

Introducción	136	Tablas de Propiedades Termodinámicas	149
Definición	136	5. Densidad.	149
Historia de los Refrigerantes	136	6. Entropía.	151
Identificación de los Refrigerantes	139	Propiedades del vapor Sobrecalentado	151
Requerimientos de los Refrigerantes	139	Propiedades Físicas y Químicas	152
Propiedades Termodinámicas.	140	7. No Debe ser Tóxico Ni Venenoso.	152
Propiedades Físicas y Químicas	140	8. No Debe ser Explosivo Ni Inflamable.	153
Propiedades Termodinámicas	141	9. No Debe Tener Efecto Sobre Otros Materiales.	154
1. Presión.	141	10. Fácil de Detectar Cuando se Fuga.	155
2. Temperatura.	141	11. Debe ser Miscible con el Aceite.	159
Curvas de Presión - Temperatura	142	12. No Debe Reaccionar con la Humedad.	160
3. Volumen.	144	13. Debe ser un Compuesto Estable.	160
4. Entalpia.	147	Mezclas de Refrigerantes	160
		Código de Colores para los Cilindros de Refrigerante	162
		Refrigerantes Alternos	163

Introducción

En este capítulo, se aprenderá cómo analizar las propiedades de un refrigerante para transportar el calor. Existe una cantidad grande de refrigerantes actualmente utilizados en aplicaciones comerciales e industriales. Cada refrigerante tiene propiedades que difieren de otros, tales como: puntos de ebullición, calor específico, calor latente, densidad y otros factores que afectan la habilidad del refrigerante para transferir el calor.

El mantenimiento efectivo de cualquier sistema de refrigeración mecánica, depende grandemente de la comprensión que se tenga de las propiedades del refrigerante. La dificultad para resolver un problema, se torna más fácil, cuando se sabe cómo reacciona el refrigerante a los cambios de temperatura y de presión. El comportamiento del refrigerante frecuentemente es la clave para detectar el origen del problema.

Definición

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

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

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

apropiados. Recientemente, se decidió discontinuar algunos de esos refrigerantes antes del año 2000, tales como el R-11, R-12, R-113, R-115, etc., debido al deterioro que causan a la capa de ozono en la estratósfera. En su lugar, se van a utilizar otros refrigerantes como el R-123, el R-134a y algunas mezclas ternarias (ver capítulo 9). Los grandes fabricantes de refrigerantes, siguen trabajando en el desarrollo de nuevos productos.

Historia de los Refrigerantes

La práctica de la refrigeración, probablemente ha existido desde la época de las cavernas. Con frecuencia, en la historia se menciona el uso de hielo y nieve naturales para fines de enfriamiento. Los chinos, y después los romanos, los usaban para enfriar sus bebidas. En algunos lugares donde sólo tienen hielo en el invierno, lo almacenaban en fosos para usarlo en el verano. En lugares desérticos donde no disponían de hielo o nieve en ninguna época del año, como en Egipto, se utilizaba la evaporación del agua para el enfriamiento de bebidas, y hasta algunos dispositivos ingeniosos para hacer la estancia más confortable.

El agua fue el primer refrigerante, con una larga historia de uso, continuando hasta nuestra época. Con el paso del tiempo, se han hecho mejoras en cuanto a su manejo y almacenamiento, pero aún se utiliza el hielo natural por todo el mundo. El uso histórico y fundamental del hielo, ha sido reconocido en una unidad de refrigeración: la tonelada de refrigeración, la cual se define como la cantidad de calor que se requiere para fundir dos mil libras de hielo en 24 hrs.

En refrigeración se dio un gran paso adelante, allá por el año 1600, cuando se descubrió que una mezcla de hielo con sal, producía temperaturas más bajas que el hielo solo. En cierta manera, ésta fue la primer mejora sobre la naturaleza en el campo de la refrigeración.

Hacia finales del siglo XVIII, la inventiva del hombre se había dirigido hacia la producción de frío en el momento y tiempo que se deseara. Se desarrollaron máquinas para disminuir la presión del vapor del agua y acelerar su evaporación. También recibió considerable atención el

arte de producir frío por la liberación de aire comprimido. Durante la primera parte del siglo XIX, se desarrollaron máquinas para la compresión de vapor y se probaron muchos fluidos como refrigerantes, entre los que sobresalieron el amoníaco, bióxido de carbono, bióxido de azufre, cloruro de metilo y en cierta medida, algunos hidrocarburos. A finales del siglo, la refrigeración mecánica estaba firmemente establecida.

Por muchos años (desde 1876), al amoníaco se le han encontrado excelentes propiedades como refrigerante, y desde entonces, ha sido el refrigerante más utilizado comúnmente. Aún en la actualidad, ha demostrado ser satisfactorio, sobre todo en refrigeración industrial en grandes plantas.

En las décadas siguientes, la atención fue orientada hacia el mejoramiento del diseño mecánico y la operación de los equipos. A principios del siglo XX, se desarrollaron las unidades domésticas y los refrigerantes en uso en ese tiempo, padecían de una o más propiedades riesgosas. Algunos eran tóxicos, otros inflamables, y otros más operaban a muy altas presiones; por lo que para estos equipos más pequeños, los ingenieros se enfocaron al refrigerante de más baja presión de operación: el bióxido de azufre. Este refrigerante tiene algunas fallas serias, como la formación de ácido sulfuroso cuando se combina con el agua; es muy corrosivo y ataca las partes del sistema. Adicional a esto, cuando se fuga aún en pequeñas cantidades, causa tos violenta y ahogamiento. Estas cualidades indeseables, obligaron a los fabricantes a hacer las unidades menos propensas a fugas y a tener precaución de secarlas, logrando reducir los requerimientos de servicio hasta un punto, donde las desventajas del refrigerante no eran tan grandes. Literalmente, se construyeron millones de esas unidades que utilizaban bióxido de azufre, las cuales operaban satisfactoriamente.

En 1928, el vicepresidente de una importante compañía de automóviles, C.F. Kettering, decidió que la industria de la refrigeración, si quería llegar a alguna parte, necesitaba un nuevo refrigerante seguro y estable, que no fuera tóxico, corrosivo ni inflamable, y que tuviera las caracterís-

ticas necesarias para poder usarse en equipos compactos. Kettering solicitó a Thomas Midgely que explorara la posibilidad de desarrollar dicho producto. Un grupo de químicos se pusieron manos a la obra e iniciaron la búsqueda de tal refrigerante. Sabían que las combinaciones de flúor eran muy estables, así que, experimentaron con algunos de los compuestos químicos comunes de carbono, cloro e hidrógeno, sustituyendo átomos de cloro e hidrógeno por átomos de flúor, y en poco tiempo, lograron sintetizar el diclorodifluorometano. Demostraron que no era inflamable y que tenía una toxicidad inusualmente baja.

Los experimentos consistieron en reordenar la molécula de tetracloruro de carbono. En la figura 12.1-A, se muestra la fórmula estructural de la molécula de tetracloruro de carbono, usada para fabricar algunos de los refrigerantes halogenados. Comparándola con la molécula de metano en la figura 12.1-B, se ve que las dos son similares, excepto que el metano tiene 4 átomos de hidrógeno y el tetracloruro tiene 4 átomos de cloro. Reemplazando un átomo de cloro por un átomo de flúor, se tiene otro compuesto más estable llamado tricloromonofluorometano o R-11, como se muestra en la figura 12.1-C. Si se reemplazan dos átomos de cloro por dos de flúor, se obtiene el diclorodifluorometano o R-12, como se muestra en la figura 12.1-D.

En 1929 se le solicitó a una compañía química, que ayudara a desarrollar un proceso comercial práctico para la fabricación del nuevo refrigerante. Con este desarrollo nació la industria de los refrigerantes halogenados, ninguno de los cuales existía antes. El primero de ellos fue el Freón 12, que durante muchos años, fue el más popular (ver figura 12.2). De allí siguieron el Freón 11, el Freón 21, el Freón 114, y el Freón 22, cada uno con sus características especiales.

Sin embargo, el desarrollo de los refrigerantes Freón no tuvo una recepción entusiasta. Las comisiones de seguridad eran prudentes en sus sanciones; los técnicos de servicio estaban inconformes respecto a las fugas, porque no los podían detectar con el olfato; los contratistas los rechazaban porque costaban más que el bióxido de azufre, y algunos de los fabricantes líderes, se rehusaban a diseñar el equipo de refrigeración que se ajustara a las propiedades termodinámicas de estos refrigerantes.

Gradualmente, surgieron diseños que usaban pequeñas cantidades de estos refrigerantes costosos. Se diseñaron compresores, evaporadores, condensadores e intercambiadores; se construyeron unidades paquete con un mínimo de uniones, y cada unión estaba cuidadosamente diseñada y fabricada para eliminar fugas. Se utilizaron nuevos materiales que no podían ser utilizados con seguridad con los antiguos refrigerantes, los técnicos se volvieron expertos en la detección de fugas, y el Freón arribó como un refrigerante aceptado. El resultado fue que los freones eran virtualmente la base de todas las unidades pequeñas, y era usado también en trabajos grandes de aire acondicionado.

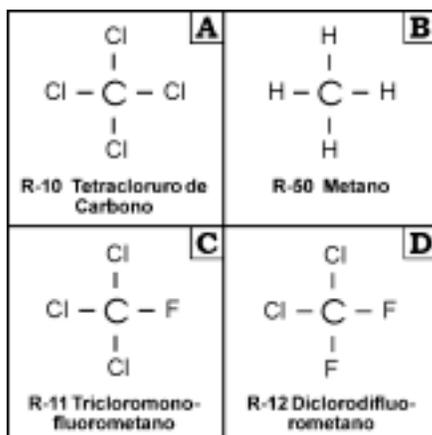


Figura 12.1 - Fórmulas estructurales del R10, R-50, R-11 y R-12.

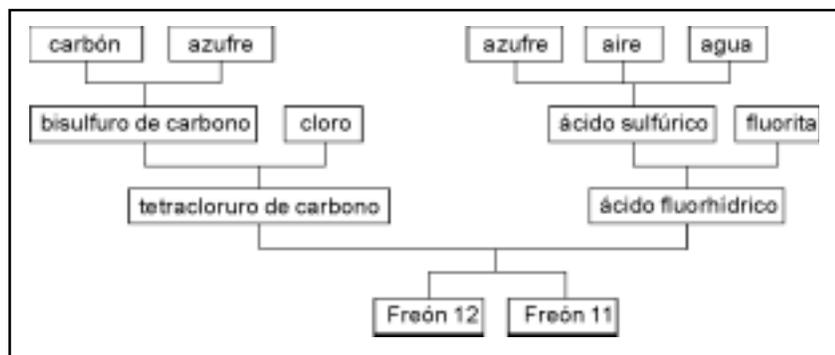


Figura 12.2 - Fabricación del Freón 12 y Freón 11.

Con el tiempo, se fueron desarrollando otros compuestos halogenados y creció la familia de los freones. Además de refrigerantes, se les encontraron otras aplicaciones, tales como propelentes, solventes, extinguidores de fuego, agentes espumantes y otros. Algunos años más tarde, otras compañías comenzaron a fabricar los compuestos halogenados con otros nombres comerciales.

Para la década de los setenta, ya había sospechas de que estos compuestos afectaban la capa de ozono de la atmósfera, pero no se podía demostrar, y tal aseveración no era aceptado por los fabricantes. Al principio de los ochenta, estudios hechos por científicos de la NASA por medio de satélites, descubrieron un "adelgazamiento" de la capa de ozono en la Antártida, y estudios posteriores, comprobaron que el deterioro del ozono estratosférico era debido a la emisión de compuestos halogenados, principalmente los que contienen bromo y cloro (ver capítulo 9).

Después de varios años de negociaciones, se llevó a cabo un acuerdo internacional en 1989 en la ciudad de Montreal, Canadá, por lo que se le conoce como el Protocolo de Montreal. Este protocolo es un esfuerzo unido de gobiernos, científicos, industrias y grupos ecologistas coordinados por la UNEP (Programa Ambiental de las Naciones Unidas). Este acuerdo consistió en regular la producción y uso de los clorofluorocarbonos (CFC) de manera gradual, hasta su total defasamiento antes del año 2000, partiendo de la base de los niveles de producción mundial que había en 1986.

Mientras tanto, los fabricantes de refrigerantes trabajaban en la búsqueda de productos nuevos para substituir los que iban a desaparecer. Rápidamente desarrollaron compuestos para substituir al R-11 y al R-12, que tienen propiedades termodinámicas muy similares, pero que no afectan la capa de ozono. Estos refrigerantes son el R-123 y el R-134a, que en la actualidad ya se están produciendo comercialmente, y algunos fabricantes de equipo original ya los están incluyendo en sus unidades. Dichos productos pueden utilizarse también en equipos usados que actualmente funcionan con R-11 o R-12, haciendo algunas modificaciones al compresor, tales como utilizar aceite sintético en lugar de aceite mineral y cambiar algunos sellos o empaques, por otros de diferente material.

Se desarrollaron también refrigerantes como el R-124 y el R-125, para substituir al R-114 y algunas aplicaciones del R-502, respectivamente. Otras alternativas aceptables para reemplazar al R-12 y al R-502 durante el período de transición, hasta el defasamiento total, son las mezclas ternarias. Las mezclas ternarias, son mezclas azeotrópicas de tres diferentes refrigerantes de entre los siguientes: 22, 124, 125, 134a, 152a y propano. Estas mezclas tienen características muy similares a los clorofluorocarbonos, pero con un impacto ambiental grandemente reducido y que requieren un mínimo de cambios en los equipos, comparados con otros refrigerantes alternos.

La historia se repite de manera similar, como a principios de la década de los años treinta, cuando se introdujo comercialmente el R-12. La introducción de los nuevos refrigerantes va a requerir de información y capacitación tanto de técnicos, contratistas y fabricantes de equipo original. Su costo actualmente es entre 2.5 y 4 veces más, pero a diferencia de la primera vez, en esta ocasión son la única alternativa, y además, existe la conciencia ecológica, lo que hace que tengan que aceptarse estos nuevos productos.

Para poder utilizar los en sistemas que actualmente están trabajando, va a ser necesario rehabilitar el compresor del sistema en lo que se refiere a cambiar algunos materiales como sellos o empaques, ya que los que son compatibles con el R-11 y el R-12, no lo son con el R-123 y el R-134a. Además, para estos refrigerantes sustitutos se tiene que utilizar aceites sintéticos a base de polialquilenglicol (PAG), de poliéster (POE), o de Alquil Benceno.

A continuación, se mencionan algunos hechos históricos en el desarrollo de los refrigerantes y la industria de la refrigeración.

- 1600 - Se encontró que una mezcla de nieve y sal, bajaba la temperatura del agua lo suficiente para congelarla.
- 1775 - Un profesor de la Universidad de Edinburgo, utilizó una bomba de aire para reducir la presión y bajar la temperatura de ebullición del agua.
- 1810 - Sir John Leslie, en Escocia, utilizó ácido sulfúrico para absorber vapor de agua y ayudar a mantener una baja presión baja.
- 1834 - La primera máquina refrigeradora práctica que usaba el ciclo de refrigeración, fue construida por Jacob Perkins, en Londres, utilizando éter como refrigerante.
- 1845 - Se usó la expansión de aire comprimido para congelar agua.
- 1850 - Se desarrolló una máquina de absorción práctica y pequeña por E. Carré, utilizando agua y ácido sulfúrico.

- 1857 - James Harrison aplicó con éxito la máquina de Perkins para producir refrigeración en cervecerías, y para enfriar carne y productos perecederos, usando éter como refrigerante.
- 1859 - Ferdinand Carré construyó un sistema de absorción con amoníaco y agua.
- 1869 - Por estas fechas ya había en existencia varias plantas de hielo.
- 1873 - El Dr. Carl Linde introdujo el compresor de vapor de amoníaco.
- 1876 - Raoul Pictet construyó un compresor de bióxido de azufre.
- 1876 - Para embarcar carne de Argentina a Francia, se utilizó éter de metilo.
- 1877 - Se iniciaron trabajos de desarrollo en maquinaria de refrigeración por aire, lo que condujo a los compresores Bell-Coleman.
- 1880/1890 - Se utilizaban exitosamente varios refrigerantes diferentes, principalmente el cloruro de metilo y bióxido de carbono.
- 1890 - Se desarrolló la demanda de unidades pequeñas para uso doméstico y comercial.
- 1900 - Apareció el motor eléctrico.
- 1930 - En una junta de la sociedad química americana, Midgely y Henne anunciaron a un diario el desarrollo de los refrigerantes halogenados.
- 1931 - El freón 12 es lanzado como un refrigerante comercial.
- 1931 - El 24 de noviembre, la patente original de los refrigerantes halogenados fue expedida a Midgely, Henne y Mc Nary.
- 1932 - Introducción comercial del freón 11.
- 1933 - Introducción comercial del freón 114.
- 1934 - Introducción comercial del freón 113.
- 1936 - Introducción comercial del freón 22. Sin embargo, no se desarrolló a grande escala, sino hasta después de la segunda guerra mundial.
- 1939 - Introducción comercial del freón 21.
- 1943 - Se desarrolló el uso del freón 11 y 12, como propelentes de aerosol, por Goodhue y Sullivan.
- 1945 - Introducción comercial del freón 13.
- 1950 - Introducción comercial del R-500.
- 1952 - La empresa Allied Chemical Corp. inicia la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1955 - Introducción comercial del freón 14.
- 1956 - Du Pont publicó un sistema para la numeración de refrigerante de uso general.
- 1957 - Pennsalt Chemicals Corp. inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1958 - Union Carbide Corp. inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1961 - Introducción comercial del freón 502.
- 1961 - Introducción comercial del freón C-318 como propelente para alimentos, aunque ya había sido usado como refrigerantes unos años antes.
- 1963 - Kaiser Aluminum and Chemical Co., inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1965 - Racón Inc. inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1974 - Los científicos Molina y Rowland, presentaron la hipótesis de que algunos gases emanados desde la tierra deterioraban la capa de ozono; lo que fue confirmado años más tarde por la NASA.
- 1989 - Se llevó a cabo el Protocolo de Montreal, donde se decidió defasar los compuestos que deterioran la capa de ozono, entre ellos el R-11 y el R-12.
- 1989 - En plantas piloto a nivel experimental, los principales fabricantes de refrigerantes desarrollaron compuestos para substituir los refrigerantes que habrán de desaparecer. Entre los nuevos sustitutos estaban el R-134a, el R-123, el R-141b, el R-124 y el R-125.
- 1990 - Se desarrollaron mezclas zeotrópicas para utilizarlas como refrigerantes, en los equipos que estaban actualmente operando con R-12, R-500 y R-502.
- 1991 - Se introdujeron comercialmente los refrigerantes R-134a, R-123 y varias mezclas zeotrópicas.

Identificación de Refrigerantes

Los refrigerantes se identifican por números después de la letra R, que significa "refrigerante". El sistema de identificación ha sido estandarizado por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers). Es necesario estar familiarizado con los números, así como con los nombres de los refrigerantes. En la tabla 12.3, aparecen los refrigerantes más comunes. Cabe mencionar que las mezclas zeotrópicas, son refrigerantes transitorios que se desarrollaron para substituir al R-22 y al R-502, aunque algunas de estas, van a permanecer como sustitutos de estos refrigerantes.

Requerimientos de los Refrigerantes

Para que un líquido pueda ser utilizado como refrigerante, debe reunir ciertas propiedades, tanto termodinámicas como físicas. El refrigerante ideal, sería aquél que fuera capaz de descargar en el condensador todo el calor que absorba del evaporador, la línea de succión y el compresor. Desafortunadamente, todos los refrigerantes regresan al evaporador arrastrando una cierta porción de calor, reduciendo la capacidad del refrigerante para absorber calor en el lado de baja.

Cuando se piensa cuidadosamente en este proceso, vienen a nuestra mente muchas preguntas: ¿Por qué los refrigerantes hierven a baja temperatura? ¿Cuánto calor se absorbe al hervir el refrigerante? ¿Qué hace realmente el compresor al refrigerante al aumentarle su presión y temperatura? ¿En cuánto se aumentan? ¿Qué causa realmente que el vapor se condense a una temperatura más alta? ¿Cómo es rechazado el calor? ¿Cuánto calor es rechazado?, y así sucesivamente.

Estas son la clase de preguntas a que se enfrenta uno en los trabajos de refrigeración. Si su trabajo es diseño de componentes y equipos, o mantener un sistema trabajando sin problemas, lo primero que debe saber es acerca del refrigerante dentro del sistema. Por ejemplo, un sistema

No.	NOMBRE QUIMICO	FORMULA QUIMICA
Serie Metano		
10	Tetraclorometano (tetracloruro de carbono)	CCl ₄
11	Tricloromonofluorometano	CCl ₃ F
12	Diclorodifluorometano	CCl ₂ F ₂
13	Clorotrifluorometano	CClF ₃
20	Triclorometano (cloroformo)	CHCl ₃
21	Diclorofluorometano	CHCl ₂ F
22	Clorodifluorometano	CHClF ₂
23	Trifluorometano	CHF ₃
30	Diclorometano (cloruro de metileno)	CH ₂ Cl ₂
40	Clorometano (cloruro de metilo)	CH ₃ Cl
50	Metano	CH ₄
Serie Etano		
110	Hexacloroetano	CCl ₃ CCl ₃
113	1,1,2-triclorotrifluoroetano	CCl ₂ FCClF ₂
115	Cloropentafluoroetano	CClF ₂ CF ₃
123	2,2-Dicloro - 1,1,1-Trifluoroetano	CHCl ₂ CF ₃
134a	1,1,1,2-Tetrafluoroetano	CH ₂ FCF ₃
141b	1,1-Dicloro-1-fluoroetano	CH ₃ CCl ₂ F
150a	1,1-Dicloroetano	CH ₃ CHCl ₂
152a	1,1-Difluoroetano	CH ₃ CHF ₂
160	Cloroetano (cloruro de etilo)	CH ₃ CH ₂ Cl
170	Etano	CH ₃ CH ₃
Hidrocarburos		
290	Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃
600	Butano	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃
600a	2-Metilpropano (isobutano)	CH(CH ₃) ₃
Compuestos Inorgánicos		
702	Hidrógeno	H ₂
704	Helio	He
717	Amoníaco	NH ₃
718	Agua	H ₂ O
720	Neón	Ne
728	Nitrógeno	N ₂
732	Oxígeno	O ₂
744	Bióxido de Carbono	CO ₂
764	Bióxido de Azufre	SO ₂
Mezclas Zeotrópicas		
400	R-12/114 (60/40)	
401A	R-22/152a/124 (53/13/34)	
401B	R-22/152a/124 (61/11/28)	
402A	R-22/125/290 (38/60/2)	
402B	R-22/125/290 (60/38/2)	
404A	R-125/143a/134a (44/52/4)	
407A	R-32/125/134a (20/40/40)	
407B	R-32/125/134A (10/70/20)	
407C	R-32/125/134a (23/25/52)	
408A	R-125/143a/22 (7/46/47)	
409A	R-22/124/142b (60/25/15)	
410A	R-32/125 (50/50)	
Mezclas Azeotrópicas		
500	R-12/152a (73.8/26.2)	
502	R22/115 (48.8/51.2)	
503	R-223/13 (40.1/59.9)	
507	R-125/143a (50/50)	

Tabla 12.3 - Designación de números a los principales refrigerantes
Los números entre paréntesis indican el porcentaje de cada componente en la mezcla.

típico tiene muchos indicadores que le dicen la condición exacta del refrigerante en varios puntos del sistema, y muchos controles que le permiten hacer ajustes cuando surja la necesidad. Estos dispositivos son necesarios, para mantener las condiciones deseadas del refrigerante al demandar cambios la carga de enfriamiento. Pero si usted no sabe cómo responde el refrigerante a los cambios de temperatura y presión, los indicadores y los controles no le serán de mucha utilidad.

Para comprender los refrigerantes, es básica la relación entre presión y temperatura. Cómo absorbe, transporta y rechaza calor un refrigerante, al cambiar de líquido a vapor y volver a líquido, es igualmente importante entenderlo. Estas son las propiedades en que los refrigerantes difieren de uno a otro.

Un refrigerante ideal deberá reunir todas las propiedades siguientes.

Propiedades Termodinámicas

- 1. Presión** - Debe operar con presiones positivas.
- 2. Temperatura** - Debe tener una temperatura crítica por arriba de la temperatura de condensación. Debe tener una temperatura de congelación por debajo de la temperatura del evaporador. Debe tener una temperatura de ebullición baja.
- 3. Volumen** - Debe tener un valor bajo de volumen específico en fase vapor, y un valor alto de volumen en fase líquida.
- 4. Entalpia** - Debe tener un valor alto de calor latente de vaporización.
- 5. Densidad**
- 6. Entropia**

Propiedades Físicas y Químicas

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

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

A continuación, se estudiarán detenidamente cada una de estas propiedades, comparando los diferentes refrigerantes y, para fines de simplificación, de la tabla 12.3 se van a seleccionar los refrigerantes más conocidos. Para efectos de comparación, se han establecido las condiciones de temperaturas de operación siguientes: -15°C (5°F) en el evaporador y 30°C (86°F) en el condensador.

Propiedades Termodinámicas

Son aquellas que tienen relación con el movimiento del calor.

Estas propiedades se publican para cada refrigerante en forma de tablas. Estas tablas se dividen en dos secciones: Propiedades de Saturación de Líquido y Vapor, y Propiedades del Vapor Sobrecalentado. Las primeras se dan comúnmente a intervalos de temperatura, y las segundas, se dan tanto a intervalos de presión, como de temperatura.

Estas tablas son elaboradas por los fabricantes de refrigerantes y algunas asociaciones relacionadas con refrigeración, y se pueden encontrar en libros de texto, manuales o boletines técnicos. Las de mayor aplicación para resolver problemas de cálculos y diseño de equipos, son las tablas de propiedades termodinámicas de saturación.

Propiedades de Saturación. En la tabla 12.12, se muestra parcialmente las propiedades de saturación para el R-22. La primera columna es la temperatura en grados centígrados. Las siguientes dos columnas, son presiones absoluta y manométrica en kPa (o en psig). Las dos columnas siguientes son los valores del volumen, uno es la cantidad de litros que ocupa un kilogramo de refrigerante líquido, el otro, es la cantidad de m³ de vapor saturado de refrigerante que se necesita para hacer un kilogramo.

Enseguida del volumen están las columnas de los valores de la densidad, estas son los kilogramos de refrigerante líquido en un litro y los kilogramos de vapor de refrigerante saturado en un m³. Estos valores son los recíprocos de los valores del volumen.

Después, hay tres columnas del contenido de calor; la primera es el calor del líquido arriba de -40°C, la segunda es el calor latente, y la tercera es el calor total.

Las últimas dos columnas son de la entropía en fase líquida y en fase vapor del refrigerante.

A continuación, se describirán cada una de estas propiedades, aunque no necesariamente en ese mismo orden.

1. Presión

Las presiones que actúan en un sistema de refrigeración, son extremadamente importantes. En primer término, se debe operar con presiones positivas; es decir, las presiones tanto en el condensador como en el evaporador, deben ser superiores a la presión atmosférica. Si la presión en el evaporador es negativa, es decir, que se esté trabajando en vacío, hay riesgo de que por una fuga entre aire al sistema. Por esto, el refrigerante debe tener una presión de evaporación lo más baja posible, pero ligeramente superior a la presión atmosférica.

Por otra parte, la presión de condensación debe ser lo suficientemente baja, ya que esto determina la robustez del compresor y del condensador. Mientras más alta sea la presión, se requiere un equipo más robusto, y por lo tanto, más caro.

La tabla 12.4, nos muestra las presiones de operación para los refrigerantes seleccionados, a las condiciones fijadas de temperaturas.

Un ejemplo claro de alta presión de condensación es el R-170, para el cual se requiere un equipo extremadamente robusto para soportar presiones arriba de 4660 kPa (660 psig). Los refrigerante R-30 y R-123, trabajarían en vacío en el evaporador a esta temperatura.

REFRIG. N°	EVAPORADOR A -15°C		CONDENSADOR A 30°C	
	kPa	psig	kPa	psig
12	183	11.8	754	93.2
22	296	28.2	1,192	158.2
30	8	27.6*	69	9.5*
123	16	25.2*	110	1.2
134a	164	9.1	767	96.6
170	1627	221.3	4,660	661.1
500	214	16.4	880	113.4
502	348	35.9	1,319	176.6
717	236	19.6	1,167	154.5
718	0.8	29.7*	4.5	28.6*

Tabla 12.4 - Presiones de operación. Los valores presentados con asterisco, indican pulgadas de vacío.

El R-134a trabaja a presiones más próximas a lo ideal, ya que su presión de evaporación es muy baja, sin llegar al vacío, y su presión de condensación no es tan alta, por lo que no requiere un equipo muy robusto.

2. Temperatura

Hay tres temperaturas que son importantes para un refrigerante y que deben ser consideradas al hacer la selección. Estas son: la de ebullición, la crítica y la de congelación.

La temperatura de ebullición de un refrigerante, siempre es referida a la presión atmosférica normal de 101.3 kPa (0 psig). Se puede decir, que el punto de ebullición de cualquier líquido, es la temperatura a la cual su presión de vapor es igual a la atmosférica.

El punto de ebullición de un refrigerante debe ser bajo, para que aún operando a presiones positivas, se pueda tener una temperatura baja en el evaporador.

En la tabla 12.5, se muestran las temperaturas de ebullición de los refrigerantes escogidos para efectos de comparación. Obsérvese que el R-170 (etano), tiene la temperatura de ebullición más baja, -88.6°C y el R-718 (agua) tiene la más alta (100°C).

Como ya se sabe, existe una relación directa entre la temperatura de ebullición y la presión; es decir, el punto de ebullición se modifica al cambiar la presión. Si se selecciona una presión conocida, se llega a una temperatura deseada. Qué presión seleccionar, es lo que provoca que surjan muchos argumentos entre los diseñadores de eva-

REFRIG. N°	TEMPERATURAS EN °C		
	EBULLICION	CRITICA	CONGELACION
12	-29.8	112	-158
22	-40.7	96	-160
30	40.6	216.1	-97
123	27.9	---	-107
134a	-26.5	101.1	-103
170	-88.6	32.3	-172
502	-45.4	82.2	---
507	-46.7	71	---
717	-33.3	132.9	-78
718	100	374.5	0

Tabla 12.5 - Temperaturas a presión atmosférica.

	Temp. del Evaporador	Temp. de Ebullición
Enfriadores de Bebidas	4 °C	-2 °C
Aire Acondicionado	6 °C	0 °C
Gabinetes de Helados	-20 °C	-26 °C
Refrigeradores Domésticos	-15 °C	-20 °C
Exhibidores de Lácteos	2 °C	-4 °C
Cámara de Enfriamiento	3 °C	-3 °C
Cámara de Congelación	-26 °C	-32 °C

Tabla 12.6 - Temperaturas recomendadas para varias aplicaciones de refrigeración.

poradores y compresores. Para que opere eficientemente un compresor (pero no necesariamente el sistema completo), es deseable tener en el evaporador la presión más alta posible. Para los diseñadores de evaporadores, lo más deseable es que operen a la presión más baja posible, para aprovechar al máximo la unidad con un mínimo de tamaño y costo. Así que, para ambos, la presión adecuada para la ebullición del refrigerante, es un punto en el cual es necesario transigir. Si el evaporador es muy grande, la temperatura estará arriba de la normal; si el evaporador es muy pequeño, la temperatura estará abajo de la normal.

El evaporador debe tener una temperatura más baja, que la que se desea tener en el espacio refrigerado (se necesita una diferencia de temperaturas para que exista el flujo de calor).

Normalmente, cuando el sistema está en operación, la temperatura de ebullición del refrigerante líquido dentro del evaporador, es aproximadamente 6°C más baja que la temperatura del evaporador. En los ciclos de paro, el refrigerante y el evaporador igualarán sus temperaturas. Como una guía práctica, a continuación en la tabla 12.6, se dan algunas temperaturas de ebullición para varias aplicaciones:

Otra temperatura a considerar cuando se selecciona un refrigerante, es la temperatura crítica, sobre todo para el diseño del condensador, ya que ningún vapor se condensa

a una temperatura mayor de la crítica, aunque la presión sea muy grande. En el caso de condensadores enfriados por aire, es conveniente que el refrigerante tenga una temperatura crítica mayor de 55°C. Como se puede ver en la tabla 12.5, todos los refrigerantes tienen temperaturas críticas arriba de 70°C, a excepción del R-170 (etano), que es de 32.3°C; por lo que, éste refrigerante no puede utilizarse en condensadores enfriados por aire, ya que la temperatura de condensación estaría siempre por arriba de la crítica.

Por otra parte, la temperatura de congelación de un refrigerante, debe ser más baja que la temperatura del evaporador. No se puede utilizar un refrigerante que se congele a la temperatura de trabajo del evaporador. Aunque esto no representa un problema, ya que la mayoría de los refrigerantes tienen temperaturas de congelación muy bajas, como se puede observar en la figura 12.5. La excepción es el R-718 (agua), la cual nunca se utiliza en el mecanismo de un ciclo de refrigeración por compresión.

Curvas de Presión - Temperatura

Sabemos que el agua hierve a 100°C en un recipiente abierto, a la presión atmosférica normal de 101.3 kPa (14.7 psia). En un recipiente cerrado, donde se puede controlar la presión, se puede cambiar el punto de ebullición. Si se incrementa la presión en el recipiente, también se incrementa el punto de ebullición. Si se disminuye la presión, se disminuye también la temperatura de ebullición del agua. Este mismo principio se aplica a todos los líquidos.

El trabajo de refrigeración se tiene que tratar con refrigerantes en sistemas cerrados, a presiones variables. Si se controlan estas presiones, se controlan las temperaturas del refrigerante en diferentes puntos del sistema. Por lo tanto, se puede lograr que hierva el refrigerante a baja temperatura en un punto (disminuyendo su presión), y que después, se condense a alta temperatura en otro punto (aumentando su presión).

Para cualquier líquido, la temperatura a la que se lleva a cabo la ebullición, se conoce como "temperatura de saturación", y su presión correspondiente, se conoce como "presión de saturación".

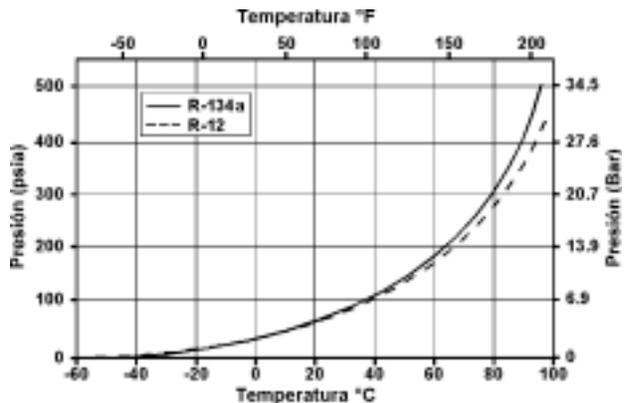


Figura 12.7 - Gráfica de P-T para el R-134a y R-12.

Las relaciones de presión y temperatura, se pueden graficar en escalas normales o en escalas logarítmicas. Estas últimas proporcionan una lectura con razonable precisión, tanto en bajas como a altas presiones.

En la figura 12.7, se muestra una gráfica de presión temperatura para el R-134a, y en la figura 12.8, se muestran las gráficas de presión y temperatura para varios refrigerantes comunes.

Estas gráficas son muy valiosas, para dar una imagen global de las relaciones de presión y temperatura de saturación, pero dependiendo del tamaño de la escala, va a ser la precisión de la lectura de los valores. Por lo tanto, algunas veces, estos valores se dan en forma de tabla, las cuales pueden dar presiones cada grado o cada 2 grados centígrados para las temperaturas de evaporación comu-

nes. También, para temperaturas de evaporación menos comunes o temperaturas de condensación, se dan presiones cada 5°C.

También hay disponibles tablas que, además de la presión y temperatura, dan otra información, tal como el volumen de líquido y vapor, calor y otros. Estas tablas se verán más adelante en este mismo capítulo.

En la escala vertical se tiene la presión en kilopascales (o en psig), y en la escala horizontal se tiene la temperatura en grados centígrados (o en grados fahrenheit). Cualquier punto sobre la curva, representa el punto de ebullición del refrigerante. Cada punto también se puede llamar "punto de condensación". La razón es que, cualquier mezcla de líquido y vapor a la temperatura y presión de saturación, puede estar en cualquiera de las tres etapas: ebullición,

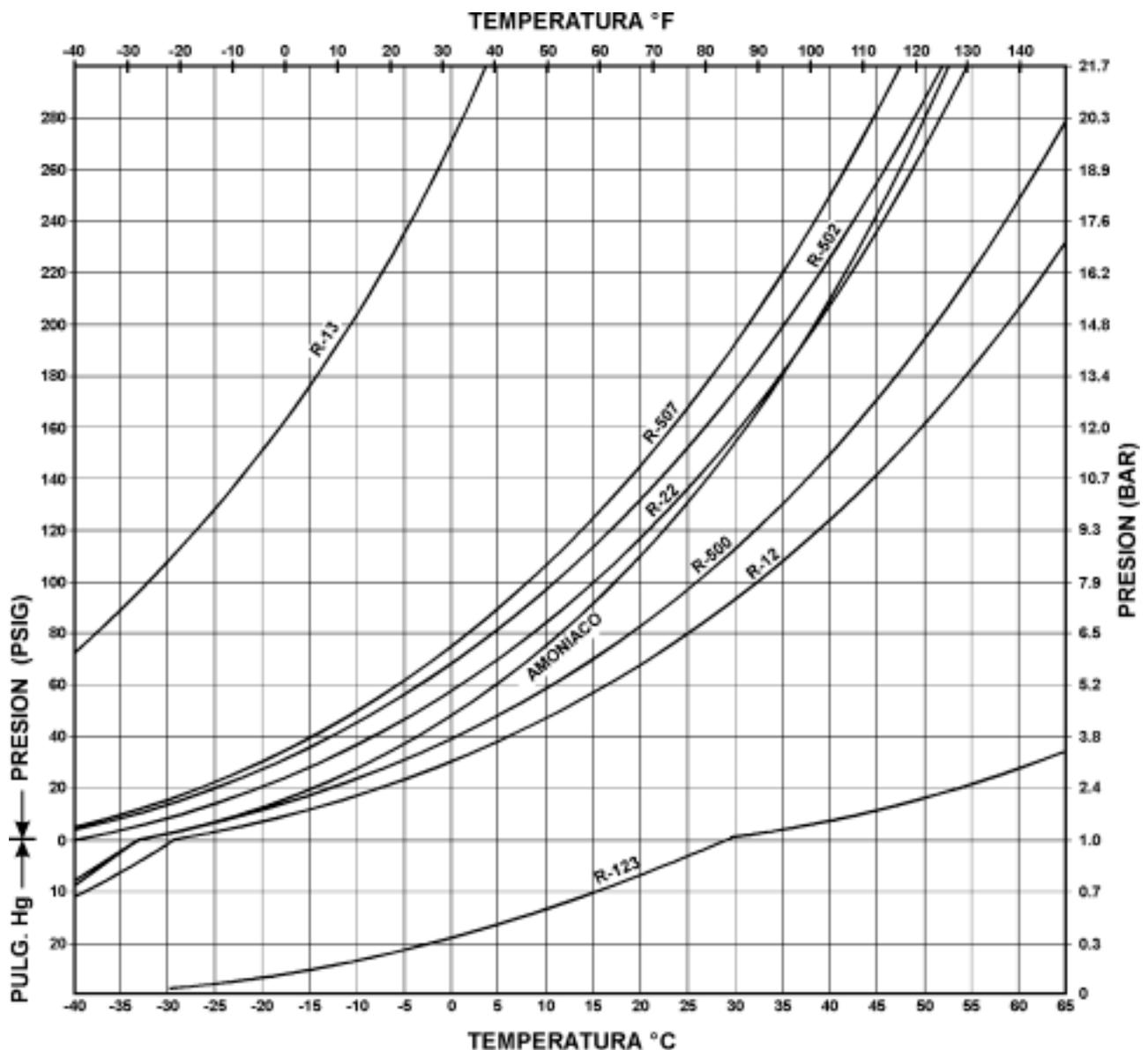


Figura 12.8 - Relaciones P-T para varios refrigerantes comunes.

condensación o equilibrio. Depende de la transferencia de calor que se esté llevando a cabo. Si se agrega calor, el líquido hierve; si se quita calor, el vapor se condensa y si no se agrega ni se quita calor, la mezcla permanece en equilibrio. Para encontrar la presión del refrigerante a una temperatura determinada, se lee verticalmente desde el valor de dicha temperatura, hasta tocar la curva; y luego, se mueve horizontalmente, hasta la escala de presión, donde se leerá la presión de saturación a esa temperatura.

Por ejemplo, la presión de vapor del R-507 a una temperatura de 10°C (50°F), es de 8.4 bar (107 psig). La temperatura es siempre la temperatura del refrigerante. La misma curva puede utilizarse para determinar presiones y temperaturas, tanto de evaporación como de condensación. Al utilizar estas gráficas, es necesario tener presente varias cosas:

1. La temperatura del refrigerante en el evaporador, es aproximadamente de 4 a 7°C más fría, que la del evaporador cuando está trabajando el compresor.
2. Cuando el compresor no está trabajando, la temperatura del refrigerante en el evaporador, es la misma que la del evaporador.
3. La temperatura del refrigerante en un condensador enfriado por aire, está entre 17 y 19°C más caliente que la temperatura ambiente.
4. La temperatura del refrigerante en un condensador enfriado por agua, es aproximadamente 10°C más caliente que el agua de la salida.
5. La temperatura del refrigerante en el condensador, será aproximadamente la misma que el medio de enfriamiento, después que la unidad haya sido apagada por 15 a 30 minutos.

En la tabla 12.9, se muestran las relaciones entre las presiones en kilopascales (kPa) y libras por pulgada cuadrada manométrica (psig), y las temperaturas en °C para los diferentes refrigerantes seleccionados para comparación. Los valores de la presión en el área sombreada, indican pulgadas de mercurio abajo de la presión atmosférica normal.

Las tablas de presión temperatura como la 12.9, son muy valiosas en lo que se refiere a los puntos de saturación, pero tienen sus limitaciones. Un líquido apartado de su vapor puede enfriarse abajo de su temperatura de saturación; tal líquido se denomina "sub-enfriado". Un vapor apartado de su líquido puede calentarse arriba de su temperatura de saturación; tal vapor denomina "sobrecalentado". Así, el agua a la presión atmosférica está sub-enfriada, si se encuentra a menos de 100°C, y está saturada, si está a 100°C. El vapor estaría saturado si se encuentra a 100°C, pero si se separa del agua y se calienta, se elevará su temperatura para formar vapor sobrecalentado.

Un líquido no puede sobrecalentarse, pues herviría; y un vapor no puede sub-enfriarse, ya que se condensaría.

Estas correspondencias de presión-temperatura de saturación, sólo son válidas cuando el líquido y el vapor están en contacto uno con otro. Esta condición existe en el evaporador y en el condensador. También existe en tanques de refrigerante que no están totalmente llenos de líquido. El vapor está, entonces, sobre el líquido.

El refrigerante líquido en el tanque receptor o en la línea de líquido, puede o no estar sub-enfriado. El vapor de succión que entra al compresor debe estar sobrecalentado; esto es, más caliente que en el evaporador. La temperatura del gas en la descarga del compresor, está sobrecalentada, es decir, más caliente que la temperatura de condensación.

3. Volumen

Cuando se comparan densidades de gases, es común expresarlas en volumen específico. El volumen específico de un refrigerante en fase vapor, no es otra cosa, que el volumen en metros cúbicos (m³) o en litros (l) que ocupará un kilogramo de refrigerante a condiciones normales; esto es, a una temperatura de 20°C y a la presión atmosférica de 101.3 kPa. (14.7 psia).

En la figura 12.10, se muestran los volúmenes específicos en las fases líquida y vapor, para los diferentes refrigerantes seleccionados, a una temperatura de -15°C (5°F). El R-718 (agua) está considerada a una temperatura de 4°C, ya que a la temperatura de -15°C estaría congelado.

En un sistema de refrigeración, al agregar calor al refrigerante, aumenta su temperatura y su volumen específico, pero su presión permanece constante; ya que, en el evaporador, en la línea de succión y en el condensador, la temperatura de saturación es lo que controla la presión del vapor sobrecalentado. Inversamente, si disminuye la temperatura del refrigerante, disminuye su volumen específico.

Como puede observarse en la figura 12.10, el volumen específico en fase líquida del R-718 (agua) es 1.0 l/kg, esto significa que un kilogramo de agua líquida ocupa un volumen de un litro. Por esta razón, el agua es el líquido que se usa como referencia para comparación con otros líquidos.

A excepción del R-170 y del R-717, los demás refrigerantes tienen un volumen específico en fase líquida menor a 1.0 l/kg; aunque este valor no tiene gran importancia. El valor que es de más utilidad en trabajos de refrigeración, es el volumen específico en fase vapor. Este valor, no es otra cosa, que el volumen en litros (o en metros cúbicos) que ocupa un kilogramo de refrigerante al pasar de líquido a vapor. Obviamente como es de esperarse, este valor debe ser lo más bajo posible, ya que de este valor dependerá el desplazamiento volumétrico del compresor.

Observando los valores de volumen específico en fase vapor de la figura 12.10, vemos que el R-30 y el R-123 tienen valores muy altos, por lo que estos refrigerantes no se recomienda usarlos con compresores recíprocos, ya que se requerirá un compresor con gran desplazamiento.

PRESION DE SATURACION		TEMPERATURA DE SATURACION (°C)								
kPa	psig	R-12	R-22	R-123	R-134a	R-170	R-404A	R-500	R-502	R-717
0	(29.9)	-102	-104	-73	---	---	---	---	---	---
17	(25)	-65	-73	-15	---	---	---	-68	---	-64
34	(20)	-53	-62	0.5	-47	---	---	-57	-67	-53
52	(15)	-45	-55	10	-40	-101	---	-48	-59	-46
69	(10)	-39	-49	17	-34	-96	---	-42	-54	-41
86	(5)	-34	-45	22	-29	-92	-49.4	-38	-49	-37
101.3	0	-29.8	-40.7	27.8	-26.1	-88.6	-46.1	-33.5	-45.4	-33.3
115	2	-26.7	-38	29.4	-22.8	-85.5	-43.3	-30.3	-42.6	-30.8
129	4	-23.9	-35.5	33.3	-20	-84	-40.5	-28.3	-40.1	-28.4
143	5	-22.8	-33.2	36.6	-17.8	-82	-39.4	-25.5	-37.8	-26.3
156	8	-19.0	-31.1	40.5	-15.5	-80.5	-36.1	-23	-35.6	-24.4
170	10	-16.8	-29	42.8	-13.8	-78.3	-34.4	-20.8	-33.6	-22.5
184	12	-14.7	-27.2	45.5	-11.6	-76.6	-32.8	-19.2	-31.8	-20.7
198	14	-12.8	-25.4	47.8	-10	-75	-30.6	-17.2	-30	-19.2
212	16	-10.9	-23.6	50	-8.3	-73.8	-28.9	-15.1	-28.3	-17.6
225	18	-9.2	-22.1	51.7	-6.6	-72.2	-27.8	-13.3	-26.6	-16.1
239	20	-7.5	-20.5	53.3	-5.5	-70.5	-26.1	-11.9	-25.1	-14.7
253	22	-5.9	-19	55.4	-3.9	-69.4	-24.4	-10.3	-23.7	-13.4
267	24	-4.2	-17.8	57.2	-2.2	-68.3	-23.3	-9	-22.3	-12.2
281	26	-3.1	-16.4	59	-1.1	-67.2	-22.2	-7.4	-21	-10.8
294	28	-1.3	-15	60.5	0.5	-66.1	-20.6	-5.9	-19.7	-9.7
308	30	0	-13.8	62	1.6	-64.8	-19.4	-4.6	-18.2	-8.6
322	32	1.3	-12.7	63.6	2.7	-64.1	-18.3	-3.3	-17.2	-7.5
336	34	2.5	-11.5	65.2	3.9	-63	-17.2	-2.2	-16.1	-6.4
350	36	3.9	-10.3	66.6	5	-62.2	-16.1	-1.1	-14.7	-5.3
363	38	5.3	-9.2	67.3	6.1	-60.9	-15	0	-13.6	-4.4
377	40	6.4	-8	69.4	7.2	-60.2	-13.9	1.4	-12.7	-3.4
391	42	7.5	-7.1	70.7	8.3	-58.9	-13.3	2.2	-11.7	-2.5
404	44	8.6	-5.8	72	9.4	-58.3	-12.2	3.3	-10.8	-1.6
418	46	9.7	-4.7	73.3	10.5	-57.5	-11.1	4.4	-9.8	-0.6
432	48	10.8	-4.2	74.5	11.6	-56.2	-10	5.6	-8.6	0.2
446	50	11.9	-3.3	75.7	12.2	-55.6	-8.9	6.8	-7.8	1
460	52	12.8	-2.3	77.2	13.1	-55	-8.3	7.4	-7	1.9
474	54	13.6	-1.4	78.6	14	-54.2	-7.2	8.4	-5.9	2.7
487	56	14.7	-0.8	80.0	14.8	-53.3	-6.7	9.6	-5.3	3.4
501	58	15.8	0.3	---	15.8	-52.3	-5.6	10.3	-4.2	4.3
515	60	16.6	1.2	---	16.6	-21.9	-5	11.1	-3.6	5
529	62	17.5	1.8	---	17.5	-51.1	-3.9	11.9	-2.5	5.7
543	64	18.5	2.5	---	18.4	-50.5	-3.3	12.8	-1.9	6.4
556	66	19.4	3.4	---	19.2	-49.8	-2.8	14.3	-0.9	6.9
570	68	20.2	4.2	---	19.8	-48.8	-1.7	14.5	-0.2	7.8
584	70	20.7	5	---	20.5	-48.2	-1.1	15.4	0.6	8.5

Tabla 12.9 - Relación de presión - temperatura para varios refrigerantes.

Continúa tabla página siguiente...

Presiones abajo de la atmosférica. () Pulgadas de mercurio.

PRESION DE SATURACION		TEMPERATURA DE SATURACION (°C)								
kPa	psig	R-12	R-22	R-123	R-134a	R-404A	R-170	R-500	R-502	R-717
598	72	21.9	5.7	88	21.4	0	-47.7	16.1	1.4	9.2
612	74	22.6	6.2	89	22.3	0.6	-46.7	17.2	2.1	9.8
625	76	23.5	7.2	90	23.1	0.8	-46.3	17.7	2.9	10.4
639	78	24.3	7.9	91	23.7	1.4	-45.7	18.4	3.5	11.1
653	80	25	8.6	92	24.4	2.8	-45	19.1	4.3	11.8
687	85	27	10	94	26	4	-44	21	6	13
722	90	29	12	---	28	6	-43	23	8	15
756	95	31	14	---	29	7	-41	24	9	16
791	100	32	15	---	31	9	-40	26	11	18
825	105	34	17	---	33	10	-38	28	13	19
860	110	36	18	---	34	11	-37	29	14	20
894	115	37	19	---	36	13	-35	31	15	21
929	120	39	21	---	37	14	-34	32	17	23
963	125	40	22	---	38	15	-33	34	18	24
998	130	42	23	---	39	16	-32	35	19	25
1,032	135	43	25	---	41	18	-31	36	20	26
1,067	140	44	26	---	42	19	-30	37	22	27
1,101	145	46	27	---	43	20	-39	39	23	28
1,136	150	47	28	---	44	21	-28	40	24	29
1,170	155	48	29	---	46	22	-27	41	25	30
1,204	160	50	30	---	47	23	-26	42	26	31
1,239	165	51	32	---	48	24	-25	44	27	32
1,273	170	52	33	---	49	26	-24	45	28	33
1,308	175	53	34	---	50	27	-23	46	30	34
1,342	180	54	35	---	51	28	-22	47	31	35
1,377	185	55	36	---	52	28	-21	49	32	36
1,411	190	57	37	---	53	29	-20	49	33	37
1,446	195	58	38	---	54	31	-19	50	34	37
1,480	200	59	39	---	55	31	-18	51	35	38
1,515	205	60	40	---	56	32	-18	52	36	39
1,549	210	61	40	---	56	33	-17	53	37	40
1,584	215	62	41	---	57	34	-16	54	38	41
1,618	220	63	42	---	58	35	-15	55	39	41
1,653	225	64	43	---	59	36	-14	56	39	42
1,687	230	65	44	---	60	37	-13	57	40	43
1,722	235	66	45	---	61	37	-13	58	41	44
1,756	240	67	46	---	62	38	-12	59	42	45
1,790	245	68	47	---	63	39	-11	60	43	45
1,825	250	69	47	---	64	40	-11	60	44	46
1,859	255	70	48	---	65	41	-10	61	45	47

Tabla 12.9- Relación de presión - temperatura para varios refrigerantes.

Continúa tabla página siguiente...

PRESION DE SATURACION		TEMPERATURA DE SATURACION (°C)								
kPa	psig	R-12	R-22	R-123	R-134a	R-404A	R-170	R-500	R-502	R-717
1,894	260	72	49	---	66	42	-9	62	46	48
1,963	270	74	51	---	67	43	-8	63	47	49
2,032	280	75	52	---	68	44	-6	65	49	50
2,100	290	77	53	---	70	46	-5	67	50	51
2,170	300	79	55	---	71	47	-4	69	51	52
2,239	310	80	56	---	73	49	-3	70	53	54
2,308	320	82	58	---	74	50	-1	---	54	55
2,377	330	---	59	---	76	51	0	---	56	57
2,446	340	---	60	---	77	52	1	---	57	58
2,514	350	---	62	---	78	54	2	---	58	---
2,583	360	---	63	---	79	55	3	---	60	---
2,652	370	---	64	---	80	57	4	---	61	---
2,721	380	---	65	---	81	---	5	---	62	---
2,790	390	---	67	---	82	---	7	---	63	---
2,859	400	---	68	---	83	---	8	---	65	---

Tabla 12.9 - Relación de presión - temperatura para varios refrigerantes.

to volumétrico, debido a la gran cantidad de vapor que producen al evaporarse. Un kilogramo de R-30, cuando pasa de líquido a vapor a -15°C , de ocupar un volumen de aproximadamente $3/4$ de litro, en fase líquida, su vapor tendría un volumen de 3,115 litros (3.115 m^3). Por esta razón generalmente los refrigerantes con alto valor de volumen específico en fase vapor, se utilizan con compresores centrífugos, los cuales manejan grandes cantidades de vapor de refrigerante.

Por otra parte, un kg de R-22 en las mismas condiciones, al evaporarse, ocupa un volumen de 77.6 litros, que es aproximadamente 40 veces menos que el R-30. Puede observarse también, que las variaciones de los

volúmenes específicos de los refrigerantes en estado líquido, son muy pequeñas, comparándolas con las correspondientes en el estado de vapor.

4. Entalpia

Es la propiedad que representa la cantidad total de energía térmica o contenido de calor, en un fluido. Sus unidades son kcal/kg. Para la mayoría de los refrigerantes, se considera que su entalpia es cero a una temperatura de saturación de -40°C . Entonces, el calor agregado o sustraído de un refrigerante, desde ese punto, se considera que es su entalpia total. En la mayoría de los trabajos de transferencia de calor, se manejan los cambios de entalpia que ocurren durante un proceso. Generalmente, no hay necesidad de conocer el contenido de energía absoluta.

En la tabla 12.11, se muestran los valores de entalpia de varios refrigerantes, a una temperatura de -15°C , excepto el R-718, que está a 5°C . Estas temperaturas se seleccionaron arbitrariamente, para efectos de comparación. Para cada refrigerante se muestran los valores de entalpia en la fase líquida (h_f), el calor latente (h_{fg}) y la entalpia en la fase vapor (h_g).

Entalpia del Líquido Saturado (h_f). Este valor es la cantidad de kilocalorías por cada kilogramo de refrigerante líquido saturado; esto es, el líquido que se encuentra a su temperatura de saturación, como las que se muestran en la figura 12.9.

Este contenido de calor del líquido, es calor sensible basado en la suposición de que el líquido saturado a -40°C , no tiene calor sensible. Esto no es cierto, ya que aún a -75°C , el líquido contiene algo de calor.

REFRIG. N°	VOLUMEN ESPECIFICO (l/kg)	
	LIQUIDO v_f	VAPOR v_g
12	0.6925	91.1
22	0.7496	77.6
30	0.7491	3115.1
123	0.64	856.3
134a	0.7376	120
170	2.3098	33
502	0.7254	50
507	0.9704	51
717	1.4982	508.8
718	1	152,600

Tabla 12.10 - Volúmen específico a -15°C de varios refrigerantes.

Refrigerante No.	Entalpía a -15°C (kcal/kg)		
	Líquido <i>h_f</i>	Latente <i>h_{fg}</i>	Vapor <i>h_g</i>
12	5.33	37.89	43.22
22	6.53	51.78	58.31
30	0.94	90.05	91.00
123	6.66	43.87	50.53
134a	7.55	49.06	56.61
170	56.39	84.44	140.83
500	6.56	46.66	53.22
502	6.06	37.40	43.46
717	26.83	313.89	340.72
718*	4.47	595.17	599.64

Tabla 12.11 - Entalpía a -15°C de varios refrigerantes.

Para que esto sea verdad, los valores de entalpía en fase líquida, tendrían que basarse en el cero absoluto de temperatura. Sin embargo, esto no es necesario, ya que sólo interesa el cambio de entalpía; esto es, la cantidad de calor que se requiere para calentar o enfriar un kilogramo de líquido, de una temperatura de saturación a otra. El hecho de que se haya seleccionado la temperatura de -40°C, como referencia para darle a la entalpía el valor de cero, fue por conveniencia.

En la tabla 12.12, se muestran las entalpias para el líquido a varias temperaturas de saturación para el R-22. Para las temperaturas menores de -40°C, los valores de la entalpía son negativos, y se indican con el signo "menos". Esto parecería significar que el líquido saturado de R-22 a -60°C, por ejemplo, tendría 4.93 kcal menos que nada, lo cual, por supuesto, es imposible. El signo "menos", significa meramente que a -60°C el líquido saturado de R-22, tiene un contenido de calor de 4.93 kcal/kg menos, que el que tendría a -40°C.

Inversamente, para elevar la temperatura de saturación de un kg de R-22 líquido de -40°C a -15°C, se requieren $6.53 - 0 = 6.53$ kcal de calor sensible.

Por ejemplo, en la figura 12.11, la entalpía del R-22 líquido a -15°C es 6.53 kcal/kg, y como ya se mencionó, a -40°C es cero; pero a -60°C, su entalpía es -4.93 kcal/kg. Esto significa que para enfriar un kg del líquido saturado de R-22 de -15°C hasta -60°C, se tienen que remover $6.53 - (-4.93) = 11.46$ kcal/kg. Como se puede observar, lo que importa solamente es la diferencia de entalpía, ya que ésta será siempre la misma, independientemente de que su contenido esté basado en -40°C, -100°C, -200°C o el cero absoluto.

Entalpía de Evaporación (*h_{fg}*). Esta es la cantidad de calor que requiere un kilogramo de líquido, para cambiar a un kilogramo de vapor a temperatura constante. Este valor también se le conoce como "calor latente de evaporación".

En los sistemas de refrigeración, este cambio de estado de líquido a vapor, ocurre en el evaporador. El cambio de

contenido de calor o entalpía resultante, se puede considerar, simplemente, como el trabajo teórico que puede realizar el refrigerante.

En la tabla 12.11, se muestran los valores de calor latente para varios refrigerantes a la temperatura de -15°C. Como se puede observar, todos los refrigerantes tienen diferentes valores de calor latente. Para un mismo refrigerante, el valor de calor latente varía con la temperatura, como se puede observar en la tabla 12.12. El calor latente disminuye al aumentar la temperatura.

Como se mencionó anteriormente, un refrigerante debe de preferencia tener un valor alto de calor latente de evaporación, ya que esto es lo que hace posible la refrigeración. Mientras mayor sea este valor, se requerirá circular menos cantidad de refrigerante. Por ejemplo, en la tabla 12.11, comprobamos que el calor latente de evaporación del R-717 (amoníaco) es muy alto, 313.89 kcal/kg, comparado con el calor latente de evaporación del R-502, que solamente es de 37.4 kcal/kg. Esto significa que en equipos similares y a las mismas condiciones, para producir una tonelada de refrigeración, se tendrían que circular 9.63 kg/h de amoníaco, mientras que el R-502 se tendría que circular 80.85 kg/h.

El calor latente de evaporación es una propiedad muy importante de un refrigerante, pero se vuelve más importante aún, cuando se convierte en "efecto de refrigeración". Este es el trabajo real producido por un refrigerante dentro del sistema de refrigeración. Es el calor absorbido, que da como resultado un enfriamiento útil. Puede determinarse conociendo la entalpía del refrigerante líquido cuando entra al evaporador, y la entalpía del vapor de refrigerante que sale del evaporador. La diferencia entre estos dos valores, es el trabajo real producido o "efecto de refrigeración".

Entalpía del Vapor Saturado (*h_g*). Un líquido antes de hervir, tiene calor sensible. Cuando está en ebullición, adquiere además, calor latente. Entonces, el calor total del vapor saturado, debe ser igual a la suma del calor sensible del líquido, más el calor latente de evaporación. Esto se expresa de la siguiente manera:

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

En la tabla 12.11, podemos observar que la entalpía del vapor saturado, equivale a la suma de la entalpía del líquido más el calor latente. La entalpía del vapor saturado, representa el contenido total de calor del vapor saturado del refrigerante en un evaporador, antes de ser sobrecalentado; es decir, antes de ser calentado por arriba de la temperatura del evaporador. Si en un sistema de refrigeración la temperatura de evaporación es menor de -40°C, entonces, los valores de entalpía del líquido deberán restarse del calor latente, para poder obtener el valor del calor del vapor, ya que los valores del líquido muestran un signo "menos" (-).

Ahora es fácil entender por qué los valores de entalpía son muy útiles, al hacer cálculos de transferencia de calor. Puede verse que la entalpía incluye la absorción de ambos

calores, sensible y latente. Aún más, ahora sabemos que líquidos diferentes tienen diferentes calores específicos, y diferentes calores latentes de evaporación. También diferentes puntos de ebullición, así que, el uso de estos valores, ahorrarán prolongados cálculos al trabajar con cargas de transferencia de calor, utilizando refrigerantes específicos.

Tablas de Propiedades Termodinámicas

Todas las propiedades termodinámicas vistas hasta ahora, tales como presión, temperatura, volumen específico y entalpia, se publican en forma de tabla para cada refrigerante. Estas tablas las elaboran los fabricantes de refrigerantes y algunas asociaciones relacionadas con refrigeración, y se pueden encontrar en libros de texto, manuales o boletines técnicos.

En la tabla 12.12, se muestra una parte de las propiedades termodinámicas del R-22, en condiciones de saturación, donde se pueden observar además de las propiedades ya vistas, otras como la densidad y entropía.

Estas tablas tienen muchos usos prácticos para los técnicos de servicio, y son, por lo tanto, herramientas al igual que los manómetros y termómetros. Algunas de las cosas que pueden determinarse por medio de ellas son: ajuste de controles, verificar temperaturas de acuerdo a las presiones, determinar cuál será la presión de alta para un conjunto dado de condiciones, ajuste del sobrecalentamiento de la válvula de termo expansión, la caída de presión, capacidad de los cilindros y tanques recibidores de refrigerante, estimación de la capacidad del compresor, etc...

A continuación, se definirán brevemente las dos propiedades termodinámicas que no se habían mencionado; estas son: densidad y entropía.

5. Densidad

La densidad de un fluido, puede definirse como su peso por unidad de volumen. Las unidades en que se expresa esta propiedad, son comúnmente kg/m^3 o puede utilizarse también kg/l .

Temp. °C	PRESION		VOLUMEN		DENSIDAD		ENTALPIA kcal/kg			ENTROPIA kcal/kg K	
	kPa	psig	Líquido l/kg <i>v_f</i>	Vapor m ³ /kg <i>v_g</i>	Líquido kg/l <i>l/v_f</i>	Vapor kg/m ³ <i>l/v_g</i>	Líquido <i>h_f</i>	Latente <i>h_{fg}</i>	Vapor <i>h_g</i>	Líquido <i>s_f</i>	Vapor <i>s_g</i>
-60	37	18.85 *	0.682	0.538	1.466	1.862	-4.93	58.36	53.43	-0.022	0.252
-55	49	15.31 *	0.689	0.415	1.452	2.411	-3.72	57.73	54.01	-0.016	0.248
-50	64	10.90 *	0.695	0.325	1.438	3.081	-2.50	57.08	54.58	-0.011	0.245
-45	83	5.48 *	0.702	0.257	1.424	3.891	-1.26	56.40	55.14	-0.005	0.242
-40	105	0.52	0.709	0.206	1.410	4.860	0.00	55.70	55.70	0.000	0.239
-35	132	4.40	0.717	0.166	1.395	6.010	1.27	54.97	56.24	0.005	0.236
-30	163	9.01	0.724	0.136	1.380	7.362	2.56	54.22	56.78	0.011	0.234
-25	201	14.45	0.733	0.112	1.365	8.940	3.87	53.43	57.30	0.016	0.231
-20	245	20.81	0.741	0.093	1.350	10.771	5.19	52.62	57.81	0.021	0.229
-15	296	28.19	0.750	0.078	1.334	12.882	6.53	51.78	58.31	0.026	0.227
-10	354	36.69	0.759	0.065	1.318	15.305	7.88	50.91	58.79	0.032	0.225
-5	421	46.41	0.768	0.055	1.302	18.071	9.26	50.00	59.26	0.037	0.223
0	498	57.43	0.778	0.047	1.285	21.215	10.65	49.05	59.70	0.042	0.221
5	584	69.97	0.789	0.040	1.268	24.779	12.06	48.07	60.13	0.047	0.220
10	681	84.03	0.800	0.035	1.250	28.808	13.49	47.04	60.53	0.052	0.218
15	789	99.76	0.812	0.030	1.232	33.348	14.93	45.98	60.91	0.057	0.216
20	910	117.28	0.824	0.026	1.213	38.457	16.40	44.86	61.26	0.062	0.215
25	1,044	136.71	0.838	0.023	1.194	44.200	17.89	43.70	61.59	0.067	0.213
30	1,192	158.17	0.852	0.018	1.174	50.654	19.41	42.48	61.89	0.072	0.212
35	1,355	181.80	0.867	0.017	1.153	57.910	20.95	41.20	62.15	0.077	0.210
40	1,534	207.72	0.884	0.015	1.131	66.072	22.52	39.86	62.38	0.082	0.209
45	1,729	236.08	0.902	0.013	1.107	75.278	24.12	38.43	62.55	0.087	0.207
50	1,942	267.01	0.922	0.012	1.085	85.696	25.76	36.92	62.68	0.092	0.206
55	2,174	300.68	0.944	0.010	1.059	97.542	27.44	35.30	62.74	0.097	0.204
60	2,427	337.25	0.969	0.009	1.032	111.105	29.18	33.56	62.74	0.102	0.202

* Pulgadas de vacío.

Tabla 12.12 - Sección de la tabla de propiedades termodinámicas de saturación para el R-22.

Los líquidos tienen diferentes valores de peso por metro cúbico o por litro, lo que se conoce como densidad. La mayoría de los refrigerantes en estado líquido, tienen una densidad más alta que el agua (gravidades específicas arriba de 1.0). La densidad de cada refrigerante varía con la temperatura. Puesto que por regla, los líquidos se expanden al calentarse, su densidad a altas temperaturas es menor que a bajas temperaturas.

En la tabla 12.13, se muestran las densidades en estado líquido y vapor, de los refrigerantes que seleccionamos para comparación. Las unidades en fase líquida están en kg/l; esto significa que un litro de R-22 a 30°C, pesa 1.17 kg y un litro de amoníaco (R-717), pesa casi 600 gramos.

Refrigerante No.	Densidad a 30°C	
	Líquido [1] <i>l/vf</i>	Vapor [2] <i>l/vg</i>
12	1.2922	42.539
22	1.1738	50.654
30	1.3371	0.3337
123	1.4545	6.92
134a	1.1854	37.769
170	0.2755	0.9313
500	1.1383	42.154
502	1.1926	76.217
717	0.5952	9.034
718	0.9995	0.03

Tabla 12.13 - Densidad de algunos refrigerantes.
[1] en kg/l. [2] en g/l.

Las unidades de densidad en fase vapor están en g/l ($1 \text{ g/l} = 1 \text{ kg/m}^3$); es decir un litro de vapor de R-22 a 30°C, pesa 50.6 gramos, y un litro de vapor de amoníaco pesa 9 gramos.

Los valores del volumen específico de un refrigerante (y en general de cualquier fluido), como los que se muestran en la tabla 12.10, son el recíproco de los valores de la densidad. Por ejemplo, la densidad de R-22 líquido a -15°C es 1.334 kg/l. Si dividimos 1 entre este valor, obtenemos el valor del volumen específico del R-22 líquido a -15°C, o sea, 0.7496 l/kg. Lo mismo es cierto para los valores del vapor saturado a -15°C. La densidad del R-22 es 12.882 g/l; por lo que su volumen específico es $1/12.882 = 0.0776 \text{ l/g}$ (77.6 l/kg).

Los valores de la densidad tienen algunas aplicaciones útiles para cálculos de ingeniería, mayormente la densidad en fase líquida. La densidad en fase vapor es útil en problemas que involucran al evaporador, la línea de succión y el condensador. La densidad en fase líquida se utiliza, entre otras cosas, para calcular la capacidad de cilindros o tanques recibidores.

Por ejemplo, un tanque recibidor tiene un volumen interno de 0.04816 m^3 (si no se conoce el volumen del tanque, se puede calcular con el diámetro interior y la altura). Si se

fuera a utilizar con R-22, ¿cuál sería su capacidad de líquido segura? Existen dos métodos para determinarla.

a) Si la temperatura ambiente es de 25°C, el R-22 tiene una densidad de $1,194 \text{ kg/m}^3$ (o bien, 1.194 kg/l); así que, el recibidor, tendría una capacidad de $1,194 \times 0.04816 = 57.5 \text{ kg}$ y estaría completamente lleno. Pero si la temperatura ambiente (y la del tanque) aumentara a 38°C, a este recibidor sólo le cabrían 54.9 kg ($0.04816 \times 1,140$, la densidad a 38°C). Es decir, 2.6 kg menos que a 25°C, por lo que el tanque podría reventarse. A mayor temperatura, como 52°C, sería aún peor; ($0.04816 \times 1,075 = 51.77 \text{ kg}$), o sea 5.73 kg menos que a 25°C.

Se puede permitir arbitrariamente un 15% de factor de seguridad, y llenarlo a un 85% de su capacidad total de líquido. Entonces, $0.85 \times 57.5 = 48.87 \text{ kg}$, que es la cantidad que se deberá poner en este tanque recibidor. Este método, es similar al método que se basa en el volumen de agua de cilindros para refrigerante.

b) Un método mejor y más fácil, es determinar la temperatura más alta a la que podría estar expuesto el tanque recibidor, y multiplicar la densidad del líquido a esa temperatura por el volumen interno del tanque. Nunca se debe considerar esta temperatura máxima menor a 55°C. En climas calientes donde un recibidor, cilindro u otro recipiente pueda estar expuesto a los rayos directos del sol, se debe usar una temperatura máxima de 60°C, o aún de 65°C, y seleccionar la densidad del líquido a esa temperatura.

En nuestro ejemplo, estableceríamos una capacidad máxima del recibidor, basándonos en una temperatura de 55°C de ($0.04816 \times 1,059$) = 51.0 kg.

Para otros refrigerantes, el mismo tanque recibidor tendrá diferente capacidad. Por ejemplo, seleccionando una temperatura máxima de 55°C para el R-12, tendría una capacidad de ($0.04816 \times 1,188.80$) = 57.25 kg.

La densidad del vapor de cada refrigerante también varía con la temperatura. Sin embargo, hay una diferencia importante: la densidad del vapor saturado aumenta al subir la temperatura, mientras que la densidad del líquido, disminuye al aumentar la temperatura. Por ejemplo, a 4°C de saturación, la densidad del vapor del R-22 es 24.03 g/l, pero a -18°C es solamente 11.58 g/l. Nótese que son vapores saturados. Si se sobrecalienta un vapor saturado, como sucede en la línea de succión, se expande y su densidad se vuelve menor. Esta no es la misma condición que al calentar un líquido, ya que la densidad de un vapor saturado de un líquido más caliente, es mayor que la de un líquido más frío.

Esta es la razón principal por la que un sistema de refrigeración tiene mayor capacidad con un evaporador a 4°C, que con un evaporador a -18°C. El vapor saturado a 4°C está más del doble denso que el vapor saturado a -18°C; por lo que en un cilindro de compresor el vapor a 4°C pesa más del doble que a -18°C. Consecuentemente, en el compresor circula más del doble de refrigerante, resultando más del doble de capacidad.

R-22 TABLAS DE VAPOR SOBRECALENTADO - PRESION CONSTANTE A INTERVALOS DE PRESION

V = volumen en l/kg H = entalpia en kcal/kg S = Entropía en kcal/kg K (propiedades de saturación en paréntesis)

Temp. °C	PRESION ABSOLUTA, kPa											
	1,200			1,213			1,227			1,241		
	159.3 psig			161.3 psig			163.3 psig			165.3 psig		
	(30.25°C) (86.45°F)			(30.69°C) (87.24°F)			(31.13°C) (88.03°F)			(31.56°C) (88.81°F)		
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S
	(19.61)	(61.90)	(0.2118)	(19.38)	(61.93)	(0.2116)	(19.15)	(61.95)	(0.2115)	(18.93)	(61.97)	(0.2114)
32	19.87	62.32	0.213	19.58	62.25	0.213	19.29	62.18	0.212	19.02	62.12	0.212
38	20.59	63.46	0.217	20.29	63.40	0.216	20.00	63.34	0.216	19.72	63.28	0.216
43	21.27	64.59	0.220	20.97	64.53	0.220	20.68	64.48	0.220	20.39	64.42	0.219
49	21.93	65.70	0.224	21.63	65.65	0.224	21.33	65.60	0.223	21.05	65.55	0.223
54	22.57	66.80	0.227	22.27	66.76	0.227	21.97	66.71	0.227	21.68	66.66	0.226
60	23.20	67.90	0.231	22.89	67.85	0.230	22.59	67.80	0.230	22.29	67.76	0.230
66	23.81	68.98	0.234	23.50	68.94	0.234	23.19	68.89	0.233	22.89	68.85	0.233
71	24.41	70.06	0.237	24.09	70.02	0.237	23.78	69.98	0.236	23.48	69.94	0.236
77	25.00	71.13	0.240	24.67	71.09	0.240	24.36	71.06	0.239	24.05	71.02	0.239

Tabla 12.14 - Parte de la tabla de propiedades termodinámicas de vapor sobrecalentado de R-22 a intervalos de presión.

Otro ejemplo del uso de los valores de la densidad del vapor es el siguiente: supóngase que se tiene un cilindro de 57 kg de R-22 a temperatura ambiente de 21°C, el volumen interno real del cilindro es de 0.0557 m³.

Si se "vacía" el refrigerante líquido hacia el sistema, es decir, cargarlo en el recibidor en forma líquida, cuando todo el líquido haya sido "vaciado", el tanque aún contendrá 0.0554 m³ de vapor saturado a 21°C. La densidad del vapor saturado de R-22 a 21°C, es 39.55 g/l, así que el cilindro aún tendrá 2.19 kg (0.0554 x 39.55) de R-22. Si se devuelve al cilindro sin vaciarlo completamente, estaremos perdiendo 2.19 kg de R-22.

6. Entropía

Con frecuencia se le llama la cantidad "fantasmal", y es una relación matemática muy útil, pero es muy difícil dar una explicación sencilla.

La entropía es un término de ingeniería, aplicado generalmente al proceso de compresión. Un proceso de compresión ideal, seguiría una línea de entropía constante en el diagrama de presión - entalpia (diagrama de Mollier).

Al igual que las otras propiedades termodinámicas de los refrigerantes, también se tienen en la tabla valores para el líquido y para el vapor a intervalos de temperaturas. Similar a la entalpia, el valor de entropía de un refrigerante líquido a -40°C, es 0, y los valores que realmente importan, son los cambios de entropía desde una temperatura de saturación a otra.

El cambio de entropía es una medida de la energía no disponible, que resulta del cambio de propiedades de un refrigerante.

El cambio de entropía, es la suma de todos los incrementos diferenciales de calor (kcal/kg), divididos por la temperatura absoluta (°C + 273 = K) existente, en el momento

que cada incremento diferencial se haya añadido o removido, de aquí que sus unidades son kcal/(kg)(K).

No tenemos que entender la entropía para utilizarla. En la mayoría de los compresores de alta velocidad, no hay un cambio de entropía apreciable durante la compresión. Así pues, si se conoce la entropía al inicio de la compresión (y se puede obtener de tablas), y si se conoce la presión de descarga, se pueden encontrar las propiedades del vapor de la descarga en las tablas de propiedades del vapor sobrecalentado.

La entropía, es pues, una relación que describe la energía relativa en el refrigerante, y se determina dividiendo la cantidad de calor en el líquido o en el vapor, por su temperatura absoluta.

La entropía no se utiliza mucho en trabajos en el campo, pero es muy útil en combinación con el diagrama de Mollier para estimar la temperatura de descarga del compresor. Ejemplo: un compresor que trabaja con R-22, descarga el vapor a una presión de 174 psia (1,200 kPa). Suponiendo que la entropía inicial del vapor que entra al compresor es de 0.227 kcal/kg K ¿cuál es la temperatura y volumen del vapor de descarga? Como ya se mencionó, no hay cambio de entropía durante la compresión; así que la entropía del vapor de la descarga, también es 0.227 kcal/kg K. Simplemente, se buscan la temperatura y el volumen correspondientes en la tabla 12.14, los cuales son 54°C y 22.57 l/kg.

Propiedades del Vapor Sobrecalentado

En un sistema de refrigeración, el vapor saturado en el evaporador, es sobrecalentado un poco en el momento que sale del evaporador (generalmente de 4° a 7°C), y luego se sobrecalienta un poco más en la línea de succión.

Al llegar al compresor, se le agrega un sobrecalentamiento adicional por el trabajo hecho por la compresión. En el

condensador, algo del calor removido es latente, y otra parte es sensible al sobrecalentamiento.

Las tablas de propiedades del vapor sobrecalentado, proporcionan esta información adicional. Aunque los diagramas de Mollier son más fáciles de usar, no son tan precisos como las tablas.

En la tabla 12.14, se muestra una sección de las tablas de vapor sobrecalentado del R-22, a intervalos de presión.

En el primer renglón está la presión absoluta (kPa), en el siguiente renglón está la presión manométrica (psig), y en seguida, la temperatura de saturación correspondiente a esas presiones. Por ejemplo, a la presión absoluta de 1,200 kPa, la presión manométrica es 159.3 psig, y la temperatura de saturación a esa presión es 30.25°C.

Enseguida, hay tres columnas: "V" o volumen en litros por kilogramo; "H" o contenido de calor (entalpía) en kilocalorías por kilogramo arriba de líquido a -40°C, "S" o entropía en kilocalorías por kilogramo y por grado Kelvin (desde -40°C). Los valores entre paréntesis, son las propiedades de saturación; es decir, 19.61 es el volumen del vapor saturado de R-22, a la presión de 1,200 kPa y a la temperatura de 30.25°C.

Todas las demás cantidades en cada columna debajo de estas propiedades, son los valores del vapor sobrecalentado a diferentes temperaturas de sobrecalentamiento. Por ejemplo, la entalpía del vapor de R-22 a una presión de 159.3 psig, con un sobrecalentamiento de 12.75°C (43-30.25), es 64.59 kcal/kg.

Propiedades Físicas y Químicas

Las propiedades físicas y químicas de los refrigerantes, no determinan directamente el calor que un refrigerante puede remover o absorber.

7. No Debe ser Tóxico ni Venenoso

Puesto que los refrigerantes son manejados por muchas personas, desde el fabricante, al distribuidor hasta el usuario, no deben representar ningún peligro. La mayoría de los refrigerantes sintéticos (hechos por el hombre, no encontrados en la naturaleza) no son tóxicos, y el riesgo es muy leve o prácticamente inexistente. Sin embargo, hay algunos refrigerantes que son realmente dañinos al hombre, aún en pequeñas concentraciones. En altas concentraciones en el aire, cualquier refrigerante puede causar asfixia, debido a que desplazan el aire y crean insuficiencia de oxígeno. La magnitud del daño depende de la concentración de refrigerante, su naturaleza y del tiempo que se esté expuesto a él.

Hasta esta fecha, en nuestro país no se ha definido claramente una reglamentación o clasificación para refrigerantes, de acuerdo a su seguridad relativa.

GRUPO	DEFINICION	EJEMPLOS
1	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 0.5% a 1% con duración de exposición de 5 minutos son letales o producen daños serios.	Bióxido de Azufre (R-764).
2	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 0.5% a 1% con duración de exposición de 30 minutos son letales o producen daños serios.	Amoníaco, Bromuro de Metilo.
3	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 2% a 2.5% con duración de exposición de 1 hora son letales o producen daños serios.	Tetracloruro de Carbono, Cloroformo y Formato de Metilo.
4	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 2% a 2.5% con duración de exposición de 2 hora son letales o producen daños serios.	Dicloroetileno, Cloruro de Metilo y Bromuro de Etilo.
Entre 4 y 5	Clasificados como algo menos tóxico que el grupo 4.	Cloruro de Metileno, Cloruro de Etilo y R-113.
5a	Mucho menos tóxico que el grupo 4 pero algo más tóxico que el grupo 6.	R-11, R-22 y Bióxido de Carbono.
5b	Gases o vapores cuyos datos disponibles los clasificarían ya sea en el grupo 5a o grupo 6.	Etano, Propano y Butano.
	Gases o vapores los cuales en concentraciones de por lo menos	R-12, R-500, R-114.

Tabla 12.15 - Clasificación de refrigerantes por su toxicidad de acuerdo a UL y a la NBFU.

En muchos países, los refrigerantes están bien clasificados de acuerdo a su grado de toxicidad, y también a su grado de inflamabilidad.

Organizaciones como Underwriter's Laboratories, Inc. (UL) y National Board of Fire Underwriter's (NBFU) en Estados Unidos, han clasificado los refrigerantes de acuerdo a su toxicidad en 6 grupos. Los refrigerantes del grupo 1 son los más tóxicos, y los del grupo 6 son los menos tóxicos. En la tabla 12.15, se muestran estos grupos.

Por ejemplo, como se puede apreciar en la tabla, el R-12 no es tóxico y una persona puede vivir en una atmósfera con un alto porcentaje de este refrigerante durante períodos prolongados. En cambio, otros refrigerantes como el amoníaco (R-717), son tan tóxicos, que una exposición de 30 minutos en aire, con una concentración de 0.5% en volumen, se considera peligrosa y hasta letal. El bióxido de azufre, que ya no se usa como refrigerante desde hace muchos años, es el más tóxico, ya que la misma concentración, pero con menos tiempo de exposición, puede ser letal.

Un punto interesante es, que estos dos refrigerantes aunque son los más tóxicos, tienen la ventaja de que su olor es muy ofensivo, y ponen alerta a la persona desde el momento que aparece el primer rastro de refrigerante.

Sin embargo, otros refrigerantes inoloros, como el R-30 (cloruro de metileno) o el R-40 (cloruro de metilo), son muy tóxicos, pero a causa de su cualidad inolora, pueden ser considerados aún más peligrosos, ya que no "avisan" como el amoníaco.

Otro factor que debe ser considerado en el tema de toxicidad de los refrigerantes, es la reacción a la flama. Los refrigerantes halogenados como el R-11, R-12, R-22, R-502, etc., se descomponen cuando se someten a altas temperaturas como las de una flama, formando vapores altamente tóxicos, aunque estos refrigerantes en sí son inofensivos. Cuando se utiliza una flama en presencia de estos refrigerantes, debe estar el área bien ventilada.

8. No Debe ser Explosivo ni Inflamable

Los refrigerantes varían extremadamente en cuanto a su facultad para arder o soportar la combustión.

En E.U. la organización National Refrigeration Safety Code (NRSC), cataloga a los refrigerantes en tres grupos de acuerdo a su grado de inflamabilidad o explosividad:

Grupo Uno - Los refrigerantes más seguros.

Grupo Dos - Refrigerantes moderadamente inflamables.

Grupo Tres - Refrigerantes inflamables.

Grupo Uno. Los refrigerantes en este grupo pueden utilizarse en cantidades mayores en cualquier instalación. Las cantidades permisibles son especificadas por la American Standard Safety Code for Mechanical Refrigeration. Estas cantidades son:

- Hasta 9 Kg (20 lb) en cocinas de hospitales.
- Hasta 23 Kg (50 lb) en concurrencias públicas.
- Hasta 23 Kg (50 lb) en uso residencial (si se toman precauciones).
- Hasta 9 Kg (20 lb) en sistemas de aire acondicionado residencial.

Algunos refrigerantes del Grupo Uno son:

R-11* Tricloromonofluorometano.

R-12* Diclorodifluorometano.

R-22 Monoclorodifluorometano.

R-500 Mezcla azeotrópica de R-12 (73.8 %) y R-152a (26.2 %).

R-502 Mezcla azeotrópica de R-22 (48.8 %) y R-115 (51.2 %).

R-503 Mezcla azeotrópica de R-23 (40.1 %) y R-13 (59.9%).

R-744 Bióxido de carbono.

* El R-11 y el R-12, junto con otros clorofluorocarbonos (CFC's), están en proceso de defasamiento, ya que existe evidencia de que dañan la capa de ozono estratosférica (ver capítulo 9). Hasta esta fecha, los refrigerantes van a substituirlos (R-123 y R-134a), aunque tienen propiedades similares y se sabe que no son tóxicos ni inflamables, se les ha clasificado provisionalmente en el Grupo Uno, hasta que se concluyan sus pruebas toxicológicas.

Grupo Dos. Los refrigerantes de este grupo pueden ser ligeramente inflamables, independientemente de que sean o no tóxicos.

Algunos refrigerantes de este grupo son:

R-717 Amoníaco.

R-40 Cloruro de metilo.

R-764 Bióxido de azufre.

El amoníaco fue uno de los primeros refrigerantes utilizados, y en la actualidad, se emplea solamente en grandes instalaciones industriales y en algunos refrigeradores de absorción.

El R-40 y el R-764 ya no se usan en la actualidad. En un tiempo, el bióxido de azufre era el refrigerante más utilizado en refrigeradores domésticos. Aún existen algunas unidades trabajando cargadas con R-764 y R-40.

Grupo Tres. Los refrigerantes de este grupo forman mezclas combustibles, cuando se combinan con el aire. Los más comunes son:

R-170 Etano.

R-290 Propano.

R-600 Butano.

Estos compuestos en la actualidad ya no se utilizan como refrigerantes; por el contrario, debido a su alta inflamabilidad, algunos de estos refrigerantes, como el R-170, arden tan bien y tan rápidamente, que se usan como combustibles.

La diferencia entre un refrigerante muy inflamable (Grupo Tres) y uno moderadamente inflamable (Grupo Dos), depende de la proporción mezclada con el aire y el límite más bajo del rango. Un refrigerante del Grupo Dos, puede ser tan riesgoso como uno del Grupo Tres, si es que hay presente una cantidad suficiente. Por ejemplo, el rango inflamable del R-290 está entre 2% a 9% en el aire, mientras que el rango para el R-717 está entre 15% a 27%. El R-290 está catalogado de mayor riesgo, porque en pequeñas cantidades puede ser inflamable o hasta explosivo; sin embargo, el R-717 puede ser igual de riesgoso si está presente una cantidad suficiente para caer dentro del rango inflamable. La temperatura de flama cuando el amoníaco arde en el aire, es arriba de 1,650°C, y para el propano, es ligeramente más alta.

Los refrigerantes del Grupo Tres arden fácilmente en una amplia proporción de mezcla con el aire, y explotan violentamente si quedan encerrados en un lugar. Por supuesto que los refrigerantes inflamables pueden utilizarse con seguridad, y de hecho, así sucede, con vigilancia de parte del operario en lugares donde el riesgo de incendio es mínimo; pero es importante reconocer estos riesgos.

Clasificación Combinada. Una clasificación más actual de los refrigerantes, es la clasificación combinada en grupos de seguridad, hecha por las organizaciones American National Standards Institute (ANSI) y la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), conocida como la norma ANSI/ASHRAE 34-1992. Esta clasificación combina la toxicidad con la inflamabilidad de los refrigerantes, y surgió de la revisión hecha a la norma 34-1989, la cual se hace

cada cinco años; pero en esta ocasión se hizo a los tres años (1989-1992). La necesidad de esta revisión, surgió al desarrollarse nuevos refrigerantes y discontinuar otros que destruyen la capa de ozono. Se volvió aparente que el sistema de clasificación existente, el cual había evolucionado a través de muchos años, no sería adecuado para clasificar los refrigerantes nuevos. Se ingenió un sistema menos arbitrario, y se cambió la manera de identificación de como se venía haciendo anteriormente, de clasificar por separado la toxicidad de la inflamabilidad con un designador básico.

La nueva clasificación de grupos de seguridad, es de acuerdo a los siguientes criterios:

- a. La clasificación deberá consistir de dos caracteres alfanuméricos. La letra mayúscula indica la toxicidad, y el número arábigo denota la inflamabilidad (por ejemplo, B2 o A1).
- b. En la clasificación de toxicidad, se asigna a los refrigerantes una de las dos clases - A o B - en base a la exposición permisible: la clase A, incluye refrigerantes a los cuales, no se ha identificado su toxicidad en concentraciones menores o iguales a 400 ppm (ligera-mente o nada). La clase B, incluye refrigerantes para los cuales, existe evidencia de toxicidad en concentra-ciones por debajo de 400 ppm. (muy tóxicos).
- c. En la clasificación de inflamabilidad, los refrigerantes se deberán asignar a una de tres clases - 1, 2 ó 3. La clase 1, incluye a refrigerantes que no muestran propagación de flama, al ser probados en aire a 101 kPa y a 18°C. La clase 2, incluye a refrigerantes que tienen un límite de inflamabilidad bajo (LFL)*, de más de 0.10 kg/m³ a 21°C y 101kPa, y un calor de combustión menor a 4,540 kcal/kg (19,000 kJ/kg). La clase 3, comprende los refrigerantes que son suma-mente inflamables, tal como se define por medio del LFL*, menos o igual a 0.10 kg/m³ a 21°C y 101kPa, o por medio de un calor de combustión mayor o igual a 4,540 kcal/kg. En la tabla 12.16, se muestran estas clasificaciones.

		GRUPO DE SEGURIDAD	
		A	B
INCREMENTO DE INFLAMABILIDAD ↑	Mayor Inflamabilidad	A3	B3
	Menor Inflamabilidad	A2	B2
	Propagación Nula de Llama	A1	B1
		Menor Toxicidad	Mayor Toxicidad
		INCREMENTO DE TOXICIDAD →	

Tabla 12.16 - Clasificación actual de grupos de seguridad de refrigerantes.

REFRIG. N°	Nombre Químico	Grupo de Seguridad	
		Anterior (34-1989)	Nuevo (34-1992)
12	Diclorodifluorometano	1	A1
22	Clorodifluorometano	1	A1
30	Cloruro de metileno	2	B2
123	2,2-dicloro-1,1,1-trifluoroetano	---	B1
134a	1,1,1,2-tetrafluoruro etano	---	A1
170	Etano	3a	A3
500	12/152a (73.8/26.2)	1	A1
502	22/115 (48.8/51.2)	1	A1
717	Amoniaco	2	B2
718	Agua	---	A1

Tabla 12.17 - Clasificaciones de grupos de seguridad para algunos refrigerantes, según norma de ANSI/ASHRAE.

* LFL, Lower Flammability Limit - Límite de Inflamabilidad Baja, es la concentración mínima de refrigerante que es capaz de propagar una llama, a través de una mezcla homogénea de refrigerante y aire, bajo ciertas condiciones de prueba.

En la tabla 12.17, se resume una comparación del sistema actual de clasificación de refrigerantes con el sistema anterior, de acuerdo a la norma ANSI/ASHRAE 34.

9. No Debe Tener Efecto Sobre Otros Materiales

Los materiales empleados en la construcción de equipos de refrigeración, generalmente no son directamente de interés para el técnico de servicio, puesto que la elección de esos materiales la hacen los fabricantes de equipo. Sin embargo, a continuación se mencionarán los efectos de algunos refrigerantes sobre varios materiales representativos, tales como metales, plásticos y elastómeros.

Compatibilidad con Metales. Debe seleccionarse un refrigerante que no tenga ningún efecto sobre los metales. Algunos refrigerantes, afortunadamente muy pocos, bajo ciertas condiciones, tienen efectos corrosivos sobre algunos metales o producen reacciones químicas que forman productos indeseables o contaminantes. A continuación se mencionan algunos ejemplos.

Los refrigerantes halogenados, bajo condiciones normales de operación, pueden utilizarse satisfactoriamente con la mayoría de los metales que comúnmente se usan en los sistemas de refrigeración, tales como: acero, hierro fundido, bronce, cobre, estaño, plomo y aluminio. Sin embargo, en condiciones severas de operación, como alta temperatura y en presencia de humedad, se afectan sus propiedades y reaccionan con los metales. No se recomienda utilizar refrigerantes halogenados con aluminio que contenga más del 2% de magnesio o magnesio y zinc, aún cuando la presencia de humedad sea muy pequeña.

Otras excepciones de reacciones con metales son las siguientes:

El R-717 (amoníaco) no debe utilizarse con cobre o cualquier aleación de cobre como bronce, estaño y zinc, ya que el amoníaco se combina rápida y completamente con cualquier humedad presente, provocando la corrosión de esos metales.

El R-40 (cloruro de metilo) no debe utilizarse con aluminio en cualquier forma. Se forma un gas altamente inflamable, y es grande el riesgo de explosión.

El R-764 (bióxido de azufre) en presencia de agua forma ácido sulfuroso, el cual ataca rápidamente al acero, al fierro, y en menor grado, a otros metales.

Compatibilidad con Elastómeros. Existe una variación considerable, en cuanto a los efectos producidos por los refrigerantes en los elastómeros y hules utilizados, tales como anillos "O", juntas, sellos, empaques y demás. Esto se debe a que los elastómeros contienen, además del polímero base, plastificantes y otros productos.

En la tabla 12.18, se muestran los efectos producidos en algunos elastómeros. Para medir este efecto, se sumergen muestras del material en refrigerante a temperatura ambiente, hasta conseguir la deformación (hinchamiento lineal) de equilibrio o máxima. Otros efectos, tales como extracción e hinchamiento o encogimiento permanente, son también importantes para determinar la compatibilidad de los refrigerantes con los elastómeros o plásticos, pero el hinchamiento lineal, es una muy buena indicación. En algunas circunstancias, la presencia de aceite lubricante, tenderá a alterar el efecto de refrigerante puro.

Compatibilidad con Plásticos. La mayoría de los materiales plásticos, no son afectados por los refrigerantes halogenados, por lo que se pueden utilizar en forma satisfactoria en la mayoría de las aplicaciones. Una excepción es el poliestireno, ya que algunos refrigerantes como el R-11 y el R-22, lo disuelven; el R-12 también, pero en menor grado.

En la tabla 12.19, se muestra el efecto de algunos refrigerantes sobre los plásticos más comunes.

En general, el efecto sobre los plásticos disminuye, a medida que aumenta el contenido de flúor en la molécula de los refrigerantes. Antes de utilizar algún material plástico con los refrigerantes, es conveniente realizar un ensayo de compatibilidad para una aplicación específica.

REFRIG. N°	% DE HINCHAMIENTO LINEAL A TEMP. AMBIENTE					
	Neopreno W	Buna N	Buna S	Hypalon 48	Hule Natural	Viton A
12	1	2	3	1	6	12
22	0	26	4	3	6	16
30	37	52	26	---	34	---
134a	0.7	0	1.1	0	1.3	13
502	0	7	3	2	4	10

Tabla 12.18 - Efecto de los refrigerantes líquidos sobre los elastómeros.

La resistencia del plástico a los refrigerantes, se puede ver alterada por variaciones en la estructura del polímero, agentes aglutinantes, plastificantes, temperatura, proceso de moldeado, etc.

10. Fácil de Detectar Cuando se Fuga

Todos los refrigerantes tienen una tendencia a fugarse, y cuando esto sucede, el refrigerante seleccionado debe ser fácilmente detectable.

En la actualidad, esto ya no es una deficiencia en ningún refrigerante, ya que se han desarrollado varios métodos para detectar fugas de cualquier refrigerante. Existen varios factores que determinan la tendencia de los refrigerantes a fugarse. Presión, viscosidad y densidad, son algunos de ellos. Cuando estas características son las mismas para diferentes refrigerantes, el que tiene más tendencia a fugarse, es el de menor peso molecular.

El razonamiento de por qué sucede esto, es simple. El refrigerante con mayor peso molecular, tiene moléculas más grandes. Esto significa que por una grieta de cierto tamaño, se fugaría más fácilmente un refrigerante de bajo peso molecular, que uno de mayor peso molecular.

En la tabla 12.20, se muestran los olores característicos, el peso molecular, y la raíz cuadrada del peso molecular de algunos refrigerantes. Matemáticamente, el tamaño de las moléculas de un compuesto, es proporcional a la raíz cuadrada del peso molecular. En la tabla se puede observar que el amoníaco, tiene una molécula de aproximadamente la mitad de tamaño de la del R-22. Esto significa que, en condiciones iguales de las propiedades mencionadas, se requeriría una grieta del doble de tamaño para que

REFRIG. N°	% DE HINCHAMIENTO LINEAL A TEMPERATURA AMBIENTE						
	Nylon	Acetato de Celulosa	Nitrato de Celulosa	Teflón	Polietileno	Poliestireno	Cloruro de Polivinilo
12	0	0	0	0	1	-0.1	0
22	1	---	--	1	2	---	---
30	0	D	D	0	5	D	2

Tabla 12.19 - Efecto de algunos refrigerantes sobre los plásticos.
---=no ensayado.
D=Desintegrado.

Refrigerante No.	TENDENCIA A FUGARSE		
	Olor Característico	Peso Molecular	$\sqrt{P.M.}$
12	Ligeramente Etereo	120.93	10.99
22	Ligeramente Etereo	86.48	9.30
30	Etereo Dulce	85.00	9.22
123	Ligeramente Etereo	152.95	12.37
134a	Ligeramente Etereo	102.03	10.10
170	Etereo Dulce	30.05	5.48
500	Ligeramente Etereo	99.31	9.96
502	Ligeramente Etereo	111.63	10.56
717	Picante	17.03	4.12
718	Ninguno	18.02	4.24

Tabla 12.20 - Pesos moleculares y olores característicos de algunos refrigerantes.

se fugue el R-22 que para el R-717. Esta es la razón por la que en las instalaciones de refrigeración de amoníaco, es muy común el olor, debido a la facilidad con que se fuga este refrigerante.

Un poco de olor en los refrigerantes puede ser una ventaja, ya que cualquier fuga, por muy pequeña, podría ser notada de inmediato y efectuarse la corrección de la misma, antes de perder todo el refrigerante o se haya ocasionado un daño mayor.

Aunque un olor fuerte y picante, como el de amoníaco, ayuda a indicar la presencia de una fuga, también podría ocasionar pánico en lugares públicos, o sacar a la gente de sus casas, y en general, crear problemas más importantes que la simple pérdida de refrigerante. Por lo tanto, aunque un ligero olor pudiera ser ventajoso, un refrigerante sin olor será normalmente mejor que un olor extremadamente ofensivo. La excepción a esto, son los refrigerantes que no tienen olor y son muy tóxicos, como el R-170. Algunas veces se añaden a estos compuestos algún olor irritante, como medida de precaución.

Detección de Fugas. La detección de fugas es un problema continuo, principalmente con los refrigerantes que no tienen olor apreciable, como los halogenados, pero en la actualidad se han mejorado los métodos que facilitan su detección.

Por muchos años, el personal de servicio ha usado equipo detector de fugas, al hacerle servicio a sistemas de refrigeración. Los detectores de fugas existen no sólo para señalar fugas en puntos específicos, sino también para monitorear un cuarto de máquinas entero sobre una base continua. Existen varias razones para detectar fugas, como son: conservación de los refrigerantes, protección de equipo valioso, reducción de emisiones a la atmósfera y protección de los empleados.

El método para probar fugas varía con el refrigerante utilizado. Sin embargo, todos los métodos tienen un pro-

cedimiento común: aplicar presión al sistema con nitrógeno o bióxido de carbono.

Precaución: Nunca utilice oxígeno o acetileno para desarrollar presión, al intentar detectar fugas. El oxígeno explota en la presencia de aceite. El acetileno se descompone y explota, si se presuriza arriba de 210 a 310 kPa (15 a 30 psig).

Con la precaución debida, se pueden utilizar el nitrógeno y el bióxido de carbono con seguridad, cuando se presurice un sistema para detectar fugas. La presión en el cilindro de nitrógeno, es aproximadamente 14 mega pascales MPa (2,000 psig), y en un cilindro de bióxido de carbono es de aproximadamente 6 MPa (800 psig). Cuando se pruebe de fugas con cualquiera de estos dos gases, siempre debe usarse un dispositivo reductor de presión que tenga regulador y válvula de seguridad.

Si se acumulara presión dentro de un sistema de refrigeración, éste explotaría. Muchos accidentes han sido causados por usar exceso de presión al probar de fugas.

La mayoría de los sistemas tienen una placa donde se recomienda la presión de prueba. Antes de presurizar el sistema con nitrógeno o bióxido de carbono, debe buscarse esa placa. Si no se conoce esa presión, nunca sobrepase los 1,300 kPa (170 psig) al probar parte o todo el sistema.

Al iniciar la prueba, es necesaria una presión positiva (mayor que la atmosférica) de 140 a 310 kPa (5 a 30 psig), a través de todo el circuito. Si no se encuentran fugas, entonces se prueba otra vez a la presión normal de condensación para el refrigerante utilizado, (p.e. 730 a 1,040 kPa [90 a 130 psig] para el R-12).

Es necesario revisar que no existan fugas, antes de hacer vacío a la unidad. La humedad puede entrar al sistema a través de una fuga, durante la evacuación. Si se detectan una o varias fugas, es muy importante revisar de nuevo toda la unidad completa, una vez hecha la reparación respectiva. Esto sirve para probar la reparación, y al mismo tiempo, detectar si hay fugas adicionales.

Tipos de Detectores. Las fugas en los sistemas de refrigeración, son usualmente muy pequeñas. Por lo tanto, los dispositivos detectores deben ser muy sensibles. Los detectores de fugas pueden ubicarse en dos amplias categorías: los que señalan fugas en puntos específicos y los monitores de área. Algunos de los dispositivos comúnmente empleados son: soluciones de burbujas (jabón), lámpara de haluro, detectores electrónicos, tintes fluorescentes y tintes para refrigerantes. Cada método tiene su ventaja. Antes de comprar cualquiera de ellos, deberán considerarse varios criterios instrumentales, incluyendo la sensibilidad, los límites de detección y la selectividad.

Usando la selectividad como criterio, los detectores de fugas pueden ubicarse en una de tres categorías: no selectivos, selectivos de halógeno o específicos com-

puestos. En general, mientras más específico es el detector, es más complejo y más caro.

Los detectores no selectivos, son aquellos que detectan cualquier tipo de fuga o vapor presente, sin importar su composición química. Típicamente, estos detectores son simples de usar, muy robustos, no son costosos y casi siempre portátiles. Sin embargo, su incapacidad para ser calibrados, su falta de selectividad y su falta de sensibilidad, limitan su uso a monitoreo de área.

Los detectores selectivos de halógeno utilizan un sensor especializado, que les permite detectar compuestos que contienen flúor, cloro, bromo y yodo, sin interferencia de otros compuestos. La mayor ventaja de estos detectores, es la reducción en el número de las molestas "falsas alarmas", causadas por la presencia de compuestos en el área, diferentes a los del objetivo.

Estos detectores típicamente son fáciles de usar, y tienen una mayor sensibilidad que los anteriores. Los límites de detección típicamente son: menos de 5 ppm cuando se usan como monitores de área, y menos de 1.4 g/año (0.05 oz/año) cuando se usan como detectores en puntos específicos. Son muy durables, y además, pueden ser calibrados fácilmente.

Los detectores específicos compuestos son los más complejos y también los más costosos. Estas unidades son típicamente capaces de detectar la presencia de un solo compuesto, sin interferencia de otros compuestos.

A continuación, se describen los métodos más comúnmente utilizados para detectar fugas, y algunas precauciones que se deben tener al utilizar los detectores.

Soluciones de Burbujas. El método de burbujas para detectar fugas, es probablemente tan antiguo como la necesidad de detectar las fugas, pero aún tiene su lugar. Consiste en usar una solución jabonosa, la cual se aplica con cepillo o esponja sobre el área donde se sospecha que hay fuga. El gas que pasa a través de la solución formará burbujas.

Existen soluciones especiales patentadas y diseñadas para detectar fugas, en vez de simple jabón. Estas forman una burbuja con una película más fuerte y más durable. La solución deberá limpiarse de la tubería o conexión después de la prueba.

En algunos casos, el ensamble completo se sumerge en agua, en kerosina o en alguna otra solución especial para detectar fugas. Agregar detergente en el líquido es útil, para evitar que las burbujas se adhieran al objeto donde no puedan ser vistas con facilidad.

Para los refrigerantes hidrocarburos (como el etano o el metano), el método de burbujas es el único método práctico, ya que estos refrigerantes no tienen olor, y no se pueden detectar con la lámpara de haluro o detector electrónico.

Algunas ventajas de utilizar el método de burbujas, son la facilidad de uso, bajo costo y fácil aplicación, comparado

con la instrumentación. Una desventaja es que las fugas muy grandes, soplan a través de la solución y no aparecerán burbujas.

Tintes. Los tintes tanto de refrigerante como fluorescentes, son otra herramienta para ayudar a resolver problemas de fugas. El tinte de refrigerante dentro de un sistema, producirá un color rojo brillante en el punto de la fuga.

El refrigerante teñido de rojo (esta mezcla la prepara el fabricante de refrigerante) se introduce al sistema. Al escapar el refrigerante teñido por alguna grieta, el refrigerante se evapora y el tinte queda sobre la tubería en forma de mancha roja, muy persistente. Para asegurar una máxima detección de fugas, en la mayoría de los sistemas debe ser reemplazada la carga completa de refrigerante, por el refrigerante que contiene el tinte. La mayoría de las fugas se mostrarán en un tiempo muy corto. Sin embargo, en algunos casos será necesario esperar hasta 24 horas, debido a la proporción de circulación de aceite; ya que este método depende de la proporción con que circula el aceite.

Otro método empleado desde hace varios años, es el tinte fluorescente. Estos tintes, invisibles bajo la luz ordinaria, pero visibles bajo luz ultravioleta (UV), se utilizan para señalar fugas en los sistemas. Estos tintes comúnmente se colocan en el aceite lubricante, al momento de darle servicio al sistema. Al igual que los otros tintes, en el lugar de la fuga quedará una mancha, la cual se detecta solamente mediante la luz ultravioleta.

Antes de agregar los tintes al sistema, es recomendable asegurarse que sean compatibles con el refrigerante y el aceite.

Lámpara de Haluro. También se le conoce como antorcha o soplete de haluro. Esta ha sido utilizada durante muchos años para detectar fugas de refrigerantes halogenados.

El principio sobre el que funciona este detector es el siguiente: la mayoría de los sopletes (alcohol, propano, acetileno, etc...) arden con una flama casi incolora. Si se coloca una tira de cobre en esta flama, seguirá siendo incolora. Sin embargo, si se pone en contacto con la tira caliente de cobre aún la más pequeña cantidad de refrigerante halogenado (R-12, R-22, R-500, R-502, etc.), la flama inmediatamente tomará un color verde claro. El color se debe a la reacción entre el refrigerante descompuesto y la placa de cobre caliente, montada en el centro del quemador de la antorcha. El aire para la combustión es atraído hacia el quemador, a través de una manguera flexible. El otro extremo de la manguera está libre, y es el que se mueve a diferentes partes del sistema. Si este extremo de la manguera se coloca cerca de una fuga, algo del vapor del refrigerante fugado será succionado a través de la manguera hacia el quemador. Inmediatamente, el color de la flama se volverá verde, indicando la fuga.

La lámpara de haluro puede utilizarse con todos los refrigerantes halogenados, excepto aquellos que contie-

nen un alto porcentaje de flúor, tales como el R-13 y el R-14. Una vez adquirida la habilidad de uso, es fácil y rápida de usar, y puede detectar fugas muy pequeñas.

Puesto que la detección de fugas con la lámpara de haluro depende de la observación visual, su buen uso depende de qué tan bien pueda apreciar el operador los cambios de color. Hay indicios de que después de largos períodos de uso, el ojo se fatiga y es más difícil notar el cambio de color.

No se recomienda el uso de la lámpara de haluro para detectar fugas de refrigerantes altamente inflamables, como el R-170 (etano).

Detector Electrónico. El detector de fugas más sensible de todos, es el electrónico. Utiliza circuitos transistorizados y el abastecimiento de energía es por medio de pilas. Existen tres tipos:

1. Detector de fuentes de Iones.
2. Tipo termistor (basado en cambio de temperatura).
3. Tipo dieléctrico, mide el balance en el aire circundante, y luego responde sólo a gas halógeno.

El detector de fugas electrónico se ha vuelto el más ampliamente utilizado, tanto en el campo de servicio, como en la fabricación y ensamble de equipos.

Para ponerlo en operación, el detector se enciende y se ajusta en una atmósfera normal. Al hacer esto, el detector sólo zumba; cuando "siente" algún refrigerante halogenado (R-12, R-22, R-502, R-500, etc.) el detector lo delatará. Entonces, la sonda detectora de fugas se pasa sobre las superficies sospechosas de fugas. Si hay una fuga, por pequeña que sea, el refrigerante halogenado es atraído hacia la sonda. El detector de fugas emitirá un sonido estridente o una luz intermitente, o ambos; porque el nuevo gas cambia la resistencia en el circuito.

El principio de operación de los detectores de fugas electrónicos, está basado en la diferente conductividad de diferentes gases. En el detector del tipo de fuente de iones, el refrigerante es descompuesto a alta temperatura por un alambre de platino, y se mide el cambio de corriente debido a la ionización del refrigerante. Algunos detectores se basan en la diferencia dieléctrica de los gases.

Los gases fluyen entre las capas de un capacitor. Estos gases actúan como el dieléctrico (aislante) para cada capacitor. Las diferentes frecuencias de un oscilador indican la fuga.

Debido a la gran sensibilidad de estos detectores, se deben tener algunos cuidados, para asegurarse que no se obtengan falsas indicaciones.

1. Aunque están diseñados para usarse con refrigerantes halogenados, algunas sustan-

cias pueden interferir en la prueba, tal es el caso del alcohol y el monóxido de carbono.

2. La sensibilidad depende de la naturaleza del refrigerante; por ejemplo, el R-12 y el R-22 pueden detectarse igualmente bien. El R-11 requerirá una fuga 1.25 veces la del R-12, para la misma sensibilidad. Para el R-13, la fuga necesitaría ser más de 30 veces la del R-12.
3. Deben reducirse al mínimo las corrientes, apagando ventiladores y otros dispositivos que causen movimiento de aire.
4. Siempre coloque la punta sensora debajo de donde se sospeche que hay fuga, ya que los refrigerantes halogenados son más pesados que el aire, tendiendo a ir hacia abajo.

Al localizar fugas con el detector electrónico, se debe de mover muy lentamente la punta sensora (aproximadamente 3 cm por segundo).

El detector electrónico, al igual que la lámpara de haluro, es difícil de usar alrededor de tuberías o componentes aislados con uretano o poliestireno; ya que estos materiales se "espuman" con algunos refrigerantes halogenados (R-11 o R-12), al quedar estos atrapados en las pequeñas celdas. Al reventarse, estas celdas liberan pequeñas cantidades de refrigerante; por lo que estos dispositivos darán indicación de fuga todo el tiempo. En estos casos, es mejor usar la prueba de burbujas.

Para localizar fugas en sistemas que usan amoníaco como refrigerante, existen dos métodos: la mecha (o vela) de azufre y el papel tornasol. El más común es el primero, y no es otra cosa que una mecha impregnada de azufre, la cual prende y se mueve por donde se sospecha que hay fuga. Al arder el azufre se forma bióxido de azufre, el cual en presencia del amoníaco, produce un humo blanco muy denso, indicando la fuga. Mientras mayor sea la fuga, más blanco y más denso es el humo.

El método del papel tornasol consiste en acercar una tira húmeda de este papel, a las partes donde se sospecha que haya fuga. Como el amoníaco es extremadamente alcalino, al contacto con la tira de papel tornasol, ésta cambiará de color.

Refrigerante No.	Prueba de Burbuja	Lámpara de Haluro	Detector Electrónico	Tintes	Mecha de Azufre
12	SI	SI	SI	SI	NO
22	SI	SI	SI	SI	NO
30	SI	SI	SI	SI	NO
123	SI	SI	SI	SI	NO
134a	SI	SI	SI	SI	NO
170	SI	NO	NO	SI	NO
500	SI	SI	SI	SI	NO
502	SI	SI	SI	SI	NO
717	SI	NO	NO	NO	SI
718	SI	NO	NO	NO	NO

Tabla 12.21 - Pruebas de fugas recomendadas para algunos refrigerantes.

En la tabla 12.21, se muestran las pruebas de fugas aplicables a cada refrigerante.

11. Debe ser Miscible con el Aceite

La miscibilidad del aceite y el refrigerante, juega un papel muy importante en el diseño de los sistemas de refrigeración. La miscibilidad del aceite con el refrigerante, se puede definir como la capacidad que tienen estos para mezclarse. En el capítulo 4, "Separadores de Aceite", se explica ampliamente la miscibilidad de los refrigerantes con los aceites, tanto minerales como sintéticos.

Aunque la función del aceite es lubricar las partes móviles del compresor, no se puede evitar que algo de aceite se vaya hacia el sistema junto con el refrigerante, aun cuando se cuente con un separador de aceite. Por lo tanto, hay dos partes del sistema donde esta relación es de interés: el cárter del compresor y el evaporador.

Esta miscibilidad tiene sus ventajas y desventajas. Las principales ventajas son: la facilidad relativa para retornar el aceite al compresor, y la lubricación de diferentes partes del sistema, como válvulas. Las desventajas son: la dilución del aceite en el cárter del compresor, disminución de la transferencia de calor en el evaporador, falta de lubricación y problemas de control.

En la tabla 12.22, se muestran las relaciones de solubilidad entre un aceite mineral y los refrigerantes. Como se puede observar, algunos refrigerantes son completamente miscibles con el aceite, algunos son parcialmente solubles, y otros prácticamente son insolubles. Los ejemplos de esta tabla son soluciones que contienen un 10% en peso de aceite mineral.

A continuación, se analizarán brevemente las relaciones entre refrigerantes y aceites, en los dos puntos de interés mencionados. En el capítulo 4, "Separadores de Aceite", se mencionan con más detalle estas relaciones en todos los componentes del sistema.

Solubilidad en el Cárter. Los refrigerantes que son completamente miscibles con el aceite, como el R-12, el mayor problema es la dilución del aceite en el cárter del compresor cuando el sistema no está en operación. Puesto que la presión tiende a igualarse entre el lado de alta y el de baja, cuando el sistema no está operando, el refrigerante tiende a acumularse en el cárter. Debido a la miscibilidad, el refrigerante se disuelve en el aceite y cuando esto sucede, los cojinetes pueden no tener la lubricación suficiente por un breve período al arranque del compresor. Eventualmente, esta condición puede causar desgaste excesivo y falla de los cojinetes.

Este problema se previene reduciendo la cantidad de refrigerante en el aceite, por medio de dos métodos:

- a) Calentadores de cárter.
- b) Mediante el uso de una válvula solenoide conectada al control de baja o al termostato (pump down).

Si el refrigerante no es soluble en el aceite o es parcialmente soluble, como es el caso del R-717 y el R-22, se pueden

Refrigerante No.	Solubilidad	Separación de Dos Capas Líquidas (°C)	Posición de la Capa de Aceite
12	Miscible	-68	Arriba
22	Buena	-9	Arriba
30	Miscible	---	---
123	Miscible	---	---
134a	Pobre	---	---
170	Miscible	---	---
500	Miscible	---	Arriba
502	Regular	82	Arriba
717	No	---	Abajo
718	No	---	Abajo

Tabla 12.22 - Relaciones entre un aceite mineral y algunos refrigerantes.

formar dos capas en el cárter cuando el sistema no está operando. Con los refrigerantes pesados como el R-22, la capa de aceite estará arriba, mientras que con los ligeros como el amoníaco, la capa de aceite estará abajo. Puesto que la capa de aceite no contiene mucho refrigerante, sus propiedades lubricantes no cambian significativamente. Aunque en el fondo esté la capa de refrigerante líquido rodeando los cojinetes, generalmente a éstos les queda suficiente aceite para darles una lubricación adecuada durante el arranque, hasta que se obtengan las condiciones normales de operación.

Las temperaturas a las que se forman dos capas líquidas son diferentes para cada refrigerante, como se muestra en la tabla 12.22. La temperatura de separación, depende también de la clase y cantidad de aceite. Por ejemplo, con una mezcla de 90% refrigerante 22 y 10% de aceite mineral, están presentes dos capas líquidas a temperaturas menores a -9°C. Cuando el aceite aumenta a 18%, la temperatura de separación es de 1°C. A concentraciones más altas de aceite, la temperatura disminuye de tal manera, que la separación se lleva a cabo a -40°C o menos, cuando está presente un 70% de aceite. Por esta razón, es muy poco probable que se presenten dos capas líquidas en el cárter cuando se usa R-22.

Solubilidad en el Evaporador. En el evaporador las temperaturas son, por supuesto, más bajas que en el cárter; y la concentración de aceite es, relativamente más baja. Bajo estas condiciones, el factor importante es la viscosidad del aceite. Esto es importante porque un aceite demasiado viscoso, es difícil de remover del evaporador; mientras que un aceite demasiado ligero es fácilmente "arrastrado" por el refrigerante, fuera del evaporador. Cuando el refrigerante se disuelve en el aceite, se reduce la viscosidad. Por lo tanto, como regla general, cuando la solubilidad del refrigerante en el aceite es alta, el aceite tiende a ser removido más fácilmente del evaporador. El diseño del evaporador y las dimensiones de la tubería, son también factores importantes para ayudar al aceite a salir del evaporador.

12. No Debe Reaccionar con la Humedad

Todos los refrigerantes absorben humedad en cantidades variables. En un sistema de refrigeración, esta cantidad debe mantenerse por debajo del límite máximo permisible, para que pueda operar satisfactoriamente. Por lo tanto, es imperativo que se elimine la humedad de los componentes del sistema durante su manufactura, y que se tomen precauciones para evitar que entre al sistema, durante las operaciones de instalación o de servicio. Los refrigerantes y los aceites son abastecidos por los fabricantes, con límites muy bajos de humedad. Se debe hacer un gran esfuerzo por mantener la humedad fuera de los sistemas de refrigeración, por dos principales razones:

1. El exceso de humedad, como el "agua libre", puede congelarse a bajas temperaturas y restringir o detener el paso de refrigerante, a través de la válvula de termo expansión o del tubo capilar.
2. El exceso de agua puede reaccionar con el refrigerante formando ácidos corrosivos, los cuales causarán atascamientos, corrosión, quemaduras del motorcompresor, y en general, deterioro del sistema de refrigeración.

En el capítulo 1, "Filtros Deshidratadores", viene más información sobre la solubilidad del agua en los refrigerantes, y los problemas que causa en los sistemas de refrigeración.

La tabla 12.23, muestra la solubilidad del agua en fase líquida para algunos refrigerantes. El R-170 (etano) no está indicado porque por ser un hidrocarburo, para efectos prácticos, no absorbe agua; es decir, el agua no es soluble en este refrigerante, por lo que el agua está normalmente "suelta", congelándose en los puntos de baja temperatura. El R-717 (amoníaco) es miscible con el agua en todas las proporciones y a todas las temperaturas, por lo que no es problema la formación de hielo.

En la mayoría de los demás refrigerantes, la solubilidad con el agua es baja, especialmente a bajas temperaturas. Si en un refrigerante hay más agua de la que puede tener en solución a temperaturas por abajo de 0°C, se formará hielo y éste puede depositarse en las válvulas de expansión

o tubos capilares. Se puede ver que este problema es más serio para el R-12 y menos serio para el R-22 y el R-134a, ya que, por ejemplo, a -10°C, el R-134a puede contener disueltas 476 ppm y el R-12 sólo puede tener 14 ppm.

El agua por sí sola, puede causar corrosión de las partes metálicas de un sistema de refrigeración, especialmente si algo de aire está presente. Se puede formar moho e incrustaciones, y emigrar a partes del sistema donde su presencia causará problemas. Cuando hay exceso de agua en un sistema de amoníaco, se forma una base fuerte, la cual puede afectar el aislamiento, las juntas, empaques y otras partes no metálicas del sistema.

Con los refrigerantes halogenados, el agua puede formar ácidos mediante una reacción llamada hidrólisis, principalmente ácido clorhídrico. Estos ácidos pueden corroer los metales y atacar el aislamiento del devanado del motorcompresor. Normalmente, esta hidrólisis es muy lenta y se vuelve más seria si hay presente agua suelta. También, las altas temperaturas de operación aceleran la reacción.

Desde cualquier punto de vista, la presencia de agua en un sistema de refrigeración es indeseable.

13. Debe Ser un Compuesto Estable

En sistemas normales que estén razonablemente limpios y secos, la estabilidad del refrigerante no es un problema. La mayoría de los refrigerantes tienen una estabilidad adecuada para las aplicaciones donde se utilizan. Las temperaturas máximas recomendadas de exposición para diferentes refrigerantes, aparecen en la tabla 12.24. Se supone que el cobre, el acero y el aceite lubricante siempre están presentes en el sistema. Estas temperaturas límite se basan en la prueba de tubo sellado (ver capítulo 10 "Aceites"). De cualquier manera, son una buena guía para la operación de los equipos de refrigeración. Si no se exceden estos límites, el sistema debe operar satisfactoriamente por muchos años, en lo que al refrigerante concierne. Bajo condiciones anormales, habiendo presente excesivas cantidades de humedad, aire y quizá otros materiales extraños, las temperaturas de la tabla 12.24 pueden ser muy altas. Cuando esto ocurre,

pueden resultar problemas operacionales, aún a temperaturas más bajas.

El amoníaco es un refrigerante estable bajo condiciones normales de operación, aun cuando las temperaturas de descarga del compresor, sean generalmente, más altas que las de los refrigerantes halogenados.

Mezclas de Refrigerantes

Por muchos años ha habido interés por el uso de refrigerantes mezclados, tanto en estudios de calorímetros como en pruebas en el campo. Cuando se consi-

Refrigerante No.	TEMPERATURA °C								
	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
12	1.7	3.5	7	14	26	45	74	118	178
22	120	186	280	423	603	830	1,120	1,480	1,900
134a	193	262	343	476	596	772	978	1,227	1,467
500	48	77	117	179	256	360	493	655	850
502	40	65	104	160	239	339	472	649	860
717	SOLUBLE EN TODAS PROPORCIONES								

Tabla 12.23 - Solubilidad del agua en refrigerantes líquidos, en ppm en peso.

REFRIG. No.	Temperatura Máxima para Exposición Continua en Presencia de Aceite, Acero y Cobre
12	120
22	135 a 150
500	120
502	135 a 150

Tabla 12.24 - Estabilidad térmica de algunos refrigerantes.

dera este tema, surgen una cantidad de preguntas. ¿Es seguro mezclar refrigerantes? ¿Cuáles son las ventajas y desventajas? ¿Cuándo pueden usarse las mezclas? ¿Cómo se afecta el funcionamiento del refrigerante? ¿Cómo cambiará la solubilidad del aceite? Estas y otras preguntas similares, en términos generales, no pueden ser totalmente contestadas. Cada mezcla propuesta debe ser examinada en detalle.

Obviamente, los refrigerantes que se mezclan deben ser compatibles entre sí; es decir, no deben tener efectos químicos uno sobre otro, ni inmediatamente ni por un largo período. Con los refrigerantes halogenados, los cuales por su naturaleza son todos similares, esto no es un problema. En sistemas herméticos, la mezcla no debe tener ningún efecto sobre el aislamiento eléctrico. Deberá tener suficiente estabilidad para dar años de operación libre de problemas. Como con cualquier otro refrigerante, una mezcla se desempeña mejor en el equipo que ha sido diseñado para ella.

Cuando se mezclan dos o más compuestos diferentes, los cuales se utilizan individualmente como refrigerantes, se pueden formar dos tipos de soluciones: una mezcla zeotrópica (o mezcla simple) o una mezcla azeotrópica. Ambos tipos de mezclas pueden operar en equipos de refrigeración, aunque las mezclas azeotrópicas tienen ciertas ventajas.

Un compuesto puro, tal como el R-134a, tiene una sola curva que define sus relaciones de presión y temperatura de saturación. Las mezclas azeotrópicas, tales como el R-502 y el R-507, también tienen una sola relación de presión-temperatura, igual que un solo compuesto puro. Las mezclas zeotrópicas se comportan un poco diferente, como se explicará a continuación.

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. La palabra zeótropo se deriva de las palabras griegas *zein* = hervir, y *tropos* = cambiar.

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. La temperatura a la cual empieza a hervir el líquido (líquido saturado), se le conoce *punto de burbuja*. La temperatura a la cual se evapora la última gota de líquido (vapor saturado), se le llama *punto de rocío*. A una misma presión, la temperatura del punto de burbuja es más baja que la del punto de rocío para cualquier mezcla zeotrópica. A este fenómeno se le conoce como "*deslizamiento de temperatura*". En la figura 12.25 se muestra la composición del R-401A, durante su ebullición. Este es una mezcla zeotrópica formada por R-22 (53%), R-152a (13%) y R-124 (34%).

Este deslizamiento de temperatura también ocurre en el condensador, pero aquí, la temperatura de condensación disminuye en lugar de aumentar. El inicio de la condensación es en su punto de rocío, cuando todo el vapor se ha condensado, este es el punto de burbuja.

El deslizamiento de temperatura puede variar, dependiendo de la mezcla, desde 1° ó 2 °C hasta varias decenas de grados centígrados. Cuando una mezcla tiene un deslizamiento menor, que no conduce a errores consecuentes en el cálculo para una aplicación en un sistema de refrigeración, se le llama "*mezcla casi azeotrópica*".

De 1990 a la fecha, los fabricantes de refrigerantes han desarrollado más mezclas zeotrópicas de las que existían, hasta antes de dicho año. Estas mezclas son transitorias y se desarrollaron para substituir a los refrigerantes HCFC's, tales como el R-12, el R-22 y el R-502. Estos últimos van a dejar de fabricarse y usarse alrededor del año 2030. Estas mezclas ya se encuentran disponibles comercialmente, y algunas se van a quedar permanentemente como reemplazos para el R-22 y el R-502.

A las mezclas zeotrópicas comerciales, se les debe asignar un número de identificación en la serie 400. Este número indica qué componentes se encuentran en la mezcla, pero no el porcentaje de cada uno de ellos. La cantidad se designa como se muestra en la figura 12.3.

% en Peso Hervido	Composición del Líquido (% en Peso)		
	R-22	R-152a	R-124
0	53.0	13.0	34.0
20	46.6	13.2	40.2
40	37.3	13.6	49.1
60	27.5	13.7	58.8
80	13.8	12.5	73.7
98	0	2.5	97.5

Tabla 12.25 - Cambio en la composición del R-404A durante la ebullición a 20°C.

Mezclas Azeotrópicas. Se llama así a las mezclas de dos o más componentes de diferente volatilidad, las cuales, al ser utilizadas en un sistema de refrigeración, NO cambian su composición ni su temperatura de saturación al hervir en el evaporador, o se condensan a una presión constante.

La composición del líquido es la misma que la del vapor. Las mezclas azeotrópicas pueden inclusive ser destiladas, sin que cambie su composición. El prefijo "a" antes de la palabra *zeótropo*, es de raíz latina, y significa una negación, por lo que la palabra azeótropo se puede interpretar como que "no cambia al hervir".

Al combinar los componentes, la mezcla resultante se comporta en muchas maneras, como si fuera un solo refrigerante puro, con una sola temperatura de saturación correspondiente a una presión dada.

Generalmente el punto de ebullición resultante de una mezcla azeotrópica, es menor o igual que el del componente con el más bajo punto de ebullición, como se puede ver en la tabla de la figura 12.26. En esta tabla, se muestran algunos ejemplos de mezclas azeotrópicas, la mayoría de las cuales no tienen importancia comercial, y en algunos casos, incluyen materiales tóxicos o inflamables. Las mezclas que contienen refrigerantes clorofluorocarbonos (CFC) como R-12, R-114, R-115, etc... van a desaparecer ya que estos refrigerantes CFC se dejaron de utilizar a fines del año 1995. Las mezclas que contienen refrigerantes hidroc fluorocarbonos (HCFC) como el R-22, R-23, R-152a, R-143a, R-125, etc. van a permanecer un poco más tiempo en el mercado, puesto que estos refrigerantes están programados para defasamiento para el año 2030 o antes.

Algunos fabricantes de refrigerantes se han adelantado al defasamiento, y han desarrollado mezclas a base de hidrof luorocarbonos (HFC), los cuales no dañan la capa de ozono. Estas mezclas surgieron como alternativas para los HCFC's, tales como el R-22, el R-502 y el R-503 y algunos se van a quedar en forma permanente. Tal es el caso del R-507, el cual es una mezcla azeotrópica con 50% de R-125 y 50% de R-134a, y sustituye al R-22 o al R-502 en aplicaciones de media y baja temperatura.

A las mezclas azeotrópicas que se comercialicen, deberá asignárseles un número de identificación progresiva de la serie 500, como se muestra en la figura 12.26.

Ventajas de los Azeótropos como Refrigerantes. Ambas mezclas, las zeotrópicas y las azeotrópicas, pueden usarse como refrigerantes. En sistemas con evaporador tipo "seco" o de expansión directa, la mezcla completa se evapora antes de salir del evaporador. La composición permanece igual a través de todo el ciclo de refrigeración, y ambas mezclas pueden utilizarse bajo estas condiciones. En sistemas con evaporadores de tipo "inundado", una mezcla azeotrópica tendrá la ventaja de composición

constante durante la evaporación. Con las mezclas zeotrópicas, es probable que el líquido en el evaporador sea mucho más rico en el componente de más alto punto de ebullición.

Otra ventaja es el bajo punto de ebullición del azeótropo, lo que significa temperaturas de evaporación más bajas y con frecuencia, mayor capacidad. Por ejemplo, el R-500 tiene un 20% más de capacidad que el R-12 cuando se utiliza en las mismas condiciones, con el mismo propósito y con el mismo tamaño de motor.

Los refrigerantes de mezclas azeotrópicas más empleadas comercialmente, son el R-500, el R-502, el R-503 y el R-507. Estos son refrigerantes patentados y el proceso de fabricación es bastante complejo, por lo que los técnicos de servicio no deben intentar nunca hacer sus propias mezclas.

DESIGNACION DEL AZEOTROPO	REFRIG.	PUNTO DE EBULLICION °C	% EN PESO	PUNTO DE EBULLICION DEL AZEOTROPO
R-500	R-12	-30	73.8	-33
	R-152a	-25	26.2	
R-501	R-12	-30	75	-41
	R-22	-41	25	
R-502	R-22	-41	48.8	-45
	R-115	-39	51.2	
R-503	R-23	-82	40.1	-88
	R-13	-81	59.9	
R-504	R-32	-52	48.2	-57
	R-115	-39	51.8	
R-505	R-12	-30	78	-30
	R-31	-9	22	
R-506	R-31	-9	55.1	-12
	R-114	4	44.9	
R-507	R-125	-49	50	-46.7
	R-143a	-47	50	
SIN NUMERO	R-22	-41	68	-45
	R-290	-42	32	
SIN NUMERO	R-114	4	59	-2
	R-600	0	41	
SIN NUMERO	R-12	-30	73	-35
	R-40	-24	27	

Tabla 12.26 - Ejemplos de azeótropos.

Código de Colores para los Cilindros de Refrigerantes

Los contenedores utilizados para el manejo de refrigerantes ya sea a granel, en tambores, latas o cilindros retornables o desechables, se codifican con algún color. Hace algunas décadas no había unificación de colores por parte de los fabricantes de refrigerantes. Posteriormente, se estandarizó un código de colores adoptado mundialmente por los fabricantes, aunque no era un método oficialmente

reconocido para identificar el contenido del cilindro, como sucedía con otros gases industriales, tales como el nitrógeno, el acetileno, el oxígeno, etc.

En años recientes, con el surgimiento de una gran cantidad de nuevos refrigerantes para reemplazar a los CFC's y algunos HCFC's, la codificación de colores no se hace arbitrariamente. La mayoría de los fabricantes se apegan a los lineamientos establecidos por el ARI (Air Conditioning and Refrigeration Institute), para la asignación de colores a los contenedores de refrigerantes.

Esta codificación, permite a los técnicos y contratistas identificar rápida y fácilmente el refrigerante, por el color del contenedor, evitando mezclar accidentalmente diferentes refrigerantes en un sistema. Pero siempre se debe leer la etiqueta e identificar el contenido, antes de utilizarlo. A continuación, en la figura 12.27, se muestra una lista de los refrigerantes más populares que incluye algunos que ya están descontinuados, y también algunos de los nuevos.

REFRIG. Nº	COLOR	PMS *
R-11	NARANJA	021
R-12	BLANCO	---
R-13	AZUL CLARO / BANDA AZUL OSCURO	2975
R-22	VERDE	352
R-123	GRIS CLARO (PLATA)	428
R-134a	AZUL CLARO (CELESTE)	2975
R-401A (MP-39)	ROJO-ROSADO (CORAL)	177
R-401B (MP-66)	AMARILLO-CAFE (MOSTAZA)	124
R-402A (HP-80)	CAFE CLARO (ARENA)	461
R-402B (HP-81)	VERDE ACEITUNA	385
R-404A (HP-62)	NARANJA	021
R-407C (AC-9000)	GRIS	---
R-500	AMARILLO	109
R-502	MORADO CLARO (ORQUIDEA)	251
R-503	AZUL-VERDE (ACQUA)	3268
R-507 (AZ-50)	MARRON	167
R-717	PLATA	877

* Sistema comparativo PANTONE.

Tabla 12.27 - Código de colores para los contenedores de algunos refrigerantes comunes.

Refrigerantes Alternos

REFRIG. ANTERIOR	REFRIGERANTE SUBSTITUTO				LUBRICANTE	APLICACION TIPICA	REEMPLAZO		
	NO. DE ASHRAE	NOMBRE COMERCIAL	FABRICANTE	TIPO			INTERINO	LARGO PLAZO	
R-11	R-123	Suva Centri-LP Genetrón 123 Forane-123	DuPont Quimobásicos Elf Atochem	Compuesto Puro	Alquil Benceno o Aceite Mineral	*Enfriadores de Agua con Compresores Centrifugos.		X	
R-12	R-134a	Suva Cold MP	DuPont	Compuesto Puro	Poliol Ester	*Equipos Nuevos y Reacondicionamientos. *Refrigeración Doméstica y Comercial (Temp. de Evaporación arriba de -7 °C). *Aire Acond. Residencial y Comercial.		X	
		Genetrón 134a	Quimobásicos						
		Forane 134a	Elf Atochem						
		Klea 134a	ICI						
	R-401A	Suva MP39	DuPont	Mezclas Zeotrópicas (Blends)	Alquil Benceno	*Reacondicionamientos en Refrigeración Comercial (arriba de -23 °C).	X		
		Genetrón MP39	Quimobásicos			*Reacondicionamientos en Refrigeración Comercial (abajo de -23 °C). *Transportes Refrigerados.	X		
Suva MP66		DuPont	*Reacondicionamientos.			X			
R-401B	Genetrón MP66	Quimobásicos							
R-409A	Genetrón 409A	Quimobásicos							
	FX-56	Elf Atochem							
R-13	Sin	Suva 95	DuPont	Mezcla Azeot.	Poliol Ester	*Muy Baja Temperatura		X	
R-22	R-410A	Genetrón AZ-20	Quimobásicos	Mezclas Azeotrópicas	Poliol Ester	*Sistemas Unitarios de Aire Acondicionado.		X	
	R-410B	Suva 9100	DuPont		Poliol Ester			X	
	R-407C	Suva 9000	DuPont	Mezcla Zeotrópica (Blend)	Poliol Ester	*Aire Acondicionado Residencial y Comercial. *Bombas de Calor. (Equipos Nuevos y Reacondicionamientos).		X	
		Genetrón 407C	Quimobásicos						
		Klea 66	ICI						
R-507	Genetrón AZ-50	Quimobásicos	Azeótropo	Poliol Ester	*Refrigeración Comercial (Temp. Media y Baja).		X		
R-502	R-402A	Suva HP80	DuPont	Mezclas Zeotrópicas (Blends)	Alquil Benceno	*Refrigeración Comercial (Temp. Media y Baja). (Principalmente en Reacondicionamientos).	X		
		Genetrón HP80	Quimobásicos						
	R-402B	Suva HP81	DuPont		Alquil Benceno	*Máquinas de Hielo y Otros Equipos Compactos.	X		
	R-404A	Suva HP-62	DuPont		Poliol Ester	*Refrigeración Comercial (Temp. Media y Baja). (Equipos Nuevos y Reacondicionamientos).		X	
		Genetrón 404A	Quimobásicos						
		FX-70	Elf Atochem						
	R-407A	Klea 60	ICI		Poliol Ester			X	
	R-408A	FX-10	Elf Atochem		Alquil Benceno			X	
R-507	Genetrón AZ-50	Quimobásicos	Azeótropo	Poliol Ester			X		

Tabla 12.28 - Guía de aplicaciones de algunos refrigerantes sustitutos que ya están disponibles comercialmente.