. (2019). *Manual del Procolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono*. Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de UN Environment Programme: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/Handbooks/MP-Handbook-2019-Spanish.pdf>
- US EPA. (2016). *Climate Change Indicators in the United States 2016*. US Environment Protection Agency, Climate Indicators. Washington DC: US Environment Protection Agency. Obtenido de EPA.gov: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/climate_indicators_2016.pdf
- US EPA. (2016). *Climate Change Indicators in the United States 2016*. US Environment Protection Agency, Climate Indicators. Washington DC: US Environment Protection Agency. Recuperado el 12 de Febrero de 2020, de EPA.gov: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/climate_indicators_2016.pdf

Fotos

Portada: <https://unsplash.com/photos/nF1FvXdJL7o>

Contraportada: <https://unsplash.com/photos/ATyawSn-NsE>

Contenido: Leila Calderón Gómez, Freepick images y Vecteezy.



Para más información sobre las acciones que se desarrollan para apoyar la transición tecnológica hacia el uso de equipos de alto rendimiento, que empleen sustancias refrigerantes con menor impacto sobre el ambiente y el clima, visite la página de DIGECA.

<http://www.digeca.go.cr/>

Síguenos en <https://www.facebook.com/digeca/>