



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

MONTAJE DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN MECÁNICO POR COMPRESIÓN DE AMONIACO CON UNA CAPACIDAD DE 33 TONELADAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADO PARA ABSORBER EL CALOR DE LA SOLUCIÓN QUE SE USA EN LA ELABORACIÓN DE BEBIDAS GASEOSAS DE LA EMPRESA TROPIC, S.A.

WISTON TUQUER HERNÁNDEZ

Asesorado por: Ing. Pedro Enrique Kubes Zac

Guatemala, marzo de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



MONTAJE DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN MECÁNICO POR COMPRESIÓN DE AMONIACO CON UNA CAPACIDAD DE 33 TONELADAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADO PARA ABSORBER EL CALOR DE LA SOLUCIÓN QUE SE USA EN LA ELABORACIÓN DE BEBIDAS GASEOSAS DE LA EMPRESA TROPIC, S.A.

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WISTON TUQUER HERNÁNDEZ

ASESORADO POR: ING. PEDRO ENRIQUE KUBES ZACEK

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, MARZO DE 2005

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexánder Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño
EXAMINADOR	Ing. Herbert Antonio Mendoza

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

MONTAJE DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN MECÁNICO POR COMPRESIÓN DE AMONIACO CON UNA CAPACIDAD DE 33 TONELADAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADO PARA ABSORBER EL CALOR DE LA SOLUCIÓN QUE SE USA EN LA ELABORACIÓN DE BEBIDAS GASEOSAS DE LA EMPRESA TROPIC, S.A.

Tema que me fuera asignado por la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Mecánica con fecha 26 de junio de 2000.

WISTON TUQUER HERNÁNDEZ

ACTO QUE DEDICO

A Dios

Ya que gracias a su gran bondad todo es posible.

Mi padre

Andres Tuquer Canel

Por su esfuerzo y apoyo incondicional que nunca me faltó.

Mi madre

Adriana Hernández

Quien me dio aliento y fuerzas para seguir adelante en los momentos más difíciles.

Mis abuelos

Amelia Patzán Canel (q.e.p.d.)

Quien sentó las bases para que mi éxito fuera posible.

Esteban Tuquer (q.e.p.d.)

Juan Francisco López (q.e.p.d.)

Quienes fueron mi inspiración para triunfar.

Luz Hernández.

Que siempre me ha dado su cariño.

AGRADECIMIENTOS A

La Empresa TROPIC, S.A.

Por su colaboración en el desarrollo de este trabajo y en especial a Luis Sajquin de León.

Mi asesor de trabajo de graduación Ing. Pedro Enrique Kubes Zacek por su valioso aporte y dedicación en la asesoría para la elaboración de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XII
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XIV
1 CICLO DE REFRIGERACIÓN	
1.1 Diagrama presión- entalpía	1
1.1.1 Efecto de refrigeración	3
1.1.2 Diagramas de ciclo	8
1.1.3 Procesos de refrigeración	10
1.1.4 Coeficiente de operación	15
1.1.5 Efectos sobre la capacidad	16
1.2 Refrigerante (amoniaco)	25
1.2.1 Definición	25
1.2.2 Inflamabilidad y explosividad	26
1.2.3 Toxicidad	27
1.2.4 Presión y temperatura crítica	28
1.2.5 Propiedades físicas	29
1.3 Temperatura de saturación de refrigerante	32
1.4 Evaporación del refrigerante	33
1.5 Condensación del refrigerante	33

1.6 Relación aceite-refrigerante	33
1.7 Ciclo de refrigeración mecánico por compresión	34
1.8 Calor de compresión	36
2. COMPONENTE PRINCIPALES DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN	39
2.1 Compresor	39
2.1.1 Descripción	42
2.1.2 Operación	43
2.1.3 Características	45
2.1.4 Sistema de lubricación	46
2.1.5 Detalles del compresor	50
2.2 Condensador	52
2.2.1 Descripción	57
2.2.2 Operación	58
2.2.3 Características	59
2.2.4 Sistema de enfriamiento	60
2.2.5 Detalles del condensador	61
2.3 Válvula de expansión	65
2.3.1 Características	66
2.4 Evaporador	68
2.4.1 Descripción	72
2.4.2 Operación	73
2.4.3 Características	75
2.4.4 Detalles del evaporador	75
2.5 Tuberías, conexiones y accesorios	77
2.5.1 Depósito de refrigerante líquido	81
2.5.2 Depósito de refrigerante del lado de baja	82

2.5.3 Trampas de aceite, visores y filtros	84
2.5.3.1 Trampa de aceite o separador de aceite	84
2.5.3.2 Visores o mirillas	86
2.5.3.3 Válvula solenoide	88
2.5.3.4 Filtro contra humedad	90
3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL MONTAJE E INSTALACIÓN	
DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN	93
3.1 Campo de trabajo	93
3.1.1 Diseño y aplicación	93
3.2 Materiales para tubería de refrigeración	95
3.3 Recepción y manejo del equipo	95
3.3.1 Registro e identificación del sistema	95
3.4 Instalación de tubería de refrigeración	96
3.5 Instalación de accesorios	97
3.6 Instalación de drenajes	97
3.7 Instalación eléctrica	98
3.8 Esquema de distribución del equipo	98
4. MONTAJE DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN	101
4.1 Montaje del compresor	101
4.1.1 Cálculo de carga y vibración	102
4.1.1.1 Carga sobre el suelo	103
4.1.1.2 Cálculos	104
4.1.1.3 Cálculo de vibraciones	106
4.1.2 Pasos para la cimentación y anclaje	107
4.1.2.1 Base de hormigón	108
4.2 Montaje de la unidad condensadora	110

4.2.1 Cálculo de carga y vibración	110
4.2.2 Cálculo para el anclaje	111
4.3 Montaje del depósito de líquido de refrigeración	111
4.3.1 Pasos para la colocación y anclaje	111
4.4 Montaje de la unidad evaporadora	112
4.4.1 Pasos para la colocación	112
4.5 Instalación de tubería y accesorios	112
4.6 Instalación eléctrica	114
4.7 Carga de refrigerante	115
4.8 Carga de lubricante	117
4.9 Verificación final	118
4.10 Arranque y puesta en marcha	118
4.11 Cuadro de diagnóstico de fallas	119
4.12 Seguridad	125
CONCLUSIONES	129
RECOMENDACIONES	131
REFERENCIAS	133
BIBLIOGRAFÍA	135
APÉNDICE	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagrama presión-entalpía para el R-12	2
2	Esquema de un ciclo simple de refrigeración	4
3	Diagrama presión-entalpía que muestra el ciclo de refrigeración	10
4	Fases del ciclo de refrigeración saturado simple	13
5	Diagrama de ciclo de refrigeración saturado simple a 20 °F de temperatura de saturación	17
6	Diagrama de ciclo de refrigeración saturado simple a una temperatura de condensación de 120 °F	19
7	Diagrama de ciclo de refrigeración saturado simple a una temperatura de condensación de 120 °F pero con un subenfriamiento	21
8	Diagrama de flujo del sistema de refrigeración R-12	23
9	Tipos de compresores usados en un sistema de refrigeración de compresión de vapor	41
10	Diagrama de cómo actúan las presiones diferenciales en las válvulas del compresor alternativo	43
11	Compresor de refrigeración que va a ser instalado	50
12	Partes principales del compresor que va a ser instalado	51
13	Condensadores de concha y tubos	53
14	Condensador de doble tubo	54
15	Condensador evaporativo	55
16	Condensador enfriado por aire para instalación en exteriores	56
17	Funcionamiento y partes principales de condensador evaporativo	62

18	Esquema de condensador evaporativo (vista lateral)	63
19	Esquema de condensador evaporativo (vista frontal y superior)	64
20	Válvula de expansión con su válvula solenoide	67
21	Funcionamiento de la válvula de expansión	67
22	Evaporador de tubo desnudo	69
23	Aletas planas que se le agregan al tubo	70
24	Evaporador de serpentín de placas	72
25	Esquema de gabinete de enfriamiento	76
26	Esquema de evaporador de placas (vista frontal)	77
27	Tuberías de refrigerante	79
28	Método de medir <i>tubing</i> y tubo estándar	80
29	Depósito de refrigerante líquido	82
30	Depósito de refrigerante del lado de baja	83
31	Separador de aceite	85
32	Visor o mirilla de flujo	86
33	Visor e indicador de humedad	87
34	Válvula solenoide	89
35	Filtro contra humedad (colador-secador)	90
36	Esquema de equipo de refrigeración mecánica por compresión de amoníaco	99
37	Esquema de unidad compresora	102
38	Base de soporte de unidad compresora	105
39	Caucho en base de soporte de unidad compresora	107
40	Profundidad de los cimientos	108
41	Carga de amoníaco en un sistema grande entre la válvula King y la válvula de expansión	116

TABLAS

I	Clasificación de toxicidad de los refrigerantes	28
II	Temperatura de evaporación	94
III	Peso de algunos líquidos	103
IV	Capacidad de carga de algunos materiales	103
V	Problemas comunes de un sistema de refrigeración	120
VI	Límites de exposición y concentración de amoníaco para seguridad del personal	126
VII	Refrigerante 12	139

LISTA DE SÍMBOLOS

Btu	Unidad térmica británica
Btu/lb	Unidad térmica británica por libra de refrigerante
COP	Coficiente de operación de un refrigerante
h	Entalpía
lb/plg²	Libra sobre pulgada cuadrada
NER	Efecto refrigerante neto
P	Presión
W	Peso de refrigerante que circula por un sistema

GLOSARIO

Compresión adiabática	Forma de comprimir el refrigerante gaseoso sin quitar o agregar calor.
Compresor	Bomba de un mecanismo de refrigeración que succiona de un vacío o baja presión en el lado de enfriamiento del ciclo de refrigeración y descarga o comprime el gas pasándolo al lado de alta presión o de condensación del ciclo.
Condensador evaporativo	Condensador en el que se absorbe calor de la superficie por medio de la evaporación de agua, que se rocía o se añade a la superficie de dicho condensador. La evaporación de una parte del agua es la que baja la temperatura.
Diagrama mollier	Gráfica de presión, contenido de calor y propiedades térmicas de una sustancia.
Diclorodifluorometano	Refrigerante cuyo nombre común es R-12. Su fórmula química es CCl_2F_2 . La clave de color de su cilindro es blanco.
Efecto de refrigeración	Cantidad de calor en Btu/hr o cal/hr que un sistema es capaz de transferir.

Entalpía	Una propiedad que sólo se define en relación con funciones puntuales, y que a menudo encuentra útil aplicación entre ingenieros y científicos.
Entropía	Factor matemático que se usa en los cálculos de ingeniería. Define el grado de desorden de la materia en un sistema.
Evaporación	Término que se aplica al cambio de estado de un líquido a un gas. En este proceso se absorbe calor.
Evaporador	Parte de un mecanismo de refrigeración en la que el refrigerante se evapora y absorbe calor.
Líquido saturado	Es cuando un líquido se encuentra en contacto y en equilibrio térmico con su vapor.
Presión absoluta	Presión manométrica más presión atmosférica.
Presión crítica	Presión del refrigerante a la cual el líquido y el gas tienen las mismas propiedades.
Refrigeración	Proceso de transferir calor de un lugar a otro por el cambio de estado de un líquido.
Refrigerante	Sustancia empleada para transmitir calor en un sistema de refrigeración. Recoge calor por evaporación a baja presión y temperatura y lo cede condensándose a presión y temperatura más elevadas.
Temperatura	Grado de calor o frío, medido con un termómetro; es una medida de la velocidad con que se mueven las moléculas
Temperatura crítica	Temperatura a la cual un vapor y su líquido tienen las mismas propiedades.

- Tonelada de refrigeración** Efecto de refrigeración igual a la fusión de una tonelada de hielo en 24 horas. Equivale a lo siguiente: 288,000 Btu/24hrs, 12,000 Btu/hr, 200 Btu/min.
- Válvula de expansión** Tipo de control de refrigerante que mantiene una diferencia de presión entre el lado de alta y el lado de baja en un mecanismo de refrigeración. La válvula se hace trabajar mediante la presión en el lado de baja o de succión.
- Vapor saturado** Estado que ocasiona la condensación de un vapor en un líquido cuando se reduce la temperatura del vapor.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en una descripción general sobre el montaje de un equipo de refrigeración mecánico por compresión de amoníaco empleado en el proceso de fabricación de bebidas gaseosas. Hablaremos de los principios teóricos y técnicos del sistema de refrigeración por compresión de amoníaco. Después se hará una descripción de cada uno de los componentes que conforman el equipo de refrigeración por compresión de amoníaco. También se explicarán algunos factores de suma importancia para el montaje e instalación del equipo de refrigeración como el campo de trabajo, recepción y manejo del equipo, materiales para utilizar en la instalación, etc.

Al final trataremos el tema de la instalación y montaje de cada uno de los componentes del equipo de refrigeración mecánico por compresión de amoníaco. También, en este último, capítulo se encontrará una tabla con algunos problemas y las posibles causas que se pueden presentar en un equipo de refrigeración por compresión.

Debido a que el refrigerante que utiliza este sistema es amoníaco trataremos sobre la seguridad que se debe tener al trabajar con este tipo de refrigerante

OBJETIVOS

General

Hacer notar la importancia que tiene la refrigeración en los procesos industriales, así como conocer los componentes que forman parte de un equipo de refrigeración mecánico por compresión de amoníaco para trabajo pesado.

Conocer los pasos que se deben seguir para el buen montaje e instalación de cada uno de los componentes que forman parte de un equipo de refrigeración mecánico por compresión de amoníaco, así como los cálculos que son necesarios para el montaje del equipo empleando los principios, técnicas y leyes de la ingeniería mecánica.

Específicos

1. Conocer las características del diagrama presión–entalpía del ciclo de refrigeración; así como las características del refrigerante que se ha de emplear, como lo es su inflamabilidad, toxicidad, puntos críticos, etc.
2. Conocer las características de cada uno de los componentes que forman parte del equipo de refrigeración mecánico por compresión de amoníaco, como compresor, condensador, elemento de expansión y evaporador.
3. Conocer todos los factores que son necesarios para el buen montaje e instalación del equipo de refrigeración, como campo de trabajo, recepción y manejo del equipo, entre otros.
4. Conocer el montaje e instalación de cada uno de los componentes que forman parte del equipo de refrigeración, así como también la elaboración de los cálculos necesarios para el montaje de cada uno de los componentes del equipo.

INTRODUCCIÓN

La refrigeración es la ciencia de producir y mantener temperaturas por debajo de la temperatura atmosférica circundante. El calor siempre pasa del cuerpo más caliente al más frío, hasta que ambos estén a la misma temperatura. La refrigeración tiene un gran campo de aplicación, y la fabricación de bebidas gaseosas no podía ser la excepción.

El siguiente trabajo se enfoca al montaje de un equipo de refrigeración mecánico por compresión de amoníaco utilizado en el proceso de fabricación de bebidas gaseosas de la empresa Tropic S.A. El equipo que se montará es un equipo de trabajo pesado, por lo cual sus componentes son robustos.

Para lograr un montaje e instalación de buena calidad y obtener un sistema que opere satisfactoriamente es necesario conocer los componentes principales del sistema de refrigeración, las variaciones entre estos de acuerdo con la aplicación, su función en el sistema y la forma como se desarrolla el ciclo de refrigeración por compresión mecánica.

Se pretende que el presente trabajo sea tomado como una guía para conocer todos los componentes y factores que conforman un equipo de refrigeración por compresión de amoníaco, y que al momento de una falla, se pueda restablecer el sistema a su funcionamiento apropiado ya que se conoce la operación o la aplicación del dispositivo que conforma el equipo de refrigeración.

Es menos costoso conocer todo lo que sea posible sobre el funcionamiento del sistema de refrigeración y realizar las actividades necesarias para asegurar su operación adecuada, que permitir una falla y restablecerlo a su condición normal.

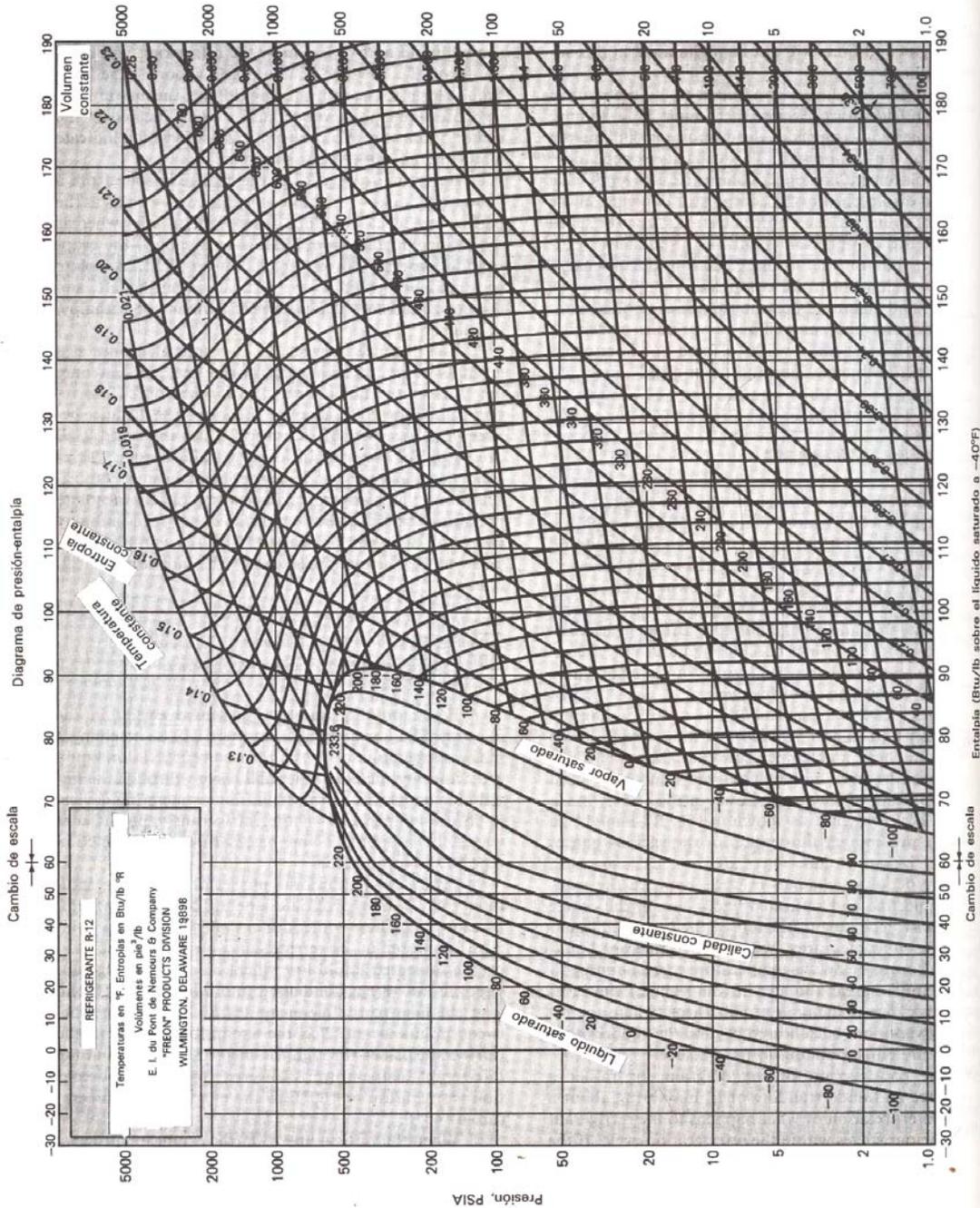
1. CICLO DE REFRIGERACIÓN

1.1 Diagrama presión-entalpía

Los diagramas presión-entalpía son importantes en cálculos de refrigeración, porque sobre estos diagramas los cambios de entalpía pueden leerse con facilidad, y tales cambios representan el calor agregado o rechazado o el trabajo recibido (en compresión adiabática). Sin embargo, el ciclo de refrigeración emplea en sí sólo dos presiones: la presión en el evaporador, asociada con la refrigeración útil, y la del condensador, asociada con la fase de disipación de calor en el ciclo. Ambas presiones se muestran con facilidad en el diagrama presión-entalpía.

En la figura 1 se muestra un diagrama presión-entalpía (ph) para el diclorodifluorometano (R 12). Las líneas claves corresponden a líquido saturado y a vapor saturado. Estas líneas se extienden hasta encontrarse en el punto crítico, el cual, para este refrigerante, está a 596.9 psi abs y 233.6 °F. La región encerrada entre las líneas de líquido y vapor saturado corresponde a la región de vapor húmedo. A la derecha de la línea de vapor saturado está la región de vapor sobrecalentado. A la izquierda de la línea de líquido saturado está la región de líquido comprimido. La condición de líquido comprimido puede ventajosamente mostrarse en este tipo de diagrama. Si la temperatura de líquido es constante no habrá cambio significativo en la entalpía del líquido comprimido, como cuando varía la presión del líquido.

Figura 1 Diagrama presión-entalpía para el R-12



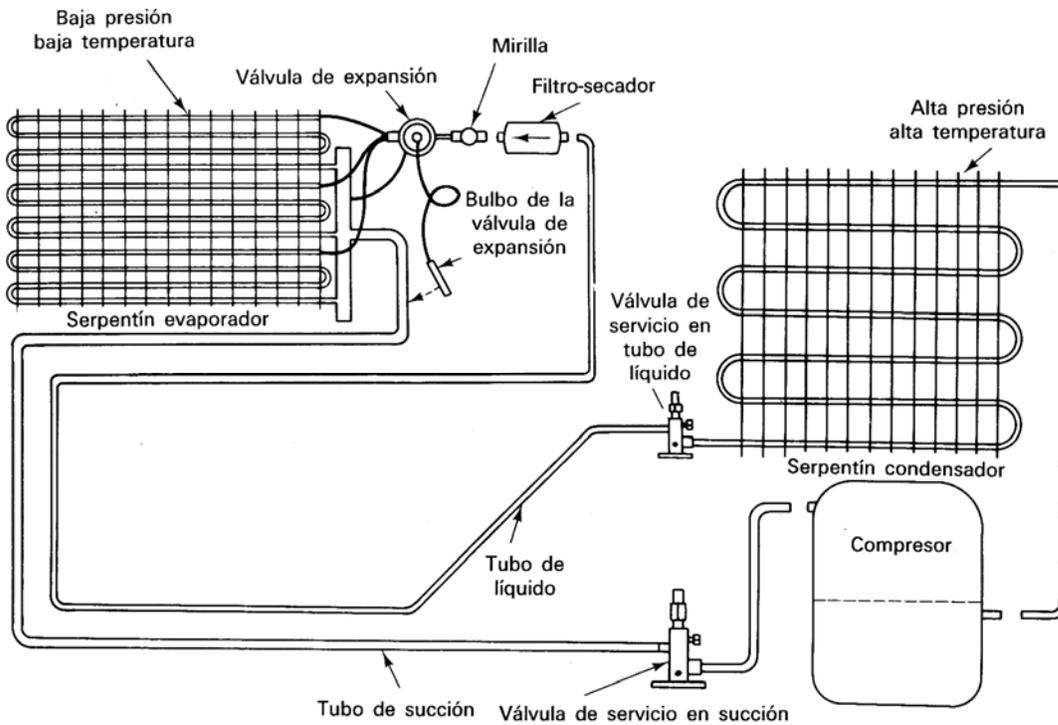
Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 90

1.1.1 Efecto de refrigeración

Si se va a llevar a cabo un trabajo específico en un sistema de refrigeración, cada libra de refrigerante que circule en el sistema debe hacer su parte del trabajo. Debe absorber una cantidad de calor en el evaporador o serpentín de enfriamiento, y disipar ese calor, y algo más que le agrega el compresor, para sacarlo por el condensador, sea enfriado por aire, por agua o evaporativo. El trabajo efectuado por cada libra de refrigerante al pasar por el evaporador se refleja en la cantidad de calor que se extrae de la carga de refrigeración, principalmente cuando el refrigerante pasa por un cambio de estado líquido a estado de vapor.

Para que un líquido pueda cambiar a vapor se debe agregar calor o debe absorberlo. Esto es lo que sucede, o debería suceder, en el serpentín de enfriamiento. El refrigerante entra a la válvula de expansión en estado líquido y pasa hacia el evaporador, donde absorbe calor al evaporarse y convertirse en gas. Como vapor, sigue su camino por el tubo de succión al compresor. En éste, se comprime pasando de un estado a baja temperatura y baja presión, a uno de vapor de alta temperatura y alta presión; a continuación pasa por el tubo de alta presión, o de descarga, al condensador, donde sufre otro cambio de estado: de vapor a líquido, y como líquido sale por el tubo de líquido y de nuevo pasa por la válvula de expansión para iniciar otro viaje por el evaporador. En la figura 2 se muestra un esquema de un ciclo sencillo de refrigeración, que describe este proceso.

Figura 2 Esquema de un ciclo simple de refrigeración



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 89

Cuando el refrigerante en estado líquido deja el condensador, puede pasar a un recipiente donde permanece hasta que se le necesite en el evaporador; o bien puede pasar en forma directa por el tubo de líquido a la válvula de expansión y después al serpentín del evaporador. El líquido que entra a la válvula de expansión inmediatamente antes del serpentín evaporador tendrá determinado contenido de calor o entalpía, que depende de su temperatura de entrada. El vapor que sale del evaporador también tendrá determinado contenido calorífico o entalpía según su temperatura.

La diferencia entre esas dos cantidades de contenido de calor es la cantidad de trabajo que hace cada libra de refrigerante al pasar por el evaporador y recoger calor allí.

La cantidad de calor absorbida por cada libra de refrigerante se llama efecto refrigerante del sistema o efecto del refrigerante dentro del sistema.

Este efecto de refrigeración se evalúa en Btu por libra de refrigerante (Btu/lb); si se conoce la carga térmica total, expresada en Btu/hora, se puede calcular el número total de libras de refrigerante que se deben circular cada hora de funcionamiento del sistema. Esta cifra se puede descomponer más en la cantidad que debe circular cada minuto dividiendo la cantidad que circula por hora entre 60.

Por ejemplo, si el calor total que se debe extraer de la carga es 60,000 Btu/hr y el efecto de refrigeración en el evaporador es igual a 50 Btu/lb, entonces:

$60,000 \text{ Btu/hr} \div 50 \text{ Btu/lb} = 1200 \text{ lb/hr}$, o sea 20 lb/min. Como 12,000 Btu/hr es igual a 1 tonelada de refrigeración, las 60,000 Btu/hr del ejemplo anterior son iguales a 5 toneladas de refrigeración, y las 20 lb de refrigerante que se deben circular cada minuto son el equivalente a 4 lb/min/ton de refrigeración (una tonelada de refrigeración durante 24 horas es igual a 288,000 Btu.).

En este ejemplo, en el que se necesitan 20 lb/min de refrigerante con un efecto de refrigeración de 50 Btu/lb para manejar la carga específica de 60,000 Btu/hr, se pueden obtener también esos resultados de otra manera. Como se mencionó antes, se necesitan 12,000 Btu/hr para igualar 1 ton de refrigeración, que es igual a su vez a 200 Btu/min/ton. Por lo tanto, al dividir 200 Btu/min/ton entre el efecto refrigerante de 50 Btu/lb se llega a 4 lb de refrigerante/min.

Este cálculo se representa mediante la ecuación: $W=200 \div NRE$
en la cual

W = peso del refrigerante circulado por minuto, lb/min/ton

200 = 200 Btu/min, el equivalente a 1 ton de refrigeración

NRE = efecto de refrigeración, Btu/lb de refrigerante.

Debido al orificio pequeño de la válvula de expansión o elemento de expansión, cuando el refrigerante comprimido pasa de la abertura pequeña del elemento de expansión al tubo de mayor diámetro del evaporador, se lleva a cabo un cambio de presión junto con un cambio de temperatura. El cambio de temperatura se efectúa debido a la evaporación de una pequeña parte, aproximadamente un 13 % del refrigerante, y en este proceso de evaporación el calor que interviene se toma del resto del refrigerante.

Otra forma de calcular el efecto de refrigeración es por medio de las tablas de las propiedades de líquido y vapor saturado de los refrigerantes. En estas tablas se muestra el contenido calorífico del refrigerante a diferentes temperaturas, así como otras propiedades que son importantes en su estado líquido y como vapor saturado. Estas propiedades son volumen, densidad, entalpía, entropía. Por ejemplo, para el refrigerante 12 se tiene la tabla de propiedades del líquido y vapor saturado (apéndice tabla VII). En esa tabla se puede observar que el contenido calorífico (entalpía) de líquido a 100 °F es 31.10 Btu/lb, y el de líquido a 40 °F es 17.27 Btu/lb. Esto indica que hay que extraer 13.83 Btu/lb de cada libra de refrigerante que entra al evaporador (esta cifra es la diferencia de las dos cantidades de entalpía).

El calor latente de evaporación del refrigerante 12 a 40 °F, según la tabla del apéndice, es 64.17 Btu/lb, y la diferencia entre esta cantidad y la que cede cada libra de refrigerante cuando disminuye la temperatura de 100 °F a 40 °F (13.83 Btu/lb) es 50.34 Btu/lb. Como se mencionó anteriormente, ésta es otra forma para calcular el efecto de refrigeración o el trabajo que efectúa cada libra de refrigerante bajo las condiciones dadas.

La capacidad del compresor debe ser tal que extraiga del evaporador la cantidad de refrigerante que se evaporó en él y en el elemento de expansión para efectuar el trabajo necesario. El compresor debe ser capaz de extraer y mandar al condensador el mismo peso de vapor de refrigerante para que se pueda condensar de nuevo al estado líquido y así pueda continuar en el circuito o ciclo de refrigeración para llevar a cabo más trabajo.

Si el compresor, debido a su diseño o velocidad, no puede sacar este peso, algo del vapor quedará en el evaporador. Éste, a su vez, originará un aumento de temperatura y una disminución del trabajo efectuado por el refrigerante, y no se mantendrán las condiciones de diseño en el espacio refrigerado. Un compresor demasiado grande extraerá el refrigerante del evaporador de modo muy rápido, originando una disminución de la temperatura en el interior del evaporador, y entonces no se mantendrán tampoco en este caso las condiciones de diseño.

Para que se mantengan las condiciones de diseño en un circuito de refrigeración debe haber un equilibrio entre las necesidades del serpentín evaporador y el compresor.

El desplazamiento medido de un compresor depende del número de cilindros, su diámetro y carrera, y de la velocidad a la que gira el compresor. La eficiencia volumétrica depende de las presiones absolutas de succión y descarga bajo las que opera el compresor

1.1.2 Diagramas de ciclo

La figura 2 muestra un esquema de diagrama de flujo de un ciclo básico de refrigeración, donde se muestran los cambios de fases y los procesos. Primero, el refrigerante pasa del estado líquido al estado gaseoso al absorber calor en el serpentín evaporador. La etapa de compresión, donde aumenta la temperatura y presión del vapor del refrigerante, sigue a continuación; después el refrigerante cede su calor en el condensador, al medio de enfriamiento, y el vapor de refrigerante se condensa de nuevo y queda listo para usarse de nuevo en el ciclo.

La figura 1 es una reproducción de un diagrama Mollier o un diagrama P-h para el refrigerante 12; se ven las características de presión, contenido de calor y temperatura de ese refrigerante. Los diagramas presión-entalpía se pueden usar para graficar el ciclo que se ve en la figura 2, pero se podría usar una gráfica básica o de cartabón como la de la figura 3, como presentación preliminar de las diversas fases del circuito del refrigerante.

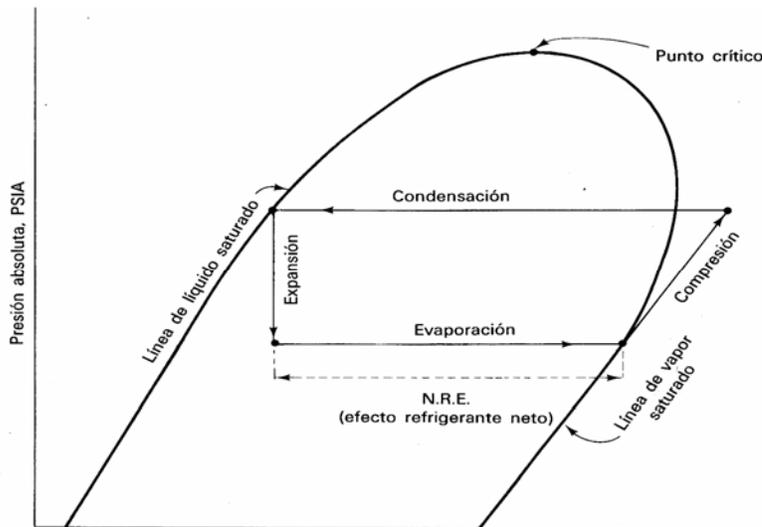
En la gráfica, hay tres zonas básicas que representan cambios de estado entre la línea de líquido saturado y la del vapor saturado al centro de la gráfica. La zona a la izquierda de la línea de líquido saturado es la zona de sobreenfriamiento, en la que el refrigerante líquido se ha enfriado por debajo de la temperatura que corresponde a su presión; mientras que la zona a la derecha de la línea de vapor saturado es la de sobrecalentamiento, en la que el vapor del refrigerante se ha calentado más allá de la temperatura de evaporación que corresponde a su presión.

La construcción del diagrama, o más bien el conocimiento y comprensión de éste, traerá una interpretación más clara de lo que sucede al refrigerante en las diversas etapas del ciclo de refrigeración. Si se conocen el estado y dos propiedades cualesquiera del refrigerante y se puede ubicar en la gráfica, las demás propiedades se pueden determinar con facilidad.

Si el punto se ubica en cualquier lugar entre las líneas de líquido y vapor saturado, el refrigerante estará en forma de una mezcla de líquido y vapor. Si la ubicación se acerca más a la línea de líquido saturado, en la mezcla habrá más líquido que vapor, y un punto ubicado en el centro de la zona a determinada presión indica que se trata de una mezcla líquido-vapor 50%-50%.

En cuanto a la figura 3, el cambio de estado de vapor a líquido, que es el proceso de condensación, se presenta como la trayectoria que el ciclo desarrolla de derecha a izquierda; mientras que el cambio de estado de líquido a vapor, que es el proceso de evaporación, va de izquierda a derecha. La presión absoluta aparece en el eje vertical de la izquierda, y el eje horizontal indica el contenido de calor, o entalpía, en Btu/lb.

Figura 3. Diagrama presión-entalpía que muestra el ciclo de refrigeración



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 91

La distancia entre las dos líneas de saturación a una presión dada, trasladada a la línea de contenido de calor, equivale al calor latente de evaporación del refrigerante a la presión absoluta dada. La distancia entre las dos líneas de saturación no es la misma a todas las presiones, ya que no son curvas paralelas. Por lo tanto, hay variaciones en el calor latente de evaporación del refrigerante que dependen de la presión absoluta. También hay variación en las tablas de presión-entalpía de los diversos refrigerantes y esas variaciones dependen de las diversas propiedades de los refrigerantes.

1.1.3 Procesos de refrigeración

Se supondrá que en el sistema de refrigeración no hay cambios de temperatura del refrigerante líquido condensado después de salir del condensador y pasar por el tubo de líquido en su camino al elemento de expansión, ni en la temperatura del vapor del refrigerante después que sale del evaporador y pasa por el tubo de succión para entrar al compresor.

La figura 4 muestra las fases del ciclo saturado simple con la identificación adecuada de presiones, temperaturas y contenido calorífico o entalpía. Se debe escoger un punto de partida en el ciclo del refrigerante; sea el punto A en la línea de líquido saturado en la que todo el vapor de refrigerante a 100 °F se ha condensado en líquido a 100 °F, que está a la entrada del elemento de expansión. Lo que sucede entre los puntos A y B es el proceso de expansión, cuando el refrigerante pasa por el dispositivo de expansión; la temperatura del refrigerante baja desde la temperatura de condensación de 100 °F a la temperatura de evaporación de 40 °F.

Cuando la línea vertical A-B, el proceso de expansión, se prolonga hacia abajo hasta llegar al eje horizontal, se obtiene una lectura de 31.10 Btu/lb, lo cual es el contenido de calor del líquido a 100 °F. A la izquierda del punto B en la línea de líquido saturado está el punto Z, que también es la línea de 40 °F de temperatura. Partiendo del punto Z hacia abajo en sentido vertical hasta llegar al eje de contenido calor, se obtiene una lectura de 17.27 Btu/lb, que es el contenido de calor del líquido a 40 °F.

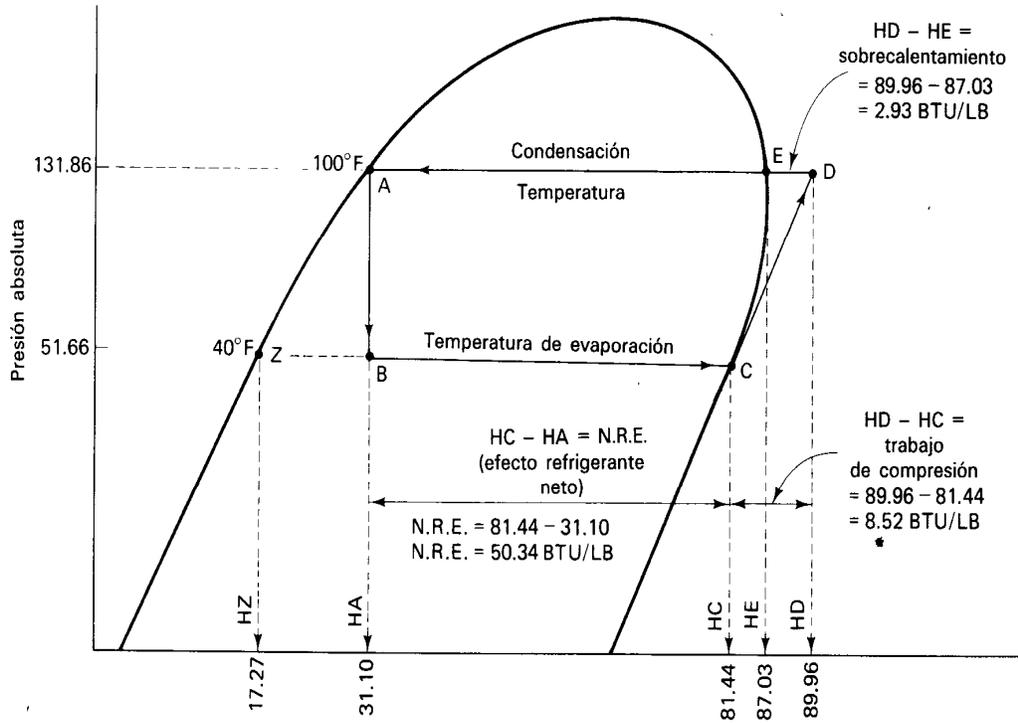
La línea horizontal entre los puntos B y C indica el proceso de evaporación en el evaporador, en que el líquido a 40 °F absorbe el calor suficiente para evaporarse. El punto C está en la línea de vapor saturado, lo que indica que el refrigerante se ha evaporado por completo y está listo para el proceso de compresión. Una línea trazada en sentido vertical hacia abajo hasta llegar al eje de la entalpía indica el contenido de calor, que se presenta en h_c , y es 81.44 Btu/lb. La diferencia entre h_a y h_c es 50.34 Btu/lb, que es el efecto de refrigeración.

La diferencia entre h_z y h_c , medida sobre el eje de entalpías, es igual a 64.17 btu/lb, y es el calor latente de evaporación de 1 lb de refrigerante 12 a 40 °F. Esta cantidad de calor también presenta el efecto refrigerante, pero se debe evaporar algo del refrigerante a 100 °F para que lo que resta de cada libra de refrigerante 12 baje su temperatura de 100 °F a 40 °F.

Las diversas propiedades de los refrigerantes, que se mencionaron antes, probablemente se deban profundizar antes de proseguir con la descripción del proceso de compresión. Todos los refrigerantes presentan ciertas propiedades cuando están en estado gaseoso. Algunas de esas propiedades son: volumen, temperatura, presión, entalpía o contenido calorífico y entropía. Esta última propiedad, la entropía, en realidad es la más difícil de describir o definir. Es el cociente del contenido calorífico del gas entre su temperatura absoluta en grados Rankine, y se relaciona con la energía interna del gas.

El diagrama Mollier grafica la línea de entropía constante, que queda igual, siempre que el gas se comprima sin agregar o retirar calor de o al exterior. Cuando la entropía es constante, el proceso de compresión se llama *adiabático*. Esto quiere decir que el gas cambia sus propiedades sin absorber o ceder calor, ya sea de o hacia una fuente o sustancia externa. Se acostumbra, al estudiar los ciclos de refrigeración, graficar la línea de compresión ya sea a lo largo o paralela a una línea de entropía constante.

Figura 4. Fases del ciclo de refrigeración saturado simple



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 91

En la figura 4, la línea C-D representa al proceso de compresión, en el que aumentan la presión y temperatura del vapor tanto del que está en el evaporador como del que está en el condensador, suponiendo que no haya entrada de calor en el tubo de succión entre el evaporador y el compresor. Para una temperatura de condensación de 100 °F, es probable que un manómetro indique unas 117 psig; pero la gráfica P-h está en función de presiones absolutas. Se debe sumar una presión atmosférica de 14.7 psi a las psig, y con ello se obtienen 131.86 psia.

El punto D llevado al eje de las presiones absolutas equivale a la temperatura de condensación de 100 °F; no está en la línea de vapor saturado, sino a la derecha, en la zona de sobrecalentamiento, en la intersección de la línea de 131.86 psia, la línea de entropía constante a 40 °F y la línea de temperatura de unos 116 °F. Una recta vertical hacia abajo desde el punto D cruza al eje de contenido de calor a 89.96 Btu/lb, que es h_d ; la diferencia entre h_c y h_d es 8.52 Btu/lb, el calor de compresión que se ha agregado al vapor. Esta cantidad de calor es la energía térmica equivalente al trabajo efectuado durante la etapa de compresión del ciclo. Es la temperatura teórica de descarga, suponiendo que entra vapor saturado al ciclo; en la operación real, la temperatura de descarga puede ser de 20 a 35 °F mayor que la teórica. Esto se puede comprobar en un sistema en funcionamiento fijando un termómetro o termopar a la salida de la válvula de servicio en el compresor.

Durante el proceso de compresión, el calor que absorbe el vapor es resultado de la fricción del pistón en los cilindros y del vapor mismo que pasa por las pequeñas aberturas de las válvulas internas de succión y descarga. Naturalmente, el vapor también se calienta por la acción de sus moléculas que se comprimen entre sí, y a lo cual se llama calor de compresión.

Por lo tanto, mucho depende del diseño del compresor, de las condiciones bajo las cuales deba trabajar y del equilibrio entre la ganancia y la pérdida de calor, para mantener al refrigerante a una entropía constante.

La línea D-E representa la cantidad de sobrecalentamiento que se debe eliminar del vapor antes de poder comenzar el proceso de condensación. Una recta vertical hacia abajo desde el punto E hasta el punto He en el eje de contenido calorífico indica la distancia $h_d - h_e$, o sea 2.93 Btu/lb de calor, ya que el contenido de calor del vapor a 100 °F es 87.03 Btu/lb. Este sobrecalentamiento se elimina normalmente en el tubo de descarga de gas caliente o en la parte superior del condensador. Durante este proceso, la temperatura del vapor disminuye hasta la temperatura de condensación.

La línea E-A representa el proceso de condensación que se efectúa en el condensador. En el punto E el refrigerante es un vapor saturado a la temperatura de condensación de 100 °F y a una presión absoluta de 131.86 psia; la misma presión y temperatura prevalecen en el punto A, pero el refrigerante está ahora en estado líquido. A cualquier otro punto de la línea E-A, el refrigerante se encuentra en una mezcla de fases líquida y vapor; mientras más cerca esté del punto A, mayor será la cantidad de refrigerante que se ha condensado. En el punto A, cada libra de refrigerante está lista para pasar de nuevo al ciclo de refrigeración cuando se le necesite para eliminar calor de la carga en el evaporador.

1.1.4 Coeficiente de operación

Hay dos factores que son de la mayor importancia para decidir qué refrigerante se debe usar para determinado proyecto de remoción de calor. Normalmente, a esta decisión se llega durante las fases de diseño del sistema de refrigeración y acondicionamiento del aire. Los dos factores que determinan el coeficiente de operación (COP) de un refrigerante son el efecto refrigerante y el calor de compresión. La ecuación se puede escribir en la siguiente forma:

$$\text{COP} = \text{efecto de refrigeración} \div \text{calor de compresión}$$

Sustituyendo los valores del diagrama P-h del ciclo sencillo saturado que se presentó antes, la ecuación sería: $COP = (hc - ha) \div (hd - hc)$

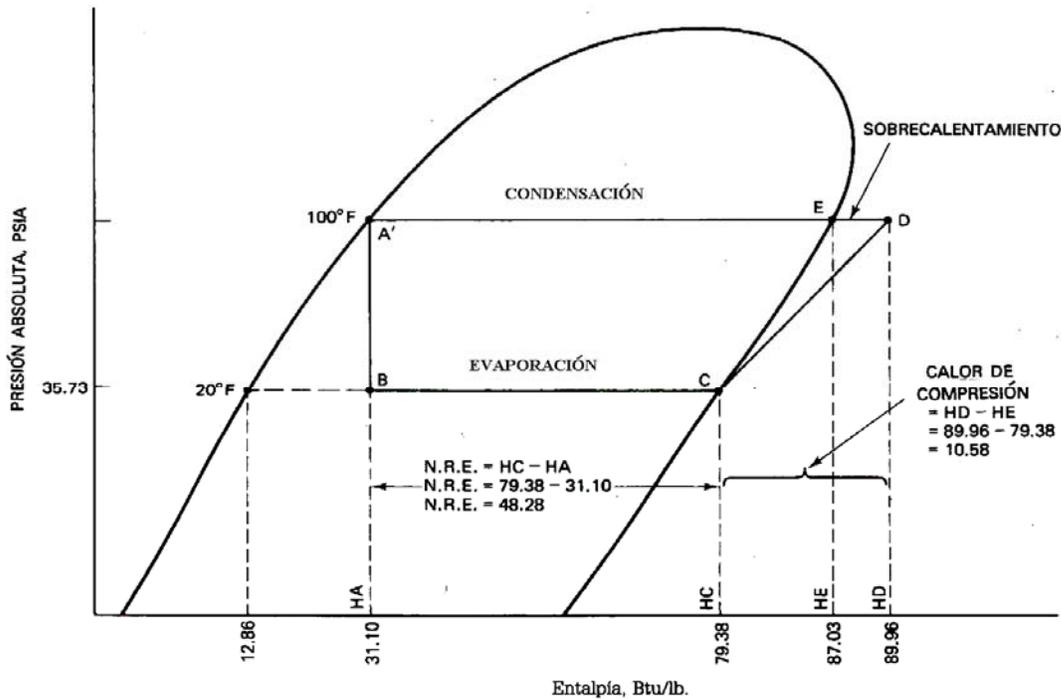
El coeficiente de operación es por lo tanto una medida de la eficiencia de un ciclo de refrigeración en el uso de energía gastada durante el proceso de compresión con relación a la energía absorbida en el proceso de evaporación. Como se puede ver en la ecuación anterior, mientras menos energía se gaste en el proceso de compresión, mayor será el COP del sistema de refrigeración. Por lo tanto, el refrigerante que tenga el mayor COP es el que probablemente se seleccionará, siempre y cuando las demás cantidades y factores permanezcan iguales.

1.1.5 Efectos sobre la capacidad

Los diagramas de presión-entalpía de las figuras 4 y 5 muestran una comparación de los ciclos saturados sencillos que tienen distintas temperaturas de evaporación con objeto de examinar varias diferencias en otros aspectos del ciclo.

Para que se pueda hacer una comparación aproximada mediante un cálculo matemático, los ciclos de las figuras 4 y 5 tienen la misma temperatura de condensación, pero la temperatura de evaporación disminuirá 20 °F. Los datos pueden obtenerse o comprobarse en la tabla para el refrigerante 12 (apéndice tabla VII), pero tomaremos los valores de A, B, C, D y E de la figura 4 como el ciclo modelo para compararlo con el de la figura 5, la que tiene evaporador a 20 °F. Se comparará el efecto refrigerante, calor de compresión y calor disipado en el condensador en cada uno de esos ciclos. Esta comparación se basará en los datos del eje de entalpía o contenido de calor, en Btu/lb.

Figura 5 Diagrama de ciclo de refrigeración saturado simple a 20°F de temperatura de evaporación



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 94

Para el ciclo de temperatura de evaporación 20 °F que se ve en la figura 5, el efecto refrigerante neto es igual a: $(hc' - ha') = (79.38 - 31.10) = 48.28$ Btu/lb y el calor de compresión es igual a: $(hd' - hc') = (89.96 - 79.38) = 10.58$ Btu/lb. Al comparar los datos anteriormente con los del ciclo con 40 °F de temperatura de evaporación (figura 4), vemos que hay una disminución de 4% en el efecto neto de refrigeración, y un aumento de 28% en el calor de compresión. Habrá algo de aumento en el sobrecalentamiento, que se debe eliminar ya sea en el tubo de descarga o en la parte superior del condensador. Es el resultado de una disminución de la temperatura de vapor en la succión, permaneciendo igual la temperatura de condensación.

Empleando la ecuación para calcular el peso del refrigerante circulado por minuto, se verá el peso del refrigerante que hay que circular por tonelada de refrigeración en un ciclo con temperatura de evaporación de 20 °F y de condensación de 100 °F es 4.14 lb/min/ton:

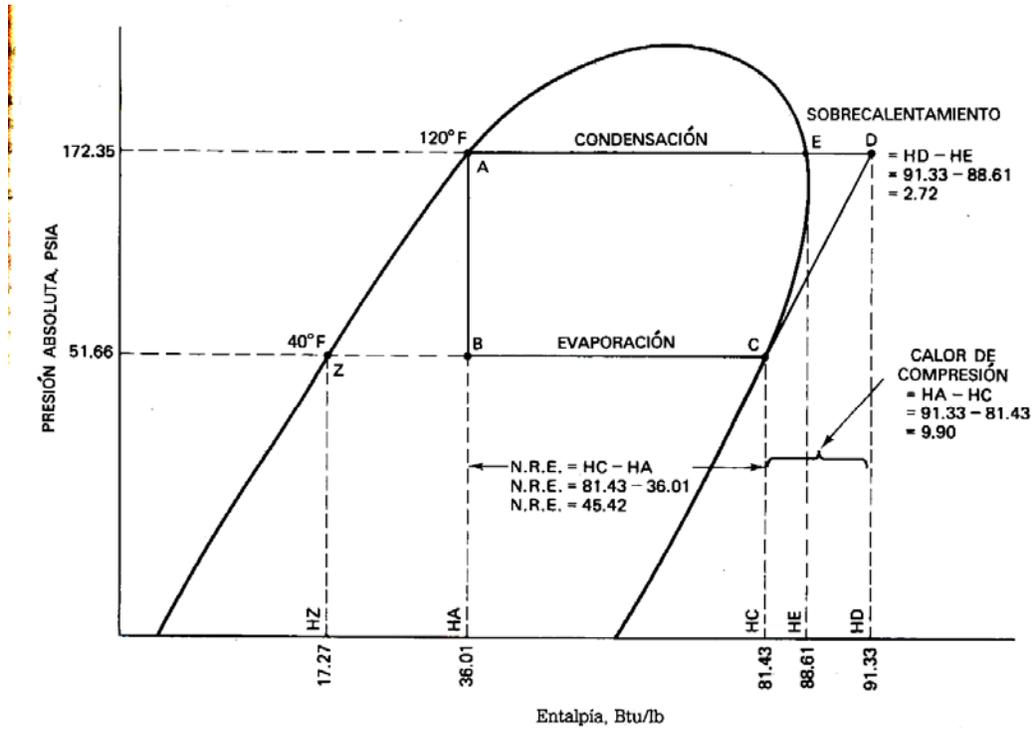
$$W = 200 \text{ (Btu/min)} \div \text{NRE (Btu/lb)}$$

$$W = 200 \text{ Btu/min} \div 48.29 \text{ Btu/lb}$$

$$W = 4.14 \text{ lb/min.}$$

Esto, naturalmente, necesitaría de un compresor más grande, o que el compresor del mismo tamaño trabajara a mayores revoluciones por minuto (rpm). La figura 6 muestra el ciclo original con una temperatura de evaporación de 40 °F, pero en el que se ha aumentado la temperatura de condensación a 120 °F.

Figura 6. Diagrama de ciclo de refrigeración saturado simple a una temperatura de condensación de 120 °F



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 95

De nuevo, tomando los datos específicos en la línea de contenido de calor o entalpía, vemos ahora que para el caso de la temperatura de condensación de 120 °F, que $h'' = 36.01$, $h_c'' = 81.43$, $h_d'' = 91.33$ y $h_e'' = 88.61$, todos Btu/lb.

Efecto refrigerante neto = $(h_c'' - h_a'') = 45.4$ Btu/lb.

Calor de compresión = $(h_d'' - h_c'') = 9.90$ Btu/lb.

Sobrecalentamiento en el condensador = $(h_d'' - h_e'') = 2.72$ Btu/lb.

En comparación con el ciclo que tiene la temperatura de condensación de 100 °F, se puede calcular que dejando que la temperatura del proceso de condensación aumente 20 °F hay una disminución en el efecto refrigerante neto de 9.8%, un aumento de 16.2% en el calor de compresión, y una disminución de 7.1% en el sobrecalentamiento que se debe eliminar, ya sea en el tubo de descarga o en la parte superior del condensador.

Usando la ecuación del peso del refrigerante circulado por minuto tenemos:

$$W = 200 \text{ (Btu/min)} \div \text{NRE (Btu/lb)}$$

$$W = 200 \text{ Btu/min} \div 45.4 \text{ Btu/lb}$$

$$W = 4.4 \text{ lb/min/ton.}$$

Esto indica que aproximadamente 11% más de refrigerante se debe circular para hacer la misma cantidad de trabajo que cuando la temperatura de condensación sea de 100 °F.

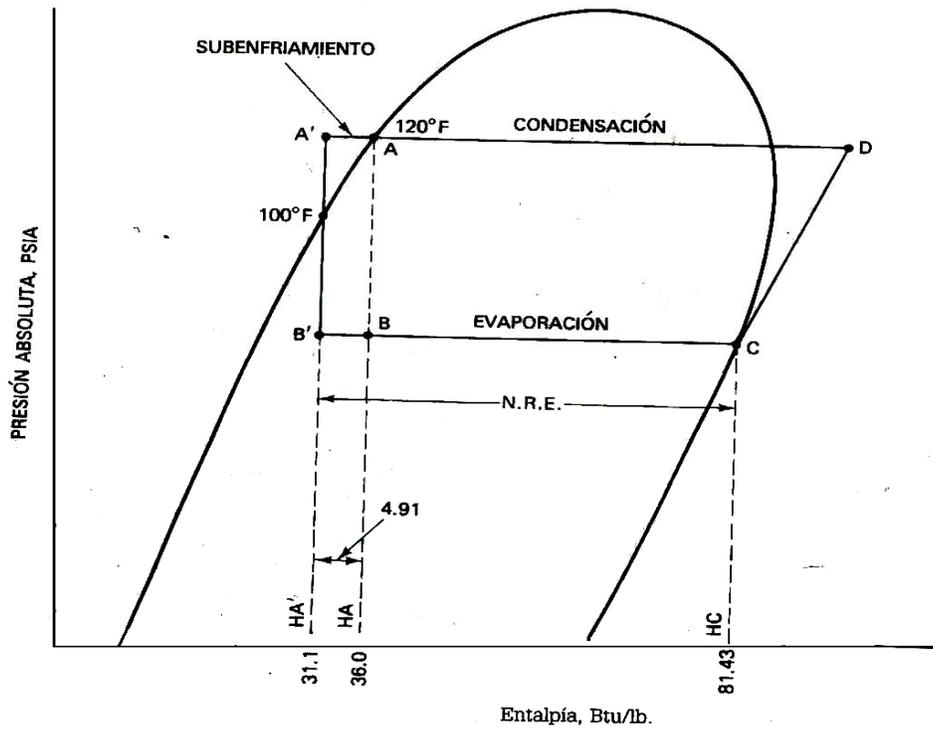
Los dos ejemplos anteriores demuestran que para tener la mejor eficiencia de un sistema, la temperatura de succión debe ser tan alta como sea posible, y la de condensación tan baja como sea posible. Naturalmente, hay límites bajo los que pueden trabajar los sistemas de modo satisfactorio, y se deben tener en cuenta otros medios de aumentar la eficiencia.

Pasando a la figura 7, después de haber terminado el proceso de condensación y que todo el refrigerante a 120 °F esta en estado líquido, si ese líquido se puede subenfriar al punto A''' en la línea de 100 °F una diferencia de 20 °F, el efecto neto de refrigeración será:

$$\text{Efecto neto de refrigeración} = (h_{c'''} - h_{a''}) = (81.43 - 31.10) = 50.33 \text{ Btu/lb.}$$

Como se puede observar se tiene un aumento de 4.91 Btu/lb (45.4 Btu/lb). Este aumento en la cantidad de calor absorbido en el evaporador sin un aumento en el calor de compresión aumentará el COP del ciclo, ya que no hay aumento en el consumo de energía del compresor.

Figura 7 Diagrama de ciclo de refrigeración saturado simple a una temperatura de condensación de 120 °F pero con un subenfriamiento

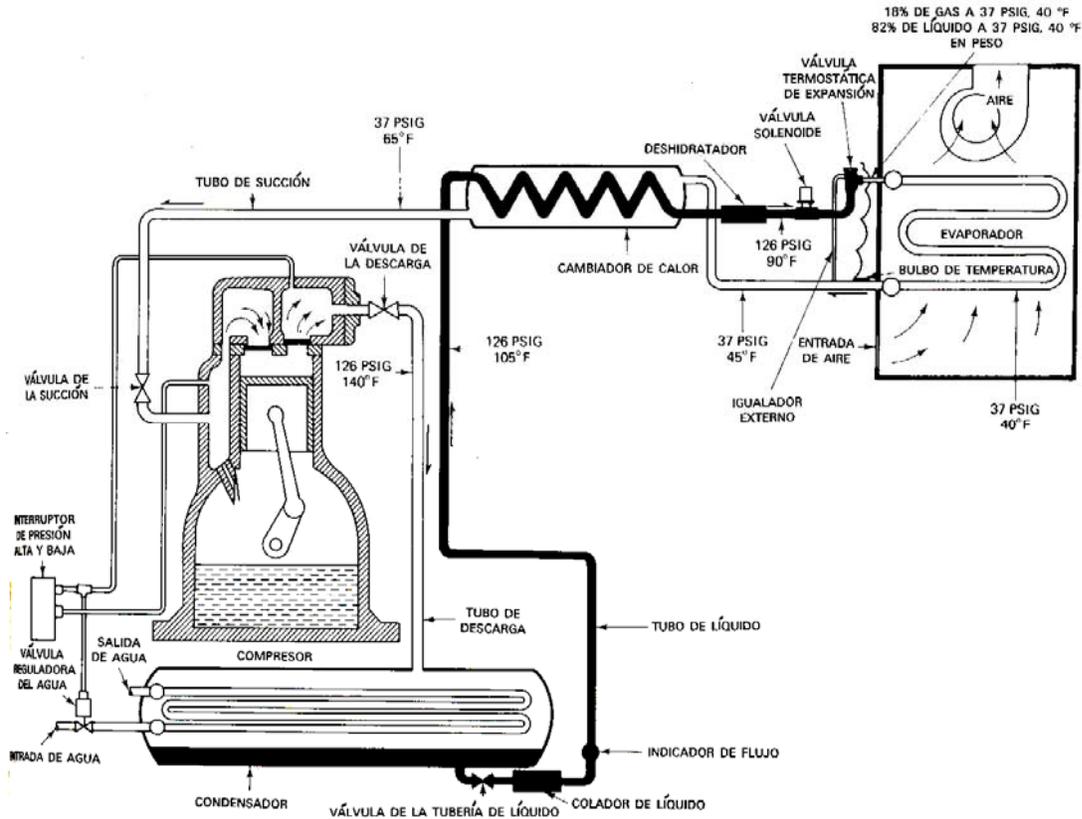


Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 96

Este subenfriamiento se llevará a cabo mientras el líquido está provisionalmente en almacenamiento en el condensador o receptor; o bien, algo del calor del líquido se puede disipar a la temperatura ambiente al pasar por el tubo de líquido en su camino al dispositivo de medición. También el subenfriamiento se efectuará en un sistema comercial enfriado por agua si se usa un subenfriador líquido que, en una aplicación de baja temperatura, bien podría pagarse debido al aumento resultante de capacidad y eficiencia del sistema general de refrigeración.

Otro método de subenfriar el líquido es mediante un cambiador de calor entre los tubos de líquido y el de la succión. El calor del líquido es transferido al vapor de la succión, ya que éste se encuentra a menor temperatura. Este ciclo se muestra en la figura 8, un diagrama de flujo de ciclo de refrigeración en el que se usa un cambiador de calor entre el líquido y el vapor en la succión. Es verdad que el calor no puede eliminarse del líquido para agregarse después al vapor que va a la succión sin ciertos efectos negativos sobre el ciclo general de refrigeración. Por ejemplo, el vapor se sobrecalentaría, con lo que a su vez se originaría un aumento en el volumen específico de cada libra de vapor de refrigerante y en consecuencia una disminución de su densidad. Así, desaparecería cualquier ventaja del subenfriamiento en un ciclo saturado; pero en un ciclo real no existen las condiciones de un ciclo saturado sencillo.

Figura 8 Diagrama de flujo del sistema de refrigeración R-12



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 97

En ciclo normal, el vapor en la succión no llega al compresor en estado saturado. Se agregará sobrecalentamiento al vapor después de haber terminado el proceso de evaporación, ya sea en el evaporador o en el tubo de succión o en ambos; y desde luego, en el compresor. Si este sobrecalentamiento sólo se agrega en el evaporador, contribuye al enfriamiento útil, ya que también está eliminando calor de la carga o producto, además del calor que fue eliminado durante el proceso de evaporación.

Pero si el vapor se sobrecalienta en el tubo de succión, que está fuera del espacio por acondicionar, no se logra enfriamiento útil; sin embargo, esto es lo que sucede en la mayor parte, si no es que en todos, los sistemas de refrigeración. Ahora bien, si algo de este sobrecalentamiento en el tubo de succión fuera estorbado mediante el uso de un cambiador de calor entre el líquido y la succión, este calor agregado al vapor sería benéfico, porque provendría del proceso de subenfriar al líquido. Por ejemplo, supongamos que la temperatura de succión en el evaporador fuera de 40 °F; el vapor sobrecalentado que sale del evaporador puede estar a unos 50 °F y la temperatura del vapor que llega al compresor podría ser 75 °F o más, dependiendo de la temperatura ambiente alrededor del tubo de succión. Esto quiere decir que la temperatura del vapor ha aumentado 25 °F sin hacer trabajo o enfriamiento útil, porque este calor se ha absorbido del aire ambiente fuera del espacio que se va a enfriar.

Si algo o la mayor parte de este aumento de 25 °F en la temperatura del vapor fuera resultado de absorción de calor del refrigerante líquido, estaría efectuando enfriamiento útil, ya que el subenfriamiento del líquido ocasionará un efecto refrigerante mayor que si el refrigerante alcanzara el elemento de expansión sin subenfriamiento alguno. Es posible alcanzar un equilibrio aproximado entre la cantidad de calor eliminado en Btu/lb cuando se subenfriaba el líquido y la cantidad de calor añadida al vapor de refrigerante en el tubo de succión sin el cambiador de calor.

1.2 Refrigerante (amoniac)

1.2.1 Definición

El amoniac (NH_3 , Refrigerante 717) es el refrigerante más extensamente empleado particularmente en la industria y la refrigeración comercial. Cuando está libre de agua se le conoce como *amoniac anhidroso*, y cuando está mezclado con agua (como se usa en los sistemas de refrigeración por absorción) se le conoce como *agua amoniacal*. La gama de presiones del amoniac es moderada y se tienen presiones subatmosféricas sólo para temperaturas menores de $-28\text{ }^\circ\text{F}$ y generalmente en el condensador la presión no excede en 200 psia. Su calor latente es excepcionalmente alto, arriba de 500 Btu/lb. La lubricación no presenta dificultades con el amoniac al seleccionar aceites minerales adecuados. El agua mezclada con amoniac no se congela en las válvulas de expansión; para otros refrigerantes sí puede tenerse congelamiento. El rendimiento termodinámico en un ciclo de refrigeración es alto. El amoniac tiene una temperatura crítica alta, de valor $271.4\text{ }^\circ\text{F}$ a 1,657 psia.

El amoniac no corroe ni al hierro ni al acero, pero corroe rápidamente al cobre y las aleaciones de zinc (latón, bronce), de tal manera que debe tenerse cuidado de que estos metales no estén en contacto con el amoniac.

1.2.2 Inflamabilidad y explosividad

Cuando un sistema trabaja en forma satisfactoria, no hay necesidad de preocuparse por el refrigerante que tiene dentro. Sin embargo, si se presentara un incendio en la cercanía de cualquier componente del sistema, hay peligro de que pueda extenderse y existe la posibilidad de una explosión si un refrigerante con propiedades desfavorables escapa por tubos rotos.

Si se presenta una fuga o si se deben hacer reparaciones a algún componente, se deben tener en cuenta la inflamabilidad y la explosividad posibles, así como la toxicidad del refrigerante. Aun cuando se pueda vaciar el sistema y todo el refrigerante del receptor condensador, las soldaduras que sea necesario hacer en la reparación o cambio de un componente, puede constituir un peligro si hay vapor suficiente dentro de los tubos de conexión, debido al peligro del calor de la flama del equipo de reparación.

Los hidrocarburos refrigerantes (llamados también *refrigerantes hidrocarbonados* incorrectamente), entre los cuales se encuentran el butano (R-600), el etano (R-170) y el propano (R-290), son todos muy inflamables y explosivos. Se debe tener el cuidado adecuado con las flamas abiertas cerca de un sistema en el que se use cualquiera de estos refrigerantes. Los refrigerantes de hidrocarburo halogenado (llamados también refrigerantes halocarbonados) no se consideran inflamables, pero algunos se vuelven tóxicos por la acción del fuego. Entre ellos están el triclorofluorometano (R-11), el diclorodifluorometano (R-12), y el monoclorodifluorometano (R-22). El R-502, que es un refrigerante azeótropo, es una mezcla de 48.8% de R-22 y 51.2% de R-115 (cloropentafluorometano), y no es inflamable.

El amoníaco se quema con dificultad, pero puede formar mezclas inflamables con mezclas de aire en relaciones de 16 a 25 % por volumen. Tales mezclas, sin embargo, no se encienden rápidamente. No se forman productos dañinos por su descomposición.

1.2.3 Toxicidad

La institución *Underwriters' Laboratories* ha llevado a cabo extensas pruebas para determinar la toxicidad de todos los refrigerantes. No intervinieron seres humanos en estas pruebas; en general los cuyos (conejos) de laboratorio acusan rápidamente los efectos de inhalar gases y vapores tóxicos.

El aire es la excepción a la regla de que todas las sustancias gaseosas son, hasta cierto grado, tóxicas. Desde luego, hay varios grados de toxicidad. El dióxido de carbono lo exhalamos al respirar, y por lo tanto es inocuo para los seres humanos hasta determinada concentración en la atmósfera que les rodee. Sin embargo, una persona que se exponga a una atmósfera con 8 a 10% de dióxido de carbono, o más, perdería rápidamente el conocimiento.

El gas de amoníaco es particularmente irritante a los ojos y a las membranas mucosas. En pequeñas cantidades en el aire son más molestas que dañinas, pero en cantidades de cerca de 0.5% por volumen de aire puede provocar serios efectos si la exposición se prolonga unos cuantos minutos.

Los *Underwriters' Laboratories* han desarrollado una clasificación numérica que va del 1 al 6. El número más bajo es para el refrigerante más tóxico y peligroso, y el mayor es el del refrigerante menos tóxico. La tabla I muestra la clasificación de los refrigerantes y la concentración y duración de la exposición que produce lesiones graves.

Tabla I. Clasificación de toxicidad de los refrigerantes

Grupo	Limitaciones	Refrigerante
1	Concentración de gases o vapores de 0.5 a 1% durante unos 5 minutos que puede producir lesiones graves o la muerte	Dióxido de azufre
2	Concentración de gases o vapores de 0.5 a 1% durante unos 30 minutos que puede producir lesiones graves o la muerte	Amoniaco
3	Concentración de gases o vapores de 2 a 2.5% durante 1 hora que puede producir lesiones graves o la muerte	Cloroformo
4	Concentración de gases o vapores de 2 a 2.5% durante 2 horas que puede producir lesiones graves o la muerte	Cloruro de metilo
5	Gases o vapores que son menos tóxicos que los del grupo 4, pero mas tóxicos que los del grupo 6	Refrigerante 11, 22, 502; butano, propano
6	Concentración de gases o vapores de un 20% durante periodos de unas 2 horas que aparentemente no producen lesiones	Refrigerante 13, 114.

1.2.4 Presión y temperatura críticas

Todo refrigerante, sea un solo elemento, un compuesto o una combinación de elementos, tiene entre sus características una presión y una temperatura arriba de las cuales no podrá estar en forma de líquido, sin importar qué tanto se aumente la presión. Este punto corresponde a la presión crítica y a la temperatura crítica del refrigerante.

Para el amoníaco su temperatura crítica es de 271.4 °F a una presión de 1,657 psia. Las presiones y temperaturas críticas quedan muy por encima de las que se pueden encontrar en el condensador. La mayoría de los refrigerantes son químicamente estables entre los límites especificados. No tienen tendencias, en condiciones normales, a reaccionar con cualquiera de los materiales que se usan en la fabricación de los componentes del sistema de refrigeración ni tampoco se descomponen químicamente.

Si el refrigerante de un sistema fuera inestable, rápidamente se volvería inútil, porque una reacción química cambiaría las características o propiedades del refrigerante. La descomposición de un refrigerante origina la presencia de gases incondensables, que provocan la presencia de altas presiones y temperaturas dentro del sistema, lo que puede originar problemas mecánicos.

1.2.5 Propiedades físicas

Dijimos antes que un refrigerante absorbe mucho más calor cuando pasa del estado líquido al gaseoso, que cuando absorbe calor siendo líquido o vapor. Por lo tanto, es de gran importancia el punto de ebullición de un refrigerante, porque se debe evaporar con facilidad abajo de la temperatura a la que se tiene que enfriar el espacio o producto.

Los refrigerantes que no tienen un punto de ebullición relativamente bajo necesitan que el compresor se trabaje a un alto vacío. Esto podría causar una disminución de la capacidad y eficiencia del sistema.

El punto de congelación del refrigerante es otra propiedad importante, en especial con las temperaturas extremadamente bajas, porque esta temperatura debe ser suficientemente más baja que cualquier temperatura prevista en el evaporador.

El calor latente del refrigerante que se escoja es, en general, alto, lo cual es una característica deseable para los sistemas de gran capacidad. Cuando el calor latente es alto, se hace circular menos refrigerante por cada tonelada de efecto refrigerante obtenido, y se puede emplear un compresor de menor caballaje. En sistemas de baja capacidad, el empleo de un refrigerante con bajo contenido de calor necesita de más circulación de refrigerante en comparación con uno cuyo refrigerante tenga mayor calor latente. El primer refrigerante hará también que sea más fácil el control del sistema, porque se necesitan dispositivos de control menos sensibles en un sistema por donde circule una gran cantidad de refrigerante.

La densidad y el volumen específico de un refrigerante son dos propiedades cuya relación es recíproca. Al comparar los refrigerantes para diversas aplicaciones, se deben tener en cuenta sus ventajas y desventajas. Para utilizar tubos de menor diámetro para los refrigerantes se debería emplear un refrigerante con alta densidad o bajo volumen específico. La construcción de ese sistema cuesta menos, así como su instalación. En algunos proyectos comerciales, donde hay mucha altura entre los componentes del sistema, puede ser conveniente usar un refrigerante con baja densidad y alto volumen específico. En esos sistemas se necesita menos presión para hacer circular al refrigerante a través de los componentes y la tubería.

Una característica que también es importante en un refrigerante es su baja solubilidad o miscibilidad con aceite, pero si es demasiado baja también puede originar problemas. La solubilidad o miscibilidad es la capacidad que tiene el refrigerante en estado líquido para mezclarse con el aceite necesario para lubricar las partes móviles del compresor.

Pero como el refrigerante se evapora en el evaporador, se presenta otra situación, porque el aceite y el vapor de refrigerante no se mezclan con facilidad. El aceite que circula por el sistema puede seguir adelante hacia el compresor sólo si el vapor se mueve con la suficiente rapidez como para arrastrar al aceite con él por el tubo de succión hasta el cárter del compresor. Si los tubos de vapor, sean la succión o el de gas caliente, corren en dirección horizontal, se acostumbra a dimensionarlos de modo que el vapor viaje a una velocidad no menor de 750 pies por minuto (230 mts/min). Cuando el vapor va por un tubo vertical hacia arriba, su velocidad no debe ser menor que 1,500 pies por minuto (460 mts/min) para asegurar que el aceite también sea arrastrado hacia arriba. Éste es el caso, por ejemplo, cuando el evaporador está colocado en algún lugar abajo del compresor o la unidad de condensación.

Cuando se usa amoníaco o dióxido de azufre, la detección de fugas es bastante fácil, ya que sus olores peculiares los percibe cualquiera. Sin embargo, el confiar sólo en el olor para localizar fugas de esos refrigerantes puede ser decepcionante y a la vez peligroso.

Las fugas de amoníaco en un condensador enfriado por agua se pueden confirmar empleando papel tornasol, o de medición de pH, sumergido en el agua de salida del condensador. Las fugas en el resto del sistema se pueden localizar con el empleo de una bujía de azufre que, cuando se enciende, produce una nube blanca de humo cuando hay presencia de humos o vapores de amoníaco.

1.3 Temperatura de saturación de refrigerante

El punto de ebullición y la temperatura de condensación de un líquido a determinada presión son iguales. Eso quiere decir que el líquido ha alcanzado el punto en el que contiene toda la energía térmica que es capaz sin pasar al estado de vapor. A este estado se le llama "líquido saturado", lo cual quiere decir que si se agrega cualquier cantidad más de calor, el líquido hervirá. Lo común es que si el vapor se enfría hasta llegar a un punto en el que es tan denso que cualquier reducción en su energía térmica lo condensa, a esta condición se le llama "vapor saturado".

El calor sensible cambia la temperatura y el calor latente cambia el estado físico. Por lo tanto, el líquido a la temperatura de ebullición está saturado con calor sensible, y cualquier calor agregado sería calor latente para evaporar el líquido.

El vapor a la temperatura de condensación ha llegado a esa temperatura quitándole el calor sensible hasta que su densidad llega a un punto en el que cualquier eliminación posterior de calor provocará la condensación del vapor, y el calor eliminado será calor latente. En este punto, se dice que el vapor es un "vapor saturado".

1.4 Evaporación del refrigerante

El refrigerante líquido fluye hacia el evaporador a presión y temperatura altas; si se disminuye la presión por medio de un dispositivo de expansión, también lo hace el punto de saturación del líquido. Como la temperatura del líquido refrigerante está muy arriba de su punto de saturación, éste hervirá inmediatamente, absorbiendo calor durante el proceso de cambio de estado y continuará haciéndolo hasta que la temperatura exterior sea reducida a la temperatura de saturación del refrigerante o hasta que la presión en el sistema aumente a la presión de saturación de la temperatura exterior.

1.5 Condensación del refrigerante

El vapor refrigerante fluye hacia el condensador a presión alta y a una temperatura de saturación o condensación suficientemente arriba de la temperatura del medio disponible de enfriamiento. El calor es transferido a las paredes del sistema y luego al medio condensante (aire o agua). La temperatura del refrigerante desciende a su temperatura de condensación cambiando de estado. El calor fluye del sistema al exterior hasta que la presión en el sistema sea disminuida a la presión equivalente a la temperatura exterior.

1.6 Relación aceite-refrigerante

En el sistema de refrigeración, el aceite y el refrigerante se mezclan continuamente. La capacidad de dos o más sustancias para mezclarse se llama miscibilidad.

El aceite que circula en un sistema de refrigeración puede ser expuesto a bajas o altas temperaturas. Debido a la naturaleza de lubricación bajo estas condiciones, únicamente pueden usarse aceites altamente refinados y preparados para esta aplicación.

Puesto que el aceite debe pasar por los cilindros de los compresores para lubricarlos, siempre circula una pequeña cantidad de aceite con el refrigerante. El aceite solo puede circular correctamente a través del sistema, si las velocidades del gas son suficientemente altas para barrerlo.

Si la velocidad del gas no es suficiente, el aceite se alojará en la parte inferior de los tubos disminuyendo la transmisión de calor y causando, posiblemente, una falla de aceite en el compresor.

A medida que se reduce la temperatura de evaporación, este problema es más crítico ya que la viscosidad del aceite aumenta con el descenso de la temperatura. Por esta razón, es esencial un diseño correcto de la tubería del sistema para obtener un retorno satisfactorio de aceite.

Demasiado refrigerante en el cárter del compresor puede dar por resultado una espuma violenta en ebullición, expulsando fuera del cárter todo el aceite y causando problemas de lubricación, por lo tanto deben tomarse las precauciones para evitar la excesiva acumulación de refrigerante líquido en el compresor.

1.7 Ciclo de refrigeración mecánico por compresión

La refrigeración continua puede lograrse por diferentes procesos. En Guatemala, se utiliza casi exclusivamente el sistema de compresión mecánica de vapor, llamado ciclo básico de compresión.

Existen dos presiones en el sistema de compresión: la de evaporación o baja presión y la de condensación o alta presión. El refrigerante actúa como medio de transporte para mover el calor del evaporador al condensador, donde es despedido a la atmósfera, o en casos de sistemas enfriados por agua, al agua de enfriamiento. Un cambio de estado de líquido a vapor, y viceversa, permite al refrigerante absorber y descargar grandes cantidades de calor.

Cualquier sistema o ciclo de refrigeración consiste en cuatro componentes principales:

Compresor: el compresor agrega energía de trabajo al ciclo, usualmente por un motor eléctrico. El compresor recibe gas refrigerante relativamente frío y a baja presión; por medio del trabajo adicionado, le eleva la presión y temperatura.

Condensador: aquí el calor es descartado del refrigerante a alta presión (después del compresor) hacia un medio de enfriamiento, usualmente aire, agua o una combinación de ambos. A medida que el gas pierde calor, cambia de estado y se condensa. La condensación ocurre a presión constante. El líquido refrigerante que sale del condensador está a alta presión.

Dispositivo de expansión: el líquido refrigerante que sale del condensador fluye a través de una pequeña abertura, orificio o restricción. Cuando el líquido a alta presión pasa a través de este dispositivo, ocurre una caída de presión que origina:

- a) Cambio de una parte del líquido a gas.
- b) Reducción en la temperatura de la mezcla líquido-gas resultante.

Evaporador: el líquido que sale del dispositivo de expansión hierve y absorbe calor dentro del evaporador enfriando cualquier corriente o flujo que pase en la superficie exterior. La ebullición del líquido refrigerante dentro del evaporador ocurre a temperatura y presión constantes.

Estos componentes se conectan por medio de tubería apropiada para formar un circuito cerrado que permita el flujo unidireccional continuo de refrigerante a través del sistema.

El sistema se puede dividir en lado de alta presión que involucra parte del compresor, condensador y dispositivo de expansión y el lado de baja presión que involucra al evaporador y resto del compresor. La presión en el lado de alta se denomina presión de condensación, en el lado de baja se denomina presión de evaporación.

1.8 Calor de compresión

Cuando se comprime el gas refrigerante en un cilindro del compresor, se aumenta la presión y se reduce el volumen. Se requiere energía y trabajo para comprimir el gas refrigerante. De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, esta energía no puede ser destruida, por lo tanto, toda la energía mecánica necesaria para comprimir el gas es transformada en energía calorífica. Con excepción de una pequeña fracción del calor total despedido por el cuerpo del compresor, esta energía es transferida al gas refrigerante.

Esto da lugar a un rápido aumento en la temperatura del gas comprimido, que provoca que las válvulas de descarga del compresor siempre se encuentren sometidas a las temperaturas más altas existentes en el sistema. El calor de compresión se define como el calor agregado al gas refrigerante que resulta de la energía de trabajo usada en el compresor. El calor que debe desechar el condensador se llama calor de rechazo y consiste en el calor absorbido por el refrigerante en el evaporador, en el compresor y en cualquier otro lugar del sistema. Para motocompresores herméticos y semiheméticos, el calor de rechazo, además del que produce la carga de refrigerante, es por definición 2,545 Btu/hr por cada HP.

2. COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO DE REFRIGERACION

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el método más común de transferencia de calor en las instalaciones de refrigeración. Hay cuatro componentes principales en ese ciclo. A continuación se hará una descripción de los componentes principales del equipo de refrigeración: compresor, condensador, elemento de expansión y evaporador. Daremos una definición de cada uno de estos componentes, así como de sus características principales y modo de operación.

2.1 Compresor

Los primeros modelos de compresores para refrigeración fueron principalmente los verticales de acción sencilla, típicos en las máquinas de amoníaco. Como el amoníaco era el refrigerante que más se usaba, estos compresores eran muy pesados para poder resistir presiones muy altas y, en comparación con los diseños modernos de compresor, los antiguos trabajaban a velocidades relativamente bajas. Los progresos en el diseño de válvulas, sellos de ejes de compresor, cojinetes y sistemas de lubricación ocasionaron un aumento gradual en la velocidad de trabajo. Ello permitió que los compresores fueran más pequeños para determinado caballaje, porque se obtuvieron mayores desplazamientos con el funcionamiento a altas velocidades.

El compresor tiene dos funciones principales en el ciclo, se clasifica siempre como el corazón del sistema, porque es el que hace circular al refrigerante. Las funciones que lleva a cabo son:

1. Recibir o eliminar el vapor de refrigerante del evaporador, de modo que se puedan mantener en él la temperatura y presión deseadas.
2. Aumentar la presión del vapor de refrigerante mediante el proceso de compresión, y en forma simultánea aumentar la temperatura del vapor para que ceda su calor al medio de enfriamiento del condensado.

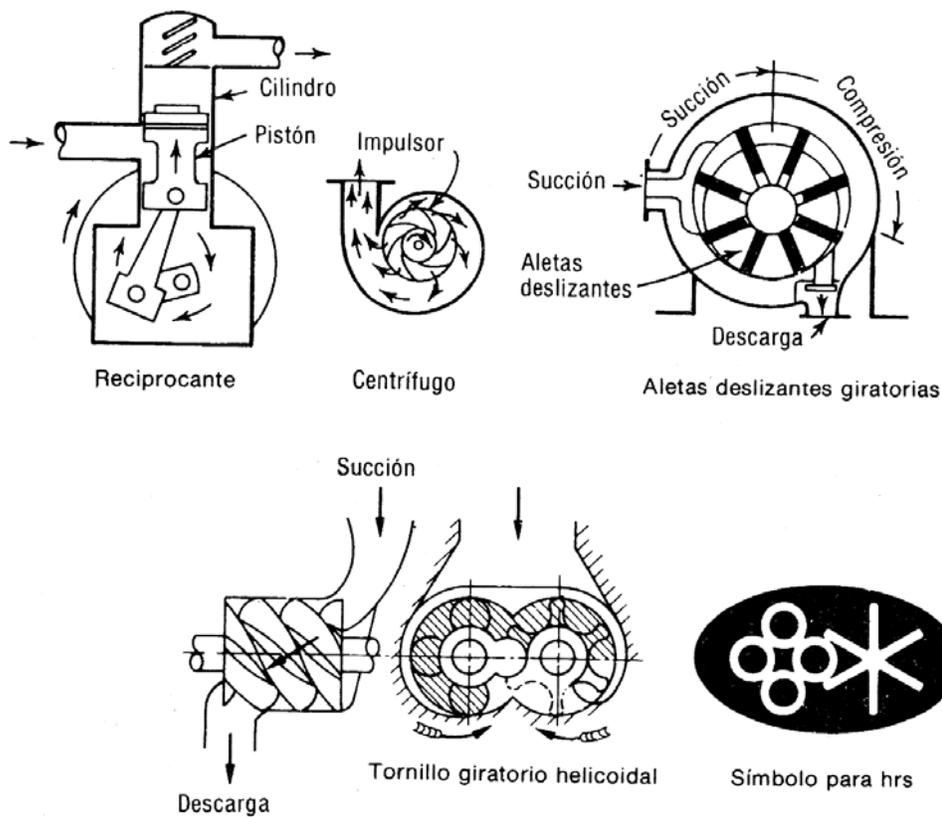
Los compresores más utilizados en trabajos de refrigeración y aire acondicionado son: reciprocantes, rotativos, centrífugos, helicoidales y de espiral.

Los tipos recíprocante, rotativo, helicoidal y espiral son compresores de desplazamiento positivo, comprimen el vapor por medio de un miembro compresor. En el recíprocante, el miembro compresor es un pistón; en el rotativo o rotatorio, el miembro que comprime tiene la forma de un rodillo o aleta; en el helicoidal, son dos rotores ranurados helicoidalmente; y en el compresor de espiral, dos espirales metálicas son las que comprimen el vapor.

Los compresores recíprocantes pueden ser de acción simple o de acción doble. En los compresores de acción simple, la compresión se efectúa en un solo lado del pistón y sólo una vez en cada vuelta del cigüeñal, mientras que en los compresores de acción doble, la compresión del vapor ocurre alternativamente en ambos lados del pistón, de modo que la compresión se efectúa dos veces por cada vuelta del cigüeñal.

El compresor centrífugo no tiene miembro compresor. La compresión del vapor se obtiene principalmente por la acción de la fuerza centrífuga, la cual es desarrollada a medida que el vapor es girado por un impulsor de alta velocidad. En la figura 9, se muestran los cuatro tipos de compresores que se mencionaron anteriormente.

Fig. 9 Tipos de compresores usados en un sistema de refrigeración de compresión de vapor



Fuente: Elonka Minich. Refrigeración y acondicionamiento de aire. Pág. 46

2.1.1 Descripción

El compresor que se emplea en este equipo de refrigeración es el compresor reciprocante. Este es el tipo más utilizado en todos los campos de la refrigeración. Se adapta al uso con refrigerantes que requieren desplazamiento relativamente pequeño y presiones condensadoras relativamente altas. El compresor es de acción simple. Por lo general, estos compresores son de tipo encerrado, donde el pistón es directamente impulsado por una biela conectada al cigüeñal, el cual realiza carreras alternativas de succión y compresión en un cilindro provisto con válvulas de succión y de descarga; ambos, biela y cigüeñal, están encerrados en la caja del cigüeñal, la cual esta herméticamente cerrada, pero abierta para permitir el ingreso del refrigerante del sistema.

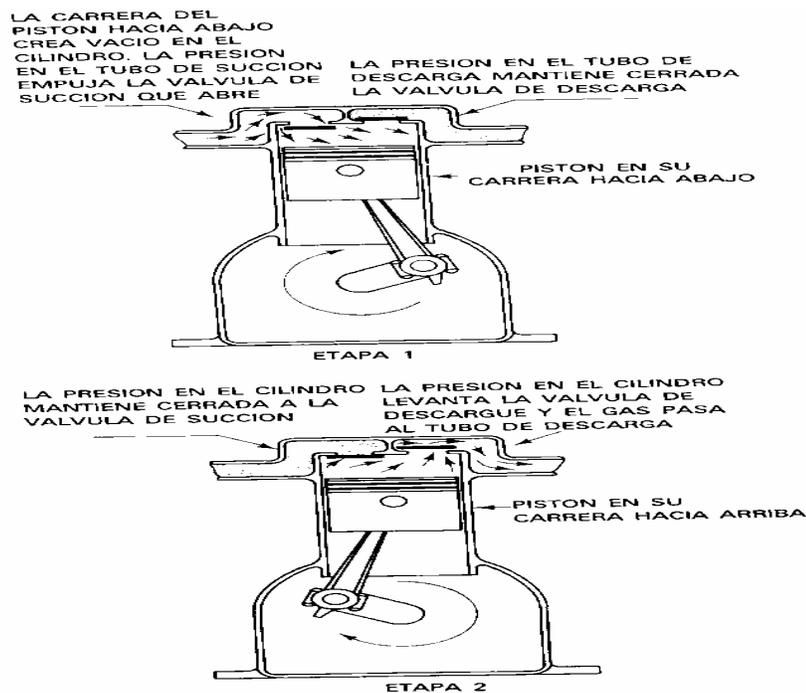
Los compresores reciprocantes de acción simple difieren en su diseño. De acuerdo con el tipo de servicio que desarrollan pueden clasificarse en: abiertos, herméticos y semiherméticos. Los compresores abiertos tienen los pistones y cilindros sellados en el interior de un cárter, y un cigüeñal extendiéndose a través del cuerpo hacia afuera para ser accionado por alguna fuerza externa, ya sea directamente o por medio de una faja.

En este caso el compresor que se utiliza es un compresor en V de acción simple con los cilindros y pistones dispuestos en forma de V. Este tipo de compresor es de alta velocidad y se pone en movimiento por un motor eléctrico. El motor transmite el movimiento al compresor por medio de fajas trapezoidales. La velocidad de funcionamiento es de 1,200 revoluciones por minuto.

2.1.2 Operación

El compresor se usa por una razón: recuperar el líquido expandido y que se pueda usar muchas veces. Si un tanque de amoníaco se expandiera dentro de los serpentines de enfriamiento y se descargara en la atmósfera, produciría el mismo efecto refrigerante, pero se necesitaría reponer el tanque de refrigerante cada vez que éste se agotara. La figura 10, muestra esquemas de un pistón en compresión y las válvulas internas de succión y descarga en diferentes etapas del ciclo de compresión.

Figura 10 Diagrama de cómo actúan las presiones diferenciales en las válvulas del compresor alternativo



Fuente: *Prentice Hall*. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 63

Un motor eléctrico acciona el pistón del compresor mediante un sistema de transmisión de fajas trapezoidales. Cuando el pistón se mueve hacia abajo en su carrera de succión, el volumen creciente del cilindro disminuye la presión por debajo de la que existe en la línea de succión. La diferencia de presión motiva que se abra la válvula de succión, y el gas refrigerante fluya al cilindro. La válvula de descarga permanece cerrada, debido a que la presión en la línea de descarga es mayor.

Cuando el pistón se mueve hacia arriba en su carrera de compresión, la disminución del volumen hace que aumente la presión del gas. Esto obliga a la válvula de succión a permanecer cerrada. Cerca del final de la carrera, la presión del gas aumenta hasta alcanzar un valor por encima de la presión existente en la línea de descarga, obligando a la válvula de descarga a abrirse, y entonces el gas comprimido fluye a la línea de descarga y hacia el condensador. Se observará que el compresor efectúa la succión y compresión del gas en cada revolución del cigüeñal.

Todos los componentes del conjunto del pistón alternativo tienen maquinado de precisión, están cuidadosamente balanceados para eliminar vibraciones y ajustados con tolerancias estrechas para asegurar que el compresor tenga alta eficiencia de bombeo del vapor del refrigerante. En los compresores recíprocos de refrigeración se utilizan dos tipos de válvulas de succión y descarga. Una es el tipo aleta, de lengüeta o flexible, empleada en unidades comerciales pequeñas. Consiste en una lámina delgada de acero flexible, sujeta en un extremo o a la mitad, y por lo común tiene la forma de una lengüeta. El diferencial de presión obliga al extremo libre de la válvula a separarse del orificio. Cuando la presión no actúa, la lengüeta vuelve a su posición normal.

En el caso de un compresor de mayor capacidad, se prefiere un tipo de válvula más resistente, llamada *válvula de anillo*. Esta válvula consiste en una placa en forma de anillo, la cual cubre los orificios del plato de válvulas. La válvula se mantiene en posición contra la placa, mediante pequeños resortes.

Las válvulas internas de un compresor se desgastan bastante en el funcionamiento normal, porque deben abrir y cerrar cientos de veces por minuto cuando trabaja el compresor.

Si las válvulas de succión no asientan en forma correcta y permiten que escape vapor de refrigerante del cilindro, el pistón no puede bombear todo el vapor comprimido a la tubería de gas caliente. Si hay escape en la válvula de succión, el vapor comprimido, o parte de él, pasará al tubo de succión y calentará el vapor de baja presión y temperatura que hay allí. Si la válvula de descarga tiene escape de algo del vapor de alta presión y alta temperatura al tubo de descarga, el gas caliente regresará al cilindro en la carrera de succión del pistón, limitando el volumen de vapor de succión que entra al cilindro.

2.1.3 Características

Las características principales del compresor son las siguientes:

Compresor de refrigeración marca: MYCOM.

Modelo: N6A

Fabricante: MAYEKAWA MFG.CO.,LTD Japón.

Tipo de compresor: recirpocante multicilíndrico.

Refrigerante con que trabaja: amoniaco.

Velocidad de funcionamiento: 1,200 revoluciones por minuto.

Desplazamiento: 193.5 m³/h.

Capacidad de refrigeración: 33 toneladas.

Presiones de trabajo: lado de baja 30 psig y lado de alta 120 psig.

Tipo de lubricación: por salpicadura y alimentación forzada.

Lubricante que utiliza compresor: SAE 20.

El compresor es impulsado por un motor eléctrico a través de un sistema de transmisión de fajas trapezoidales.

2.1.4 Sistema de lubricación

El sistema de lubricación del compresor es una combinación de lubricación por chapoteo y de alimentación forzada. En el tipo de chapoteo, la biela tiene una cucharilla en su extremo inferior, la cual recoge aceite del cárter y lo salpica en las superficies de desgaste. El sistema de alimentación forzada tiene una bomba de aceite que obliga al aceite a desplazarse hacia los cojinetes a través de orificios practicados en el cigüeñal. La mayoría de los compresores que utilizan alimentación forzada emplean bombas de aceite de desplazamiento positivo del tipo de engranes, accionados por el cigüeñal. Una válvula de alivio, de resorte, instalada en la descarga de la bomba, se abre si se presenta un exceso de presión, desviando el aceite hacia el cárter. Las bombas se diseñan por lo común de manera que puedan funcionar en una u otra dirección de rotación, puesto que los compresores con frecuencia pueden ser operados en cualquiera de las dos direcciones. Algunos compresores herméticos soldados, de poca capacidad, utilizan bombas centrífugas.

El aceite arrastrado por el refrigerante lubrica las paredes del cilindro y circula a través del sistema a fin de que este aceite retorne al cárter. Con el fin de evitar una pérdida de aceite causada por una oleada súbita proveniente del cárter cuando se pone en funcionamiento el compresor, se coloca una válvula de retención en el conducto del aceite. En la línea de succión se coloca una malla (filtro) para detener las pequeñas gotas de aceite refrigerante, así como las materias extrañas. Ocasionalmente se incorpora a la línea de succión una cámara de separación de grandes dimensiones para que actúe como una trampa de aceite antes de que éste regrese a través del conducto. Generalmente se instalan válvulas de servicio en los puntos de succión y descarga para aislar al compresor cuando sea necesario darle mantenimiento o repararlo. Estas válvulas son comúnmente del tipo de asiento posterior.

Problemas relacionados con el refrigerante líquido y el aceite. Se debe tener mucho cuidado en evitar que se introduzca un exceso de refrigerante en los compresores. Los líquidos son incompresibles, y si una cantidad considerable de líquido queda atrapada en el cilindro al final de la carrera de descarga, la presión que se origina puede romper las válvulas y hasta la biela. Un problema relacionado con el anterior es la dilución excesiva del aceite de lubricación por el refrigerante. Esto puede dar como resultado una lubricación ineficaz y consecuentemente el rápido desgaste de los cojinetes o del pistón y los cilindros.

Los compresores modernos poseen numerosos dispositivos para reducir la frecuencia de este tipo de problemas, y para proteger al compresor si se presentan. También deben llevarse a cabo ciertos procedimientos de operación para disminuir la posibilidad de que sucedan estos casos. Los sistemas de tubería de refrigeración deben diseñarse e instalarse de manera que impidan al refrigerante líquido entrar al compresor, y también que mojen el retorno del aceite al cárter.

Cuando el refrigerante líquido procedente del evaporador entra en el compresor en forma continua durante la operación, se presenta una situación llamada escurrimiento o flujo de retorno.

Cuando grandes cantidades de líquido entran repentinamente al compresor durante un breve período, la situación se conoce como penetración. Esta penetración del líquido tiende a presentarse cuando la carga cambia repentinamente o al arrancar el compresor. El escurrimiento tiende a causar dilución del aceite y un subsiguiente desgaste excesivo en ciertas partes del compresor. El golpeteo, que es consecuencia de la penetración, también daña algunas partes del compresor. Más adelante se analizarán ambas situaciones.

Migración del refrigerante. Este término se refiere a la migración del vapor del refrigerante desde el evaporador al cárter del aceite. Cuando se detiene el sistema, la presión del vapor del refrigerante contenido en el evaporador lo conduce hacia el cárter. La mayor parte de los refrigerantes son solubles en aceite y cuando el refrigerante llega al cárter y se disuelve en el aceite, esto hace que se reduzca la presión del vapor en el cárter, lo que causa a su vez una mayor diferencia de la presión, aumentando aún más la migración.

Cuando el compresor arranca, la presión en el cárter (presión de succión) disminuye repentinamente. La caída de presión hace que el refrigerante hierva rápidamente, separándose del aceite. Las burbujas que se originan dan lugar a la formación de una espuma o a la agitación del aceite y del refrigerante líquido, aumentando momentáneamente su volumen. Esto ocasiona la penetración de líquido al cilindro durante el arranque y origina el golpeteo con los consiguientes daños. Aún en el caso de que esto no suceda, la pérdida de aceite del cárter o el vapor espumante, pueden reducir considerablemente la alimentación a la bomba, ocasionando mala lubricación.

Ya se describió que la válvula de retención, colocada en el conducto de retorno del aceite, se utiliza para reducir la oleada de aceite que pudiera entrar al compresor por el conducto de succión. Para reducir la migración del refrigerante, se utiliza un calentador en el cárter. La temperatura del aceite se mantiene bastante elevada, para evaporar y alejar cualquier cantidad de refrigerante en migración. El calentador es un elemento eléctrico de calefacción instalado en el cárter de los compresores de gran capacidad. En las pequeñas unidades herméticas, el elemento se sujeta por fuera, alrededor del casco. Se debe tener cuidado de que la temperatura del aceite no sea excesiva y tenga lugar la carbonización, lo cual disminuye la calidad lubricante del aceite.

La penetración del refrigerante en forma de líquido puede tener lugar directamente del evaporador al compresor. Esto puede ocurrir durante el arranque, cuando se acumula una cantidad considerable de líquido en el evaporador, mientras permanece inactivo el sistema. Puede, asimismo, ocurrir en el caso en que el compresor haya estado trabajando sin carga, debido a que los serpentines se hayan estado descongelando, de lo cual resulta la acumulación de refrigerante líquido en el evaporador.

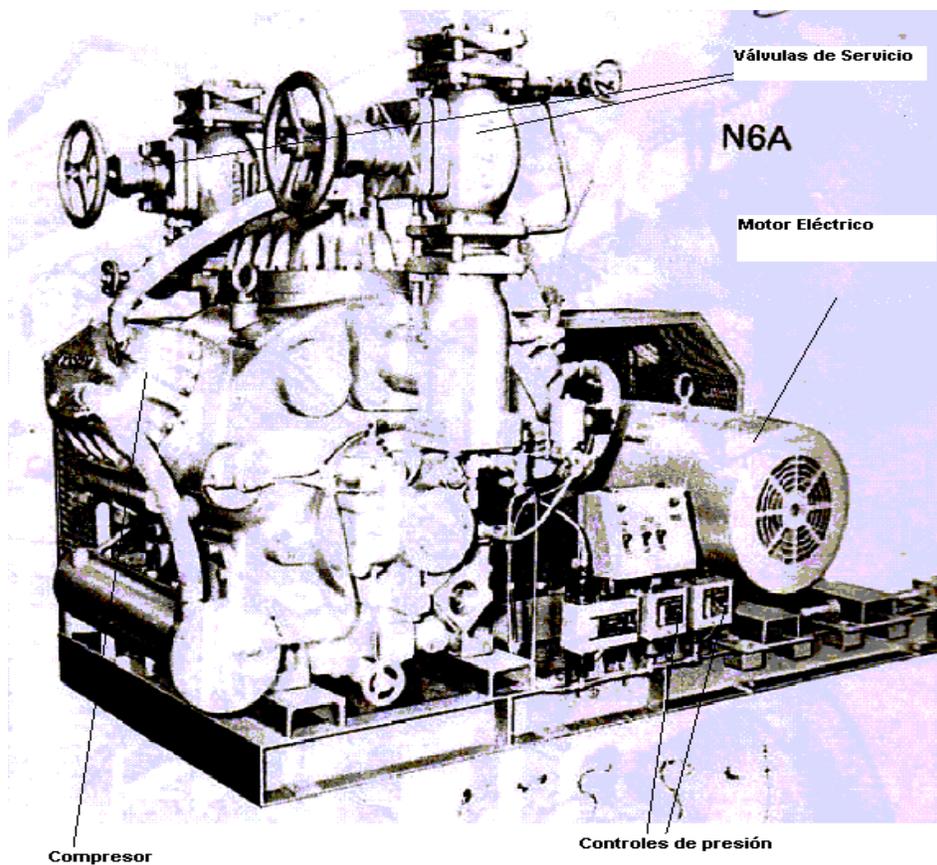
Ya se discutió con anterioridad el empleo de la malla de succión en el compresor para reducir el flujo de líquido. A veces se utiliza por separado una trampa para el líquido, llamada acumulador de succión, que se instala en la línea de succión, especialmente con las bombas de calor.

Además de los problemas que ya se trataron puede presentarse el escurrimiento del refrigerante procedente del evaporador, como resultado de un diseño e instalación inadecuados. Por ejemplo, el sistema puede estar cargado con un exceso de refrigerante, o la válvula de expansión termostática puede ser del tipo incorrecto o puede estar mal instalada.

2.1.5 Detalles del compresor

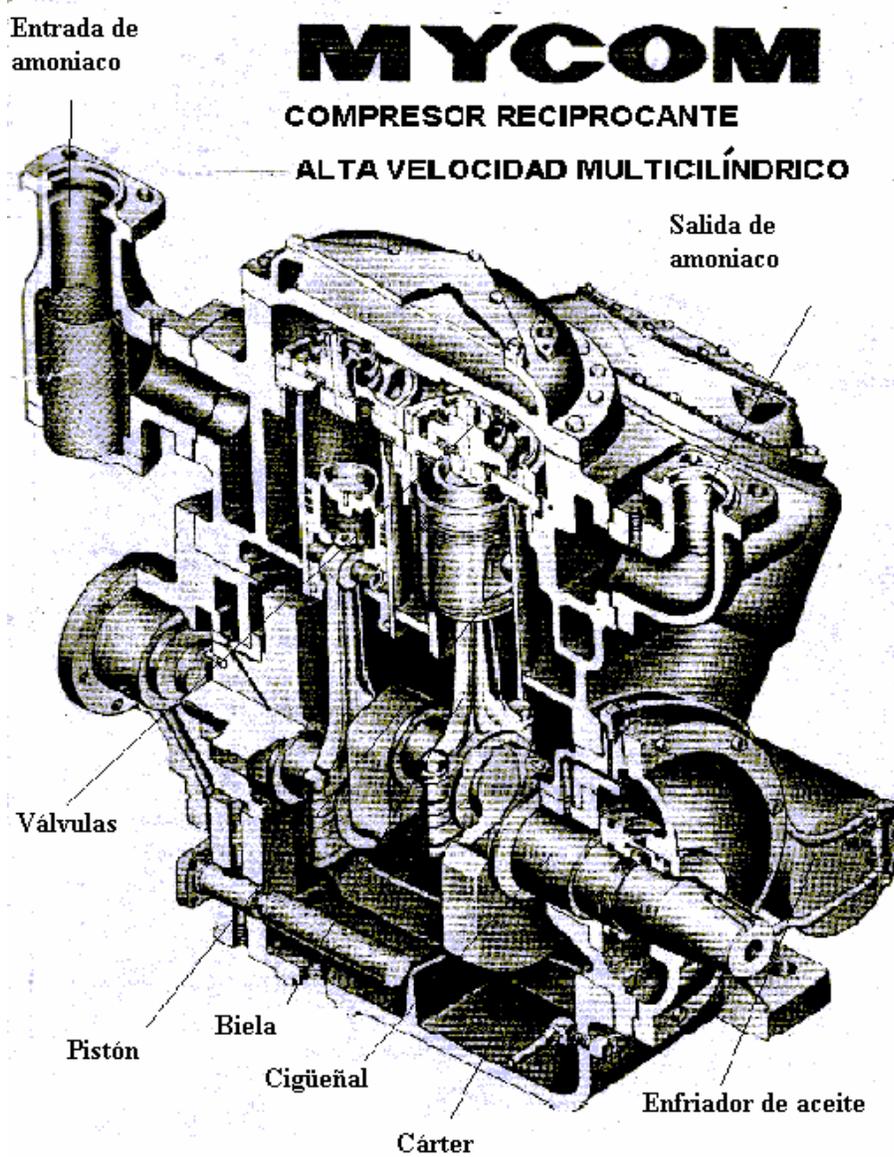
En las figuras 11 y 12 se muestra algunas características y partes principales del compresor.

Figura 11 Compresor de refrigeración que va a ser instalado



Fuente: Mycom. Manual de compresor. Pág. 1

Figura 12 Partes principales del compresor que va a ser instalado



Fuente. Mycom. Manual de compresor. Pág. 2

2.2 Condensador

Los condensadores son esenciales ya que remueven el sobrecalentamiento del refrigerante producido por el compresor y así licuan el refrigerante para otro ciclo a través del sistema.

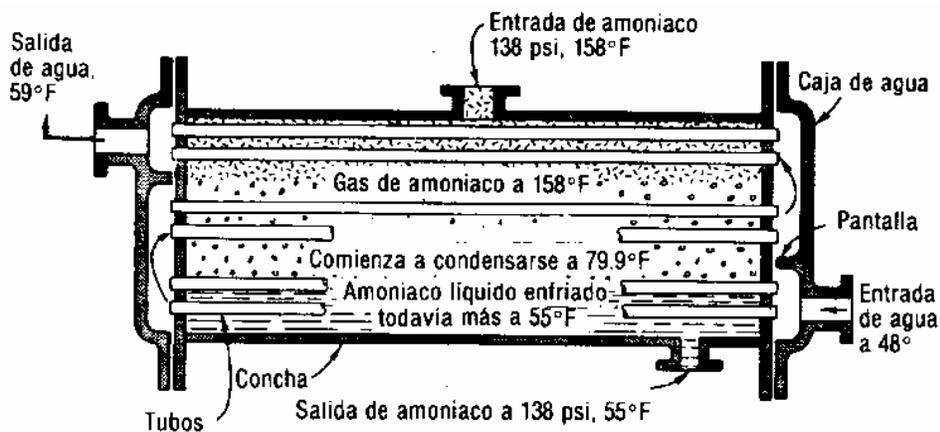
Toda energía absorbida por el sistema de refrigeración más el calor equivalente de la energía mecánica requerida para hacer funcionar el sistema deben eliminarse por el condensador.

El condensador es otro de los componentes del sistema: transfiere el calor de un lugar donde no se le desea a un lugar donde no estorbe; transfiere el calor del refrigerante a un medio que pueda absorberlo y pasarlo a un punto de eliminación final. El condensador es el punto final que evacúa el calor del sistema de refrigeración. Con el fin de efectuar una operación confiable y eficiente deben conocerse los que actualmente se utilizan. Son seis tipos: 1) el de concha y tubos, 2) el de concha y serpentín, 3) el de tubos dobles, 4) el atmosférico, 5) el evaporativo y 6) el enfriado por aire.

Los condensadores de concha y serpentín se usan en unidades de baja presión y pequeño tonelaje. Constan de una concha que contiene un serpentín para circulación de agua. No tienen cabezales desmontables y el lado de agua del serpentín puede limpiarse sólo con productos químicos. En caso de una fuga en el serpentín, el banco entero tiene que ser reemplazado.

El condensador de concha y tubos (figura 13) consta de una concha o coraza, cabezales de tubos y tubos, cajas de agua y conexiones de refrigerante. En los tamaños más pequeños, las conchas pueden ser de material estándar, pero en los tamaños mayores se usan conchas soldadas. Los cabezales de tubos, normalmente de 1 a 1 ¼ plg. de espesor, son soldados a la concha y perforados para recibir tubos. Se insertan tubos mandrilados o pulidos en sus respectivos extremos a través de los agujeros del cabezal de tubos y luego se rolan o se sueldan para proporcionar una unión a prueba de fuga de gas. El gas refrigerante fluye dentro de la concha y alrededor de los tubos, mientras que el agua lo hace por dentro de los tubos.

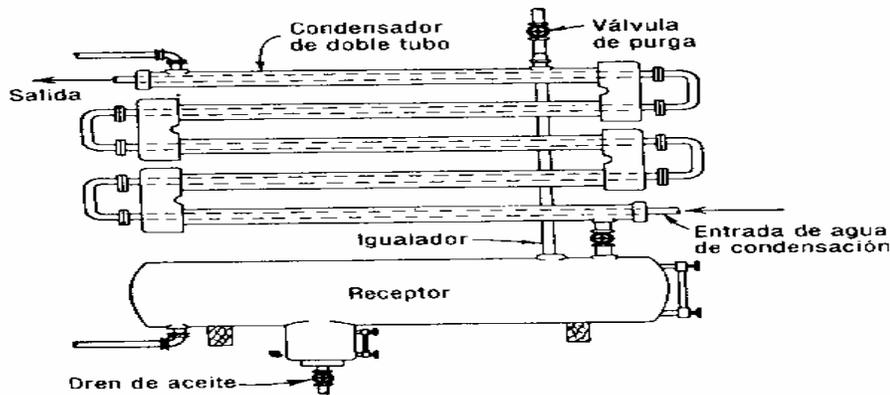
Figura 13 Condensadores de concha y tubos



Fuente: Elonka Minich. Pág. 71

El condensador de tubos dobles o de doble tubo (figura 14) tiene el tubo de agua de condensación dentro del tubo de refrigerante. El refrigerante fluye en el espacio entre los tubos, mientras que el agua se bombea por dentro de los tubos interiores. El agua fluye en dirección opuesta al refrigerante, es decir con el agua más fría en contacto con refrigerante más frío y agua más caliente con refrigerante más caliente. Puesto que con el amoniaco no puede usarse tubería de cobre, este tipo de condensador se hace de tubería de acero para amoniaco, normalmente con tubo de 1 ¼ de pulgada dentro de tubo de 2 pulgadas de diámetro.

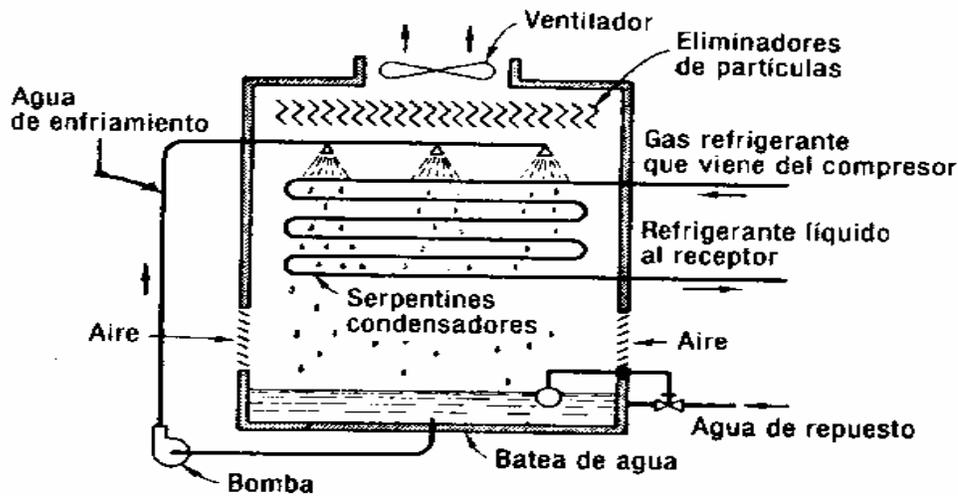
Figura 14 Condensador de doble tubo



Fuente: Elonka Minich. Pág. 75

El condensador evaporativo (figura 15) combina las funciones de una torre de enfriamiento y un condensador. Consta de una carcasa que encierra un ventilador o sección sopladora, eliminadores de agua, serpentín de condensación de refrigerante, batea de agua, válvula de flotador y bomba de rociado fuera de la carcasa. La bomba de rociado hace circular el agua de la batea colectora que está en el fondo de la unidad, la envía a las toberas sobre el serpentín de refrigerante. Los ventiladores hacen pasar aire a través del serpentín y a través del agua que se está rociando sobre el serpentín metálico y sobre la que pasa sobre el serpentín. El calor del refrigerante es transmitido desde el serpentín metálico al agua que pasa sobre el serpentín. El aire remueve el calor del agua evaporando una porción de ésta. Los eliminadores evitan que las gotitas de agua sean sacadas por el aire.

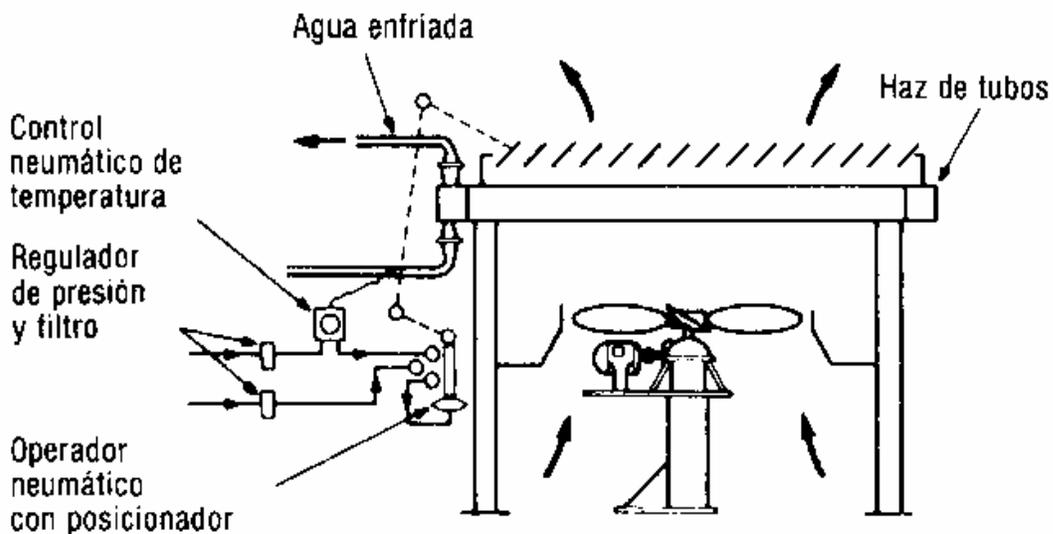
Figura 15 Condensador evaporativo



Fuente: Elonka Minich. Pág. 76

El condensador enfriado por aire (figura 16) se emplea en casi todas las unidades de fracción de caballo. Representa un ahorro el que no necesiten tubería de agua, como los condensadores enfriados por agua. En años recientes el mayor costo del agua, las tarifas crecientes por drenajes y eliminación y las restricciones en el uso del agua han hecho populares a los grandes condensadores enfriados por aire.

Figura 16 Condensador enfriado por aire para instalación en exteriores



Fuente: Elonka Minich. Pág. 79

Los intercambiadores de calor enfriados por aire son tan comunes como el radiador de un automóvil. Consisten en un grupo de tubos con aletas (normalmente) que van rolados o soldados en los cabezales. El aire ambiental se mueve a través del grupo de tubos por medio de un ventilador de tiro forzado o inducido, o aun por tiro natural. El fluido caliente, que circula por los tubos, cede parte de su calor al aire, que luego es expulsado hacia la atmósfera o alrededor de la unidad.

2.2.1 Descripción

El condensador evaporativo con circulación de aire forzado es el que se utilizará en este caso; tiene algunas de las características de los condensadores enfriados por aire y por agua. En el condensador evaporativo, el calor se absorbe del serpentín mediante evaporación de agua. En el caso de los condensadores enfriados por aire o por agua, no hay evaporación.

El condensador evaporativo posee dos turbinas que son las encargadas de suministrar el aire para que se dé el proceso de enfriamiento; las turbinas son impulsadas por motores eléctricos a través de fajas trapezoidales.

El condensador posee un depósito de agua y una bomba, que se encarga de suministrar el agua de enfriamiento.

Para calcular la cantidad de agua que se requiere en un condensador, se toma como base una tonelada de refrigeración; entonces, por cada 200 Btu/min absorbidos por el evaporador, deben ser disipados por el condensador hasta 300 Btu/min. Esto depende de las presiones de succión y descarga y del tipo de refrigerante. El sistema promedio se diseña para disipar 250 Btu/min por cada 200 Btu de efecto de refrigeración.

El agua necesaria por tonelada de refrigeración en un condensador enfriado por agua variará con la temperatura de entrada del agua y el aumento permisible de temperatura a través del condensador. La cantidad de agua requerida en galones por minuto por tonelada es:

$$250 / [8.33 * (t_2 - t_1)]$$

en donde $250 = \text{Btu} / (\text{min}) * (\text{ton})$ disipados en el condensador.

t_1 = temperatura del agua que entra en el condensador.

t_2 = temperatura del agua que sale del condensador.

8.33 = libras de agua por galón.

Si el agua disponible está a 80 °F y gana calor para dejar el condensador a 90 °F, la cantidad de agua de enfriamiento será de: $250 / [8.33 * (90 - 80)]$ y esto será igual a $250 / (8.33 * 10) = 3$ gal / min. de agua necesaria por tonelada de refrigeración.

2.2.2 Operación

El condensador evaporativo funciona de la siguiente forma: se bombea agua de una charola en la base de la unidad, pasa por una serie de toberas de aspersión y a continuación pasa por el serpentín de refrigerante. Al mismo tiempo entra aire por la base, pasa hacia arriba a través del serpentín y la aspersión de agua, pasa por deflectores que eliminan el agua arrastrada, y después por los ventiladores. Finalmente sale de la unidad. El agua que se pierde por evaporación se repone mediante un tubo de suministro de agua, y el nivel de agua en la charola lo mantiene una válvula de flotador. Como siempre quedan impurezas cuando se evapora agua, es necesaria una pequeña purga continua para reducir la concentración de impurezas.

Para que un líquido pase al estado gaseoso se necesita una gran cantidad de calor, y el agua no es la excepción. Cuando el agua de aspersión toca al serpentín de condensación caliente, se lleva a cabo la evaporación. El calor necesario para evaporar el agua proviene del serpentín. Al mismo tiempo, el gas caliente de refrigerante cede algo de su calor dentro del serpentín, y el refrigerante se condensa. Durante este proceso, el ventilador saca el aire cargado de humedad de los alrededores del serpentín mojado y lo reemplaza con aire que tiene todavía capacidad de absorber humedad.

Los condensadores evaporativos, por supuesto, son dispositivos eficientes de conservación de agua, pero tienen una desventaja, porque se necesita gran cantidad de tubería de refrigeración, así como un recibidor. Esto tiende a aumentar los costos de instalación y los riesgos de confiabilidad, que quedan sujetos a la destreza de los instaladores. También evita el armado, prueba y embarque completos por parte del fabricante y que las unidades tengan pocos requisitos de instalación. Como resultado, se ha tendido hacia el uso de más equipo tipo paquete enfriado por agua para sistemas más pequeños, y usar torres de enfriamiento de agua cuando se deben disipar mayores cantidades de calor.

2.2.3 Características

Las características principales del compresor a ser montado son las siguientes:

Condensador marca: CIMCO.

Fabricante: *CIMCO LIMITED*, Toronto, Notario, Canadá.

Condensador: tipo evaporativo de circulación de aire forzada.

El condensador tiene que ser capaz de desplazar 403,200 Btu /hr.

El condensador posee dos turbinas que son las encargadas de suministrar el aire para el enfriamiento.

2.2.4 Sistema de enfriamiento

La capacidad de un condensador evaporativo está determinada por la cantidad de calor que el aire que entra es capaz de absorber. Por lo tanto, mientras mayor sea el calor contenido en el aire que entra, menor será la capacidad, y mientras menor calor haya en el aire de entrada, mayor será la capacidad. De lo anterior se ve que la capacidad del condensador evaporativo depende del contenido de calor del aire que entra. Este contenido se calcula a partir de la temperatura de bulbo húmedo, la cual se determina con facilidad colocando una mecha mojada sobre el bulbo de un termómetro común y corriente, y sujetando el termómetro en la corriente de aire entrante. La temperatura de bulbo húmedo corresponde a la medición indicada más baja. Después que la mecha comienza a secarse, la temperatura comenzara a subir hasta llegar a la temperatura de bulbo seco.

Se puede usar la temperatura de bulbo húmedo para calcular el contenido de calor del aire. La diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra y la del aire que sale, junto con la cantidad de aire, determina la capacidad de cualquier condensador evaporativo. El calor total que debe ser disipado depende de la temperatura de bulbo húmedo. Representa la suma del calor sensible y el calor latente en el aire a determinada temperatura de bulbo húmedo. Si se calcula la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra y del que deja el condensador, se puede determinar el contenido de calor en estos dos puntos. El aumento en el calor total se debe al calor cedido por el refrigerante en condensación y representará la capacidad del condensador. Cuanto más baja sea la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra, mayor será la capacidad de condensador.

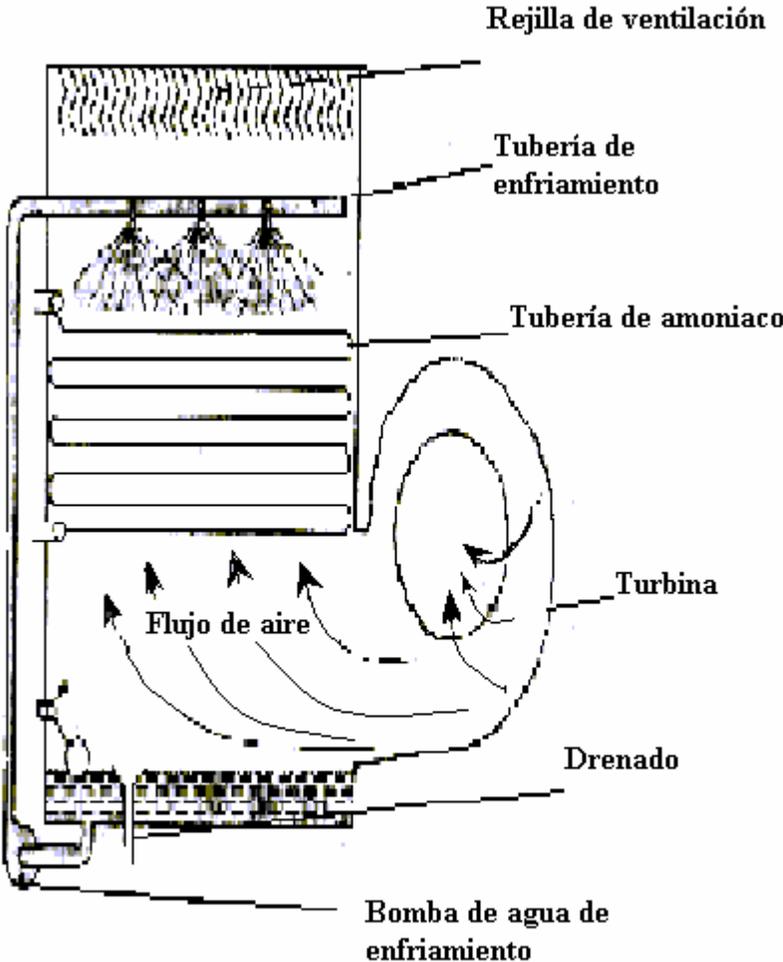
El tubo empleado en los serpentines de los condensadores evaporativos puede ser tubo desnudo o con aletas. El tubo desnudo tiene alguna ventaja por ser más fácil de limpiar, pero es más estorboso y más pesado para una capacidad determinada. El serpentín con aletas puede funcionar satisfactoriamente aún en condiciones adversas de agua, si se le da a ésta el tratamiento apropiado. Tiene también la ventaja de proporcionar suficiente capacidad con temperaturas de subcongelación del aire cuando trabaja como un condensador seco.

Otra parte importante del evaporador es la línea de purga. Ésta es una pequeña tubería que va directamente de la descarga de la bomba al drenaje. Puesto que un condensador evaporativo evapora grandes cantidades de agua, el agua que se va quedando empieza a aumentar su concentración en sales y sólidos. Si se deja que se acumulen, se agravará el problema de la incrustación.

2.2.5 Detalles del condensador

En las figuras 17, 18 y 19 se muestran algunos esquemas y componentes que forman el condensador evaporativo.

Figura 17 Funcionamiento y partes principales de condensador evaporativo



Fuente: Air-conditioning & refrigeration institute. Pág.70

Figura 18 Esquema de condensador evaporativo (Vista lateral)

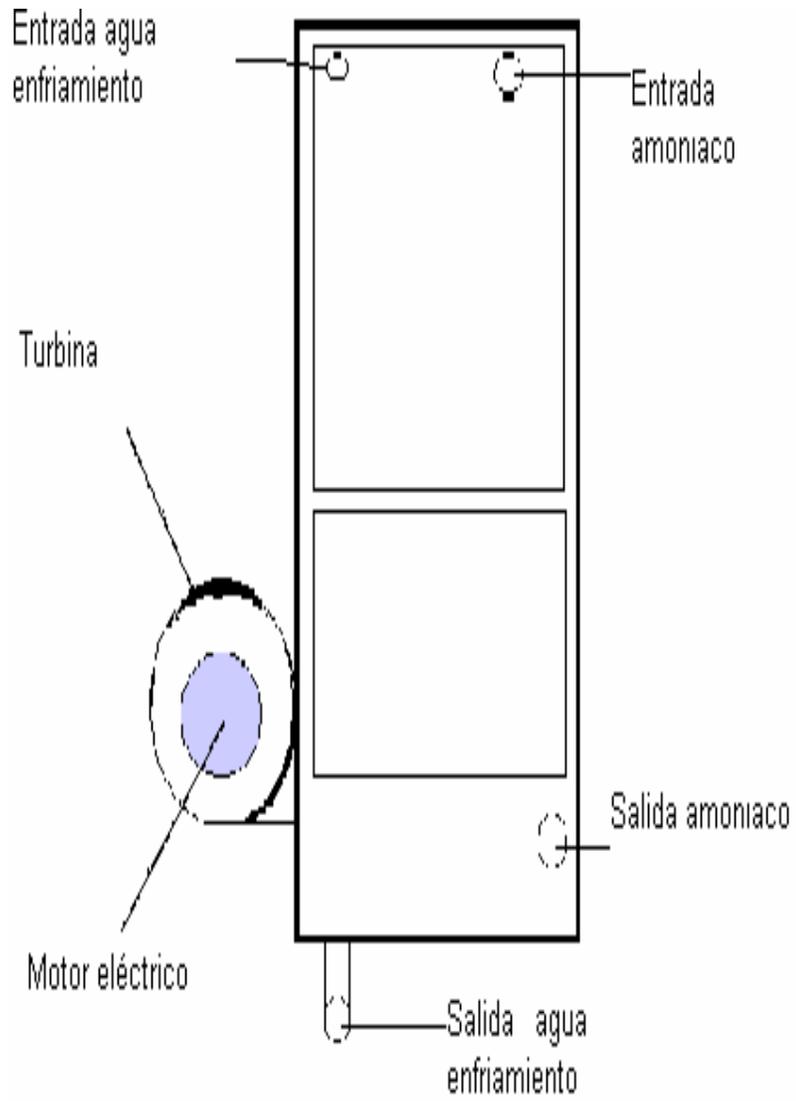
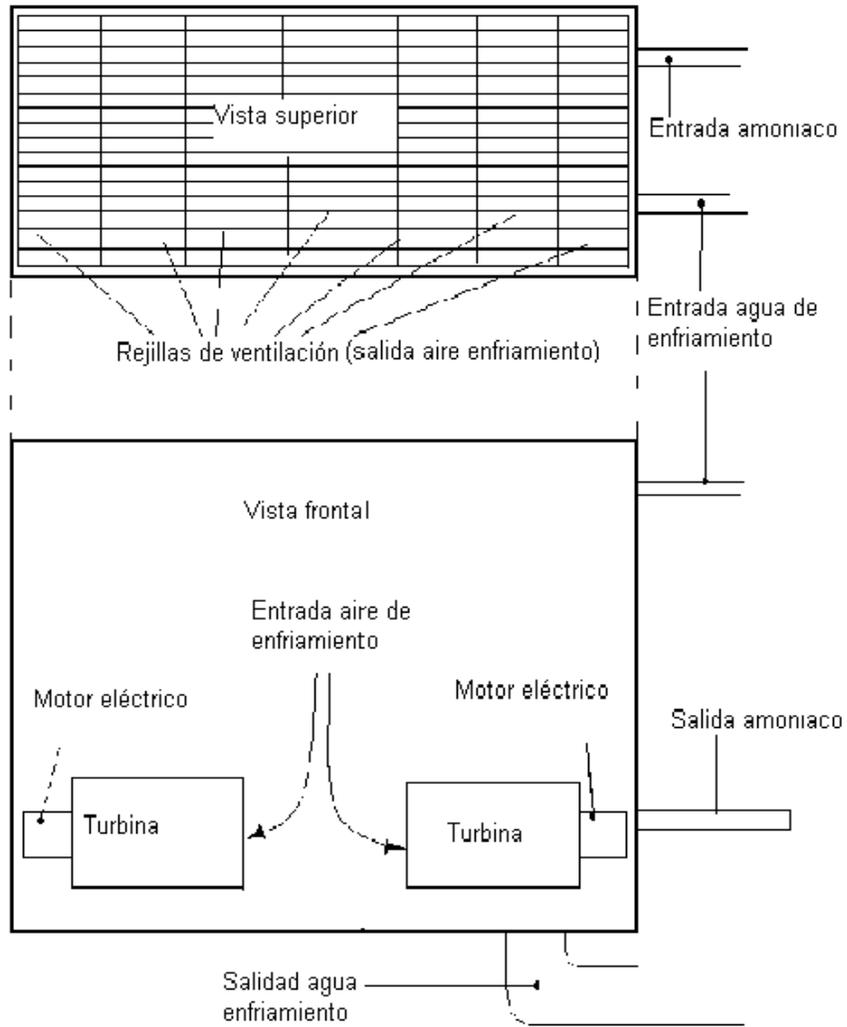


Figura 19 Esquema de condensador evaporativo. (Vista frontal y superior)



2.3 Válvula de expansión

La válvula de expansión debe realizar dos funciones en un sistema de compresión de vapor.

1. Debe regular el flujo del refrigerante líquido que se alimenta al evaporador, según sea la demanda.
2. Debe crear una caída de presión, desde el lado de alta al lado de baja del sistema.

Esta caída de presión expande el refrigerante que fluye, haciendo que una pequeña cantidad se evapore, de manera que se enfríe hasta la temperatura de evaporación.

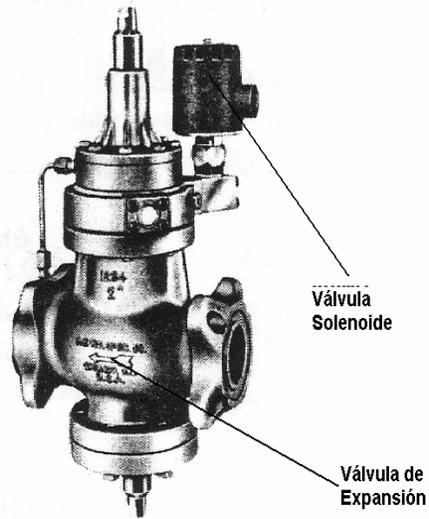
La válvula de expansión debe alimentar hacia el evaporador el refrigerante líquido en la misma proporción en que el compresor lo bombea desde el evaporador. Esto es, el evaporador no debe sobrealimentarse ni subalimentarse. La válvula debe reaccionar ante un cambio en las condiciones, las que requieren a su vez un cambio en el flujo. Cuando aumenta la carga térmica en el evaporador, la válvula debe reaccionar y alimentar más refrigerante, y debe reducir el flujo cuando disminuye la carga. Se verá que cada válvula ejecuta su función de una manera diferente, y que en efecto algunas de ellas no lo hacen de un modo satisfactorio bajo ciertas circunstancias. Este es uno de los motivos por los que se dispone de diferentes tipos de válvulas de expansión, y por lo que cada una de ellas tiene una aplicación diferente.

Otro punto que es necesario explicar es que la válvula de expansión no es un dispositivo de control de presión. En algunos casos es conveniente controlar la presión del evaporador o la de succión, manteniéndola fija en un solo valor, o limitarlo a un valor elevado o bajo, o ambos. En la mayoría de los casos, la válvula de expansión no sólo no controla la presión del lado de baja, sino que puede originar problemas debido a que permite que varíe la presión. Cuando es necesario controlar la presión pueden requerirse dispositivos adicionales.

2.3.1 Características

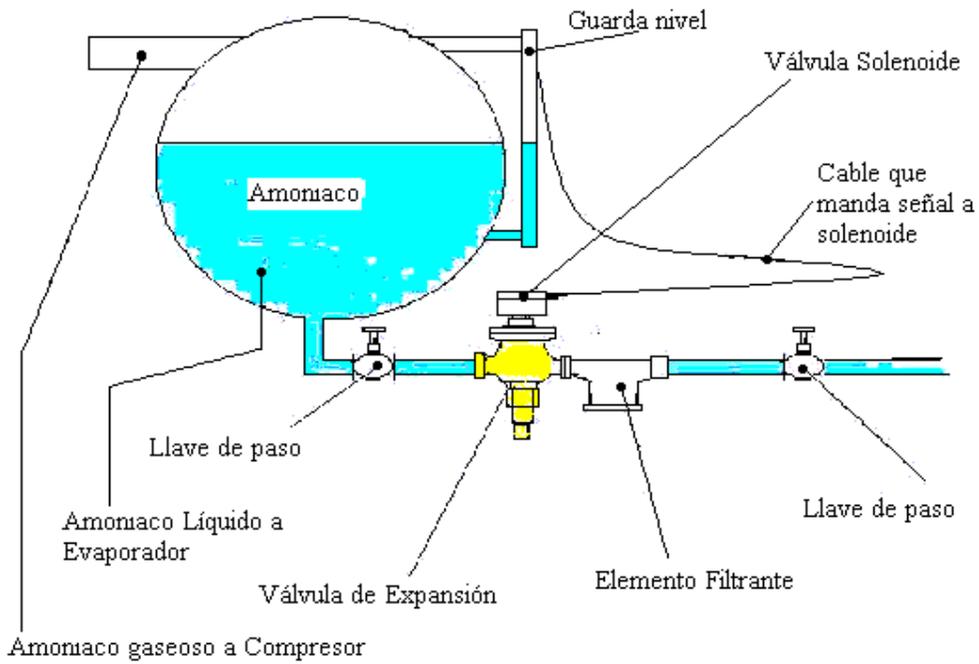
La válvula de expansión que se utilizará es una válvula marca **RS Controls** de la serie **A4A** para funcionar con amoníaco y un diámetro de tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada. En las figuras 20 y 21, se puede observar la válvula de expansión y la forma en la cual es gobernada ésta dependiendo del nivel del depósito de amoníaco. La válvula de expansión en este caso es gobernada por un solenoide eléctrico, el cual ordena a la válvula abrir o cerrar dependiendo del nivel del tanque de amoníaco que se encuentra sobre el evaporador.

Fig. 20 Válvula de expansión con su válvula solenoide



Fuente: Bulletin 23-04a. RS Controls. Pág. 3

Fig. 21 Funcionamiento de la válvula de expansión



La válvula solenoide mantiene un nivel predeterminado en el tanque de amoníaco que se encuentra sobre el evaporador, el nivel del tanque cambiará dependiendo de la carga térmica que se le exija al evaporador. El evaporador se mantendrá con una mezcla de amoníaco en estado líquido y gaseoso. En el depósito de amoníaco se hará la separación del líquido y el gas de amoníaco, ya que hacia el compresor no puede pasar amoníaco líquido, puesto que produciría daños muy serios al compresor.

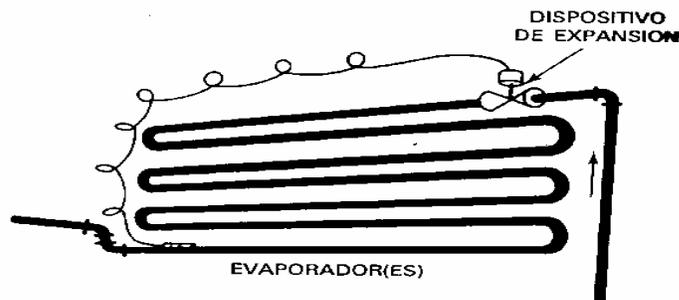
La válvula solenoide debe mantener un nivel determinado en el depósito de amoníaco. El guarda nivel del depósito es el encargado de mandar una señal eléctrica a la válvula solenoide, y ésta a su vez activa la válvula de expansión para dejar que entre amoníaco al depósito. El nivel del depósito de amoníaco no debe bajar del nivel determinado, ya que no se produciría el efecto refrigerante que se necesita en el evaporador, puesto que éste se llenaría de vapor sobrecalentado de amoníaco y, por lo tanto, se elevaría la presión del depósito y arrastraría amoníaco líquido hacia el compresor.

2.4 Evaporador

El evaporador es la parte del sistema de refrigeración en la que el refrigerante pasa de líquido a vapor mediante el proceso de evaporación. Éste se lleva a cabo cuando el calor del producto o la carga es absorbido por el refrigerante en el evaporador. Los evaporadores pueden ser de tres tipos: tubos desnudos, tubos aletados y placas.

La mayor parte de las vitrinas comerciales, cuartos enfriadores, cajas de enfriamiento y refrigeradores de florería emplean el diseño de serpentín de tubo con aletas. Un evaporador de este tipo tiene ventajas definidas en comparación con el evaporador de tubo desnudo, que se ve en la figura 22. La carga de calor que maneja el evaporador llega al serpentín de enfriamiento mediante uno o más de los tres mecanismos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación. Pero este calor pasa al refrigerante sólo mediante uno de estos mecanismos, la conducción.

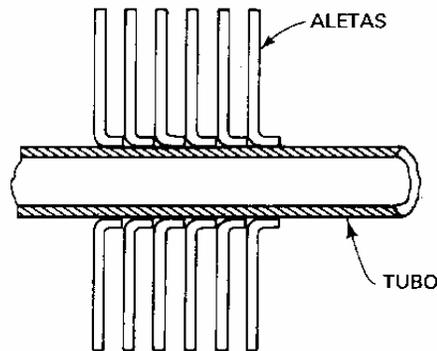
Figura 22 Evaporador de tubo desnudo



Fuente:Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado, Pág. 98

El área adicional de las aletas, además de la del tubo desnudo, permite una mayor velocidad de transferencia desde el aire que rodea al serpentín, como se ve en la figura 23. Por lo tanto, mientras mayor sea el área de la superficie de conducción de calor desde el producto hasta el refrigerante en el evaporador, mayor será la transferencia posible de calor.

Figura 23 Aletas planas que se le agregan al tubo



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 98

Si el calor del producto llega al evaporador, pero no lo absorbe el refrigerante dentro del serpentín, la caja o la zona estarán a una temperatura mayor de la deseada. Al aumentar el área superficial del evaporador se aumenta su capacidad. Muchos evaporadores comerciales se diseñan para convección natural como medio de paso del aire por el serpentín. Desde luego, la capacidad de este tipo de serpentines se basa principalmente en flujo no estorbado. Si se coloca el serpentín de manera inadecuada, o si su diseño o instalación es tal que se restringe la circulación del aire a su alrededor y a través de él, el serpentín no puede trabajar a la máxima eficiencia.

Cuando el aire pasa por el serpentín de enfriamiento cede su calor y por lo tanto se enfría. Al enfriarse, se contrae; su volumen es menor y pesa más que un volumen de aire más caliente. Así se establecen las corrientes de convección de aire, que se llevan consigo el calor del producto que se va a enfriar.

La circulación de este aire de convección se puede ayudar, lo cual se hace con frecuencia, con varios métodos, uno de los cuales es el empleo de mamparas de metal u otros materiales. Esas mamparas o desviaciones se colocan de tal modo que las corrientes de aire tienen que moverse siguiendo determinadas trayectorias para obtener la transferencia óptima de calor.

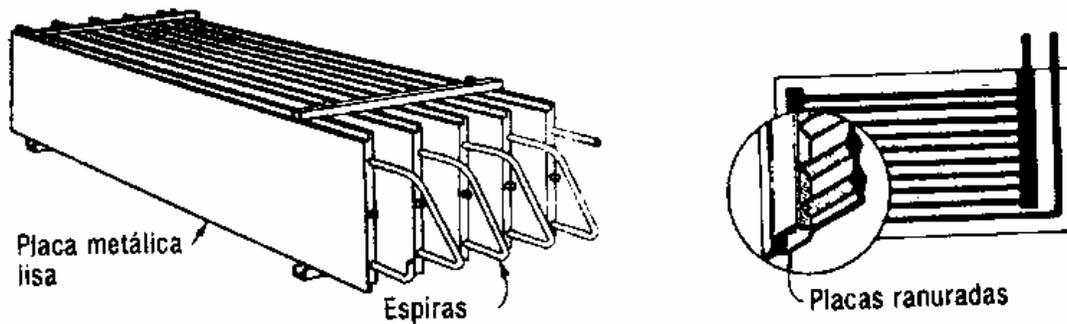
Si hay dudas acerca de si las corrientes de convección pueden producir el flujo necesario de aire a través del serpentín de evaporación para con ello sacar cantidades satisfactorias de calor del aire y del producto, lo indicado es emplear circulación forzada del aire que pasa por el serpentín. Los evaporadores que usan circulación forzada tienen tubos aletados, y uno o más ventiladores axiales del tipo hélice para lograr la circulación. En estos casos no son absolutamente necesarias las mamparas para dar un patrón normal de circulación, aunque se usan con frecuencia.

Con circulación forzada de aire, es necesario que el ventilador sea capaz de:

1. Hacer circular la cantidad suficiente de aire para eliminar el calor del producto.
2. Distribuir el aire a una velocidad adecuada por el recinto o el espacio acondicionado.
3. Asegurar que no haya zonas muertas.

Si la velocidad del aire que pasa en determinados casos es mayor que la que se recomienda, se tenderá a una deshidratación rápida.

Figura 24 Evaporador de serpentín de placas



Fuente: Elonka Minich. Refrigeración y aire acondicionado. Pág.85

El evaporador de placas (figura 24) es un serpentín hecho de placas de metal suave con espiral de tubería soldadas entre pares de placas. También se hacen de pares de placas ranuradas soldadas una con otra de manera que las ranuras formen un canal para el refrigerante. Se usan con mayor frecuencia como serpentines de anaquel en congeladores. El refrigerante frío se hace circular por los canales, y el producto a congelar se coloca entre las placas.

2.4.1. Descripción

En este caso el evaporador que se utilizará es un evaporador de placas. El evaporador forma parte del gabinete de enfriamiento de la bebida gaseosa. El gabinete cuenta con dos bandejas, una en la parte superior de las placas del evaporador y la otra en la parte inferior. La bandeja superior suministra la bebida gaseosa a 27 °C a través de las placas del evaporador y la bandeja inferior recolecta la bebida a 4.5 °C y envía otra parte del proceso de la bebida gaseosa.

Sobre el gabinete de enfriamiento se encuentra el depósito de amoníaco a baja presión que es el encargado de mantener las placas del evaporador al nivel adecuado para el enfriamiento. Todos los componentes del gabinete de enfriamiento de la bebida gaseosa son de acero inoxidable.

2.4.2 Operación

El evaporador que se empleará en este caso es un evaporador de placas que trabaja inundado de refrigerante. El amoníaco baja del depósito que se encuentra en su parte superior por gravedad. El evaporador forma parte del gabinete de enfriamiento de la bebida gaseosa. Este gabinete cuenta con una bandeja superior que recibe la bebida gaseosa a una temperatura de 27 °C y la distribuye a través de las placas del evaporador para su enfriamiento. El enfriamiento se produce por convección ya que la bebida se enfría por contacto con las placas del evaporador; el enfriamiento se va dando conforme cae por gravedad la bebida de la bandeja superior a la inferior.

El depósito de amoníaco líquido que se encuentra en la parte superior del gabinete de enfriamiento de la bebida gaseosa es el que suministra el amoníaco necesario para el enfriamiento del producto. Un dispositivo de nivel de líquido mantiene el depósito a un nivel predeterminado. Las placas del evaporador se mantienen llenas de una mezcla de amoníaco líquido y gaseoso. La cantidad de calor que cada libra de refrigerante recoge el producto y del aire en su paso por el evaporador se llama efecto de refrigeración o efecto refrigerante. El refrigerante líquido que entra al dispositivo de medición y al serpentín de enfriamiento tiene determinado contenido de calor a su temperatura dada, al igual que el vapor de refrigerante que sale del serpentín de enfriamiento a su temperatura menor.

La diferencia entre los contenidos de calor de esas dos fases (líquido y vapor) es la cantidad de calor que absorbe una libra de refrigerante al circular por el serpentín de enfriamiento. Por lo tanto, el efecto refrigerante se valoriza en términos de Btu por libra de refrigerante circulado.

El calor absorbido por el refrigerante depende de dos condiciones principales del refrigerante y de las temperaturas a esas condiciones:

1. La temperatura del refrigerante líquido que entra al control de refrigerante.
2. La temperatura de evaporación, o la temperatura del vapor que sale del evaporador.

En este caso en particular las condiciones bajo las cuales trabajará el evaporador son las siguientes: el refrigerante entra al dispositivo de medición en estado líquido a la temperatura de 21.6 °C y sale del evaporador en estado gaseoso a -8.8 °C.

Consultando la tabla que presenta las propiedades del amoniaco saturado, se ve que la entalpía (contenido de calor) del refrigerante líquido a 21.6°C es 122.80 Btu/lb , mientras que la entalpía del vapor a -8.8°C que sale del serpentín de enfriamiento es 616.61 Btu/lb. Por lo tanto, la diferencia entre esos dos números es 493.81 Btu/lb, que es la cantidad de calor que absorbe cada libra de refrigerante del producto o del aire bajo las condiciones específicas.

Con lo anterior, se puede ver que si la cantidad de calor que se ha de eliminar es de 336,000 Btu, se debe hacer circular 11.34 lbs de refrigerante por minuto. Cuando la cantidad total de Btu que se debe eliminar se divide entre la diferencia de entalpías del refrigerante, llegamos a la ecuación: $336,000 \text{ Btu/hr} / 493.81 \text{ Btu/lb}$ y esto da como resultado 680.423 lb/hr. Entonces $680.423 \text{ lb/hr} / 60 \text{ min/hr} = 11.34 \text{ lb/min}$. Por lo tanto, debe circular, por el evaporador, 11.34 libras de refrigerante por minuto.

2.4.3 Características

El evaporador en este caso es un evaporador de placas tipo inundado con un depósito de amoníaco a baja presión. El evaporador se encuentra incorporado al gabinete enfriador de la bebida gaseosa. Este gabinete cuenta con unas bandejas, las cuales reciben la bebida y la distribuyen entre las placas del evaporador para su enfriamiento. El gabinete de enfriamiento de la bebida gaseosa es de la marca *CROWN SUPER-COOL*. Todos los componentes del evaporador son de acero inoxidable.

2.4.4 Detalles del evaporador

En las figuras 25 y 26 se muestran algunos esquemas del evaporador.

Figura 25 Esquema de gabinete de enfriamiento

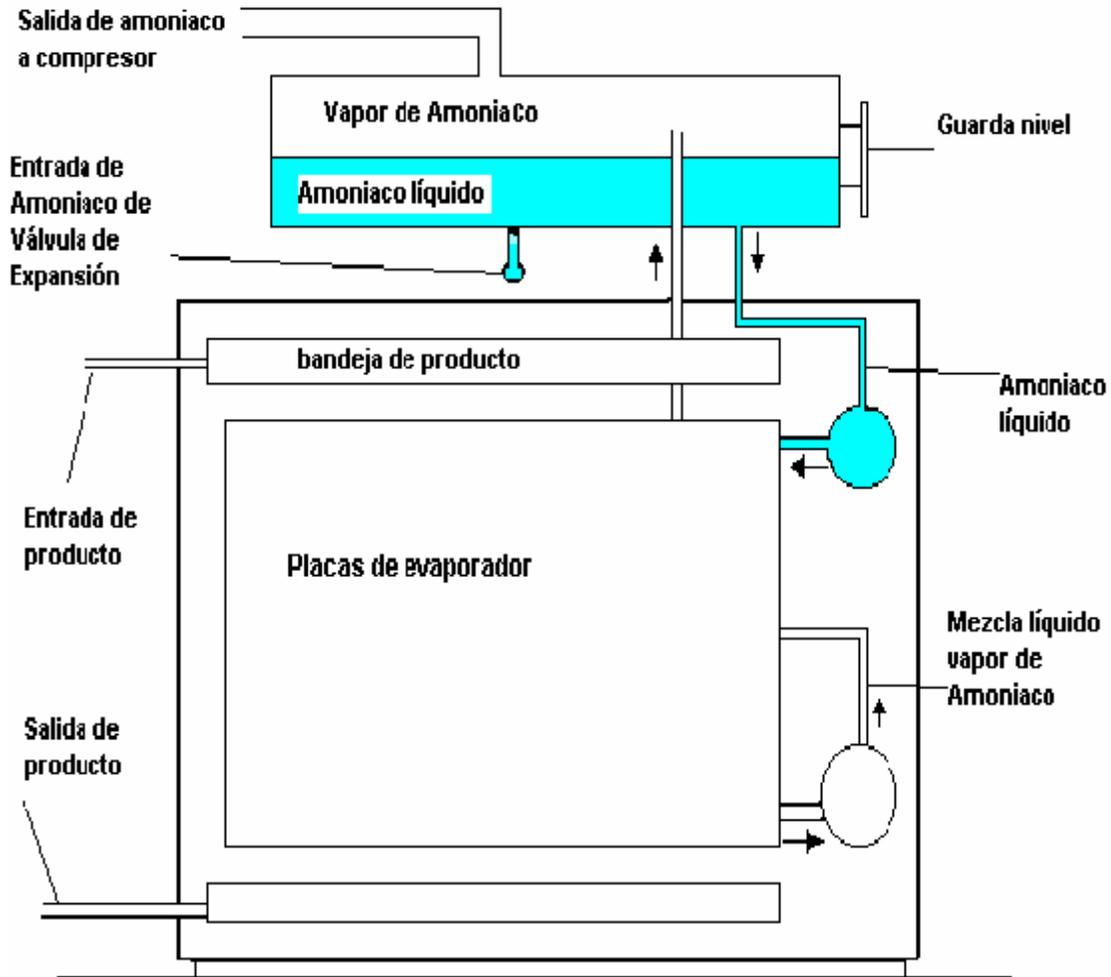
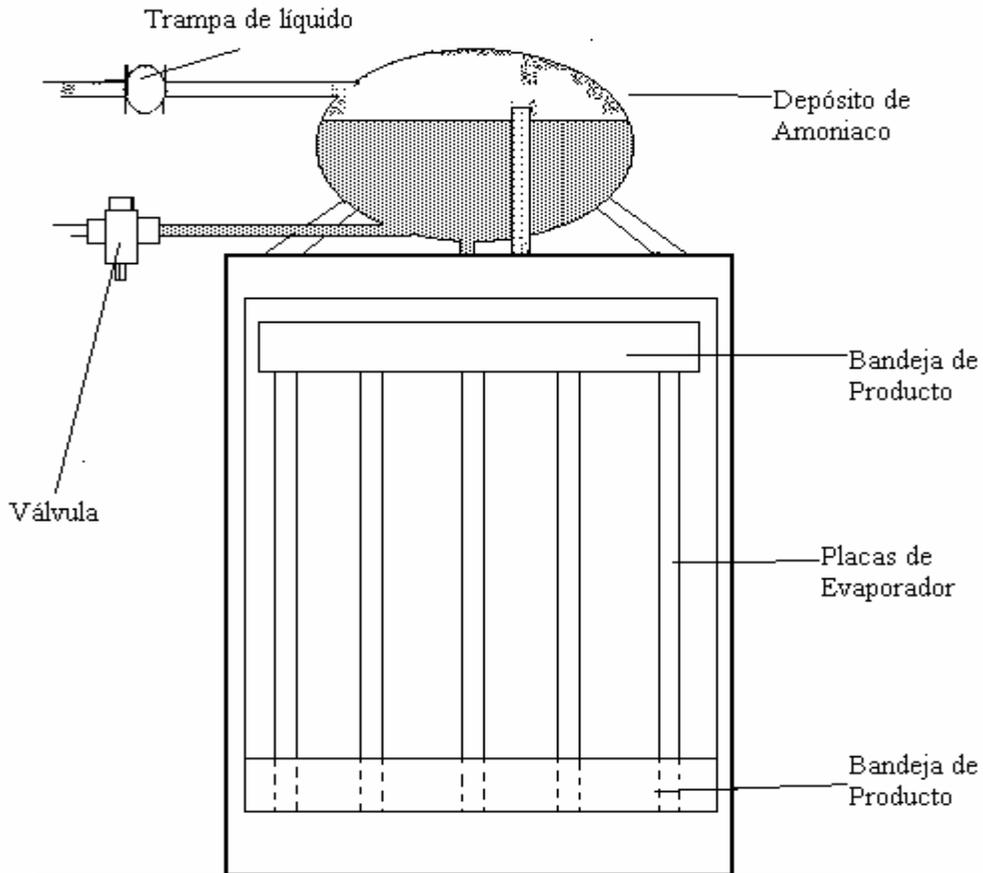


Figura 26 Esquema de evaporador de placas (vista frontal)



2.5 Tuberías, conexiones y accesorios

La tubería, las conexiones y los accesorios de cualquier sistema de refrigeración son vitales para la operación eficiente del compresor, el condensador, el evaporador y la válvula de expansión.

Las conexiones correctas que aquí se dan se basan en la experiencia técnica en refrigeración. A continuación presentamos una lista de accesorios comunes: separador de aceite (trampa de aceite), silenciador, cambiador de calor, colador-secador, acumulador en la succión, calentador de cárter, mirilla, indicador de humedad, válvula de agua, válvula solenoide, válvula de retención, regulador de presión de evaporador, válvula de alivio y tapones fusibles (hay otros accesorios, pero son tan especializados o se usan tan poco que no están en la lista).

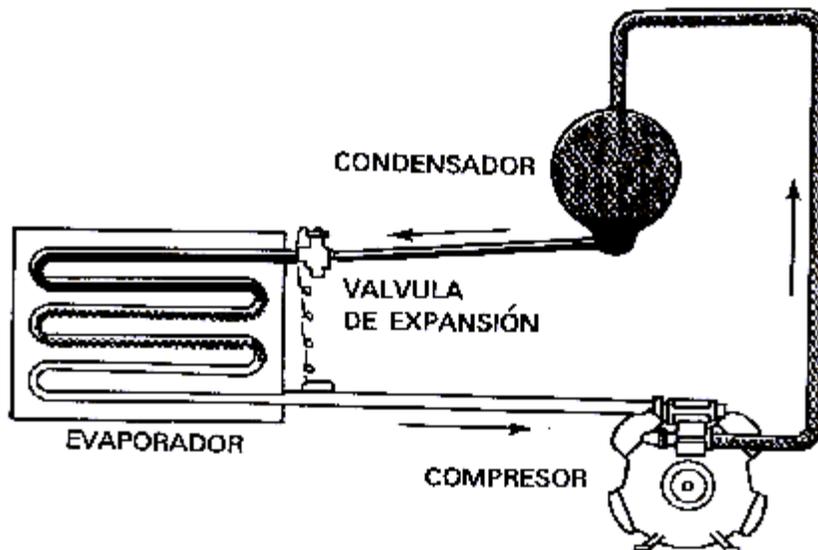
Tubería para refrigeración. La confiabilidad de un sistema de refrigeración o aire acondicionado armado en campo depende mucho del diseño e instalación adecuados de las diversas partes del sistema, de tubería. Una tubería adecuada de refrigeración es tan esencial para el funcionamiento correcto del sistema, como las venas y arterias del ser humano lo son para su organismo. Si la distribución y el dimensionamiento son incorrectos, puede hacer variar la eficiencia de los diversos componentes, y con ello influir sobre la capacidad y eficiencia del sistema.

La distribución de la tubería la hace normalmente un ingeniero de aplicaciones, pero el técnico de refrigeración que instala y provee servicio al sistema también interviene en esa distribución debido a la posibilidad de dificultades y fallas del sistema. La distribución del ingeniero puede ser sólo en diagrama, teniendo poco en cuenta las distancias que intervienen, sean horizontales o verticales. Por lo tanto, el técnico queda con frecuencia en una posición de tener que interpretar la voluntad del ingeniero para poder aplicar los principios aceptados para terminar la instalación en forma correcta.

La tubería que conecta las cuatro partes principales del sistema (figura 27) tiene dos funciones: 1) ser un conducto para la circulación de refrigerante, sea en estado líquido o vapor, dependiendo de la parte del sistema que se trate, y 2) ser un conducto a través del cual regrese aceite al compresor. Cada parte de la tubería debe llenar esos dos requisitos con una caída mínima de presión del refrigerante, teniendo al mismo tiempo un buen flujo de aceite para máxima protección del compresor.

La mayor parte del tubo de refrigeración que se usa en acondicionamiento de aire está hecho de cobre. Sin embargo, hoy en día el aluminio se usa con frecuencia para fabricar los circuitos internos de los serpentines del evaporador y condensador, aunque no se ha extendido su uso en fabricación en el campo, porque no se puede trabajar con tanta facilidad como el cobre, que es más difícil de soldar.

Figura 27 Tuberías de refrigerante



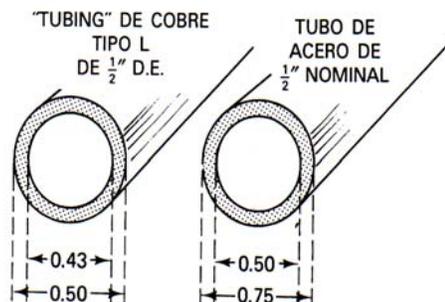
Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 152

La tubería de acero se usa para armar sistemas de refrigeración muy grandes en los que se necesitan tubos de 6 pulg. de diámetro o mayores. En la refrigeración moderna no se usan conexiones roscadas de tubo de acero, porque no se pueden hacer herméticas. Estos sistemas son soldados, y cuando se necesita conectar al equipo o se necesitan uniones de servicio se usan conexiones atornilladas.

El término *tubing* se aplica en general a materiales de pared delgada que se unen mediante sistemas que no sean de rosca cortada en la pared del tubo. Por otro lado, el término tubo común y corriente es el que se aplica a materiales con pared gruesa, como por ejemplo hierro y acero, en los cuales se pueden cortar en la pared, y que se unen mediante conexiones que se atornillan en el tubo. Estos tubos también se pueden soldar.

Otra diferencia entre *tubing* y tubo es el método de medición de tamaño (ver figura 2.16). Los tamaños de *tubing* se expresan en términos de diámetro exterior (DE), y los del tubo se expresan como diámetros nominales interiores (DI). Así, en la figura 28 el tubo de cobre tipo L de $\frac{1}{2}$ " tiene un diámetro interior de 0.43". El tubo de $\frac{1}{2}$ " nominal de acero tiene un diámetro interior de 0.50" y un diámetro externo de 0.75".

Figura 28 Método de medir *tubing* y tubo estándar



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 42

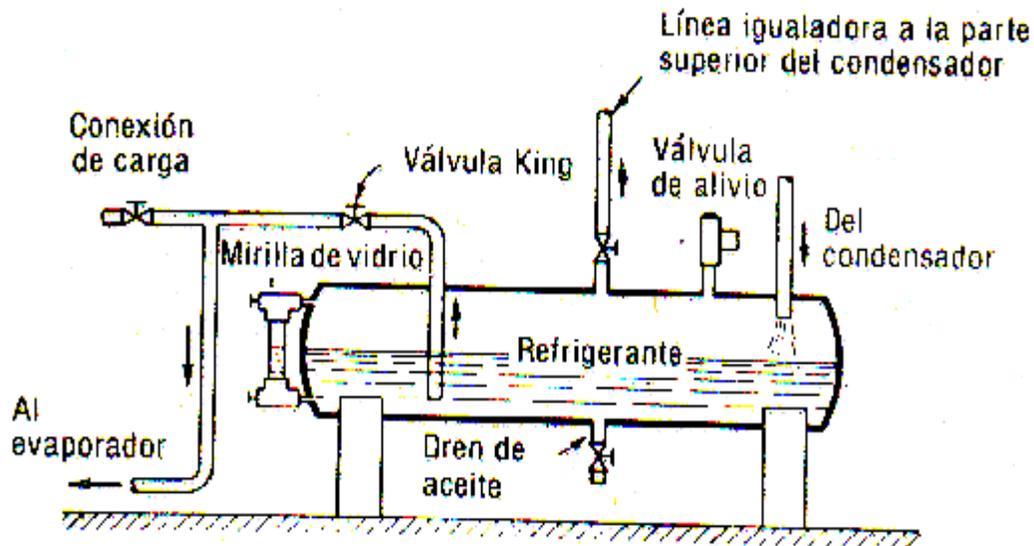
En este caso, para el sistema de refrigeración de amoníaco, se empleará tubo de acero de 3 pulgadas de diámetro para la descarga y tubo de 4 pulgadas de diámetro para la succión.

2.5.1 Depósito de refrigerante líquido

El depósito de refrigerante líquido desempeña las siguientes funciones: 1) almacena el refrigerante no usado que regresa del condensador; 2) almacena el refrigerante que va a ser evaporado por la válvula de expansión; 3) almacena el exceso de refrigerante en el sistema y 4) proporciona un lugar para almacenar refrigerante cuando se vacía el evaporador durante las operaciones de mantenimiento. El receptor debe tener una línea de retorno del condensador, una válvula de alivio y una línea igualadora a la parte superior del condensador. Esta línea de ventilación iguala la presión en el condensador y en el receptor, de modo que el refrigerante condensado fluya del condensador al receptor.

La línea de líquido se extiende dentro del receptor unas cuantas pulgadas arriba del fondo, de manera que no recoja mugre ni el aceite que se asienta. Una mirilla de vidrio muestra el nivel de líquido en todo momento. Un dren de aceite en el fondo del receptor sirve para sacar el aceite que es arrastrado por el refrigerante. En la figura 29 se muestra el depósito de refrigerante líquido con sus conexiones.

Figura 29 Depósito de refrigerante líquido

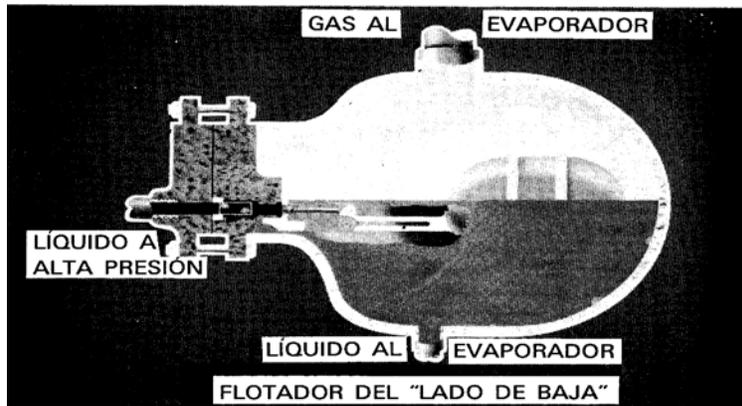


Fuente: Elonka Minich. Refrigeración y aire acondicionado. Pág.137

2.5.2 Depósito de refrigerante del lado de baja

El depósito de refrigerante de baja posee un flotador de baja presión. El medio principal de control es el nivel del líquido en la cámara del flotador, como se muestra en la figura 30. Este tipo de control siempre se usa con un evaporador inundado. La bola del flotador puede estar directamente en el evaporador o en una cámara adyacente a él. Si se usa la cámara, se debe conectar su parte superior e inferior con el evaporador, para que el nivel de líquido en ambas permanezca igual siempre.

Figura 30 Depósito de refrigerante del lado de baja



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 110

A medida que aumenta la carga en el evaporador, hierve más líquido y el nivel de éste en el evaporador y en la cámara del flotador baja. El flotador desciende con el nivel hasta que el orificio abre y admite más líquido del lado de alta presión. Cuando baja la carga del evaporador, hierve menos líquido, y el flotador sube hasta que cierra al orificio.

El flotador de baja presión es considerado uno de los mejores dispositivos de medición de que se dispone para el sistema inundado. Proporciona un control excelente y su simplicidad lo hace casi libre de problemas. Éste se puede encontrar en cualquier aplicación inundada, grande o pequeña, y puede usarse con cualquier refrigerante, por lo que en este caso se usará con amoníaco.

2.5.3 Trampas de aceite, visores y filtros

Los artículos esenciales del sistema básico de refrigeración son el compresor, condensador, dispositivo de medición y evaporador. Un accesorio de refrigeración es un artículo o dispositivo que agrega comodidad o eficacia al sistema. Un accesorio proporciona al sistema determinadas capacidades que le permiten llegar a un grado de eficiencia que es impráctico o virtualmente imposible de obtener con los componentes básicos disponibles en el comercio. Dichos accesorios tienen muchas formas y tamaños, y desempeñan un sinnúmero de funciones, pero su objeto principal es dar comodidad o eficiencia al sistema de refrigeración.

2.5.3.1 Trampa de aceite o separador de aceite

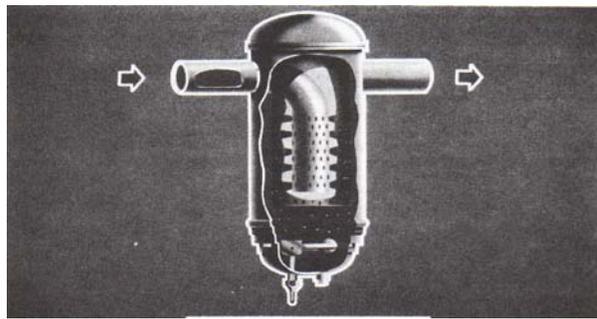
El objetivo del separador de aceite es reducir la cantidad del mismo en circulación por el sistema y con ello aumentar la eficiencia. Todos los sistemas de refrigeración tienen algo de aceite que pasa por ellos. En ciertos casos la cantidad en circulación puede afectar las características de transferencia de calor del evaporador, crear falso accionamiento del flotador o aun afectar la operación de la válvula de expansión. En esos casos, la trampa de aceite (separador de aceite) puede mejorar la eficiencia del evaporador, o reducir problemas con el flotador o la válvula, reduciendo el aceite que circula dentro del sistema.

Los sistemas con tuberías mal dimensionadas, o con problemas de obstrucción, con mucha frecuencia no regresan aceite al compresor, y con ello crean problemas de lubricación en éste. La inserción de una trampa de aceite a tales sistemas no corregirá dichos problemas. Una trampa de aceite no es 100% eficiente y deja pasar algo de aceite.

La instalación de una trampa de aceite en un sistema con problemas de obstrucción, tan solo demorará el problema; en ningún caso lo resuelve.

En el separador que se muestra en la figura 31, la mezcla caliente de gas y aceite del compresor entra en el lado izquierdo y pasa hacia abajo y afuera por el tubo perforado. La mezcla pega contra la rejilla en la que normalmente se separa el aceite del gas. El aceite escurre hacia abajo por la rejilla y pasa al pequeño cárcamo en el fondo de la trampa

Figura 31 Separador de aceite



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 167

El gas pasa por la rejilla y deja la trampa de aceite en el lado superior derecho. Cuando sube el nivel de aceite en el cárcamo, la válvula de flotador sube y el aceite regresa al cárter pasando por un orificio.

La trampa de aceite se instala normalmente en el tubo de descarga, tan cerca del compresor como se pueda. El tubo de retorno de aceite va directamente al cárter. La construcción interna de la trampa de aceite varía mucho; sin embargo, su aspecto externo y su colocación en el sistema hacen que sea relativamente fácil su identificación.

Cuando se usa una trampa de aceite, se deben tener ciertas precauciones. Una trampa de aceite fría condensa refrigerante gaseoso al estado líquido. Si se permite que éste regrese al cárter del compresor, puede dañarlo. También se debe tener cuidado de mantener limpio el orificio del flotador, porque puede obstruirse con cualquier lodo que pueda salir por la descarga del compresor. Si el flotador se atorara estando abierto, pasaría gas caliente al cárter. Si se atorara estando cerrado, no regresaría aceite al compresor.

2.5.3.2 Visores o mirillas

El visor (figura 32) en un sistema de refrigeración permite que el instalador o el técnico de servicio observe el estado del refrigerante en determinado punto. El visor consiste en una abertura en la tubería de líquido del sistema cubierta con un vidrio. Con frecuencia se usa un vidrio a cada lado del tubo para asegurar la iluminación.

Figura 32 Visor o mirilla de flujo

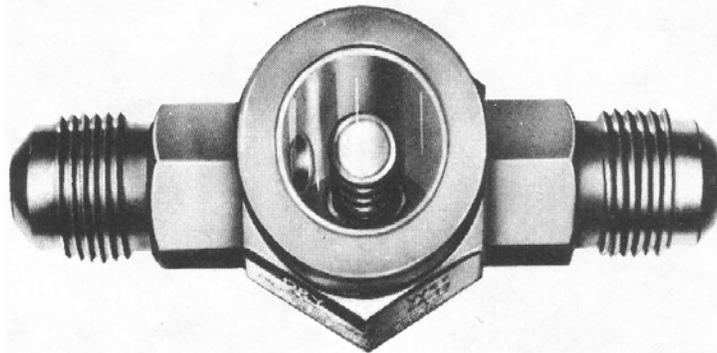


Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 171

Cuando el tubo está completamente lleno de refrigerante líquido, casi no hay obstrucción a través del visor. Sin embargo, si hay algo de gas, se verá de inmediato en forma de burbujas que pasan por el visor. Se debe hacer notar que, en un visor de este tipo, la mirilla también parecerá clara cuando sólo haya gas en ella.

A primera vista, el indicador de humedad puede parecer como un simple visor, lo cual es natural ya que el indicador es parte del mismo. Dentro del vidrio, pero expuesto al refrigerante líquido, se tiene un punto pequeño de color, como se ve en la figura 33. Este punto es el indicador de humedad. Tiene composición química especial que cambia de color dependiendo de la cantidad de humedad en el refrigerante. Cuando la cantidad de humedad está dentro de los límites establecidos por el fabricante, el punto será de un color. Sin embargo, si hay demasiada humedad, cambia el color del punto. Cuando un técnico de mantenimiento o de servicio vea que ha cambiado el color del punto, sabe que se deben tomar medidas para eliminar la humedad del sistema antes de que se presenten daños.

Figura 33 Visor e indicador de humedad



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 171

Dependiendo del objeto para el que se les use, el visor o el indicador de humedad pueden estar en más de un sitio. Si el visor se va a usar como ayuda para determinar si el sistema está cargado en forma correcta, se coloca en el condensador o en la salida del receptor. Si se va a usar para comprobar que no haya gas de evaporación instantánea antes que el líquido entre al dispositivo medidor, se localiza inmediatamente previo a éste.

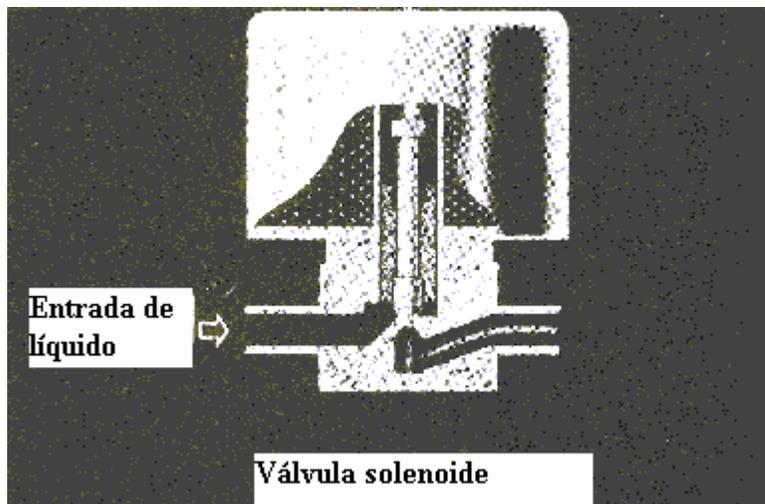
2.5.3.3 Válvula solenoide

La válvula solenoide se puede usar para controlar el flujo de un gas o de un líquido. Se usa con frecuencia en tubos de refrigerante líquido para controlar el flujo de éste hacia el evaporador. A veces se utiliza en los tubos de succión para aislar los evaporadores en sistemas de varios evaporadores y dos temperaturas. Otro empleo importante de la válvula solenoide es como piloto de una válvula mucho mayor.

Las válvulas solenoides se usan de muchos modos para controlar el flujo de líquido, pero una de las formas más comunes es como válvula de tubo de refrigerante líquido. En este caso, se usa la válvula solenoide para detener el flujo de líquido al evaporador cuando se han cumplido los requisitos de refrigeración. Cuando se necesita más refrigeración, la válvula solenoide abre y el líquido pasa al evaporador.

El principio de funcionamiento de una válvula solenoide es sencillo. Una bobina se coloca alrededor de un tubo que contiene un émbolo móvil. Cuando pasa corriente a través del conductor se crea un campo magnético. Este jala hacia arriba al émbolo, hacia adentro del tubo. Al subir el émbolo, abre una válvula y permite que pase el líquido.

Figura 34 Válvula solenoide



Fuente: Prentice Hall. Manual de Refrigeración y aire acondicionado. Pág. 172

La válvula de la figura 34 es una válvula normalmente cerrada, porque no hay flujo de corriente. Las válvulas solenoides también se fabrican en el tipo normalmente abierto. Estas válvulas se cierran sólo cuando se energiza la bobina.

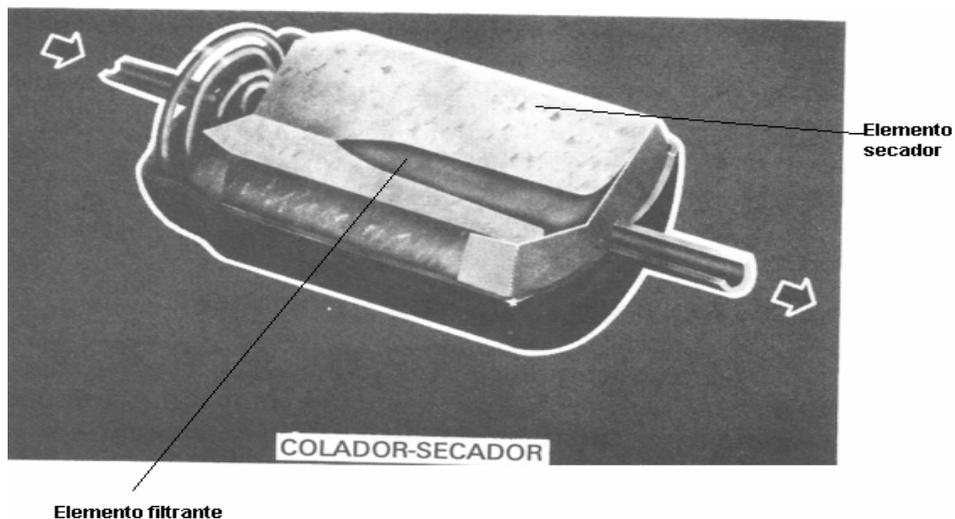
La válvula solenoide es un dispositivo extremadamente confiable, cuando la instala el fabricante. **Una mala instalación, como por ejemplo no colocar derecha la válvula o poner mal el cableado y torcer el cuerpo de la válvula debido a demasiado calor durante el latonado, puede hacer que una válvula solenoide sea fuente de problemas constantes.** Por lo tanto, lo más importante para este dispositivo es una instalación adecuada.

2.5.3.4 Filtro contra humedad

La humedad es un peligro dentro de un sistema de refrigeración. Sin embargo, si entra humedad al sistema de refrigeración se debe eliminar. Un método de eliminarla es el empleo del filtro o colador-seco. Este accesorio consiste en un cascarón a través del que pasa el refrigerante líquido. Dentro del cascarón se encuentra un material que se llama desecante o desecador. Al pasar el refrigerante cargado de humedad por el secador, éste elimina parte de la humedad. En cada paso por el secador, se elimina más humedad hasta que el refrigerante está suficientemente seco, o hasta que el secador haya alcanzado su capacidad de saturación de humedad. Cuando esto sucede, se debe reemplazar el secador.

El colador-secador (figura 35) también efectúa una segunda función, al filtrar y detener cualquier partícula sólida se encuentre en el refrigerante líquido. Esas partículas las filtra el núcleo del desecador.

Figura 35 Filtro contra humedad (Colador-secador)



Fuente: Prentice Hall. Manual de refrigeración y aire acondicionado. Pág. 169

El colador-secador se encuentra casi siempre en el tubo de líquido del sistema de refrigeración; esto se debe a que el volumen del líquido es mucho menor que el del gas y se puede usar un secador más pequeño. Esto, desde luego, resulta en menor costo. También, el dispositivo de medición queda protegido contra partículas sólidas cuando el colador-secador está en ese lugar.

Se deben resaltar dos hechos importantes concernientes a los secadores. El primero es que se deben reemplazar cuando el agente secador está saturado. El segundo es que ocasionan cierta caída de presión; por lo tanto, se deben dimensionar en forma correcta para evitar demasiada caída de presión con la evaporación instantánea resultante.

3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL MONTAJE E INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN

3.1 Campo de trabajo

Es muy probable que la mayoría de las fallas de operación en sistemas instalados en el campo puedan ser causadas por procedimientos inadecuados de instalación. Estas especificaciones son aconsejables para determinar la responsabilidad de la mano de obra de instalación, la calidad de los componentes y todos los dispositivos y conexiones requeridos para completar el sistema de refrigeración según la planificación y las condiciones en que se llevará a cabo la instalación, como descripción del tipo del equipo y accesorios de suministro, tiempo de entrega del sistema, garantía, forma de pago, mantenimiento, etc.

3.1.1 Diseño y aplicación

El corazón de todo sistema de refrigeración es el compresor; éste debe ser seleccionado para la capacidad requerida a las condiciones de operación deseadas de acuerdo con las recomendaciones del fabricante sobre el refrigerante y temperatura en que debe usarse. En el mercado, los compresores pueden operar con un refrigerante determinado en cualquiera de los rangos de operación que se muestran en la tabla II.

Tabla II Temperatura de evaporación

Temperatura alta	De 45 ° F a 0 ° F o de 55 ° F a 0 ° F
Temperatura media	De 25 ° F a -5 ° F
Temperatura baja	De 0 ° F a -40 ° F
Temperatura extra baja	De -20 ° F a -40 ° F

La operación a temperaturas de evaporación por arriba de los rangos de funcionamiento aprobados puede sobrecargar el motor del compresor.

Algunos principios de diseño son esenciales para el funcionamiento adecuado de cualquier sistema de refrigeración, entre ellos:

- 1-El sistema debe estar limpio, seco y libre de cualquier contaminante.
- 2-El compresor debe operarse dentro de los límites correctos de temperatura, presión y electricidad.
- 3-El sistema debe estar nivelado para asegurar una lubricación adecuada.
- 4-El sistema debe diseñarse y operarse de manera que no entre al compresor una cantidad excesiva de refrigerante líquido. Los compresores de refrigeración están diseñados para bombear vapor refrigerante, y toleraran únicamente una cantidad limitada de refrigerante líquido.
- 5-Los equipos deben localizarse en un área bien ventilada para evitar los reflujos de aire.
- 6-La capacidad del sistema debe ser suficiente para abatir la carga térmica en el tiempo deseado y para la cual fue calculado.
- 7-Las líneas de succión y líquido deben ser del tamaño adecuado para mantener la velocidad requerida del refrigerante.

3.2 Materiales para tubería de refrigeración

Toda la tubería de refrigeración debe estar libre de cualquier grasa, debe estar sellada y puede ser rígida o flexible del grado tipo "L" o "K"; todos los accesorios de conexión estarán fabricados de acero forjado. Todos los codos o vueltas deben ser de radio amplio. Las uniones soldadas son preferibles a las roscadas y deben utilizarse donde sea posible. Toda la tubería debe permanecer sellada excepto cuando se corte o se instale.

3.3 Recepción y manejo del equipo

Esta actividad debe ser asignada a una persona o grupo de personas, dependiendo de la magnitud del sistema. Todo el equipo y accesorios deben ser revisados para determinar cualquier daño, desperfecto o equivocación y debe de ser reportado inmediatamente. Es recomendable que el equipo y accesorios permanezcan en su empaque original hasta momentos antes de ser instalados para evitar posible contaminación o intercambios con otras unidades.

3.3.1 Registro e identificación del sistema

Una hoja de registro de servicio, funcionamiento e identificación de los componentes empleados en el sistema de refrigeración debe prepararse para cada instalación. La hoja debe incluir (pero no limitarse a):

- 1-Modelo, marca y capacidad del equipo.
- 2- Ubicación.
- 3-Empresa que lo instaló.
- 4- Características eléctricas.

- 5-Tipo de refrigerante.
- 6-Características de los motores ventiladores.
- 7-Frecuencia de realización del servicio.
- 8-Consumo eléctrico del compresor y los motores ventiladores.
- 9-Presión de succión y descarga.
- 10-Temperatura de la línea de succión y descarga.
- 11-Cambio de temperatura a través del filtro deshidratador.
- 12- Fecha de revisión y limpieza de los dispositivos eléctricos.
- 13-Fecha de limpieza de motores, gabinetes y otros.
- 14-Cualquier otro dato que la persona encargada del servicio de mantenimiento considere relevante.

3.4 Instalación de tubería de refrigeración

La tubería debe ser instalada de manera que las líneas horizontales tengan una inclinación hacia el compresor de 1 pulgada por 20 pies (2.54 cm por 6 metros). Todas las líneas deben estar soportadas a intervalos no mayores de 8 pies (2.3 mts). Las piezas de hule deben ser utilizadas entre la tubería y el soporte para prevenir daños a la línea. En donde una línea de succión sube más de 5 pies (1.5 mts), un sifón de aceite tipo P debe ser instalado en la base de cada tubo de succión ascendente para mejorar el regreso de aceite al compresor. Las líneas de succión y líquido y todos los accesorios deben ser de la medida recomendada para mantener las velocidades de refrigerante adecuadas. Todas las uniones de las líneas deben realizarse con soldadura mediante arco eléctrico de alta temperatura.

Las líneas de succión se deben aislar para evitar la condensación. El aislamiento deberá ser del tipo celular (*armaflex*) o equivalente, cubriendo estrechamente el tubo. La tubería debe ser instalada de tal manera que permita inspección y mantenimiento fácil; se debe evitar obstrucción de otros equipos. Se debe hacer circular nitrógeno seco a baja presión para limpiar la tubería después de instalada.

3.5 Instalación de accesorios

Los accesorios de los sistemas de refrigeración se deben instalar según las recomendaciones del fabricante; por lo general, estas recomendaciones son semejantes para las marcas que se encuentran en el mercado local. Se debe tener especial cuidado cuando se diseña un sistema de refrigeración o aire acondicionado; de acuerdo con nuestras necesidades de aplicación se deben elegir los accesorios y dispositivos.

3.6 Instalación de drenajes

El diámetro de la tubería de drenaje no debe ser menor que la dimensión de la conexión al serpentín. La tubería y accesorios deben ser de tipo PVC excepto para aplicaciones a baja temperatura, los cuales deben ser de cobre rígido con resistencia para evitar el congelamiento y bloqueo del tubo. Las líneas deben estar inclinadas para drenar por gravedad; no deben conectarse directamente al sistema de alcantarillado.

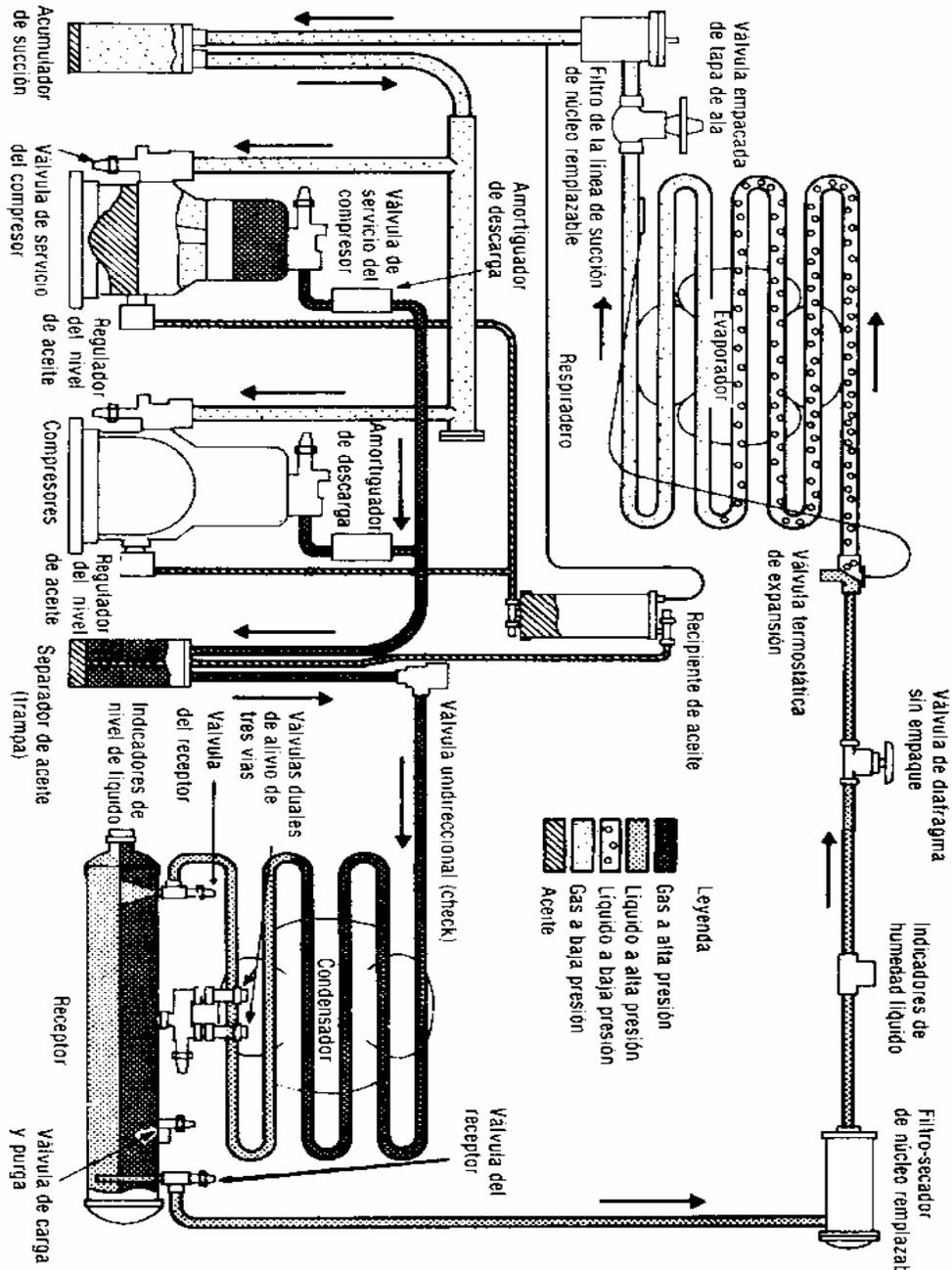
3.7 Instalación eléctrica

El suministro de energía, voltaje, frecuencia y fases deben coincidir con la placa de datos de los equipos del sistema, como motores eléctricos y dispositivos de seguridad, entre otros. Todo alambrado debe ser revisado cuidadosamente contra los diagramas del fabricante.

3.8 Esquema de distribución del equipo

En la figura 36, se muestra el esquema de un equipo de refrigeración mecánica por compresión de amoníaco. En el esquema se pueden observar las partes más importantes del equipo, como: compresor, condensador, evaporador, válvula de expansión.

Figura 36 Esquema de equipo de refrigeración mecánica por compresión de amoniaco



Fuente: Elonka Minich. Refrigeración y aire acondicionado. Pág.134

4. MONTAJE DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN

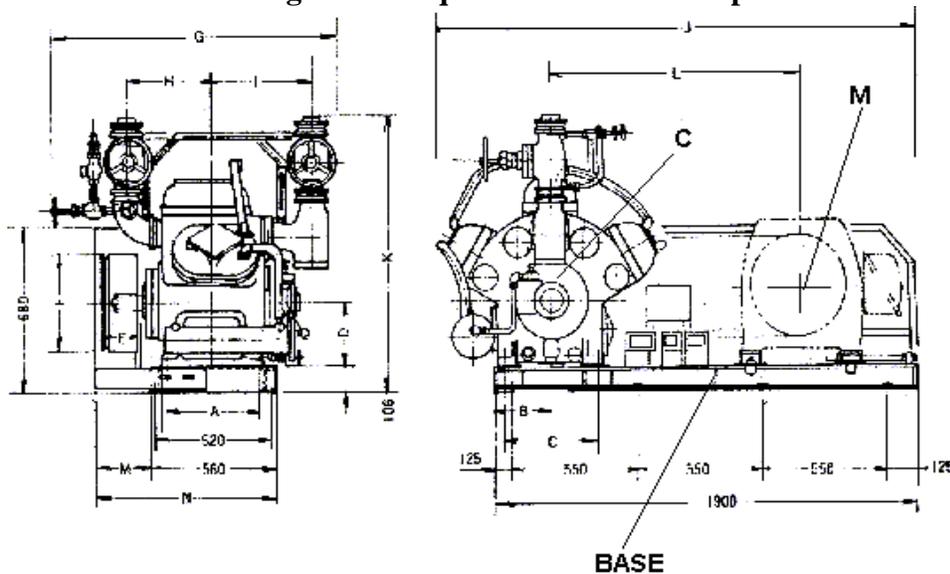
En el presente capítulo se hará una descripción de la forma en que se realizó el montaje de los componentes del equipo de refrigeración por compresión de amoniaco con una capacidad de 33 toneladas de refrigeración y que se ha utilizado para absorber el calor de la solución que se utiliza en la elaboración de bebidas gaseosas de la empresa TROPIC S.A.

Como primer punto se hará una descripción del montaje de los componentes principales del equipo de refrigeración, como la: unidad compresora (compresor de amoníaco), unidad condensadora (condensador evaporativo), depósito de líquido de refrigerante y, por último, unidad evaporadora (evaporador de placas). Seguidamente se dará una descripción de la instalación de la tubería y accesorios, instalación eléctrica, carga de refrigerante, carga de lubricante al compresor, verificación final de la instalación del equipo montado, arranque y puesta en marcha del equipo, cuadro de diagnóstico de fallas más comunes del equipo de refrigeración y por último la seguridad que se debe tener al trabajar con un equipo de compresión de amoniaco.

4.1 Montaje del compresor

El compresor de este sistema de refrigeración viene contenido en una unidad en la cual el compresor y el motor eléctrico que le da impulso están colocados sobre una plataforma o base metálica como lo muestra la figura 37. Por lo tanto, el montaje del compresor será el montaje de esta unidad. En la figura 37 se observa el compresor C y el motor eléctrico M sobre la base metálica. A estos componentes sobre la base metálica los llamaremos unidad compresora.

Figura 37 Esquema de unidad compresora



Fuente: Mayekawa MFG. Co., Ltd.-Manual de compresor MYCOM. Pág. 2

Para el montaje de la unidad compresora se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Se realizó el análisis del terreno.
- b) Después de realizar el estudio del terreno se procedió a realizar el cimientado (hacer la losa de concreto).
- c) Se corroboró la nivelación de la losa de concreto.
- d) Se colocó sobre la losa de concreto la unidad compresora con la ayuda de un montacargas.
- e) Se colocaron los pernos para anclar la unidad compresora al piso.
- f) Se realizó la instalación eléctrica.

4.1.1 Cálculo de carga y vibración

A continuación se presentan los factores que se deben tomar en cuenta para el cálculo de carga y vibraciones que deben soportar los cimientos.

4.1.1.1 Carga sobre el suelo

Entre las consideraciones iniciales que se deben tomar en cuenta se tiene el peso de la unidad compresora y los materiales que sujetan este peso. Se debe calcular el peso del conjunto total con los fluidos. Estos incluyen los equipos, accesorios y el peso de todos los líquidos (aceite y agua de enfriamiento) soportados por los cimientos. La tabla III muestra una tabla el peso de algunos líquidos.

Tabla III. Peso de algunos líquidos

Pesos de líquidos		
Líquido	lb/gal de E.U.A.	Densidad relativa
Agua/glicol	8,55	1,03
Agua	8,3	1
Aceite lubricante	7,6	0,916
Combustible diesel	7,1	0,855
Queroseno	6,7	0,80

Fuente: Bulletin 25-08M. Manual compresor MYCOM. Pág. 3

El material sobre el que descansan los cimientos debe soportar el peso total. La tabla IV muestra las capacidades de carga de algunos materiales comunes.

Tabla IV. Capacidad de carga de algunos materiales

Material	Capacidad para soportar carga	
	Carga segura de soporte lb/pulg ²	kPa
Roca, tierra endurecida	70	482
Arcilla dura, grava y arena gruesa	56	386
Arena semifina suelta y arcilla media	28	193
Arena fina suelta	14	96,4
Arcilla blanda	0 a 14	0 a 96,4

Fuente: Bulletin 25-08M. Manual compresor MYCOM. Pág. 2

El terreno, grava o piedra firme proporcionan un soporte satisfactorio para grupos de equipos de servicio estacionario o portátil. Este soporte puede utilizarse en casos en que la capacidad de soporte del material excede la presión ejercida por el conjunto de los equipos, y en casos donde el alineamiento no sea importante.

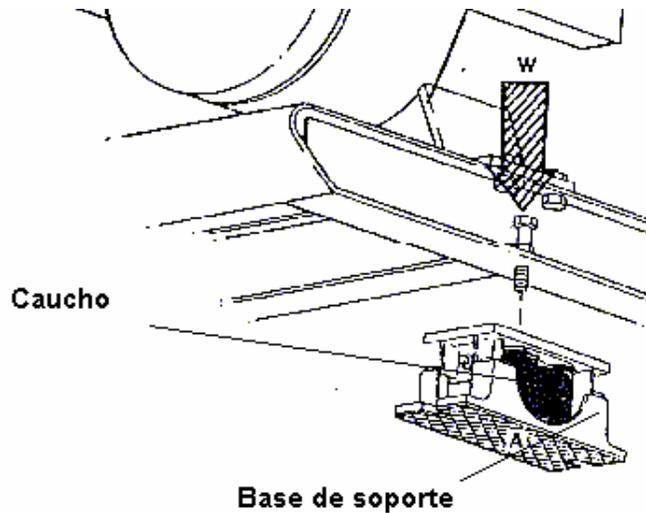
Los terrenos como arcilla fina, arena suelta o arena cerca del nivel de agua subterránea son particularmente inestables bajo cargas dinámicas y requieren cimientos sustancialmente más grandes. La información referente a la capacidad de soporte de los terrenos en un cierto lugar se pueden obtenerlos de fuentes locales y deben cumplir con los códigos de construcción locales.

4.1.1.2 Cálculos

El material que soportará la unidad compresora es un material sólido de tierra endurecida y roca. Para lo cual, según la tabla IV, la capacidad de carga es de 70 lb/pulg².

Como se muestra en la figura 38, el peso total de la unidad compresora es de 2,480.2 libras y el área que soportará la unidad es de 37.60 pulgadas cuadradas (8 plgs x 4.7 plgs), entonces:

Figura 38 Base de soporta de unidad compresora



Fuente: Bulletin 25-08M. Manual compresor MYCOM. Pág. 5

Para calcular la presión (P) ejercida por la unidad compresora se divide el peso total (W) por el área lateral (A) de la base de soporte.

$$P = W / A$$

Donde: P = Presión en lb/pulg².

W = Peso en libras.

A = Área en pulgadas cuadradas.

Entonces: $P = 2480.20 / 37.60 = 65.96$

La presión que soportará el material del suelo será de 65.96 lbs/plg². Según la tabla IV la carga que soporta el material del suelo es de 70 lb/plg². Por lo tanto, el material soportará el peso de la unidad compresora sin problema.

4.1.1.3 Cálculo de vibraciones

Por lo general, es conveniente considerar cualquier problema de vibración en términos de: (1) la fuente de vibraciones indeseables, (2) el receptor, por ejemplo, aquéllo que se vea afectado de manera adversa por las vibraciones y necesite de protección y (3) la trayectoria a lo largo de la cual llegan las vibraciones desde la fuente hasta el receptor. En situaciones prácticas, muchas fuentes contribuyen a menudo con las vibraciones experimentadas por un receptor único, y las vibraciones provenientes de una fuente dada llegan a él a través de varias trayectorias.

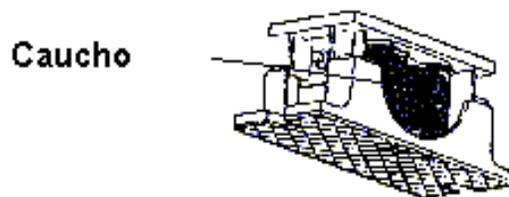
Al tratar con cualquier problema de vibración deberá tomarse en cuenta el fenómeno llamado resonancia. Cualquier sistema o estructura mecánica tiene un número de frecuencias en el cual puede comenzar a vibrar con mucha facilidad; estas frecuencias se llaman frecuencias naturales. La más baja de éstas, llamada frecuencia natural fundamental, es, a menudo, la que se excita con mayor facilidad y la que tiene más importancia. La resonancia se presenta si un sistema se encuentra sujeto a una fuerza vibratoria o a un movimiento en algunas de sus frecuencias naturales; después pueden ocurrir vibraciones grandes, aún con señales de entrada pequeñas. Las frecuencias naturales de un sistema pueden determinarse en forma sencilla; si el sistema se flexiona y se libera, o si se golpea, vibrará a una o más de sus frecuencias naturales.

Sin embargo, para observar las frecuencias naturales suele ser necesario que todas las fuentes de vibración relevantes se apaguen, de manera que las frecuencias naturales no queden ocultas por las frecuencias de excitación.

Con frecuencia es útil un estroboscopio para propósitos de diagnóstico. Este aparato consiste en una luz que se refleja a intervalos precisos de tiempo. La luz apunta hacia la parte vibratoria y la frecuencia de reflexión se ajusta en forma manual hasta que la parte vibratoria parece quedar inmóvil; entonces, puede leerse la frecuencia de la vibración en el instrumento.

Después, al cambiar un poco la frecuencia de centelleo, podrá observarse la vibración en cámara lenta aparente, para observar dónde ocurren los movimientos más grandes. En este caso en particular, la unidad compresora no presenta vibraciones excesivas en el compresor ni en el motor eléctrico; por lo tanto, el caucho que trae las bases de soportes (figura 39) absorberá cualquier vibración pequeña que se produjera.

Figura 39 Caucho en base de soporte de unidad compresora



Fuente: Bulletin 25-08M. Manual compresor MYCOM. Pág. 8

4.1.2 Pasos para la cimentación y anclaje

Las funciones principales de los cimientos son:

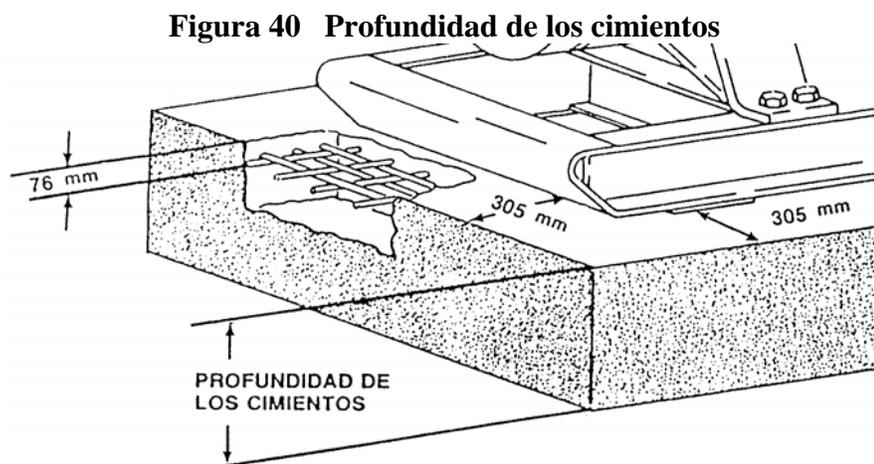
- Soportar el peso total del equipo (unidad compresora).
- Mantener el alineamiento entre el motor eléctrico y el compresor.
- Aislar el equipo de las vibraciones de la estructura circundante.

4.1.2.1 Base de hormigón

Existen varios tipos de cimientos básicos para equipos de aire acondicionado. Los cimientos escogidos dependerán de factores previamente descritos (carga sobre el suelo) así como de las limitaciones impuestas por la ubicación y aplicación específicas. No es necesario construir cimientos de hormigón masivos para equipos modernos de velocidad media. Se deben evitar las bases excesivamente gruesas para reducir a un mínimo la carga del subsuelo o terreno. Las bases deben tener únicamente el espesor suficiente para impedir la reacción de flexión y torsión, y retener suficiente área lateral para el soporte.

Las normas generales mínimas para cimientos de hormigón son:

- La resistencia debe soportar el peso de los equipos con fluidos más las cargas dinámicas.
- Tener profundidad suficiente para alcanzar un peso mínimo igual al peso del equipo.
- Las dimensiones externas deben exceder las del equipo un mínimo de 30 cm (1 pie) por todos los lados, como se muestra en la figura 40.



Fuente: Bulletin 25-08M. Manual compresor MYCOM. Pág. 12

El cálculo de la profundidad de los cimientos se realiza de modo que sea igual al peso del equipo:

$$FD = W / (D \times B \times L)$$

FD = Profundidad de los cimientos

W = Peso total del equipo.

D = Densidad del hormigón (Nota: use 2,402.8 kg/mt³ o 150 lb/pie³.)

B = Ancho de los cimientos

L = Longitud de los cimientos

Las dimensiones del equipo son de 6.23 pies de largo y 2.62 pies de ancho. El peso es de 2,480.20 libras. Entonces para el cálculo de la profundidad del cimiento tenemos:

$$W = 2,480.20 \text{ lbs.}$$

$$D = 150 \text{ lbs/plg}^3.$$

$$B = 2.62 \text{ pies} + 1 \text{ pie} = 3.62 \text{ pies}$$

$$L = 6.23 \text{ pies} + 1 \text{ pie} = 7.23 \text{ pies.}$$

Por lo tanto,

$$FD = 2480 / (150 \times 3.62 \times 7.23) = 0.63175 \text{ pies}$$

Entonces la profundidad del cimiento para la unidad compresora será de 0.63175 pies (192 milímetros).

La mezcla sugerida para el hormigón es de 1:2:3 por volumen de cemento, arena y agregado respectivamente, con un asentamiento máximo de 4 pulgadas (101.6 mm) y 28 días de resistencia a la compresión de 3,000 lb/plg².

Para el anclaje de la unidad compresora se emplearon 8 pernos de acero con un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

4.2 Montaje de unidad condensadora

La unidad condensadora (condensador evaporativo) es una unidad autocontenida del tipo paquete, por lo cual para su montaje se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Se verificó que el piso del área se encontrará nivelado. Se utilizó un nivel y se pudo observar que el piso tenía una leve inclinación.
- b) Se aplicó otro revestimiento de concreto sobre la superficie actual, de tal manera que permitiera que el piso se nivelara.
- c) Se corroboró de nuevo la nivelación del piso.
- d) Se colocó la unidad condensadora con la ayuda de una grúa hidráulica, ya que la unidad condensadora debería quedar a una altura de dos metros sobre el piso.
- e) Se procedió a la colocación de los pernos de anclaje de la unidad condensadora; no hubo necesidad de colocar un material aislante, ya que la unidad condensadora no produce vibraciones grandes.
- f) Se colocaron las tuberías que unirían a la unidad condensadora con el resto de los componentes del sistema (tubería de amoníaco y agua de enfriamiento del evaporador).
- g) Se procedió a la instalación eléctrica de los motores de las turbinas de enfriamiento.

4.2.1 Cálculo de carga y vibración

La unidad condensadora no produce vibraciones grandes, ya que en ella las únicas piezas móviles son las dos turbinas que proporcionan el flujo de aire para que se produzca la condensación del refrigerante. Las turbinas son impulsadas por motores eléctricos; tanto las turbinas como los motores eléctricos no producen vibraciones grandes, ya que estos vienen balanceados y montados sobre bases que absorben las pocas vibraciones que producirían.

4.2.2 Cálculo para el anclaje

La unidad condensadora no produce vibraciones de consideración, por lo tanto no es necesario hacer cálculos para el anclaje, sólo se necesita sujetar la unidad al piso para que no se mueva al momento de un movimiento sísmico o algún fenómeno natural.

Para sujetar la unidad condensadora al piso se emplearon cuatro pernos de acero de ½ pulgada de diámetro y 3 pulgadas de largo. Los pernos se colocaron y se fundieron en la losa que soporta al evaporador.

4.3 Montaje del depósito de líquido refrigerante

El depósito de líquido es un cilindro de acero de 0.4 metros de diámetro y 3 metros de largo. Este cilindro no tiene ningún componente móvil ya que sólo es un depósito donde se acumula el amoníaco líquido del sistema.

4.3.1 Pasos para la colocación y anclaje

- a) Primero se procedió a verificar la nivelación del piso donde se colocaría el depósito de líquido.
- b) Después de verificar la nivelación del piso, se procedió a la colocación de los pernos de acero que fijarían el depósito al suelo.
- c) Con la ayuda de un montacarga, se procedió a colocar en su lugar el depósito de líquido.
- d) Se colocaron las tuercas de los pernos para dejar fijo el depósito al piso.
- e) Se procedió a la colocación de la tubería y accesorios del depósito de amoníaco.

4.4 Montaje de unidad evaporadora

El evaporador de placas que se empleó en este sistema de amoníaco es una unidad que viene en un gabinete de enfriamiento. Este gabinete de enfriamiento es en sí la máquina que produce el cambio de temperatura de 27 °C a 4.5 °C en la bebida gaseosa, por lo tanto al hablar del montaje de la unidad evaporadora, se estará refiriendo al montaje del gabinete de enfriamiento. Este gabinete no posee piezas móviles o eléctricas ya que el enfriamiento se produce por conducción y convección (contacto de líquido con las placas del evaporador)

4.4.1 Pasos para la colocación

- a) Se procedió a la verificación de la nivelación del piso.
- b) Se colocaron en el piso los pernos para fijar el gabinete de enfriamiento.
- c) Con la ayuda de un montacargas, se colocó el gabinete de enfriamiento en su posición final.
- d) Se procedió a la colocación de los accesorios y la tubería de amoníaco para unir el gabinete de enfriamiento con el resto del sistema de enfriamiento.

4.5 Instalación de tubería y accesorios

La tubería que se utilizó en este sistema de refrigeración, se unió en tres diferentes formas: uniones soldadas (soldadura arco eléctrico), uniones acopladas con flanco y uniones enroscadas.

La tubería que se utilizó en la instalación fue tubería de hierro negro cédula 40. Para la tubería que se unió por medio de soldadura de arco eléctrico, se utilizó electrodo 6017. Para soldar esta tubería no se utilizó ningún tratamiento especial. Para el compresor de amoníaco se utilizó tubería de dos diámetros diferentes. Se utilizó tubería de 1.5 pulgadas en el lado de descarga y tubería de 2 pulgadas en el lado de succión. Para unir esta tubería se utilizaron uniones de tipo brida y por medio de soldadura de arco eléctrico.

Para la unidad condensadora, se utilizó tubería de 1.5 pulgadas de diámetro para el paso de amoníaco; para el sistema de enfriamiento del evaporador (paso de agua) se utilizó tubería galvanizada de 1.5 pulgadas de diámetro para la alimentación de las toberas del evaporador y una tubería de 4 pulgadas de diámetro para recolectar el agua que cae de las toberas hacia el depósito de recirculación de agua. Para unir la tubería de paso de amoníaco se utilizó soldadura de arco eléctrico y para la tubería galvanizada de paso de agua se utilizaron uniones roscadas.

Para el depósito de amoníaco líquido se empleó tubería de 1.5 pulgadas de diámetro y tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada; la tubería que llegó al depósito de líquido se unió mediante uniones roscadas.

Para el evaporador, se empleó tubería de $\frac{3}{4}$ pulgada de diámetro para la entrada y tubería de 2 pulgadas de diámetro para la salida. La tubería de entrada se unió por medio de uniones roscadas y la tubería de salida del evaporador se unió con acoplamientos de brida y uniones roscadas. Para la unión de la válvula de expansión y los accesorios en la tubería, como trampas de aceite, filtros, válvulas de paso y visores, se utilizaron uniones roscadas.

4.6 Instalación eléctrica

La alimentación eléctrica principal con la que trabajan los componentes principales del sistema de refrigeración de amoniaco es de 550 voltios trifásica. Los componentes eléctricos del sistema de refrigeración que funcionan directamente con 550 voltios trifásicos son: motor eléctrico que da movimiento al compresor de amoniaco y los motores de las turbinas del condensador evaporativo. El motor eléctrico que mueve el compresor tiene una potencia de 50 hp y los motores del condensador evaporativo tienen una potencia de 3 hp.

Los controles de presión de aceite del compresor, presión de amoniaco y sensores del sistema de refrigeración son alimentados con un voltaje de 110 voltios monofásicos. Para el motor eléctrico que proporciona movimiento al compresor de amoniaco, se empleó cable AWG 4 tipo RHW para su instalación eléctrica, así como un arrancador magnético trifásico NEMA 3 de 3x60 amperios Cutler-Hammer con su protector de fase correspondiente.

Para la instalación eléctrica de los motores eléctricos del evaporador evaporativo, se empleó cable AWG 10 RHW, así como un arrancador magnético Nema 0 de 2x30 amperios Cutler-Hammer y su protector de fase correspondiente. Para la conexiones eléctricas de los presostatos se empleó alambre AWG calibre 14 tipo RH.

4.7 Carga de refrigerante

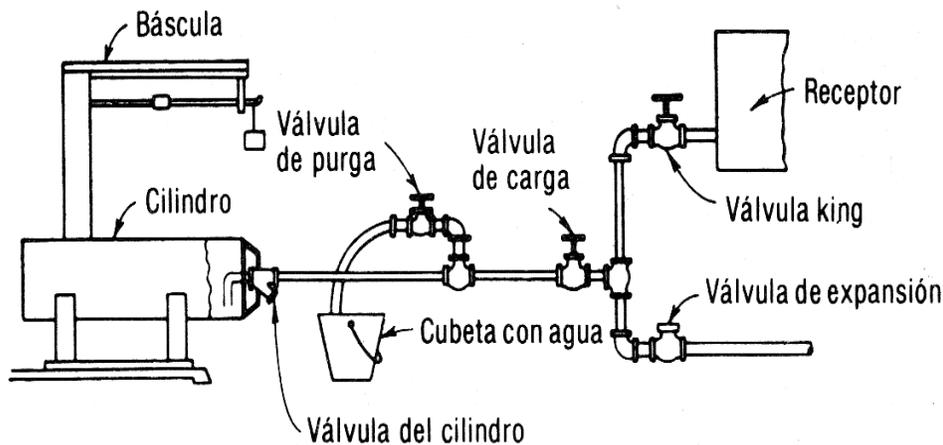
El amoniaco seco (anhidro) se embarca en cilindros de 150,100 o 50 lb netas; independientemente de su tamaño, se llenan de manera que a los 65 °F el amoniaco líquido ocupe solamente el 88 % del cilindro. El espacio adicional permite la expansión del amoniaco a temperaturas mayores. Los cilindros se deben mantener lejos de las líneas de vapor, tubos de escape caliente y de dispositivos de calefacción. Nunca se debe aplicar calor con un soplete a un cilindro de amoniaco. Para la carga de refrigerante de este equipo se utilizaron cilindros de 100 lbs.

La conexión de carga del refrigerante está siempre en el lado de alta presión del sistema. Esto evita daños al compresor y los “tragos” de líquido. La conexión está cerca del receptor, donde el refrigerante puede almacenarse. La mayor parte de las plantas grandes tienen la carga de amoniaco en la conexión entre la válvula King y la válvula de expansión. Este caso no es la excepción. Primero se eleva $\frac{3}{4}$ de pulgada el extremo del fondo del cilindro, asegurándose de que el tubo que se inserta para vaciar apunte hacia abajo. Con la línea y las conexiones de carga bien apretadas, cierre la válvula King y abra la válvula del cilindro y de carga.

Cuando esté colocado todo, cierre la válvula de expansión y haga trabajar lentamente el compresor manteniendo toda la presión del agua en el condensador. El amoniaco es bombeado hacia el condensador y el líquido se acumula en el receptor. Observe la mirilla del receptor para evitar que se llene en exceso. Tan pronto se muestre en la mirilla algo de líquido, abra la válvula del cilindro y la válvula del receptor.

Asegúrese de que la válvula de purga esté cerrada. Al ir entrando el amoniaco en el cilindro, vaya verificando con la báscula la velocidad de llenado. Después de cierto tiempo, el flujo se hace más lento debido a la presión que se forma en el cilindro. Cierre la válvula del receptor y abra la de purga. Esto permite que el gas no condensable fluya del cilindro hacia el agua en la cubeta, la cual absorberá el gas de amoniaco que viene con los otros gases. En la medida que se formen burbujas, habrá gas no condensable. Cierre la válvula de purga cuando se detenga el burbujeo; luego abra la válvula del receptor y continúe el llenado. Cuando la báscula muestre que se ha llegado a la cantidad correcta de amoniaco (como se muestra en la figura 41) deje una tolerancia por alguna cantidad de amoniaco que pudiera haber estado en el cilindro al comienzo, cierre las válvulas del receptor y del cilindro y desconecte el cilindro.

Figura 41 Carga de amoniaco en un sistema grande entre la válvula King y la válvula de expansión



Fuente: Elonka/Minich. Refrigeración y acondicionamiento de aire. Pág. 219

Para cerciorarse de que el cilindro está descargado dentro del sistema, ponga el cilindro en la báscula y observe el cambio de peso. Compare este peso con el peso de tara del fabricante (marcado en el cilindro) para ver si el cilindro está vacío. Para cargar un sistema con gas de amoniaco en lugar de líquido, se voltea el cilindro de manera que el tubo de vaciado apunte hacia arriba. Calentar el cilindro con agua caliente acelerará el flujo, pero no es recomendable hacer esto. Se debe verificar siempre que el gas sale del cilindro y no se condensa dentro.

4.8 Carga de lubricante

Para cargar el lubricante en el sistema de refrigeración, el lubricante se debe introducir en el cárter del compresor. El compresor trae lubricante de fábrica para que sus piezas no se oxiden o se queden pegadas. Una vez que se unieron las tuberías del sistema, se procede a regular el nivel de aceite del compresor.

Para regular el nivel de aceite en el cárter del compresor, se debe conectar una manguera en el tubo de llenado del compresor y se introduce el extremo libre de la manguera en una cubeta de aceite. Cierre la válvula de succión del refrigerante mientras la unidad esté trabajando, y abra la válvula de vaciado. Esto generará un vacío en el cárter. Luego se abre un poco la válvula en el tubo llenador y se introduce la cantidad requerida de aceite, se debe tener el cuidado de que el extremo de la manguera permanezca inmerso en el aceite. Cierre la válvula antes de que la cubeta se vacíe para evitar que entre aire al sistema.

4.9 Verificación final

La verificación final se refiere a una revisión cuidadosa y detallada de cada uno de los componentes que se instalaron antes del arranque y puesta en marcha del equipo de refrigeración. Dentro de estas revisiones tenemos: la revisión de los pernos de anclaje, revisión de llaves de paso de refrigerante, revisión de niveles de aceite y refrigerante, revisión de conexiones eléctricas, revisión de tensión de fajas que impulsan los motores eléctricos.

4.10 Arranque y puesta en marcha

Para el arranque de un sistema de amoniaco se deben tener en cuenta los siguientes pasos.

- 1) Activar el sistema de agua de enfriamiento.
- 2) Abrir la válvula de descarga del compresor.
- 3) Arrancar el compresor.
- 4) Abrir la válvula de succión del compresor hasta que la presión en el evaporador descienda a unas 20 psi, y luego abrirla completamente.
- 5) Abrir la válvula de líquido y ajustar la válvula de expansión para que dé la presión de succión deseada.

A medida que la planta va ya entrando en operación regular, debe revisarse los rodamientos o chumaceras, los cilindros, las bombas de aceite, los manómetros, los termómetros y otros dispositivos, para buscar indicios de calentamiento o de problemas. Se deben ajustar las válvulas de los medidores de presión para evitar que las agujas vibren excesivamente. Hay que cerciorarse de que la máquina tiene suficiente aceite en el cárter, una o dos pulgadas más son lo mejor durante la primera semana de operación en el caso de una máquina nueva. Debe cambiarse el aceite cada semana durante el primer mes. Luego, hay que abrir el cárter y limpiarlo antes de poner aceite de repuesto.

Se deben probar los controles automáticos y los cortes de seguridad. Las válvulas de flotador o de expansión se deben ajustar para balancear la carga.; luego se procede a colocar el sistema en funcionamiento automático.

En condiciones normales de operación, el receptor estará a un cuarto o a la mitad de refrigerante líquido. La válvula principal de líquido (válvula King) se extiende dentro del receptor, bajo la superficie del líquido, aún cuando el recipiente esté casi vacío. Esta válvula debe permanecer completamente abierta cuando el sistema esté funcionando. Debe abrirse la válvula de expansión una parte de vuelta; sólo lo suficiente para mantener la presión de succión en el punto deseado y evitar que se acumule hielo en la línea de succión hacia los cilindros del compresor. Sin embargo, el hielo en la trampa de succión no causa problemas.

4.11 Cuadro de diagnóstico de fallas

A continuación se presenta la tabla V con los problemas más comunes que se pueden presentar en un sistema de refrigeración por compresión de amoníaco. Para la solución de los problemas se tomarán en cuenta fallas mecánicas y eléctricas como posibles causas que puedan ocasionar el desperfecto.

Tabla V. Problemas comunes de un sistema de refrigeración

Problema: El compresor hace ciclos cortos		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. Operación normal excepto por los paros y arranques frecuentes.	1. Contacto intermitente en el circuito control.	1. Repare o reemplace el control eléctrico que tiene falla.
2. Operación normal excepto por los paros y arranques frecuentes.	2. El diferencial controlador de baja presión está muy cerrado.	2. Reajuste el diferencial de acuerdo con las condiciones adecuadas de trabajo.
3. La válvula puede silbar cuando se cierra. También la temperatura cambia en la línea de refrigerante a través de la válvula.	3. La válvula solenoide de la línea de líquido tiene fuga.	3. Repare o cambie.
4. Presión de descarga excesivamente alta.	4. Condensación defectuosa.	4. Revise si falta agua o si hay problema en el condensador evaporativo.
5. Presión de descarga alta.	5. Sobrecarga de refrigerante o de gas no condensable.	5. Extraiga el exceso de refrigerante o purgue el gas no condensable
6. Operación normal excepto por los paros y arranques demasiado frecuentes en el interruptor de control de baja presión.	6. Falta refrigerante.	6. Repare la fuga de refrigerante y vuelva a cargar.
7. Alta presión de descarga.	7. Válvula reguladora de agua inoperante o restringida por suciedad o temperatura de agua demasiado alta.	7. Limpie o repare la válvula de agua.
8. Alta presión de descarga.	8. Tubería de agua restringida o presión demasiado baja en el agua de alimentación.	8. Determine la causa y corríjala.

Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
9. Presión de succión demasiado baja y congelamiento en el filtro.	9. Filtro de la línea líquida medio tapado.	9. Limpie el filtro.
10. El motor arranca y se detiene rápidamente.	10. Motor con falla.	10. Repare el motor o cámbielo.
11. El compresor se detiene por el corte de alta presión. a. No hay agua. b. Toberas de rociado tapadas	11. Operación defectuosa del condensador evaporativo.	11. Descubra la causa y corrija. a. Llene de agua. b. Limpie las toberas de rociado.
Problema: El compresor trabaja sin interrupción		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. Alta temperatura en el área acondicionada.	1. Carga excesiva.	1. Revise si hay excesivo aire de repuesto o infiltración. Revise si el aislamiento del espacio es adecuado.
2. Baja temperatura en el área acondicionada.	2. El termostato está ejerciendo su función de control a una temperatura demasiado baja.	2. Reajuste el termostato o repárelo.
3. Burbujas en la mirilla.	3. Falta de refrigerante.	3. Repare fuga y recargue
4. Alta presión de descarga.	4. Sobrecarga de refrigerante.	4. Purgue o quite el exceso.
5. Compresor ruidoso o trabajando a una compresión de descarga baja o a una presión de succión anormalmente alta.	5. Las válvulas del compresor no cierran bien.	5. Repare el compresor.
Problema: El compresor pierde aceite		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. Nivel de aceite demasiado bajo.	1. Carga insuficiente de aceite.	1. Agregue suficiente cantidad de aceite al compresor.
2. El nivel del aceite baja gradualmente.	2. Filtros o válvulas tapados.	2. Limpie o repare y cambie.

Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
3. Succión excesivamente fría.	3. Válvula de expansión o bulbo remoto flojos.	3. Asegure que el bulbo remoto y la línea de succión tengan un buen contacto.
4. Succión excesivamente fría. Operación ruidosa del compresor.	4. El líquido se regresa inundando el compresor.	4. Restablezca y reajuste el sobrecalentamiento o revise el contacto que hace el bulbo remoto.
5. Arranques y paros demasiado frecuentes del compresor.	5. Corto-ciclado.	5. Descongele; revise el corte de presión.
6. Aceite alrededor de la base del compresor y nivel de aceite bajo en el cárter.	6. Las uniones en el cárter dejan escapar aceite.	6. Repare la fuga y agregue aceite apropiado para refrigeración.
Problema: El compresor hace mucho ruido		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. El compresor es detenido por el control de falla de aceite.	1. Falta de aceite.	1. Agregue aceite.
2. Chillido cuando el compresor trabaja.	2. Sello seco o rayado.	2. Revise el nivel de aceite.
3. El compresor golpetea.	3. Partes internas del compresor rotas.	3. Repare el compresor.
4. Línea de succión extraordinariamente fría.	4. Válvula de expansión pegada en posición abierta.	4. Repare o reemplace.
Problema: Sistema falto de capacidad		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. Cambio de temperatura en la línea de refrigerante a través del filtro o la válvula de solenoide para detención.	1. Filtro o válvula para detención tapados.	1. Limpie o reemplace.
2. Flujo de aire reducido.	2. Hielo o suciedad en el evaporador.	2. Limpie o descongele el serpentín.
3. Corto-ciclado u operación continua.	3. Válvula de expansión pegada u obstruida.	3. Repare o cambie la válvula de expansión. 4.

Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
4. Sobrecalentamiento demasiado elevado.	4. Excesiva caída de presión en el evaporador.	4. Revise el sobrecalentamiento y reajuste la válvula termostática de expansión.
Problema: Presión de descarga demasiado alta		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. El agua deja el condensador excesivamente caliente.	1. Agua del condensador escasa o muy caliente.	1. Suministre agua adecuada para el enfriamiento, ajuste la válvula del agua.
2. Poco aire o escaso volumen de agua para el rociado. Superficie incrustada.	2. Operación inapropiada del condensador evaporativo.	2. Corrija el flujo de aire o de agua. Limpie la superficie del serpentín.
3. Condensador demasiado caliente y con excesiva presión.	3. Aire o gas no condensable en el sistema.	3. Purgue.
4. Condensador demasiado caliente y excesiva presión de descarga.	4. Sobrecarga de refrigerante.	4. Quite el exceso o purgue.
Problema: Presión de descarga demasiado baja		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. El agua sale del condensador excesivamente fría	1. Demasiada agua hacia el condensador.	1. Ajuste la válvula reguladora de agua.
2. Burbujas en la mirilla.	2. Falta de refrigerante.	2. Repare la fuga y cargue.
Problema: Presión de succión demasiado alta		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. El compresor opera sin interrupción.	1. Carga excesiva en el evaporador.	1. Revise si hay excesiva renovación o infiltración de aire o mal aislamiento de los espacios.
2. Línea de succión extraordinariamente fría. El líquido rebalsa hacia el compresor.	2. Sobrealimentación de la válvula de expansión.	2. Regule el sobrecalentamiento ajustando la válvula de expansión.

Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
3. Línea de succión anormalmente fría. El líquido rebalsa hacia el compresor.	3. Válvula de expansión pegada abierta.	3. Repare o cambie la válvula.
4. Línea de succión anormalmente fría. El líquido rebalsa hacia el compresor.	4. Válvula de expansión demasiado grande.	4. Verifique la capacidad de la válvula. Cámbiela si es necesario.
5. Compresor ruidoso.	5. Válvulas rotas en la succión del compresor.	5. Desmonte la cabeza, examine las válvulas y repare las que estén en malas condiciones.
Problema: Presión de succión demasiado baja		
Síntomas	Causa probable	Acción recomendada
1. Burbujas en la mirilla.	1. Falta de refrigerante.	1. Repare la fuga y recargue el sistema.
2. No hay flujo de refrigerante a través de la válvula.	2. El mecanismo de operación de la válvula de expansión ha perdido carga.	2. Cambie el mecanismo de operación de la válvula de expansión.
3. Pérdida de capacidad.	3. Válvula de expansión obstruida.	3. Limpie la válvula o cámbiela si es necesario
4. Falta de capacidad.	4. Válvula de expansión demasiado pequeña.	4. Revise la tabla de capacidades de válvulas para verificar el tamaño correcto.

Fuente: Elonka/Minich. Refrigeración y acondicionamiento de aire. Págs. 233 a 238.

4.12 Seguridad

Los equipos de refrigeración se deben diseñar, instalar y reparar de acuerdo con las normas y reglamentos de seguridad internacionales y también con todas las normas municipales y estatales vigentes en la localidad. Los principales peligros que existen en la refrigeración son: las explosiones, el incendio y los efectos tóxicos de los gases. El peligro de explosión aumenta entre más refrigerante se use. Si el gas escapa, puede dañar los productos que se estén refrigerando. Si es tóxico (como el amoníaco) puede causar serio daño personal. Si es inflamable, puede formar una concentración explosiva.

Peligros del amoníaco. El amoníaco no es un gas venenoso pero irrita severamente las membranas de los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones. Una concentración muy pequeña se puede detectar fácilmente por su olor penetrante. En la tabla VI se dan los límites de concentración y tiempo de exposición tolerables. El amoníaco líquido nunca debe entrar en contacto con la piel porque congela el tejido, sometándolo a una acción cáustica. Los síntomas son similares a los de una quemadura. Los empleados que manejan amoníaco deben estar instruidos y entrenados en lo siguiente: 1) localización de las máscaras de gas y otro equipo protector. 2) localización de regaderas de seguridad, bebederos, mangueras con agua, salidas y equipo de primeros auxilios. Un suministro adecuado de agua es importante porque el lavado rápido y meticuloso es esencial cuando el amoníaco entra en contacto con los ojos o la piel. 3) el uso adecuado de las máscaras para gas y otro equipo de protector. 4) la importancia de comunicar inmediatamente cualquier olor anormal a amoníaco. 5) el conducto apropiado en caso de una emergencia. 6) los métodos para el manejo adecuado de recipientes de amoníaco y los procedimientos aprobados para limpiar tuberías y equipos.

Tabla VI. Límites de exposición y concentración de amoniaco para seguridad del personal

Gaseoso, ppm	Concentración %	Efecto sobre el trabajador desprotegido	Período de exposición
50	0.006	Mínimo olor detectable.	Permisible para las 8 horas de trabajo.
100	.00125	No tiene efectos nocivos en el trabajador.	Permisible para las 8 horas de trabajo.
400	0.05	Causa irritación de la garganta y de los ojos y tos convulsiva.	Ordinariamente no tiene consecuencias serias con exposiciones cortas y no frecuentes (menos de 1 hora).
700	0.1	Causa irritación de la garganta y de los ojos y tos convulsiva.	Ordinariamente no tiene consecuencias serias con exposiciones cortas y no frecuentes (menos de 1 hora).
1,740	0.22	Produce espasmos o estrangulamiento respiratorios, asfixia.	No es permisible la exposición. (puede ser mortal después de una exposición corta, menos de ½ hora).
5,000 a 1,0000	----- ---	----- ----- ---	No es permisible la exposición (fatal rápidamente).

Fuente: Elonka/Minich. Refrigeración y acondicionamiento de aire. Pág. 387

Acciones que se deben tomar al momento de que una persona se quema o es afectada por el amoniaco. Como en la mayoría de los accidentes serios, se recomienda llamar a un médico de inmediato. Las siguientes medidas generales serán útiles:

Gas de amoniaco. 1) Haga que el paciente inhale aire fresco, de preferencia en un cuarto caliente en que la temperatura sea de unos 70°F. 2) Acuéstelo con la cabeza y los hombros ligeramente levantados y manténgalo caliente con frazadas u otras ropas. 3) Si la respiración es débil, administre oxígeno. 4) Si se ha detenido la respiración, proporcione de inmediato respiración artificial.

Quemaduras con amoniaco líquido. 1) Ojos: Lave inmediatamente los ojos con agua. Use un bebedero, lavabo o alguna manguera, o meta la cabeza en un recipiente con agua, abriendo y cerrando los ojos varias veces. Lave continuamente durante 15 minutos. Puede usarse solución suave (del 2 al 5%) de ácido bórico, si se dispone de ella. 2) Piel: Quite inmediatamente toda la ropa saturada de amoniaco. Lave rápida y meticulosamente con agua fría el área quemada. Después aplique jugo de limón, vinagre o solución al 2% de ácido acético. No use nunca ungüentos. El hielo aplicado directamente a las áreas quemadas ayuda a calmar el dolor. 3) Nariz y garganta: Inhale por la nariz una solución al 2% de ácido bórico y enjuague la boca a conciencia. Si el paciente puede sorber, hágalo ingerir grandes cantidades de ácido cítrico en solución al 0.5%, o simplemente limonada fuerte.

CONCLUSIONES

- 1 La refrigeración por compresión de amoníaco es una de las formas de bajar la temperatura en los procesos industriales de una manera rápida y eficiente.
- 2 El conocimiento teórico del ciclo de refrigeración por compresión mecánica, así como de cada uno de los componentes que conforman el equipo en sí, son necesarios para que se lleve a cabo un montaje e instalación de un equipo industrial de refrigeración por compresión de una forma correcta y eficiente.
- 3 Para que un montaje de cualquier equipo de refrigeración industrial sea eficiente, además de conocer los fundamentos teóricos y prácticos del sistema y del equipo en sí, se deben de tomar en cuenta otra serie de factores externos que son de suma importancia, como el campo de trabajo y recepción y manejo del equipo, entre otros.
- 4 Al tener el conocimiento de cada uno de los componentes que conforman un equipo de refrigeración por compresión mecánica así como la forma en que van instalados en el sistema será más fácil resolver una falla cuando se presente.

RECOMENDACIONES

- 1 Se debe recolectar toda la información posible sobre el equipo de refrigeración que se desea instalar, ya que existen una infinidad de accesorios y partes en el mercado que difieren en muchos aspectos.
- 2 Planificar de una manera estratégica y ordenada el montaje de cada uno de los componentes que conforman el sistema de refrigeración, ya que con esto se tendrá un aprovechamiento eficiente de todos los recursos.
- 3 Realizar con responsabilidad las actividades relacionadas con la recopilación de información sobre el estado del equipo, ya que esto permitirá, en un futuro, anticiparse a la falla y disminuir el tiempo de reparación.
- 4 Especializar a las personas encargadas de la operación y mantenimiento de los sistemas de refrigeración por compresión de amoniaco, ya que estos equipos presentan ciertos riesgos debido a la robustez de los componentes del sistema así como del refrigerante que utiliza el sistema.

REFERENCIAS

1

Instituto de refrigeración y aire acondicionado. **Manual de refrigeración y aire acondicionado.** (2ª Edición; México: Editorial Prentice-Hall, Tomo 1, 1994) pp. 88-98

2

Ibid., pp. 115-133

3

Stephen Michael Elonka y Quaid Walton Minich. **Refrigeración acondicionado de aire: preguntas y respuestas** (3ª Edición; México: Editorial McGraw-Hill, 1989) p.85

4

Ibid., p. 133

5

Marco Vinicio Maldonado Gómez. **Programa de mantenimiento preventivo y correctivo para sistemas de refrigeración y aire acondicionado mecánico por compresión.** (Guatemala: Editorial Universitaria, 1998) pp.17-24.

6

Pablo César Escobar García. **Montaje de grupos electrógenos.** (Guatemala: Editorial Universitaria, 1995) pp.53-55.

BIBLIOGRAFÍA

1. Marks' Standard Handbook. **Manual del Ingeniero Mecánico**. 9ª ed. (volumen 2) Estados Unidos: Editorial McGraw-Hill, 1995. 890 pp.
2. Moring Faires, Virgil. **Termodinámica**. 4ª ed. México: Editorial Hispano Americana, 1965. 721 pp.
3. Kenneth Wark, Jr. **Termodinámica**. 5ª ed. U.S.A.: McGraw-Hill, 1987. 800 pp.

APÉNDICE

TABLA VII REFRIGERANTE 12

TEMP F	PRESION lb por pulg ²		VOLUMEN pie ³ por lb		DENSIDAD lb por pie ³		ENTALPIA** Btu por lb			ENTROPIA** Btu por (lb) (°R)		TEMP F
	Absoluta p	Manomé- trica p	Líquido v _f	Vapor v _g	Líquido l/v _f	Vapor l/v _g	Líquido h _f	Latente h _{fg}	Vapor h _g	Líquido s _f	Vapor s _g	
-25	13.556	2.320*	0.010730	2.7295	93.197	0.36636	3.1724	71.391	74.563	0.007407	0.17164	-25
-24	13.886	1.649*	.010741	2.6691	93.098	0.37466	3.3848	71.288	74.673	.007894	.17151	-24
-23	14.222	0.966*	.010753	2.6102	92.999	0.38311	3.5973	71.185	74.782	.008379	.17139	-23
-22	14.564	0.270*	.010764	2.5529	92.899	0.39171	3.8100	71.081	74.891	.008864	.17126	-22
-21	14.912	0.216	.010776	2.4972	92.799	0.40045	4.0228	70.978	75.001	.009348	.17114	-21
-20	15.267	0.571	0.010788	2.4429	92.699	0.40934	4.2357	70.874	75.110	0.009831	0.17102	-20
-19	15.628	0.932	.010799	2.3901	92.599	0.41839	4.4487	70.770	75.219	.010314	.17090	-19
-18	15.996	1.300	.010811	2.3387	92.499	0.42758	4.6618	70.666	75.328	.010795	.17078	-18
-17	16.371	1.675	.010823	2.2886	92.399	0.43694	4.8751	70.561	75.436	.011276	.17066	-17
-16	16.753	2.057	.010834	2.2399	92.298	0.44645	5.0885	70.456	75.545	.011755	.17055	-16
-15	17.141	2.445	0.010846	2.1924	92.197	0.45612	5.3020	70.352	75.654	0.012234	0.17043	-15
-14	17.536	2.840	.010858	2.1461	92.096	0.46595	5.5157	70.246	75.762	.012712	.17032	-14
-13	17.939	3.243	.010870	2.1011	91.995	0.47595	5.7295	70.141	75.871	.013190	.17021	-13
-12	18.348	3.652	.010882	2.0572	91.893	0.48611	5.9434	70.036	75.979	.013666	.17010	-12
-11	18.765	4.069	.010894	2.0144	91.791	0.49643	6.1574	69.930	76.087	.014142	.16999	-11
-10	19.189	4.493	0.010906	1.9727	91.689	0.50693	6.3716	69.824	76.196	0.014617	0.16989	-10
-9	19.621	4.925	.010919	1.9320	91.587	0.51759	6.5859	69.718	76.304	.015091	.16978	-9
-8	20.059	5.363	.010931	1.8924	91.485	0.52843	6.8003	69.611	76.411	.015564	.16967	-8
-7	20.506	5.810	.010943	1.8538	91.382	0.53944	7.0149	69.505	76.520	.016037	.16957	-7
-6	20.960	6.264	.010955	1.8161	91.280	0.55063	7.2296	69.397	76.627	.016508	.16947	-6
-5	21.422	6.726	0.010968	1.7794	91.177	0.56199	7.4444	69.291	76.735	0.016979	0.16937	-5
-4	21.891	7.195	.010980	1.7436	91.074	0.57354	7.6594	69.183	76.842	.017449	.16927	-4
-3	22.369	7.673	.010993	1.7086	90.970	0.58526	7.8745	69.075	76.950	.017919	.16917	-3
-2	22.854	8.158	.011005	1.6745	90.867	0.59718	8.0898	68.967	77.057	.018388	.16907	-2
-1	23.348	8.652	.011018	1.6413	90.763	0.60927	8.3052	68.859	77.164	.018855	.16897	-1
0	23.849	9.153	0.011030	1.6089	90.659	0.62156	8.5207	68.750	77.271	0.019323	0.16888	0
1	24.359	9.663	.011043	1.5772	90.554	0.63404	8.7364	68.642	77.378	.019789	.16878	1
2	24.878	10.182	.011056	1.5463	90.450	0.64670	8.9522	68.533	77.485	.020255	.16869	2
3	25.404	10.708	.011069	1.5161	90.345	0.65957	9.1682	68.424	77.592	.020719	.16860	3
4	25.939	11.243	.011082	1.4867	90.240	0.67263	9.3843	68.314	77.698	.021184	.16851	4
5	26.483	11.787	0.011094	1.4580	90.135	0.68588	9.6005	68.204	77.805	0.021647	0.16842	5
6	27.036	12.340	.011107	1.4299	90.030	0.69934	9.8169	68.094	77.911	.022110	.16833	6
7	27.597	12.901	.011121	1.4025	89.924	0.71300	10.033	67.984	78.017	.022572	.16824	7
8	28.167	13.471	.011134	1.3758	89.818	0.72687	10.250	67.873	78.123	.023033	.16815	8
9	28.747	14.051	.011147	1.3496	89.712	0.74094	10.467	67.762	78.229	.023494	.16807	9
10	29.335	14.639	0.011160	1.3241	89.606	0.75523	10.684	67.651	78.335	0.023954	0.16798	-10
11	29.932	15.236	.011173	1.2992	89.499	0.76972	10.901	67.539	78.440	.024413	.16790	11
12	30.539	15.843	.011187	1.2748	89.392	0.78443	11.118	67.428	78.546	.024871	.16782	12
13	31.155	16.459	.011200	1.2510	89.285	0.79935	11.336	67.315	78.651	.025329	.16774	13
14	31.780	17.084	.011214	1.2278	89.178	0.81449	11.554	67.203	78.757	.025786	.16765	14
15	32.415	17.719	0.011227	1.2050	89.070	0.82986	11.771	67.090	78.861	0.026243	0.16758	15
16	33.060	18.364	.011241	1.1828	88.962	0.84544	11.989	66.977	78.966	.026699	.16750	16
17	33.714	19.018	.011254	1.1611	88.854	0.86125	12.207	66.864	79.071	.027154	.16742	17
18	34.378	19.682	.011268	1.1399	88.746	0.87729	12.426	66.750	79.176	.027608	.16734	18
19	35.052	20.356	.011282	1.1191	88.637	0.89356	12.644	66.636	79.280	.028062	.16727	19
20	35.736	21.040	0.011296	1.0988	88.529	0.91006	12.863	66.522	79.385	0.028515	0.16719	20
21	36.430	21.734	.011310	1.0790	88.419	0.92679	13.081	66.407	79.488	.028968	.16712	21
22	37.135	22.439	.011324	1.0596	88.310	0.94377	13.300	66.293	79.593	.029420	.16704	22
23	37.849	23.153	.011338	1.0406	88.201	0.96098	13.520	66.177	79.697	.029871	.16697	23
24	38.574	23.878	.011352	1.0220	88.091	0.97843	13.739	66.061	79.800	.030322	.16690	24
25	39.310	24.614	0.011366	1.0039	87.981	0.99613	13.958	65.946	79.904	0.030772	0.16683	25
26	40.056	25.360	.011380	0.98612	87.870	1.0141	14.178	65.829	80.007	.031221	.16676	26
27	40.813	26.117	.011395	0.96874	87.760	1.0323	14.398	65.713	80.111	.031670	.16669	27
28	41.580	26.884	.011409	0.95173	87.649	1.0507	14.618	65.596	80.214	.032118	.16662	28
29	42.359	27.663	.011424	0.93509	87.537	1.0694	14.838	65.478	80.316	.032566	.16655	29
30	43.148	28.452	0.011438	0.91880	87.426	1.0884	15.058	65.361	80.419	0.033013	0.16648	30
31	43.948	29.252	.011453	0.90286	87.314	1.1076	15.279	65.243	80.522	.033460	.16642	31
32	44.760	30.064	.011468	0.88725	87.202	1.1271	15.500	65.124	80.624	.033905	.16635	32
33	45.583	30.887	.011482	0.87197	87.090	1.1468	15.720	65.006	80.726	.034351	.16629	33
34	46.417	31.721	.011497	0.85702	86.977	1.1668	15.942	64.886	80.828	.034796	.16622	34
35	47.263	32.567	0.011512	0.84237	86.865	1.1871	16.163	64.767	80.930	0.035240	0.16616	35
36	48.120	33.424	.011527	0.82803	86.751	1.2077	16.384	64.647	81.031	.035683	.16610	36
37	48.989	34.293	.011542	0.81399	86.638	1.2285	16.606	64.527	81.133	.036126	.16604	37
38	49.870	35.174	.011557	0.80023	86.524	1.2496	16.828	64.406	81.234	.036569	.16598	38
39	50.763	36.067	0.011573	0.78676	86.410	1.2710	17.050	64.285	81.335	0.037011	0.16592	39

TABLA VII (continuación)

TEMP F	PRESION lb por pulg ²		VOLUMEN pie ³ por lb		DENSIDAD lb por pie ³		ENTALPIA** Btu por lb			ENTROPIA** Btu por (lb) (°R)		TEMP F
	Absoluta P	Manomé- trica p	Líquido v _l	Vapor v _g	Líquido l/v _l	Vapor l/v _g	Líquido h _l	Latente h _{fg}	Vapor h _g	Líquido s _l	Vapor s _g	
40	51.667	38.971	0.011588	0.77357	86.296	1.2927	17.273	64.163	81.436	0.037453	0.16586	40
41	52.584	37.888	.011603	.76064	86.181	1.3147	17.495	64.042	81.537	.037893	.16580	41
42	53.513	38.817	.011619	.74798	86.066	1.3369	17.718	63.919	81.637	.038334	.16574	42
43	54.454	39.758	.011635	.73557	85.951	1.3595	17.941	63.796	81.737	.038774	.16568	43
44	55.407	40.711	.011650	.72341	85.836	1.3823	18.164	63.673	81.837	.039213	.16562	44
45	56.373	41.677	0.011666	0.71149	85.720	1.4055	18.387	63.550	81.937	0.039652	0.16557	45
46	57.352	42.656	.011682	.69982	85.604	1.4289	18.611	63.426	82.037	.040091	.16551	46
47	58.343	43.647	.011698	.68837	85.487	1.4527	18.835	63.301	82.136	.040529	.16546	47
48	59.347	44.651	.011714	.67715	85.371	1.4768	19.059	63.177	82.236	.040966	.16540	48
49	60.364	45.668	.011730	.66616	85.254	1.5012	19.283	63.051	82.334	.041403	.16535	49
50	61.394	46.698	0.011746	0.65537	85.136	1.5258	19.507	62.926	82.433	0.041839	0.16530	50
51	62.437	47.741	.011762	.64480	85.018	1.5509	19.732	62.800	82.532	.042276	.16524	51
52	63.494	48.798	.011779	.63444	84.900	1.5762	19.957	62.673	82.630	.042711	.16519	52
53	64.563	49.867	.011795	.62428	84.782	1.6019	20.182	62.546	82.728	.043146	.16514	53
54	65.646	50.950	.011811	.61431	84.663	1.6278	20.408	62.418	82.826	.043581	.16509	54
55	66.743	52.047	0.011828	0.60453	84.544	1.6542	20.634	62.290	82.924	0.044015	0.16504	55
56	67.853	53.157	.011845	.59495	84.425	1.6808	20.859	62.162	83.021	.044449	.16499	56
57	68.977	54.281	.011862	.58554	84.305	1.7078	21.086	62.033	83.119	.044883	.16494	57
58	70.115	55.419	.011879	.57632	84.185	1.7352	21.312	61.903	83.215	.045316	.16489	58
59	71.267	56.571	.011896	.56727	84.065	1.7628	21.539	61.773	83.312	.045748	.16484	59
60	72.433	57.737	0.011913	0.55839	83.944	1.7909	21.766	61.643	83.409	0.046180	0.16479	60
61	73.613	58.917	.011930	.54967	83.823	1.8193	21.993	61.512	83.505	.046612	.16474	61
62	74.807	60.111	.011947	.54112	83.701	1.8480	22.221	61.380	83.601	.047044	.16470	62
63	76.046	61.320	.011965	.53273	83.580	1.8771	22.448	61.248	83.696	.047475	.16465	63
64	77.239	62.543	.011982	.52450	83.457	1.9066	22.676	61.116	83.792	.047905	.16460	64
65	78.477	63.781	0.012000	0.51642	83.335	1.9364	22.905	60.982	83.887	0.048336	0.16456	65
66	79.729	65.033	.012017	.50848	83.212	1.9666	23.133	60.849	83.982	.048765	.16451	66
67	80.996	66.300	.012035	.50070	83.089	1.9972	23.362	60.715	84.077	.049195	.16447	67
68	82.279	67.583	.012053	.49305	82.965	2.0282	23.591	60.580	84.171	.049624	.16442	68
69	83.576	68.880	.012071	.48555	82.841	2.0595	23.821	60.445	84.266	.050053	.16438	69
70	84.888	70.192	0.012089	0.47818	82.717	2.0913	24.050	60.309	84.359	0.050482	0.16434	70
71	86.216	71.520	.012108	.47094	82.592	2.1234	24.281	60.172	84.453	.050910	.16429	71
72	87.559	72.863	.012126	.46383	82.467	2.1559	24.511	60.035	84.546	.051338	.16425	72
73	88.918	74.222	.012145	.45686	82.341	2.1889	24.741	59.898	84.639	.051766	.16421	73
74	90.292	75.596	.012163	.45000	82.215	2.2222	24.973	59.759	84.732	.052193	.16417	74
75	91.682	76.986	0.012182	0.44327	82.089	2.2560	25.204	59.621	84.825	0.052620	0.16412	75
76	93.087	78.391	.012201	.43666	81.962	2.2901	25.435	59.481	84.916	.053047	.16408	76
77	94.509	79.813	.012220	.43016	81.835	2.3247	25.667	59.341	85.008	.053473	.16404	77
78	95.946	81.250	.012239	.42378	81.707	2.3597	25.899	59.201	85.100	.053900	.16400	78
79	97.400	82.704	.012258	.41751	81.579	2.3951	26.132	59.059	85.191	.054326	.16396	79
80	98.870	84.174	0.012277	0.41135	81.450	2.4310	26.365	58.917	85.282	0.054751	0.16392	80
81	100.36	85.66	.012297	.40530	81.322	2.4673	26.598	58.775	85.373	.055177	.16388	81
82	101.86	87.16	.012316	.39935	81.192	2.5041	26.832	58.631	85.463	.055602	.16384	82
83	103.38	88.68	.012336	.39351	81.063	2.5413	27.065	58.488	85.553	.056027	.16380	83
84	104.92	90.22	.012356	.38776	80.932	2.5789	27.300	58.343	85.643	.056452	.16376	84
85	106.47	91.77	0.012376	0.38212	80.802	2.6170	27.534	58.198	85.732	0.056877	0.16372	85
86	108.04	93.34	.012396	.37657	80.671	2.6556	27.769	58.052	85.821	.057301	.16368	86
87	109.63	94.93	.012416	.37111	80.539	2.6946	28.005	57.905	85.910	.057725	.16364	87
88	111.23	96.53	.012437	.36575	80.407	2.7341	28.241	57.757	85.998	.058149	.16360	88
89	112.85	98.15	.012457	.36047	80.275	2.7741	28.477	57.609	86.086	.058573	.16357	89
90	114.49	99.79	0.012478	0.35529	80.142	2.8146	28.713	57.461	86.174	0.058997	0.16353	90
91	116.15	101.45	.012499	.35019	80.008	2.8556	28.950	57.311	86.261	.059420	.16349	91
92	117.82	103.12	.012520	.34518	79.874	2.8970	29.187	57.161	86.348	.059844	.16345	92
93	119.51	104.81	.012541	.34025	79.740	2.9390	29.425	57.009	86.434	.060267	.16341	93
94	121.22	106.52	.012562	.33540	79.605	2.9815	29.663	56.858	86.521	.060690	.16338	94
95	122.95	108.25	0.012583	0.33063	79.470	3.0245	29.901	56.705	86.606	0.061113	0.16334	95
96	124.70	110.00	.012605	.32594	79.334	3.0680	30.140	56.551	86.691	.061536	.16330	96
97	126.46	111.76	.012627	.32133	79.198	3.1120	30.380	56.397	86.777	.061959	.16326	97
98	128.24	113.54	.012649	.31679	79.061	3.1566	30.619	56.242	86.861	.062381	.16323	98
99	130.04	115.34	.012671	.31233	78.923	3.2017	30.859	56.086	86.945	.062804	.16319	99
100	131.86	117.16	0.012693	0.30794	78.785	3.2474	31.100	55.929	87.029	0.063227	0.16315	100
101	133.70	119.00	.012715	.30362	78.647	3.2936	31.341	55.772	87.113	.063649	.16312	101
102	135.56	120.86	.012738	.29937	78.508	3.3404	31.583	55.613	87.196	.064072	.16308	102
103	137.44	122.74	.012760	.29518	78.368	3.3877	31.824	55.454	87.278	.064494	.16304	103
104	139.33	124.63	0.012783	0.29106	78.228	3.4357	32.067	55.293	87.360	0.064916	0.16301	104

TABLA VII (continuación)

TEMP F	PRESION lb por pulg ²		VOLUMEN pie ³ por lb		DENSIDAD lb por pie ³		ENTALPIA** Btu por lb			ENTROPIA** Btu por (lb) (°R)		TEMP F
	Absoluta P	Manomé- trica p	Líquido v _f	Vapor v _g	Líquido 1/v _f	Vapor 1/v _g	Líquido h _f	Latente h _{fg}	Vapor h _g	Líquido s _f	Vapor s _g	
105	141.25	126.55	0.012806	0.28701	78.088	3.4842	32.310	55.132	87.442	0.065339	0.16297	105
106	143.18	128.48	.012829	.28303	77.946	3.5333	32.553	54.970	87.523	.065761	.16293	106
107	145.13	130.43	.012853	.27910	77.804	3.5829	32.797	54.807	87.604	.066184	.16290	107
108	147.11	132.41	.012876	.27524	77.662	3.6332	33.041	54.643	87.684	.066606	.16286	108
109	149.10	134.40	.012900	.27143	77.519	3.6841	33.286	54.478	87.764	.067028	.16282	109
110	151.11	136.41	0.012924	0.26769	77.376	3.7357	33.531	54.313	87.844	0.067451	0.16279	110
111	153.14	138.44	.012948	.26400	77.231	3.7878	33.777	54.146	87.923	.067873	.16275	111
112	155.19	140.49	.012972	.26037	77.087	3.8406	34.023	53.978	88.001	.068296	.16271	112
113	157.27	142.57	.012997	.25680	76.941	3.8941	34.270	53.809	88.079	.068719	.16268	113
114	159.36	144.66	.013022	.25328	76.795	3.9482	34.517	53.639	88.156	.069141	.16264	114
115	161.47	146.77	0.013047	0.24982	76.649	4.0029	34.765	53.468	88.233	0.069564	0.16260	115
116	163.61	148.91	.013072	.24641	76.501	4.0584	35.014	53.296	88.310	.069987	.16256	116
117	165.76	151.06	.013097	.24304	76.353	4.1145	35.263	53.123	88.386	.070410	.16253	117
118	167.94	153.24	.013123	.23974	76.205	4.1713	35.512	52.949	88.461	.070833	.16249	118
119	170.13	155.43	.013148	.23647	76.056	4.2288	35.762	52.774	88.536	.071257	.16245	119
120	172.35	157.65	0.013174	0.23326	75.906	4.2870	36.013	52.597	88.610	0.071680	0.16241	120
121	174.59	159.89	.013200	.23010	75.755	4.3459	36.264	52.420	88.684	.072104	.16237	121
122	176.85	162.15	.013227	.22698	75.604	4.4056	36.516	52.241	88.757	.072528	.16234	122
123	179.13	164.43	.013254	.22391	75.452	4.4660	36.768	52.062	88.830	.072952	.16230	123
124	181.43	166.73	.013280	.22089	75.299	4.5272	37.021	51.881	88.902	.073376	.16226	124
125	183.76	169.06	0.013308	0.21791	75.145	4.5891	37.275	51.698	88.973	0.073800	0.16222	125
126	186.10	171.40	.013335	.21497	74.991	4.6518	37.529	51.515	89.044	.074225	.16218	126
127	188.47	173.77	.013363	.21207	74.836	4.7153	37.785	51.330	89.115	.074650	.16214	127
128	190.86	176.16	.013390	.20922	74.680	4.7796	38.040	51.144	89.184	.075075	.16210	128
129	193.27	178.57	.013419	.20641	74.524	4.8448	38.296	50.957	89.253	.075501	.16206	129
130	195.71	181.01	0.013447	0.20364	74.367	4.9107	38.553	50.768	89.321	0.075927	0.16202	130
131	198.16	183.46	.013476	.20091	74.209	4.9775	38.811	50.578	89.389	.076353	.16198	131
132	200.64	185.94	.013504	.19821	74.050	5.0451	39.069	50.387	89.456	.076779	.16194	132
133	203.15	188.45	.013534	.19556	73.890	5.1136	39.328	50.194	89.522	.077206	.16189	133
134	205.67	190.97	.013563	.19294	73.729	5.1829	39.588	50.000	89.588	.077633	.16185	134
135	208.22	193.52	0.013593	0.19036	73.568	5.2532	39.848	49.805	89.653	0.078061	0.16181	135
136	210.79	196.09	.013623	.18782	73.406	5.3244	40.110	49.608	89.718	.078489	.16177	136
137	213.39	198.69	.013653	.18531	73.243	5.3965	40.372	49.409	89.781	.078917	.16172	137
138	216.01	201.31	.013684	.18283	73.079	5.4695	40.634	49.210	89.844	.079346	.16168	138
139	218.65	203.95	.013715	.18039	72.914	5.5435	40.898	49.008	89.906	.079775	.16163	139
140	221.32	206.62	0.013746	0.17799	72.748	5.6184	41.162	48.805	89.967	0.080205	0.16159	140
141	224.00	209.30	.013778	.17561	72.581	5.6944	41.427	48.601	90.028	.080635	.16154	141
142	226.72	212.02	.013810	.17327	72.413	5.7713	41.693	48.394	90.087	.081065	.16150	142
143	229.46	214.76	.013842	.17096	72.244	5.8493	41.959	48.187	90.146	.081497	.16145	143
144	232.22	217.52	.013874	.16868	72.075	5.9283	42.227	47.977	90.204	.081928	.16140	144
145	235.00	220.30	0.013907	0.16644	71.904	6.0083	42.495	47.766	90.261	0.082361	0.16135	145
146	237.82	223.12	.013941	.16422	71.732	6.0895	42.765	47.553	90.318	.082794	.16130	146
147	240.65	225.95	.013974	.16203	71.559	6.1717	43.035	47.338	90.373	.083227	.16125	147
148	243.51	228.81	.014008	.15987	71.386	6.2551	43.306	47.122	90.428	.083661	.16120	148
149	246.40	231.70	.014043	.15774	71.211	6.3395	43.578	46.904	90.482	.084096	.16115	149
150	249.31	234.61	0.014078	0.15564	71.035	6.4252	43.850	46.684	90.534	0.084531	0.16110	150
151	252.24	237.54	.014113	.15356	70.857	6.5120	44.124	46.462	90.586	.084967	.16105	151
152	255.20	240.50	.014148	.15151	70.679	6.6001	44.399	46.238	90.637	.085404	.16099	152
153	258.19	243.49	.014184	.14949	70.500	6.6893	44.675	46.012	90.687	.085842	.16094	153
154	261.20	246.50	.014221	.14750	70.319	6.7799	44.951	45.784	90.735	.086280	.16088	154
155	264.24	249.54	0.014258	0.14552	70.137	6.8717	45.229	45.554	90.783	0.086719	0.16083	155
156	267.30	252.60	.014295	.14358	69.954	6.9648	45.508	45.322	90.830	.087159	.16077	156
157	270.39	255.69	.014333	.14166	69.770	7.0592	45.787	45.088	90.875	.087600	.16071	157
158	273.51	258.81	.014371	.13976	69.584	7.1551	46.068	44.852	90.920	.088041	.16065	158
159	276.65	261.95	.014410	.13789	69.397	7.2523	46.350	44.614	90.964	.088484	.16059	159
160	279.82	265.12	0.014449	0.13604	69.209	7.3509	46.633	44.373	91.006	0.088927	0.16053	160
161	283.02	268.32	.014489	.13421	69.019	7.4510	46.917	44.130	91.047	.089371	.16047	161
162	286.24	271.54	.014529	.13241	68.828	7.5525	47.202	43.885	91.087	.089817	.16040	162
163	289.49	274.79	.014570	.13062	68.635	7.6556	47.489	43.637	91.126	.090263	.16034	163
164	292.77	278.07	.014611	.12886	68.441	7.7602	47.777	43.386	91.163	.090710	.16027	164
165	296.07	281.37	0.014653	0.12712	68.245	7.8665	48.065	43.134	91.199	0.091159	0.16021	165
166	299.40	284.70	.014695	.12540	68.048	7.9743	48.355	42.879	91.234	.091608	.16014	166
167	302.76	288.06	.014738	.12370	67.850	8.0838	48.647	42.620	91.267	.092059	.16007	167
168	306.15	291.45	.014782	.12202	67.649	8.1950	48.939	42.360	91.299	.092511	.16000	168
169	309.56	294.86	0.014826	0.12037	67.447	8.3080	49.233	42.097	91.330	0.092964	0.15992	169