



87
Zejun
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO
Y CORRECTIVO PARA ULTRACONGELADORES
DE UNA Y DOS ETAPAS POR COMPRESION
MECANICA DE VAPORES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

FELIPE GONZALEZ GONZALEZ

DIRECTOR DE TESIS:
ING. GABRIEL ASCANIO G.

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A la memoria de mi madre Efigenia y mi abuelita María Dolores por sus cuidados y cariño que me brindaron, los cuales agradezco y llevaré por siempre en mi corazón.

Con todo cariño para mis sobrinas Ayatzin del Carmen y Efigenia Yolotzin por los bellos momentos que vivimos, los cuales siempre me acompañarán.

A mis hermanos y sobrinos por su apoyo brindado y por la unión que siempre hemos tenido.

A mi padre, abuelos, primos y cuñados con todo cariño.

A Leticia Castillo por su apoyo en la redacción de este trabajo y por amistad sincera.

A José Juan Corona de la sección de Dibujo en el Centro de Instrumentos de la U.N.A.M. quien contribuyó a reproducir las figuras aquí presentadas.

A todos los profesores y amigos de la Facultad de Ingeniería que contribuyeron a mi formación profesional.

Un especial agradecimiento para el Ing. Gabriel Ascanio Gasca por todo su apoyo brindado en el desarrollo de esta tesis y por su amistad.

INDICE

INTRODUCCION	1
SISTEMAS DE REFRIGERACION	
Antecedentes	4
Ciclo de compresión	5
Refrigeración por absorción	7
Refrigeración por adsorción	9
Licuefacción y solidificación de gases	12
Ultrabajas temperaturas	19
CICLO DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR	
Ciclo teórico de refrigeración	20
Ciclo real de refrigeración	30
Sistema de compresión de vapor en cascada y de etapas múltiples	35
REFRIGERANTES	
Refrigerantes	41
Toxicidad	41
Inflamabilidad y explosividad	43
Detección de fugas	45
Refrigerantes empleados en equipos de Ultracongelación	47

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DE ULTRACONGELADORES

Introducción	52
Compresores	52
Condensadores	57
Deshidratadores	59
Tubo capilar	60
Acumulador	62
Tubería para equipos de refrigeración	64
Intercambiador de calor	65
Instalación y arranque	68
Colocación del equipo	68
Mantenimiento preventivo	69
Instalación eléctrica	72
Aceites	79
Equipo de medida y prueba	80
Programa de mantenimiento preventivo	83
Fallas, posibles causas y soluciones	84

CONCLUSIONES	87
---------------------	-----------

APENDICE	89
-----------------	-----------

LISTA DE FIGURAS	102
-------------------------	------------

BIBLIOGRAFIA	105
---------------------	------------

INTRODUCCION

En el pasado el hombre desarrolló métodos para conservar alimentos y bebidas con hielo y nieve. A principios del siglo XX se desarrolló la refrigeración industrial mediante el uso del ciclo mecánico; empacadores de carne, carnicerías, cervecerías y otras industrias comenzaron por emplear la refrigeración mecánica.

Con el crecimiento de la industria eléctrica y el alumbrado en los hogares, los refrigeradores domésticos se popularizaron.

Este creciente interés en los refrigeradores domésticos fue ayudado por el diseño de motores eléctricos, de baja potencia para operar los compresores en "cajas de hielo" mecánicas. Después de 1920 estas unidades han sido producidas en gran número y han llegado a convertirse en una necesidad para todos, más que un lujo para unos cuantos.

No estamos limitados a la conservación de frutas, vegetales, carnes, productos lácteos y otros productos que se obtienen en determinada época del año y que podemos almacenar, y transportar a cualquier parte del mundo y conservar por largos períodos de tiempo.

La refrigeración ha mejorado la economía en muchas áreas, al suministrar un medio de preservar productos, despachados a consumidores remotos.

Alrededor de 1940 la mayoría de las llantas para automoviles, camiones, aviones y similares se hacían de caucho natural, producido en plantaciones de Asia. Cuando el embarque del latex desde las plantaciones de caucho del extranjero a los Estados Unidos fue restringido a consecuencia del estallido de la Segunda Guerra Mundial, la industria americana y el gobierno federal establecieron un programa cooperativo de caucho sintético, basado en investigaciones previas.

Los científicos apreciaron que algunos de los procesos de manufactura podrían hacer al caucho artificial más durable y resistente al uso, mediante la utilización de bajas temperaturas; así la refrigeración llegó a ser vital en otra industria.

La industria petroquímica (plásticos, plantas textiles y la industria de procesamiento de datos son grandes usuarios de los procesos de refrigeración.

Uno de los más recientes desarrollos asociados a la situación de la energía, es la importación de gas natural licuado, de fuentes lejanas. Se requieren temperaturas de -165°C para cambiar el gas a líquido, el cual luego es cargado en tanques refrigerados para embarque. Permanentemente el líquido debe ser mantenido a -165°C hasta que este listo para ser gasificado. Se espera que la calefacción, la refrigeración y el aire acondicionado mediante la energía solar, proporcione muchas oportunidades de desarrollo de nuevos productos y para aplicación calificada, instalación y servicio personal.

En lo referente a la investigación científica, la refrigeración juega un papel importante en aplicaciones clínicas, médicas, biológicas, etc. Para este tipo de aplicaciones se requieren equipos que deben tener la posibilidad en muchos casos, de operar con temperaturas en el evaporador de -50 a -80°C . El éxito clínico para conservación de redes de células humanas, tejidos, espermatozoides, injertos de piel, huesos, y tumores por largo tiempo es una muestra del impacto actual de la refrigeración.

Algunos productos por refrigerar pueden conservarse a temperaturas sobre -79°C , como la sangre, tejidos y virus, que son almacenados en sistemas de refrigeración que permiten temperaturas de congelación.

La conservación de tejidos para trasplantes es otra aplicación médica. Los trasplantes deberán ser realizados en corto tiempo por el período de vida del órgano (córnea del ojo humano, riñones) pueden ser satisfactoriamente almacenados por simple hielo de refrigeración.

Refrigeración Especial. La investigación y diagnóstico de laboratorio relacionado con estudios de virus se lleva a cabo temperaturas de refrigeración de -40°C , que es el intervalo más usado. Mientras el conocimiento absoluto de la composición o características de numerosos virus es todavía incompleta, ciertos aspectos del comportamiento de estos microorganismos así como las propiedades físicas que permiten el crecimiento, actividad, y sobrevivencia en circunstancias sobrenaturales, son ya conocidos.

El intervalo principal de almacenamiento de tejidos y virus para un congelamiento se lleva a cabo entre -20 y -40°C .

En clínicas y laboratorios el máximo valor que tiene la ultracongelación, es el estudio de virus que causan enfermedades, con el fin de producir antisueros o inoculación animal. Ciertos virus se conservan mejor a bajas temperaturas, y la adición de sólidos que contengan dióxido de carbono los mantienen enfriados alrededor de -70°C . Para este tipo de aplicaciones se requieren equipos que den temperaturas extremadamente bajas. Actualmente estos equipos son llamados ultracongeladores y, considerando que son equipos y refacciones de importación, tienen que ser importados un costo elevado.

El mantenimiento en los países desarrollados se efectúa con el simple reemplazo de la pieza dañada. En México como en latinoamérica se deben establecer programas de mantenimiento preventivo y correctivo para aprovechar al máximo dichos equipos, ya que prácticamente no se cuentan con tales programas o no se adaptan a las necesidades del país.

CAPITULO 1

SISTEMAS DE REFRIGERACION

ANTECEDENTES

La nieve y el hielo natural fueron el primer sistema de refrigeración usado principalmente para mantener en buen estado vegetales, verduras, pescado, etc., puesto que el hielo evita la deshidratación. Las desventajas que presenta el hielo son:

1. No se pueden obtener tan bajas temperaturas como con otras sustancias como el cloruro de sodio o de calcio, en los cuales se consiguen -17.7°C (0°F); en cambio con el hielo sólo 0°C (32°F).
2. Es necesario reponer constantemente el hielo.
3. Produce condensado.
4. Es difícil controlar la refrigeración.

Por lo tal motivo el hielo y la nieve han sido sustituidos por otros métodos. La capacidad de los refrigerantes líquidos de absorber calor mientras se evaporan, es la base de la refrigeración moderna.

En el presente capítulo se describen a grandes rasgos los sistemas de refrigeración de mayor empleo para trabajar con temperaturas altas, medias, bajas y ultrabajas.

CICLO DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR

El ciclo de refrigeración por compresión mecánica de vapor es actualmente es el ciclo más utilizado. La figura 1.1 muestra un esquema de las partes de un sistema de refrigeración por compresión de vapor y los diagramas Temperatura-Entropía y Presión - Entalpía, correspondientes a dicho sistema.

El vapor saturado del estado 1 se comprime isentrópicamente a vapor sobrecalentado en el estado 2. El vapor refrigerante entra a un condensador, en donde extrae calor a presión constante hasta que el fluido se convierte en líquido saturado en el estado 3. Para que el fluido regrese a presión más baja, se expande adiabáticamente en una válvula o un tubo capilar hasta el estado 4. El proceso 3-4 es una estrangulación y $h_3 = h_4$ en el estado 4, el refrigerante es una mezcla húmeda de baja calidad. Finalmente, pasa por el evaporador a presión constante. De la fuente de baja temperatura entra calor al evaporador, convirtiendo el fluido en vapor saturado y se completa el ciclo. Nótese que todo el proceso 4-1 y una gran parte del proceso 2-3 ocurren a temperatura constante. A diferencia de muchos otros ciclos ideales, el ciclo de compresión de vapor que se presentó en la figura 1.1 contiene un proceso irreversible que es el proceso de estrangulación. Se supone que todas los demás son reversibles.

Todo el ciclo podría ser internamente reversible si se sustituyera el proceso de estrangulación 3-4 del diagrama T-S de la figura 1.1 por el proceso de expansión isentrópica 3-4' indicado en el diagrama. En teoría, la salida de trabajo de la expansión podría aprovecharse para ayudar a mover el compresor. Además, se aumenta el efecto frigorífico, por unidad de masa del refrigerante, porque ahora se tendrá q_L desde el estado 4' al 1, en lugar de 4 al 1. En otras palabras, cuando se utiliza estrangulación, el efecto de refrigeración disminuye en una cantidad igual al área bajo la línea 4'-4 de la figura 1.1. Tanto la disminución de la cantidad de trabajo neto de entrada como una mayor cantidad de refrigeración aumenta el COP (coeficiente de operación) si se usara una expansión que realizara trabajo, en la práctica, se usa un estrangulamiento o una expansión libre. En primer lugar, la salida de

trabajo de la expansión es pequeña porque el fluido fundamentalmente es líquido y de volumen específico pequeño. En segundo lugar, un aparato estrangulador es mucho menos costoso que un mecanismo que efectúe trabajo de expansión.

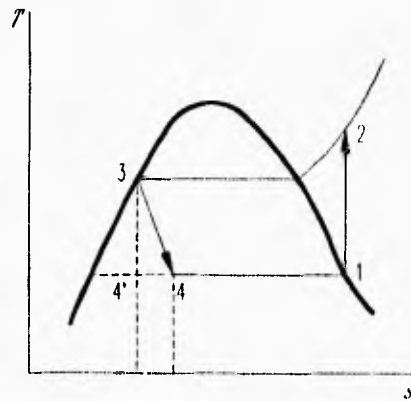
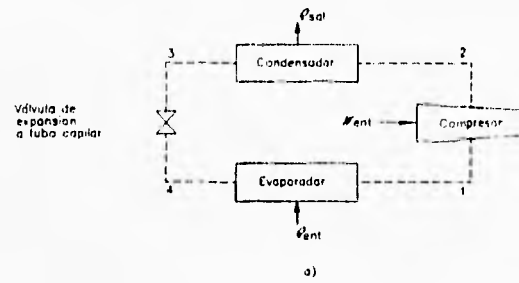


Fig. 1.1 Esquema de las partes y el diagrama T-s de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

La capacidad de los sistemas frigoríficos se expresa en base a toneladas de refrigeración que proporciona la unidad al operarla en las condiciones de diseño. Una tonelada de refrigeración se define como la rapidez de extracción de calor de la región fría (o la rapidez de absorción de calor por el fluido que pasa por el evaporador) de 211 kJ/min o 200 BTU/min. Otra cantidad frecuentemente citada para una máquina frigorífica es el flujo volumétrico de refrigerante a la entrada del compresor que es el desplazamiento efectivo del compresor.

REFRIGERACION POR ABSORCION

La máquina de refrigeración por absorción constituye una unidad para enfriamiento de agua que utiliza directamente el calor sin emplear propulsión o máquina motriz, utilizando pues, los medios de calefacción todo el tiempo y durante todo el año.

La máquina de absorción es una unidad para enfriamiento de agua que utiliza agua como refrigerante y una solución salina tal como bromuro de litio, como absorbente. Sus componentes principales son los siguientes:

1. *Evaporador* .- El agua es enfriada por evaporación del refrigerante que es rociado sobre tubos de agua
2. *Absorbedor*.- El vapor del agua evaporada es absorbido por el absorbente. El calor de absorción es disipado por circulación de agua en el condensador en esta sección.
3. *Generador*.- Se adiciona calor en forma de vapor de agua caliente para hacer que hierva el refrigerante del absorbente y reconcentrar la solución.
4. *Condensador*.- El vapor de agua producido en el generador es condensado por el agua del condensador que circula en esta sección.

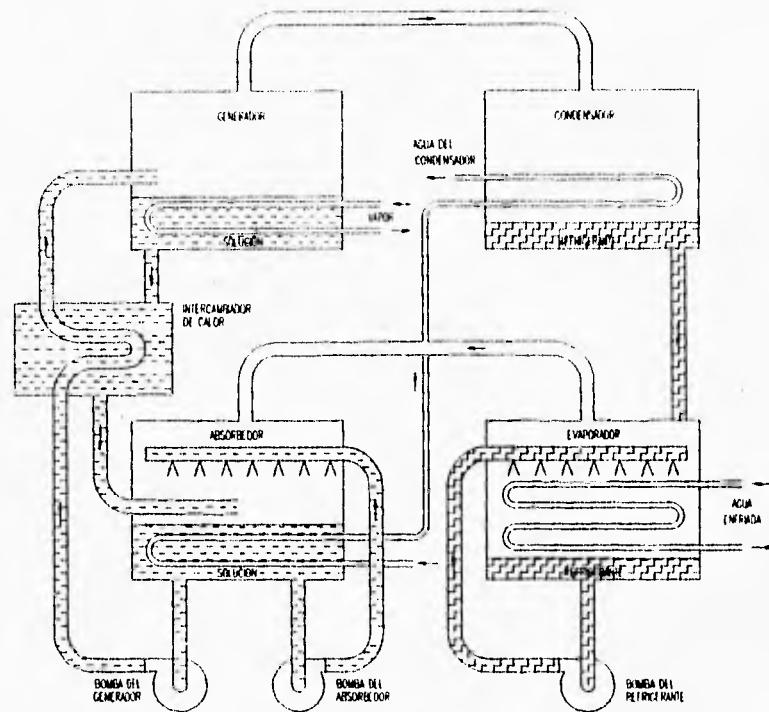


Fig. 1.2 Esquema de un ciclo básico de absorción

5. **Bomba de evaporador.-** Hace circular el refrigerante a presión sobre un haz de tubos del banco.
6. **Bombas de solución.-** Bombean la solución de sal hasta el generador y también hasta el colector de pulverización del absorbedor.
7. **Intercambiador de calor.-** Aquí la solución diluida es bombeada hasta el generador, desde el absorbedor es calentada por la solución caliente concentrada que es retornada al absorbedor.

8. *Unidad de purga.*- Es empleada para eliminar los vapores no condensables de la máquina para mantener una presión baja en esta .

La figura 1.2 presenta un esquema del ciclo de absorción. La máquina puede estar construida con uno o más depósitos o secciones, dependiendo esto del fabricante o de la aplicación. Los factores que intervienen en la elección de una máquina de absorción son la carga, la cantidad de agua enfriada y su temperatura y cantidad de la misma, el factor de suciedad admisible y la fuente de calor.

REFRIGERACION POR ADSORCION

Adsorbente.- Sustancia que tiene la propiedad de retener moléculas de fluidos sin cambios químicos o físicos.

La adsorción es un proceso del cual se obtiene una concentración elevada de cualquier componente en la superficie de una fase líquida o sólida que la que existe en el interior de la misma. Esta propiedad permite fijar uno o más componentes, los cuales se acumulan en la región interfacial. El proceso de transferencia de masa del componente desde la masa principal del fluido a la superficie, continua hasta que se alcanza un estado de equilibrio (equilibrio de adsorción).

El componente que se acumula en la interfase se denomina adsorbato y el adsorbente al material cuya superficie se acumulan las componentes de la fase fluida.

Existen una gran cantidad de materiales adsorbentes que se usan en muy diversas aplicaciones, tales como: separaciones gaseosas para la eliminación de olores e impurezas desagradables de gases industriales, recuperación de vapores de cierto valor comercial, de disolvente a partir de mezclas diluidas con aire y otros gases, fraccionamiento de mezclas de gases de hidrocarburos que contienen sustancias como: metano, etileno, etano, propileno y propano, separación de líquidos que incluyen: eliminación de humedad disuelta en gasolina, eliminación de mezclas de hidrocarburos aromáticos y parafínicos.

Algunos de los adsorbentes más comunes son:

- Alumina activada y alumina-gel
- Arcillas activadas
- Bauxita
- Carbón adsorbente de gases
- Carbones decolorantes
- Carbón activado de malla molecular
- Carbón de hueso
- Mallas moleculares
- Polímeros sintéticos
- Sílica-gel
- Tierras de Fuller.

Existen dos tipos principales de adsorción que dependen de la asociación entre el gas y la superficie sólida, si ésta es de carácter físico o químico, es decir si intervienen fuerzas de Van der-Waals (o de dispersión) o atracciones análogas de valencia.

La adsorción Van der-Waals o física es un fenómeno reversible, como resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia absorbida. La adsorción activada o quimioadsorción es la que implica fuerzas de carácter químico, lo cual queda demostrado frecuentemente por la irreversibilidad de la adsorción.

La figura 1.3 presenta el ciclo de refrigeración por adsorción.



Fig. 1.3 Ciclo de refrigeración por adsorción

Como en el caso de adsorción líquido gas, el principio de adsorción se puede incorporar a un ciclo de refrigeración. Debido a la dificultad técnica que representa transportar el sólido dentro de un sistema, el ciclo de refrigeración tiene por lo general un funcionamiento intermitente, es decir, que los procesos de adsorción-condensación están separados en el tiempo.

En el proceso de desorción-condensación, se desorbe el refrigerante del adsorbente al suministrar la energía térmica necesaria; el refrigerante (adsorbato) se libera y se licua en el condensador donde se almacena. Se requiere de un cierto tiempo para que la masa del adsorbente alcance las condiciones de adsorción, siendo en este momento donde se inicia el proceso de evaporación del refrigerante el cual se almacena previamente y su adsorción es simultánea en el sólido.

Es posible obtener un ciclo continuo de refrigeración, cuando se dispone de dos recipientes en donde se desarrollan los procesos de desorción y adsorción simultáneamente en dos fases de inversión de funciones. En este caso se usa un condensador y un evaporador; un sistema automático de válvula permite la inversión de funciones. El inconveniente del funcionamiento intermitente es que, sólo se dispone

de la potencia frigorífica durante el proceso de evaporación-adsorción, requiriéndose un almacenamiento frigorífico para uso en período diferente.

En la figura 1.4 se han empleado un sólo recipiente que efectúa las dos funciones de desorbedor y adsorbedor y en donde se tiene un ciclo de refrigeración formado por un desorbedor-absorbedor (D.A), un condensador (C), Un recipiente de condensado (R.C), un evaporador (E) y válvulas de control (V_1 , V_2 , y V_3).

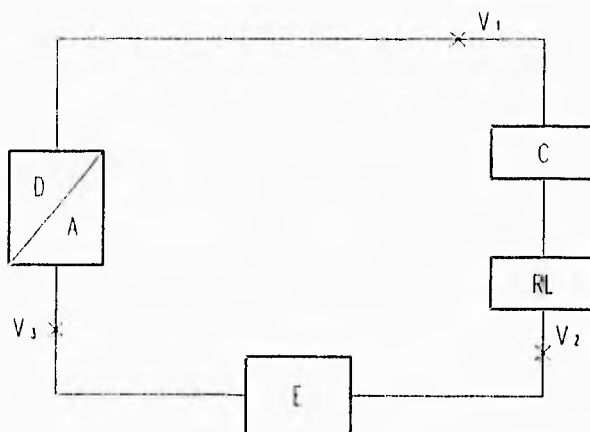


Fig. 1.4 Ciclo intermitente de refrigeración por adsorción.

LICUEFACCION Y SOLIDIFICACION DE GASES

La preparación de líquidos a temperatura abajo de -75°C o -100°C es muy importante en la tecnología moderna. Para estudiar las propiedades y el comportamiento de sustancias a bajas temperaturas, los materiales se colocan en baños de gases licuados. Por ejemplo, de esta manera se separan el oxígeno y el nitrógeno del aire y también se obtienen gases raros como el helio. El helio y el hidrógeno líquido son de especial utilidad en la investigación en la región de temperatura de 2

a 30 K como en estudios de superconductividad o superfluidez. A continuación se presenta una breve descripción de los ciclos termodinámicos utilizados en la licuefacción y solidificación de gases.

En general se deben satisfacer dos condiciones para lograr que un proceso cambie de un gas a la fase líquida o sólida. En primer lugar, el gas debe enfriarse por debajo de su temperatura crítica, porque sólo a temperaturas menores que la crítica se puede hacer una distinción entre las fases líquida y gaseosa. La temperatura crítica de los gases comunes monoatómicos y diatómicos es considerablemente menor que los valores atmosféricos. Por lo tanto, estas sustancias existen en la fase líquida sólo a temperaturas extremadamente bajas. La segunda condición se refiere al coeficiente Joule-Thomson y la máxima temperatura de inversión de una sustancia. Los procesos de licuefacción dependen del estrangulamiento para lograr una parte del efecto necesario de enfriamiento. El cambio de temperatura que ocurre cuando la presión disminuye durante el estrangulamiento se mide por medio de $(dT/dP)_h$, la cantidad que se conoce como coeficiente Joule-Thomson M_{JT} . Cuando M_{JT} es positivo, ocurrirá un efecto de enfriamiento porque la temperatura disminuye al disminuir la presión. Para cierta sustancia a presión dada, hay una temperatura a la que $M_{JT}=0$ y por arriba de la cual el valor de M_{JT} es negativo. Esta temperatura se conoce como la temperatura de inversión para esa presión. Todo gas tiene una temperatura de inversión máxima y para la mayoría de los gases, excepto el hidrógeno, helio y neón, esta arriba de la temperatura ambiente. Por consiguiente, estos tres gases requieren un preenfriamiento considerable antes que pueda aprovecharse el efecto Joule-Thomson.

La figura 1.5 ilustra un ciclo simple para licuar gases.

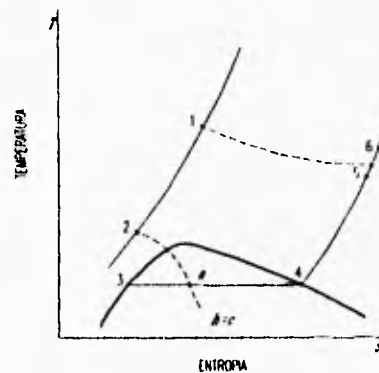
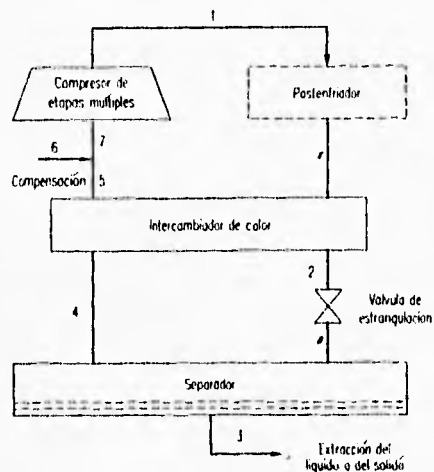


Fig. 1.5 Esquema del equipo y diagrama T-s de un un ciclo básico de licuefacción de gases.

El gas de compesación entra al sistema de régimen permanente en el estado 6 y después mezclarse, el gas se comprime a una presión y temperatura elevada (estado 1). Nótese que el diagrama T-s indica que la compresión no es isoentrópica. De hecho, en la práctica se usan etapas múltiples con el enfriamiento intermedio de manera que el proceso de compresión es más parecido a un isotérmico que a un isoentrópico. Antes de someterse al proceso de estrangulamiento el gas se enfría en el estado 2 pasándolo por un intercambiador de calor a contracorriente eficiente. (El uso del postenfriador indicado en la figura se estudiará posteriormente). El gas se estrangula entonces hasta el estado a, que debe encontrarse en la región húmeda (o en la región

sólido-gas) para que ocurra un cambio de fase. El líquido se recoge en el fondo del tanque separador como líquido saturado en el estado 3 y el gas restante es devuelto por el intercambiador de calor. Como el gas que sale del separador como vapor saturado en el estado 4 puede estar considerablemente más frío que el gas en el estado 1. Puede usarse para enfriar la corriente de gas que pasa por el compresor a la válvula de estrangulación. El gas, en el estado 5, se mezcla con el gas de compensación y se repite el ciclo. El proceso se indica en el diagrama T-s de la figura anterior. Considerese un volumen de control trazado alrededor del intercambiador de calor, la válvula de estrangulación y el separador de la figura. Se supone que estas tres partes del aparato son adiabáticas y que los cambios de energía cinética y potencial son despreciables. La ecuación de energía en el estado estacionario para este volumen de control se reduce en consecuencia a $\Delta H=0$, considerese que una unidad de masa entra al volumen de control y hagamos que Y sea igual a la fracción de líquido o sólido que se forma en el separador por cada unidad de masa que entre. Por consiguiente, de acuerdo con los símbolos indicados en la figura anterior

$$Yh_3 = (1-Y)h_5 = 1(h_1)$$

Al resolver para Y, encontramos que

$$Y = \frac{h_5 - h_1}{h_5 - h_3}$$

El valor de h_3 está fijado por la presión P_3 en el separador. Al mismo tiempo, h_5 lo fija el diseño del intercambiador de calor. La entalpía h_1 esta fijada por T_1 y P_1 , pero T_1 está determinada por el diseño del separador y el intercambiador de calor. En consecuencia la presión a la salida del compresor, P_1 , es la variable principal para controlar la fracción del gas que se licúa o se solidifica. Se observa que se hace más grande disminuyendo el valor de h_1 . Puede demostrarse que el máximo grado de licuefacción ocurre cuando el valor inicial de P_1 para cierta temperatura del gas que entra al intercambiador de calor es la presión de inversión a esta temperatura.

Una aplicación interesante del aparato descrito en la figura 1.6 es la producción del dióxido de carbono sólido o hielo seco.

La figura 1.6 es una representación de la trayectoria aproximada del proceso en un diagrama T-s.

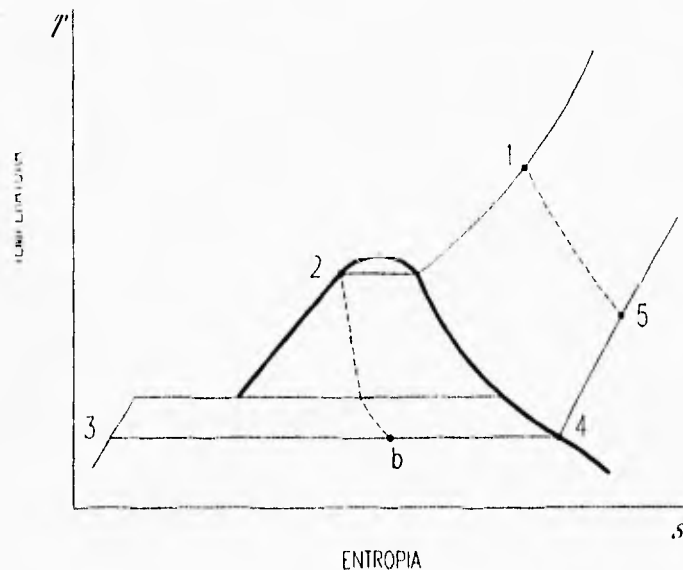


Fig. 1.6 Diagrama T-s del ciclo para producir dióxido de carbono sólido.

El dióxido de carbono en condiciones atmosféricas (estado 5) se comprime en etapas o pasos múltiples hasta una presión elevada (aproximadamente 70 bar o 1000 psi) representado por el estado 1. Luego pasa por el intercambiador de calor, donde se enfría y se condensa a líquido saturado en el estado 2. La temperatura que corresponde a este estado líquido es la temperatura ambiente. El líquido se expande después con una válvula de estrangulación hasta alcanzar la presión atmosférica en el separador. La mezcla resultante es sólido y gas en el estado b. Los estados de saturación correspondientes son los estados 3 y 4 de la figura. Se forma el sólido

porque el estado triple de dióxido de carbono es aproximadamente 5 atm y -57°C o -70°F . En consecuencia, no puede existir el dióxido de carbono líquido a una presión de 1 atm. La temperatura de sublimación del dióxido de carbono a la presión atmosférica es aproximadamente de -80°C o -110°F . Se formará dióxido de carbono sólido al enfriar hasta esta temperatura de estrangulamiento. La fase sólida se comprime en barras, mientras que la fase gaseosa en el estado 4 y el gas de compensación necesarios regresan al compresor en el estado 5. Varias modificaciones del ciclo básico producen una mejor operación y mayor eficiencia. Una de éstas es el uso de un postenfriador o un preenfriador, ubicado entre el compresor y el intercambiador de calor. Esto se indica en la figura con la caja a trazos. En la práctica se usa un sistema de refrigeración diferente para preenfriar al gas al pasar por el postenfriador. Cualquier aparato de refrigeración auxiliar es inherentemente más eficiente para enfriar el gas, comparado con el proceso de estrangulamiento, porque el dispositivo de refrigeración puede hacerse más reversible que el proceso de estrangulamiento. Las irreversibilidades inherentes al proceso de estrangulamiento pueden evitarse parcialmente con otra modificación al ciclo básico de licuefacción antes tratado. Además del enfriamiento por medio del estrangulamiento de un gas, puede enfriarse por medio de una expansión en una máquina, como una turbina. Simplemente se sustituirá el dispositivo de estrangulamiento por un expansor, resultarían dificultades de operación a causa de las complicaciones producidas por el flujo de dos fases en una turbina, que debe evitarse. Esto se resuelve con el sistema Claude para licuar gases usando tanto la válvula de estrangulación como un motor de expansión. La figura 1.7 ilustra esquemáticamente el proceso en un diagrama T-s.

Una compresión en etapas múltiples con enfriamiento intermedio cambia el gas del estado 9 al 1. Un sistema de refrigeración auxiliar enfría más el gas hasta el punto 2, punto donde la corriente se divide. Una parte pequeña continua por otro intercambiador de calor y luego pasa por la válvula de estrangulación hacia el separador. La otra parte pasa por una máquina de expansión, donde se enfría para después reunirse con la corriente proveniente del separador. Después de pasar

por los intercambiadores de calor adicionales, el flujo principal regresa al compresor y vuelve a comenzar el ciclo. Al colocar el expansor cerca del inicio del ciclo se logra un enfriamiento pero el fluido aún después de la expansión, se encuentra todavía fuera de la región húmeda, evitándose así un flujo de dos fases en el aparato de expansión. El trabajo de salida del expansor se podría aprovechar como entrada de trabajo a la parte de compresión del ciclo. El resultado total es un gasto menor de trabajo neto de entrada para cierta cantidad de licuefacción. Son posibles otras modificaciones para desarrollar sistemas que licúen gases a bajas temperaturas.

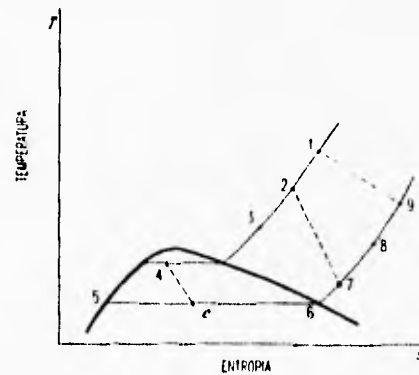
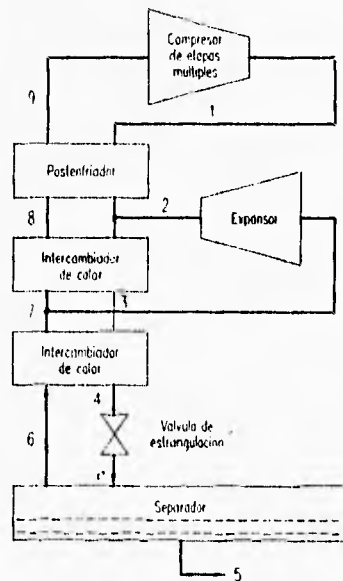


Fig. 1.7 Esquema y diagrama T-s del proceso de licuefacción de gases que incluye un expansor de turbina.

ULTRABAJAS TEMPERATURAS.

Los equipos para ultrabajas temperaturas de congelación son contruidos bajo especificaciones estrictas, existiendo modelos verticales y horizontales. Algunos modelos comerciales cubren un intervalo de temperatura de -35°C a -95°C . Las ultrabajas temperaturas son conseguidas por medio de la refrigeración convencional de una etapa, teniendo un intervalo de temperatura de -35°C , -45°C , y -50°C . Un sistema de cascada múltiple de refrigeración es usado en modelos que tienen un intervalo de temperaturas de -75°C , -80°C , -85°C y -95°C .

El sistema de refrigeración de una etapa puede ser comparado con el sistema de un refrigerador casero. El refrigerante usado es una mezcla de R-12 y R-22. El sistema de refrigeración en etapas múltiples es actualmente en dos sistemas separados, sellados y de controles separados. El sistema sellado puede ser consultado en manuales de baja etapa o de alta etapa. La etapa de baja temperatura usa refrigerante R-13 o R-17 y aditivo. La etapa de alta usa una mezcla de refrigerante R-12 y R-22 o R-12 sólo en algunos modelos.

En el capítulo 4 se explican las partes y funcionamiento de un ultracongelador.

CAPITULO 2

CICLO DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el método más usado actualmente para producir temperaturas extremadamente bajas, por lo tanto utilizaremos este método por ser muy práctico; el estudio del mismo se presentará en tres partes que son: el ciclo teórico, el ciclo real y el ciclo en cascada.

CICLO TEORICO DE REFRIGERACION.

El ciclo de un vapor refrigerante saturado simple es un ciclo teórico y es una modificación del ciclo de Carnot.

En un diagrama teórico de refrigeración se considera que el vapor sale del evaporador y entra al compresor saturado y que el líquido sale del condensador y entra como líquido saturado a la válvula de control. En los diagramas presión-entalpía es de gran utilidad en problemas prácticos de refrigeración, por tal motivo a continuación presentamos el diagrama de un ciclo saturado simple (ciclo teórico).

Los procesos llevados a cabo en el ciclo son los siguientes:

EXPANSION

El proceso de expansión ocurre en la válvula de expansión; la presión del líquido se reduce de la presión de condensación a la presión de evaporación. Cuando ocurre la expansión a través del orificio de la válvula, la temperatura del líquido también se reduce de la temperatura de condensación a la de evaporación como se muestra en la figura 2.1. El proceso de expansión A-B es isoentálpico sin producir trabajo.

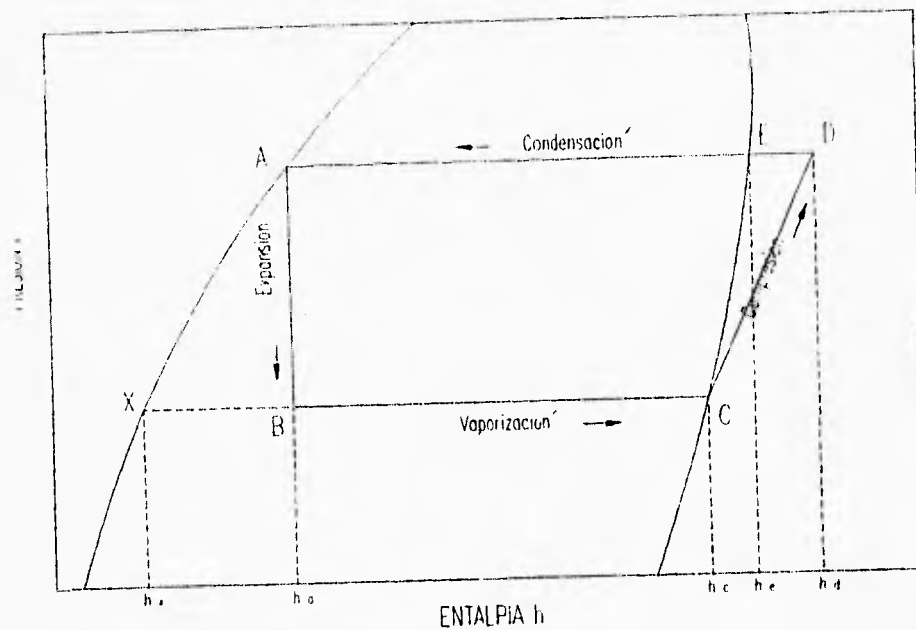


Fig. 2.1 Diagrama P-h de un ciclo saturado simple o teórico

b) VAPORIZACION

El proceso B-C corresponde a la vaporización del refrigerante en el evaporador. Debido a que la vaporización se efectúa a temperatura y presión constantes, el proceso B-C es isotérmico e isobárico. En C el refrigerante es vapor saturado a la presión y temperatura vaporizante. La cantidad de calor absorbida por el refrigerante en el evaporador (efecto refrigerante) es la diferencia de valor entre la entalpía del refrigerante de los puntos B y C. Por lo tanto h_a , h_b , h_c , h_d , h_e , y h_x son las entalpías del refrigerante en los puntos A, B, C, D, E, y x respectivamente.

EFFECTO REFRIGERANTE.- El efecto refrigerante de un refrigerante líquido es igual al calor latente del refrigerante a la presión de vaporización, menos la cantidad del calor que desprende el líquido al enfriarse de la temperatura de entrada a la válvula a la temperatura de salida; este calor evapora parte del mismo líquido antes de entrar al evaporador, o sea

$$ER = h_c - h_a$$

Donde ER = Efecto refrigerante.

La distancia X-C en el diagrama de la figura 2.1 representa el calor latente total de vaporización, que esta compuesto por el efecto refrigerante (X-B).

COMPRESION

La compresión en un ciclo teórico se supone que es un proceso adiabático. El proceso C-D se lleva a cabo en el compresor a medida que se incrementa la presión de vapor debido a la compresión desde la presión vaporizante hasta la presión condensante. El proceso de compresión C-D es isoentrópico. Una compresión isoentrópica es un tipo especial de proceso adiabático donde no se presenta fricción. Debido a que la compresión es a entalpía constante el punto D puede localizarse en un diagrama P-h sobre la línea isoentrópica desde el punto C hasta la intersección con la línea de presión de condensación. Durante la compresión se realiza un trabajo mecánico sobre el refrigerante y esto ocasiona un incremento de energía de vapor. Comúnmente este trabajo mecánico es conocido como calor de compresión y lo podemos calcular mediante la siguiente ecuación:

$$q_w = h_d - h_c$$

Si w es el trabajo mecánico efectuado sobre el vapor por el pistón durante la compresión.

$$W = (q_w)(J) = J(h_d - h_c)$$

Donde J = Equivalente mecánico de calor.

CONDENSACION

En el condensador es donde el agente absorbe calor del refrigerante, transformando el gas a sobrecalentado que sale del compresor, en líquido saturado o subenfriado.

El proceso E-D se realiza a presión constante bajando la temperatura hasta la de saturación; el proceso E-A se realiza a presión y temperatura constantes.

El calor absorbido por el condensador es igual que el calor absorbido en el evaporador más el calor equivalente al trabajo suministrado por el compresor.

$$q_c = h_d - h_a$$

Donde q_c = Calor absorbido por el condensador

En un ciclo saturado simple, la energía del refrigerante se incrementa en dos puntos del ciclo: (1) el calor absorbido del espacio refrigerado a medida que se vaporiza el refrigerante en el evaporador (efecto de refrigeración) y (2) la energía equivalente debido al trabajo mecánico del compresor (q_w) por lo tanto.

$$q_c = q_e + q_w$$

Donde m es la masa de la razón de flujo de refrigerante circulando para producir la capacidad de refrigeración requerida (Q_c) de una tonelada

$$m = \frac{Q_c}{q_c}$$

donde:

Q_c = Cantidad de calor eliminado en el condensador por minuto y por tonelada

$$Q_c = m q_c$$

$$Q_c = m(h_d - h_a)$$

Q_w es la energía térmica equivalente al trabajo de compresión por minuto y por tonelada de capacidad de refrigeración

$$Q_w = m q_w$$

$$Q_w = m(h_d - h_c)$$

El trabajo de compresión por tonelada es:

$$W = J(Q_w)$$

$$W = J(n)(h_d - h_c)$$

POTENCIA TEORICA.- La potencia teórica en caballos de potencia necesaria para impulsar al compresor recíprocante por toneladas de refrigeración de capacidad puede obtenerse mediante la siguiente ecuación

$$T(\text{hp}) = \frac{W}{33,000}$$

COEFICIENTE DE COMPORTAMIENTO (COP)

El coeficiente de comportamiento de un refrigerante es la medida de su eficiencia en utilizar la energía gastada en el compresor en relación con la energía absorbida durante la evaporación. El coeficiente de comportamiento es una de las propiedades más importantes de un refrigerante.

$$\text{COP} = \frac{\text{Calor absorbido en el espacio refrigerado}}{\text{Energía térmica suministrada al compresor}}$$

Para el ciclo teórico tenemos:

$$\text{COP} = \frac{\text{Efecto de refrigeración}}{\text{Calor de compresión.}}$$

Existen efectos importantes que afectan la eficiencia del ciclo, como son:

a) EFECTO DE LA TEMPERATURA CONDENSANTE

Podemos mejorar la eficiencia del ciclo cuando tenemos una temperatura vaporizante mayor, pero tenemos que tomar en cuenta las variaciones de la temperatura condensante ya que ésta causará efectos que repercutirán directamente en la eficiencia del ciclo.

Si la temperatura vaporizante se mantiene sin cambio, la eficiencia se reducirá, la eficiencia del ciclo al incrementarse la temperatura condensante.

El diagrama siguiente muestra los efectos de dos ciclos simples saturados con diferentes temperaturas condensantes.

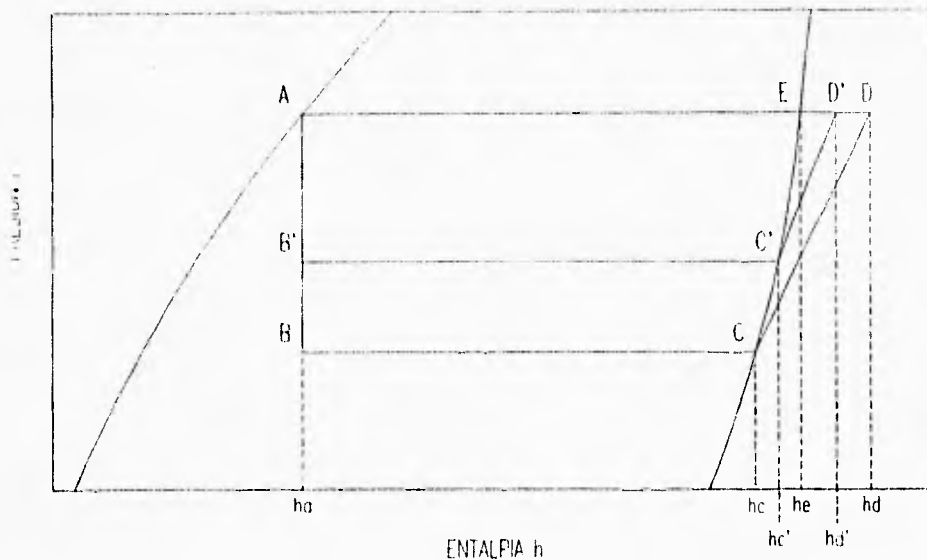


Fig. 2.2 Comparación entre dos ciclos simples saturados trabajando con diferentes temperaturas vaporizantes.

En un ciclo teórico, el líquido refrigerante llega a la válvula de control o tubo capilar a la temperatura condensante. A medida que crece la temperatura condensante, se incrementa también la temperatura con que llega a la válvula de control y disminuye el efecto refrigerante por unidad de masa.

La temperatura condensante mayor provoca el efecto refrigerante por unidad de masa es menor para un ciclo que tenga una temperatura condensante mayor.

En un ciclo saturado simple, el volumen específico del vapor en la succión únicamente con la temperatura vaporizante.

Cuando en los valores de las presiones vaporizante y condensante son grandes las diferencias, el trabajo de compresión por unidad de masa de refrigerante circulando será también mayor para el ciclo que tenga la mayor temperatura condensante.

Cuando se tiene mayor trabajo de compresión por unidad de masa y mayor razón de flujo por capacidad unitaria, la potencia teórica requerida por unidad de capacidad refrigerante aumentará a medida que aumente la temperatura condensante.

Resulta natural pensar que el efecto que se tiene en la eficiencia de un ciclo al incrementar la temperatura condensante es exactamente lo opuesto al que se tiene al incrementar a la temperatura vaporizante. La cantidad de calor sensible absorbido en el condensador crece bastante para cuando se tienen temperaturas condensantes elevadas, mientras decrece ligeramente la cantidad de calor absorbido. Esto es, que para una temperatura condensante alta, una gran parte de la superficie del condensador se usa en forma simple para bajar la temperatura del vapor hasta la temperatura condensante.

b) EFECTO DE LA TEMPERATURA DE SUCCION

La eficiencia de un ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor varía considerablemente tanto con la temperatura vaporizante como con la condensante, siendo la temperatura vaporizante la que produce mayor efecto.

En el diagrama P-h siguiente se muestra el efecto. En este diagrama se comparan dos ciclos simples saturados, trabajando a diferentes temperaturas vaporizantes.

Al comparar los dos ciclos podemos ver que el efecto de refrigeración por unidad de masa refrigerante es mayor para el ciclo de mayor temperatura vaporizante. Este hecho, de obtener un efecto refrigerante mayor por unidad de masa refrigerante circulando debido a que se tiene un diferencial menor de temperatura entre la temperatura vaporizante y la temperatura del líquido que llega a la válvula de control de refrigerante. Por lo tanto a mayor temperatura de succión, se vaporiza una fracción menor de refrigerante en la válvula de control

y una mayor parte se vaporizará en el evaporador para producir el enfriamiento útil.

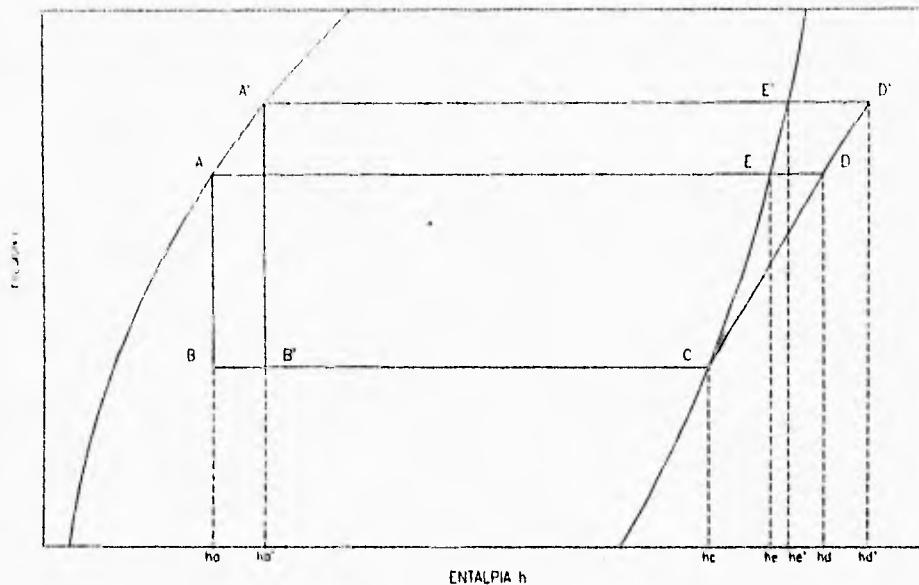


Fig. 2.3 Diagrama P-h mostrando el efecto de la temperatura de succión. Este esquema es una comparación entre dos ciclos saturados simples trabajando a diferentes temperaturas vaporizantes.

La razón de flujo de masa refrigerante necesario para producir una capacidad de una tonelada de refrigeración es menor para una temperatura de succión mayor que para una menor, debido a que el efecto de succión de refrigerante por unidad de masa es mayor.

Debido a que la diferencia entre las presiones vaporizante y condensante es pequeña para los ciclos de alta temperatura de succión, el trabajo de compresión por unidad de masa necesaria para comprimir el vapor desde la presión vaporizante hasta la presión condensante es menor para el ciclo de temperatura más alta que para

y una mayor parte se vaporizará en el evaporador para producir el enfriamiento útil.

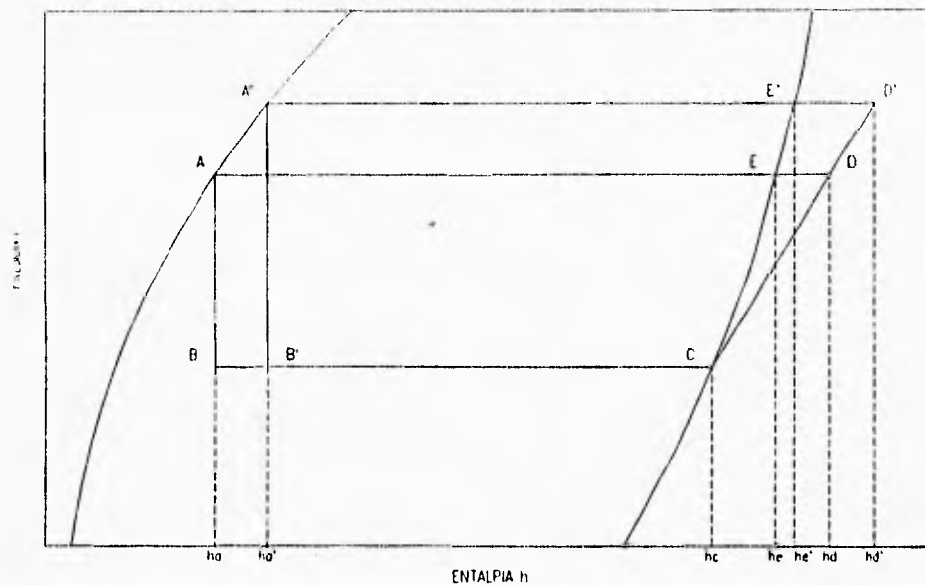


Fig. 2.3 Diagrama *P-h* mostrando el efecto de la temperatura de succión. Este esquema es una comparación entre dos ciclos saturados simples trabajando a diferentes temperaturas vaporizantes.

La razón de flujo de masa refrigerante necesario para producir una capacidad de una tonelada de refrigeración es menor para una temperatura de succión mayor que para una menor, debido a que el efecto de succión de refrigerante por unidad de masa es mayor.

Debido a que la diferencia entre las presiones vaporizante y condensante es pequeña para los ciclos de alta temperatura de succión, el trabajo de compresión por unidad de masa necesaria para comprimir el vapor desde la presión vaporizante hasta la presión condensante es menor para el ciclo de temperatura más alta que para

el ciclo de menor temperatura, deducimos que el calor de compresión por unidad de masa para el ciclo que tiene la temperatura vaporizante mayor es menor que para el ciclo que tiene la temperatura vaporizante menor.

Es importante hacer notar que el volumen de vapor que el compresor debe manejar por minuto y por tonelada de refrigeración varía bastante con los cambios que se tengan en la temperatura vaporizante. Es probable que éste sea uno de los factores más importantes que influyen en la capacidad y eficiencia de un sistema de refrigeración de vapor por compresión.

Debido a que el coeficiente de comportamiento es un índice de la potencia necesaria por unidad de capacidad de refrigeración y como tal, es una indicación de la eficiencia del ciclo, tanto el rendimiento como la eficiencia del ciclo se mejora en forma considerable al aumentar la temperatura vaporizante.

El trabajo de compresión por masa unitaria y la razón de flujo de masa de refrigerante necesario por tonelada de capacidad son menores para el ciclo de temperatura de succión alta, la potencia teórica requerida por tonelada será menor en el ciclo de temperatura vaporizante mayor.

La cantidad de calor absorbido en el condensador por minuto y por capacidad unitaria, es mucho menor para el ciclo que tiene la temperatura vaporizante y ésta es debido a:

- 1.- La menor razón de flujo de masa
- 2.- El calor de compresión por unidad de masa

CICLO REAL DE REFRIGERACION

En el ciclo real existen ciertas modificaciones al ciclo teórico, que se estudiarán a continuación.

EFFECTO DE SOBRECALENTAMIENTO EN LA SUCCION DEL COMPRESOR.

En el ciclo teórico, se supone que el vapor entra al compresor como vapor saturado y seco (punto C de la siguiente figura), pero realmente, posteriormente que el líquido se evapora completamente, el vapor sigue absorbiendo calor y sobrecalentándose antes de entrar al compresor (punto C').

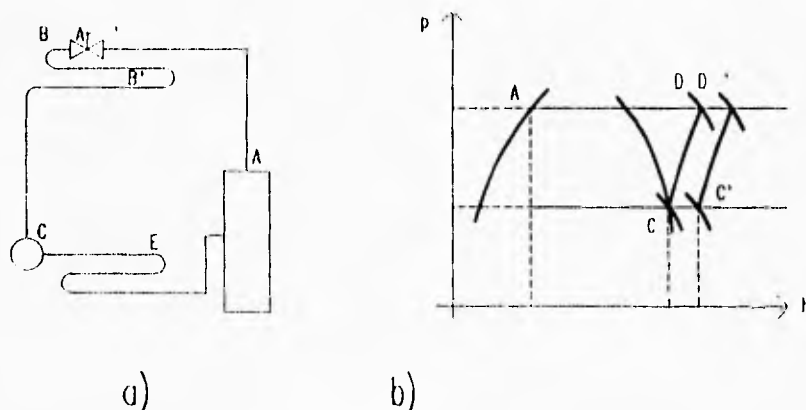


Fig. 2.4 Efecto de sobrecalentamiento en la succión del compresor.

En el caso de la figura anterior el vapor se sobrecalienta del punto c al C'. Se supone que la presión se mantiene constante; y al no tomar en cuenta la pérdidas por fricción, pérdidas en las válvulas del compresor .

El punto D y D' se localizan siguiendo una línea de entropía constante correspondiente a la presión de condensación.

De lo anterior se deduce lo siguiente:

1.- El calor de compresión es mayor en el ciclo real que en el ciclo teórico o saturado.

2.- La temperatura de descarga del compresor será mayor en el ciclo real.

3.- En el condensador se disipa más calor en el ciclo real que en el ciclo teórico.

El efecto de sobrecalentamiento del vapor de la succión tiene en la capacidad del sistema y el coeficiente de comportamiento una dependencia únicamente de donde y cómo ocurra el sobrecalentamiento del vapor y que si de una forma u otra el calor absorbido por el vapor para sobrecalentarse se traduzca en un aprovechamiento del enfriamiento.

El sobrecalentamiento del vapor se lleva a cabo en:

a) El evaporador, produciendo "frío útil", sin embargo no es económico, ya que el evaporador no está diseñado para transferir calor sensible.

b) En el tubo de succión del compresor, en cuyo caso no produce "frío útil".

EFFECTO DEL SUBENFRIAMIENTO DEL LIQUIDO.

En un ciclo real, después del condensador, el líquido no sale saturado como en el ciclo teórico como se muestra en el punto A de la siguiente figura, sino que hay un subenfriamiento (punto A').

En el caso representado en la figura 2.5, hay un subenfriamiento antes de llegar a la válvula de expansión.

De lo anterior se deduce lo siguiente:

1.- El calor de compresión es mayor en el ciclo real que en el ciclo teórico o saturado.

2.- La temperatura de descarga del compresor será mayor en el ciclo real.

3.- En el condensador se disipa más calor en el ciclo real que en el ciclo teórico.

El efecto de sobrecalentamiento del vapor de la succión tiene en la capacidad del sistema y el coeficiente de comportamiento una dependencia únicamente de donde y cómo ocurra el sobrecalentamiento del vapor y que si de una forma u otra el calor absorbido por el vapor para sobrecalentarse se traduzca en un aprovechamiento del enfriamiento.

El sobrecalentamiento del vapor se lleva a cabo en:

a) El evaporador, produciendo "frío útil", sin embargo no es económico, ya que el evaporador no está diseñado para transferir calor sensible.

b) En el tubo de succión del compresor, en cuyo caso no produce "frío útil".

EFFECTO DEL SUBENFRIAMIENTO DEL LIQUIDO.

En un ciclo real, después del condensador, el líquido no sale saturado como en el ciclo teórico como se muestra en el punto A de la siguiente figura, sino que hay un subenfriamiento (punto A').

En el caso representado en la figura 2.5, hay un subenfriamiento antes de llegar a la válvula de expansión.

Ya se ha visto que cuando el líquido se subenfía antes de llegar a la válvula de control, el efecto de refrigeración aumenta una cantidad igual a $h_B - h_A$. Por lo tanto, con el subenfriamiento se ahorra refrigerante y es muy deseable, y a veces llega a instalarse un enfriamiento doble o adicional, ya sea integral al condensador, o bien, un cambiador de calor "subenfriamiento-sobrecalentamiento".

El subenfriamiento ocurre en lugares tales como: en el tanque de almacenamiento de refrigerante, en la tubería y en el condensador .

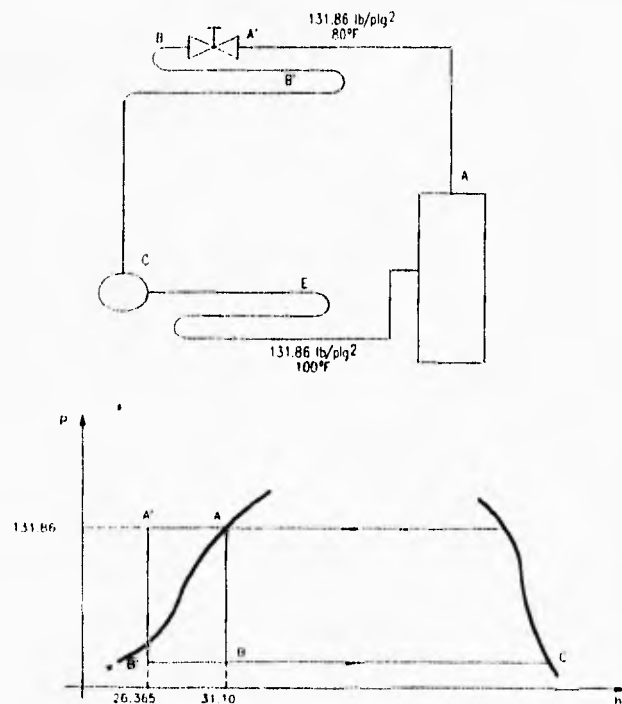


Fig. 2.5 Efecto del subenfriamiento del líquido que sale del condensador.

CAMBIADORES DE CALOR SUCCION-LIQUIDO.

Un método para subenfriar un líquido, es la colocación de un intercambiador de calor entre el líquido y el vapor frío de la succión antes de la entrada al mismo al condensador. En un intercambiador de calor succión-líquido, el vapor de succión frío es pasado a través de un intercambiador de calor en contraflujo para que el líquido refrigerante caliente fluyendo a través de la tubería del líquido pase hasta el dispositivo de control refrigerante. Cuando se usa un cambiador de calor succión-líquido, el calor cedido por el líquido para subenfriarse es absorbido por el vapor de succión y permanece en el sistema.

El uso de este intercambiador es muy discutido, ya que si bien produce un subenfriamiento, también produce, quizá, un sobrecalentamiento excesivo.

EFFECTO DE LAS PERDIDAS DE PRESION DEBIDAS A LA FRICCION

La figura 2.6 muestra el efecto de las pérdidas de fricción en tuberías y accesorios, por donde fluye el refrigerante.

Supongamos un ciclo cualquiera en el que la caída de presión en el evaporador B'C' tienen un valor determinado, lo que hace que el vapor salga del evaporador a menor presión y temperatura y con un volumen específico mayor al estado inicial. La línea C'C'' es la pérdida a través del tubo que une al evaporador con el compresor, y C''C''' es la pérdida a través de las válvulas de succión y conductos del compresor hasta llegar al cilindro.

La línea C'''D'' representa el proceso de compresión. Nótese que se comprime a una presión considerablemente mayor que la presión de condensación, lo que es necesario para forzar a que el vapor salga del cilindro a través de las válvulas de succión y llegue al condensador a la presión D'.

La línea D''D' representa la presión requerida (caída) para forzar a que abran las válvulas de descarga del compresor, la línea D''A representa la caída en las líneas de descarga y el condensador.

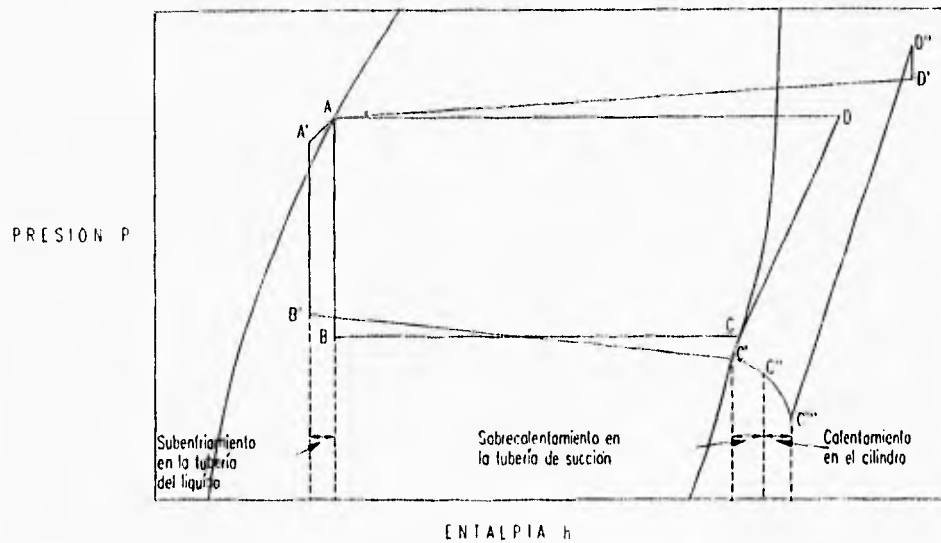


Fig. 2.6 Diagrama del ciclo real de refrigeración mostrando los efectos de subenfriamiento, sobrecalentamiento y pérdidas de presión. Para comparación se dibujó un ciclo saturado simple.

La línea A-A' representa la caída de presión, para forzar a que el refrigerante entre al tanque receptor, y la pérdida en la línea del líquido del receptor a la válvula de expansión.

SISTEMA DE COMPRESION DE VAPOR EN CASCADA Y DE ETAPAS MULTIPLES

En esta sección examinaremos dos variaciones del ciclo de refrigeración básico por compresión de vapor. En primer lugar examinaremos el ciclo en cascada, que nos permite usar un ciclo por compresión cuando la diferencia de temperatura entre el evaporador y el condensador es muy grande. La segunda estudia el uso de compresión en etapas múltiples con enfriamiento intermedio, el cual reduce la entrada necesaria de trabajo para el compresor.

a) CICLO EN CASCADA.

En la sección examinaremos métodos para lograr temperaturas extremadamente bajas mediante una compresión de vapor y estrangulamiento. Estos métodos son de gran valor e indispensables para licuar y solidificar gases. No obstante, hay aplicaciones industriales, clínicas y de laboratorio en las que sólo se necesitan temperaturas moderadamente bajas que requieren sistemas menos complejos. Esto es especialmente cierto para rangos de temperatura de -25°C a -75°C . Desafortunadamente, no se puede alcanzar estas temperaturas con un solo ciclo de compresión de vapor para alcanzar estas temperaturas moderadamente bajas. La diferencia de temperatura entre el condensador y el evaporador es, en este caso muy grande. Por consecuencia, la variación de la presión de vapor con la temperatura de saturación, de un sólo refrigerante cualquiera que sea no cubre los valores requeridos para el evaporador y el condensador. Para solucionar este problema, siguiendo la compresión de un vapor, podríamos usar un sistema de compresión de vapor por un ciclo en cascada. Un ciclo en cascada es simplemente una combinación de ciclos de compresión de vapor en serie, de tal manera que el condensador de un ciclo a menor temperatura suministre calor al evaporador de un ciclo de temperatura mayor, como se indica en la figura 2.7 (a).

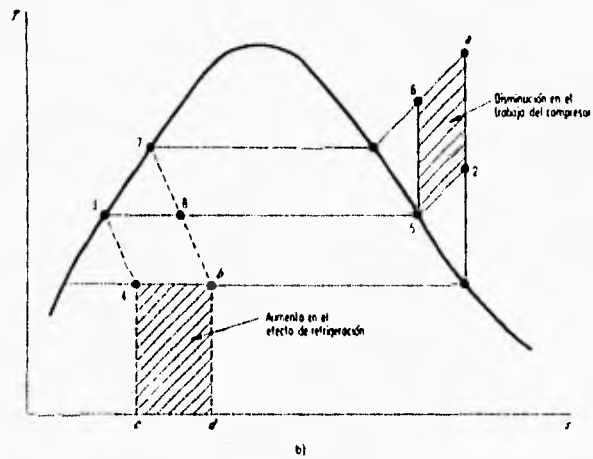
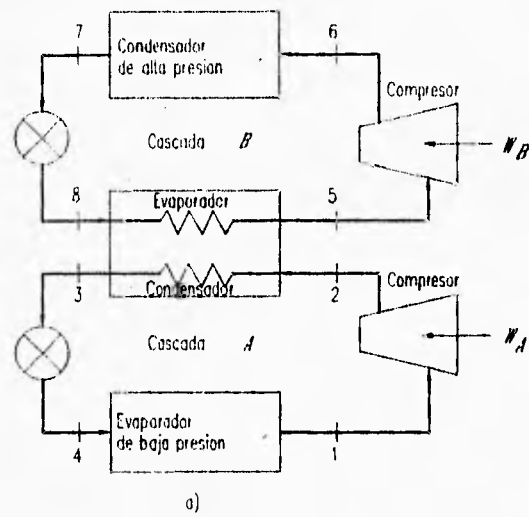


Fig. 2.7 Esquema del equipo y diagrama T-s de un ciclo de refrigeración en cascada.

Aunque sólo mostramos dos unidades, sería más práctico utilizar tres ó cuatro unidades en serie, si fuese necesario. Normalmente se emplean distintos tipos de refrigerante en cada ciclo distinto, para ajustarlo a los intervalos requeridos de presión y temperatura. Por ejemplo, al escoger los dos refrigerantes de la figura anterior, es muy importante que la temperatura del estado triple del fluido en el caso B sea mayor que la temperatura crítica del fluido en el ciclo A.

La figura 2.7 (b) también muestra un diagrama T-s de un sistema ideal doble en cascada que usa el mismo refrigerante en cascada circuito. (Si se usaran refrigerantes distintos en un sistema en cascada, deberíamos usar dos diagramas T-s diferentes). Aunque prácticamente no sea usual como se indicó anteriormente, al usar el mismo refrigerante en cada circuito suministra una base para el estudio de las ventajas del sistema en cascada.

En la figura se indica las posiciones del ciclo A (1,2,3,4) y del ciclo B (5,6,7,8). Los flujos de refrigerante en los dos ciclos generalmente son diferentes, ya sea que el refrigerante sea o no el mismo. El flujo másico lo fija el número de toneladas de refrigeración necesaria en el evaporador del ciclo A. Además, la transferencia de calor disipado por el condensador del ciclo A debe ser igual a la transferencia de calor absorbido por el fluido en el evaporador del ciclo B, si el intercambiador de calor entre los dos ciclos está bien aislado. El balance de energía en el intercambiador de calor del condensador-evaporador revela que:

$$m_A(h_2-h_3) = m_B(h_5-h_1) \text{ sistema en cascada}$$

Por lo tanto, el cociente de los dos flujos de cada ciclo esta fijado por los cambios en la entalpía de cada flujo al pasar por el intercambiador de calor.

Si se usara un sólo ciclo de refrigeración para todo el rango de temperatura, éste se representaría por el ciclo 1-a-7-b-1 de la anterior figura. En el diagrama T-s son evidentes dos efectos importantes. En primer lugar, para el ciclo único el trabajo del compresor aumenta la cantidad de rea 2-a-6-5 con respecto al ciclo en cascada. En segundo lugar, hay una disminución en la capacidad de refrigeración al usar una sola unidad para el mismo flujo que pasa por el evaporador de temperatura baja. Esta pérdida está representada por el rea 4-b-d-c del diagrama Ts. Los dos efectos producirían un COP mayor en el sistema en cascada que en la unidad frigorífica única.

b) COMPRESION DE VAPOR EN ETAPAS MULTIPLES.

Una modificación más del ciclo de refrigeración por compresión de vapor consiste en la compresión en etapas múltiples con enfriamiento intermedio para disminuir la entrada de trabajo. En los ciclos de potencia de gas, el calor extraído del enfriador intermedio se transfiere generalmente al ambiente. En un ciclo de refrigeración, el sumidero de energía puede ser el refrigerante mismo del ciclo, porque en varias partes del ciclo la temperatura del refrigerante es menor que la ambiental. Por lo tanto, el intercambiador de calor del enfriador intermedio se convierte en un intercambiador de calor regenerativo, ya que la transferencia de calor ocurre ahora dentro del sistema. La figura 2.8 muestra un esquema para el ciclo de compresión de dos etapas con enfriamiento intermedio regenerativo.

El líquido que sale del condensador se estrangula (proceso 5-6) al entrar a una cámara de expansión (flash) mantenida a presión intermedia entre las presiones del evaporador y el condensador. Todo el vapor que se separa del líquido en la cámara de expansión y se transfiere a la cámara de mezclado, donde se mezcla con el vapor que sale del compresor de baja presión en el estado 2. La cámara de mezclado actúa como un enfriador intermedio regenerativo, pues enfría el vapor que sale del compresor de baja presión antes que toda la

Si se usara un sólo ciclo de refrigeración para todo el rango de temperatura, éste se representaría por el ciclo 1-a-7-b-1 de la anterior figura. En el diagrama T-s son evidentes dos efectos importantes. En primer lugar, para el ciclo único el trabajo del compresor aumenta la cantidad de rea 2-a-6-5 con respecto al ciclo en cascada. En segundo lugar, hay una disminución en la capacidad de refrigeración al usar una sola unidad para el mismo flujo que pasa por el evaporador de temperatura baja. Esta pérdida está representada por el rea 4-b-d-c del diagrama Ts. Los dos efectos producirían un COP mayor en el sistema en cascada que en la unidad frigorífica única.

b) COMPRESION DE VAPOR EN ETAPAS MULTIPLES.

Una modificación más del ciclo de refrigeración por compresión de vapor consiste en la compresión en etapas múltiples con enfriamiento intermedio para disminuir la entrada de trabajo. En los ciclos de potencia de gas, el calor extraído del enfriador intermedio se transfiere generalmente al ambiente. En un ciclo de refrigeración, el sumidero de energía puede ser el refrigerante mismo del ciclo, porque en varias partes del ciclo la temperatura del refrigerante es menor que la ambiental. Por lo tanto, el intercambiador de calor del enfriador intermedio se convierte en un intercambiador de calor regenerativo, ya que la transferencia de calor ocurre ahora dentro del sistema. La figura 2.8 muestra un esquema para el ciclo de compresión de dos etapas con enfriamiento intermedio regenerativo.

El líquido que sale del condensador se estrangula (proceso 5-6) al entrar a una cámara de expansión (flash) mantenida a presión intermedia entre las presiones del evaporador y el condensador. Todo el vapor que se separa del líquido en la cámara de expansión y se transfiere a la cámara de mezclado, donde se mezcla con el vapor que sale del compresor de baja presión en el estado 2. La cámara de mezclado actúa como un enfriador intermedio regenerativo, pues enfría el vapor que sale del compresor de baja presión antes que toda la

mezcla entre a la etapa de alta presión de compresor en el estado 3. El líquido saturado de la cámara de expansión se estrangula al pasar a la presión del evaporador en el estado 9.

El proceso de compresión de dos etapas con enfriamiento intermedio regenerativo se muestra a continuación en un diagrama T-s (figura 2.8b).

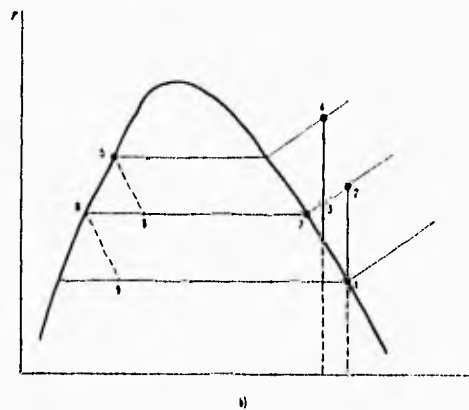
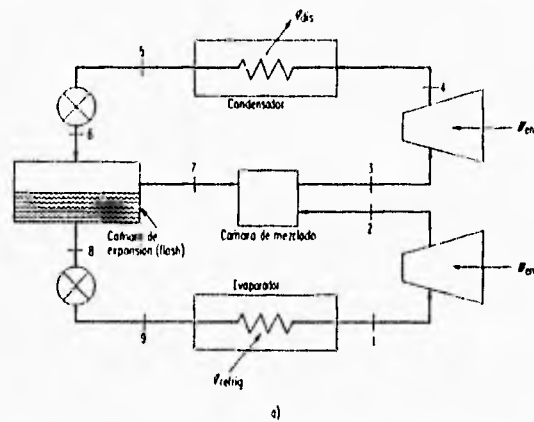


Fig. 2.8 Esquema del equipo y diagramas T-s de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor de dos etapas con enfriamiento intermedio regenerativo.

En este diagrama se ha supuesto una compresión isoentrópica. Aunque el mismo refrigerante circula en ambos circuitos de todo el sistema, los flujos en cada circuito no son iguales. Con el objeto de analizar el sistema conviene suponer que en uno de los circuitos circula la unidad de masa, pero la elección es arbitraria. En este análisis supongamos que la unidad de masa pasa por los estados 3-4-5-6- del circuito de alta presión. La fracción de vapor formado en la cámara de expansión es la calidad x del fluido en el estado c de la figura anterior, y ésta es la fracción de flujo que pasa por el condensador que atraviesa la cámara de mezclado desde la cámara donde se produce el abatimiento de la presión (flash). La fracción de líquido que se forma es $(1-x)$ y es la fracción del flujo total que pasa por el evaporador. Se puede evaluar la entalpía en el estado 3 por medio de un balance de energía en la cámara de mezclado en condiciones adiabáticas. Despreciando la energía cinética, encontramos lo siguiente .

$$xh_7 + (1-x)h_2 = h_3$$

En la que h_3 es la única incógnita. El efecto de refrigeración por unidad de masa que pasa por el condensador es:

$$q_{\text{refrig}} = (1-x)(h_1 - h_9)$$

La entrada total de trabajo al compresor por unidad de masa que pasa por el condensador es la suma de las cantidades para las dos etapas, es decir,

$$W_{\text{comp}} = (1-x)(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)$$

El COP del ciclo de compresión de vapor en dos etapas con enfriamiento intermedio regenerativo se define también como

$$\text{COP} = q_{\text{refrig}}/W_{\text{comp}}.$$

CAPITULO 3

REFRIGERANTES.

Un refrigerante es una sustancia que tiene la capacidad de absorber calor de un lugar y trasladarlo a otro. Por ejemplo, el hielo, el agua, el aire, la salmuera, etc. Sin embargo solamente aquellas sustancias que sufren cambios a temperaturas y presiones comercialmente útiles son de valor práctico.

La refrigeración mecánica utiliza un amplio intervalo de temperaturas, existen refrigerantes utilizados para alta temperatura para condiciones de comodidad (Aire acondicionado); otros manejan intervalos más bajos de temperatura, tales como para el almacenamiento de productos, procesos de congelación y aplicaciones que requieren aún más bajas temperaturas como las aplicaciones clínicas.

La selección de un refrigerante para un proyecto específico hoy en día no depende únicamente de su capacidad para absorber calor, puesto que las cuestiones ecológicas han tomado mucha importancia. A continuación mencionaremos algunos factores importantes que deben tomarse en cuenta a la hora de elegir un refrigerante.

Toxicidad

Debido a que un sistema de refrigeración puede tener fugas, existe el peligro de intoxicación de la que hay que tener cuidado. La sofocación y el envenenamiento están comprendidos en la toxicidad.

La mayoría los fluidos son tóxicos excepto el aire. El grado de toxicidad varía con el tiempo en que se esté expuesto a los mismos, así como a la cantidad de fluido fugado. Muchas veces la toxicidad de un refrigerante es decisivo en la elección del mismo, por ejemplo, en barcos, hospitales, iglesias etc., se utilizan siempre el CO₂, el R-12 u otros no tóxicos.

La Underwriters Laboratories (UL) ha efectuado una gran cantidad de pruebas a todos los refrigerantes y éstos han sido clasificados en secuencia numérica de acuerdo con el grado de toxicidad, el cual varía del 1 al 6. El número más bajo designa al refrigerante más tóxico y peligroso y con el número mayor al menos tóxico.

La tabla siguiente muestra la clasificación de gases y vapores con riesgo para la vida de acuerdo con la Underwriters Laboratories.

GRUPO	LIMITACIONES	REFRIGERANTE
1	Concentración de gases o vapores cerca 0.5-1% por cerca de 5 minutos, es capaz de producir lesión seria o muerte	Dióxido de azufre
2	Concentración de gases o vapores cerca de 0.5-1% cerca de 30 minutos, puede producir lesión seria o muerte	Amoníaco
3	Concentración de gases o vapores cerca de 2-2.5 cerca de 1 hora, puede producir lesión seria o muerte	Cloroformo
4	Concentración de gases o vapores cerca de 2-2.5 durante 2 horas, puede producir lesión seria o muerte	Metil cloruro
5	Gases o vapores que son menos tóxicos que los del grupo 4 aún cuando más tóxicos que los del grupo 6.	Refrigerantes 11, 22, 502, butano
6	Concentración de gases o vapores cerca del 20% por período de 2 horas	Refrigerantes 12, 114.

Tabla 1.3 Clasificación de gases y vapores con riesgo para la vida según Underwriters Laboratories.

Inflamabilidad y Explosividad

Si ocurre un incendio, proveniente de una fuente externa, en la cercanía de cualquier componente de refrigeración, existe el riesgo de que el fuego pueda extenderse y la posibilidad de una explosión es inminente si un refrigerante cuestionable escapa de las líneas o tubos rotos.

La inflamabilidad y toxicidad, son dos parámetros que deben considerarse cuando se presenta una fuga en el sistema de refrigeración. Aún cuando el sistema pueda ser evacuado y todo el refrigerante llevado a algún depósito o a un condensador recipiente, el estaño o la soldadura que se necesita en la reparación o reemplazo de algún componente, representa riesgos a causa de que puede permanecer suficiente vapor en los componentes o líneas de conexión para causar peligro por la llama que produce el equipo de reparación.

Los refrigerantes hidrocarburos, como el butano (R-600), etano (R-170) y propano (R-290), son todos altamente inflamables y explosivos. Debemos tener cuidado con la llama abierta, alrededor de un equipo que use este tipo de refrigerante. Los refrigerantes de halocarburo no son inflamables, pero algunos son tóxicos cuando se exponen a la llama. Entre éstos está el triclorofluorometano (R-11), el diclorodifluorometano (R-12) y el (monoclorodifluorometano (R-22). El R-502, el cual es una mezcla azeotrópica de 48.8% de R-22 y 51.2% de R-115 (Cloropentafluoroetano), el cual no es inflamable.

Además de estos factores, en la selección de un refrigerante se deben considerar las siguientes propiedades físicas:

- **Punto de ebullición.-** Es de gran importancia, porque debe evaporar fácilmente por debajo de la temperatura del producto o espacio que debe enfriarse. Los refrigerantes que no tienen punto de ebullición bajo, requieren que el compresor sea operado con un vacío profundo. Esto puede causar un abatimiento en la capacidad y eficiencia del sistema.

- Punto de congelamiento.- Es una propiedad importante, particularmente en aplicaciones de temperatura extremadamente bajas, porque este punto debe ser lo suficientemente bajo para cualquier temperatura anticipada del evaporador.
- Volumen específico y densidad.- La densidad y el volumen específico son propiedades recíprocas. Para utilizar líneas más pequeñas, tubos o tuberías, un tubo de alta densidad y bajo volumen específico es el apropiado. Tal sistema cuesta menos construirlo e instalarlo. En algunas instalaciones comerciales en donde no hay una considerable distancia vertical entre los mayores componentes del sistema, puede ser recomendable usar un refrigerante con una baja densidad y un alto volumen específico.
- Presión y temperatura críticas.- Todo refrigerante tiene entre sus características una presión sobre la cual permanecerá como un líquido, aún cuando se adicione más calor, tiene también una temperatura sobre la cual no puede existir en estado líquido, independientemente de la presión ejercida sobre el. Estos puntos son la presión crítica y la temperatura crítica, respectivamente del refrigerante.
- Miscibilidad del aceite.- La presencia del aceite lubricante en un sistema es obvia, por lo que el refrigerante y el aceite deben ser compatibles química y físicamente.

El refrigerante óptimo es el que mantiene una estabilidad química en presencia de aceite lubricante y a la vez no altere las características químicas del lubricante.

La capacidad que tienen algunos refrigerantes de mezclarse con el aceite recibe el nombre de miscibilidad, en cualquier porción, algunos se mezclan poco o nada.

Esto provoca que un sistema sufra variaciones de un refrigerante a otro. A continuación se mencionan los refrigerantes miscibles y poco miscibles.

Refrigerantes miscibles	Fluorocarbonados
	Clorohidrocarburos
	Hidrocarburos

Refrigerantes poco miscibles	Amoníaco
	CO ₂
	SO ₂

La miscibilidad tiene como objetivo reducir la viscosidad del aceite y disminuir la temperatura a la que se congela un lubricante; por ello, presenta una ventaja y una desventaja.

El efecto de un lubricante es bajar la eficiencia, puesto que se forma una capa en los tubos del evaporador y reduce la transmisión de calor; esto sucede con refrigerantes poco miscibles .

DETECCION DE FUGAS

Un buen refrigerante debe poseer buenas características para ser detectado lo más rápidamente posible cuando hay una fuga. Mientras más denso sea un refrigerante es menor la posibilidad de fuga. Cuando tenemos una presión menor a la atmosférica, la fuga es en sentido contrario y las consecuencias son de tipo térmico, disminuyendo la eficiencia del sistema. Las fugas causan pérdidas de refrigerante, peligro de explosión e intoxicación, baja la eficiencia del sistema etc. Cada refrigerante tiene su sistema para la detección de fugas, entre los principales sistemas para la detección de fugas tenemos los siguientes:

- **Detector electrónico.-** El detector electrónico es ampliamente usado para manufacturar y ensamblar equipos de refrigeración. La operación de los instrumentos depende de la corriente de flujo causado por ionización por la descomposición del refrigerante entre dos cargas opuestas de electrodos de platino. Estos instrumentos pueden detectar algunos refrigerantes de halógeno excepto el R-14, el cual no es recomendable para usos en ambientes que contienen vapores inflamables o explosivos.
- **La antorcha hálida** es un método rápido y seguro para la detección de fugas de refrigerantes halogenados. El aire es retirado sobre un elemento de cobre calentado por alcohol metílico o por una flama hidrocarbónica. Si los vapores halogenados están presentes, se descompone la flama y el color de ésta cambia de azulado a verde. Aunque no es tan sensible como el detector electrónico, éste método es apropiado para muchos propósitos.
- **El método de la burbuja** registra fugas de refrigerante en función de la presión del sistema bajo inspección. El método consiste en sumergir en agua la zona del sistema donde se sospeche fuga y éstas podrán ser observadas por la formación de burbujas en el líquido. Agregando una cantidad de detergente en el agua se disminuye la tensión superficial de ésta, evitando el escape de gas de la zona de prueba originando la formación de pequeñas burbujas.

El detector electrónico es el sistema más sensible de los métodos para detectar fugas, es capaz de detectar hasta una fuga de 300 mg por año de R-12.

REFRIGERANTES EMPLEADOS EN EQUIPOS DE ULTRACONGELACION

R-12 DICLORODIFLUOROMETANO (CCL₂F₂)

El R-12 se considera un refrigerante seguro, pero puede producir la formación de vapores ácidos cuando se pone en contacto con una flama abierta. Este refrigerante es tal vez el de empleo más común por sus características como son:

- Es un refrigerante no tóxico
- No es irritante
- Es muy estable
- Se utiliza para temperaturas altas, medias y bajas
- Se condensa a presión moderadamente bajo condiciones atmosféricas normales
- Temperatura de ebullición -29.9°C

La miscibilidad del R-12 en el aceite bajo condiciones de operación, simplifica el problema de retorno de aceite y tiende a incrementar la eficiencia y capacidad del sistema.

El desplazamiento que necesita el compresor por tonelada de refrigeración es un poco mayor que el necesario que para otros tipos de refrigerantes comunes, porque su alta densidad lograda en el evaporador. La potencia requerida por tonelada de capacidad es más favorable que con otros refrigerantes.

Podemos detectar fugas de R-12 por los métodos de la burbuja, antorcha hálida, detector electrónico. Aunque se puede adicionar un método más el cual consiste en adicionar aceites colorantes

El R-12 es muy común en equipos recíprocos y rotatorios y en algunos casos son usados en equipos centrífugos.

R-22 DICLORODIFLUOROMETANO (CHCLF₂)

Este tipo de refrigerante al igual que el R-12, es ampliamente usado en equipos de aire acondicionado. Es un refrigerante seguro y las fugas pueden detectarse por el método de la burbuja, antorcha hálida y el detector electrónico de fugas. A pesar de ser miscible en aceite en el condensador comúnmente, es separado del aceite en el evaporador. Los separadores de aceite se usan siempre cuando se trabaja con temperaturas muy bajas.

El R-22 requiere un desplazamiento del compresor aproximadamente del 60% del requerido por el R-12 lo que representa una gran desventaja, lo que significa que para un desplazamiento específico del compresor, la capacidad de refrigeración será del 60% con R-22 que con R-12. Cuando utilizamos R-22 el tamaño de la tubería es menor que cuando utilizamos R-12.

El R-22 tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de humedad superiores que el R-12 con lo que se ahorran problemas de congelamiento en los sistemas R-22. Debido a que la temperatura de descarga con el R-22 es alta la temperatura de sobrecalentamiento en la succión debe tener un mínimo valor, sobre todo cuando usamos unidades herméticas.

R-502 (R-22 al 48.8% y R-115 al 51.2%)

El refrigerante 502 es una mezcla azeotrópica con 48.8% de R-22 y 51,2% de R-115. Es un refrigerante seguro porque no es inflamable, no tóxico, no corrosivo y es utilizado para intervalos de temperaturas entre -18°C a -51°C. Se utiliza en cámaras de refrigeración para conservar alimentos, helados ,etc.

Una desventaja del R-502 es el hecho de sólo ser aplicable a sistemas que operen con compresores reciprocantes.

Los sistemas para detectar fugas de este refrigerante son el método de la burbuja, antorcha hálida y detector electrónico. Una ventaja del R-502 sobre el R-22 es que la temperatura adiabática baja y esto aumenta la vida del compresor, válvulas, conexiones etc. Estos sistemas tienen buena lubricación debido al incremento de la viscosidad del aceite a temperaturas de condensación bajas. El desplazamiento del compresor y la capacidad por tonelada de refrigeración son menores para el R-502, así como las presiones de operación aunque estas últimas sean moderadas.

R-503 (R-23 al 40.1% y R-13 al 59.9%)

El R-503 es otra mezcla azeotrópica, además de ser un refrigerante seguro, puesto que no es inflamable, no tóxico ni corrosivo.

El refrigerante 503 puede manejarse para un intervalo de temperaturas de -73.2°C a -101°C . Su temperatura de condensación es de 6.67°C y -84.4°C dentro de evaporador. En cuanto al desplazamiento del compresor, para el R-503 es aproximadamente el 64% del que requiere el R-13 para la misma capacidad refrigerante.

La tabla 3.2 presenta las propiedades físicas y datos de funcionamiento de los refrigerantes R-12, R-22, R-502 y R-503.

PROPIEDADES FÍSICAS	R - 12	R - 22	R - 502	R - 503
Fórmula química	CCL_2F_2	CHClF_2	---	---
Peso molecular	120.9	86.5	111.6	87.5
Punto de calentamiento a 1 atm (°F)	-21.6	-41.4	-49.8	-26.1
Punto de congelamiento a 1 atm (°F)	-252	-256	---	---
Temperatura crítica (°F)	234	205	180	67
Presión crítica (psia)	597	722	591	632
Densidad del líquido saturado a 86°F	80.7	73.3	74.5	78.5
Calor específico líquido a 86°F (Btu/lb°F)	0.24	0.31	0.30	0.28
Calor específico de vapor a presión cte (Cp) a 86°F y 1 atm (Btu/lb°F)	0.15	0.16	0.17	0.14
Calor específico de vapor a 86°F y 1 atm	0.15	1.18	1.14	1.21
Flamabilidad y explosividad	NO	NO	NO	NO
Toxicidades	6	5	5	6

Tabla 3.2 Propiedades físicas y características de los refrigerantes R-12, R-22, R-502 y R-503

CAPITULO 4

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DE ULTRACONGELADORES

INTRODUCCION

Hoy en día los sistemas empleados para ultrabajas temperaturas son de manufactura confiable. Sin embargo si no se cuenta con un almacén de refacciones, será necesario dejar de operar tales equipos hasta contar con las piezas de reemplazo. Asimismo debe tenerse en cuenta que una mala instalación o la ausencia de un programa de mantenimiento pueden ocasionar que el equipo deje de operar eficientemente. Desgraciadamente para equipos de ultracongelación los programas de mantenimiento estan diseñados para Estados Unidos donde el mantenimiento se realiza por reemplazo de piezas. Es por ello que presentamos un programa de mantenimiento preventivo y correctivo acorde a las necesidades de México, ya que en el país en muchas ocasiones requerimos importar las refacciones con la cuantiosa pérdida de tiempo y dinero. Es por ello que en la mayoría de los casos nos vemos obligados a reparar la pieza dañada procurando no sacrificar el buen funcionamiento del sistema en cuestión.

Los ultracongeladores estudiados serán de una etapa y de etapas múltiples.

ULTRABAJAS TEMPERATURAS.

Los equipos para ultrabajas temperaturas de congelación son contruidos bajo especificaciones estrictas, existiendo modelos verticales y horizontales. Algunos modelos comerciales cubren un intervalo de temperatura de -35°C a -95°C . Las ultrabajas temperaturas son conseguidas por medio de la refrigeración

convencional de una etapa, teniendo un intervalo de temperatura de -35°C, -45°C, y -50°C. Un sistema de cascada múltiple de refrigeración es usado en modelos que tienen un rango de temperaturas de -75°C, -80°C, -85°C y -95°C.

El sistema de refrigeración de una etapa puede ser comparado con el sistema de un refrigerador casero. El refrigerante usado es una mezcla de R-12 y R-22.

El sistema de refrigeración en etapas múltiples más empleado consta de dos sistemas separados, sellados y de controles separados. El sistema sellado puede ser consultado en manuales de baja etapa o de alta etapa. La de baja etapa usa refrigerante R-13 o R-17 entre otros. La alta etapa usa una mezcla de refrigerante R-12 y R-22 o R-12 sólo en algunos modelos.

A continuación se presenta las partes y funcionamiento de un ultracongelador de cascada de dos etapas.

COMPRESORES

El compresor bombea refrigerante a través de todo el sistema. Al mismo tiempo comprime el gas y después lo manda por la línea de descarga. El compresor de gas levanta bruscamente la temperatura y entra en el condensador.

En términos generales los compresores se clasifican de la siguiente forma :

- a) *Compresores de desplazamiento positivo* $\left\{ \begin{array}{l} \text{reciprocantes} \\ \text{rotatorios} \\ \text{helicoidal} \end{array} \right.$
- b) *Compresores centrífugos*

Los compresores reciprocantes son usados en la mayoría de las aplicaciones domésticas, comerciales pequeñas, unidades industriales de condensación y para nuestro caso la construcción de sistemas de ultracongelación. Este tipo de compresor puede posteriormente

subclasificarse de acuerdo a su construcción en abierto o accesible para darle servicio o reparación en el campo de trabajo o completamente sellado, de tal forma que no se pueda reparar ni dar servicio en la zona de trabajo.

Los compresores recíprocos varían en tamaño, de uno hasta los que tienen 16 cilindros. La carcasa del compresor puede construirse en una o dos partes de hierro fundido, y en algunas ocasiones de aluminio. La disposición de los cilindros puede ser horizontal, radial o vertical y ellos pueden estar en línea o arreglados en V y W.

La figura 4.1 presenta un esquema de un pistón de compresor y las válvulas de succión y descarga en diferentes etapas del ciclo de compresión.

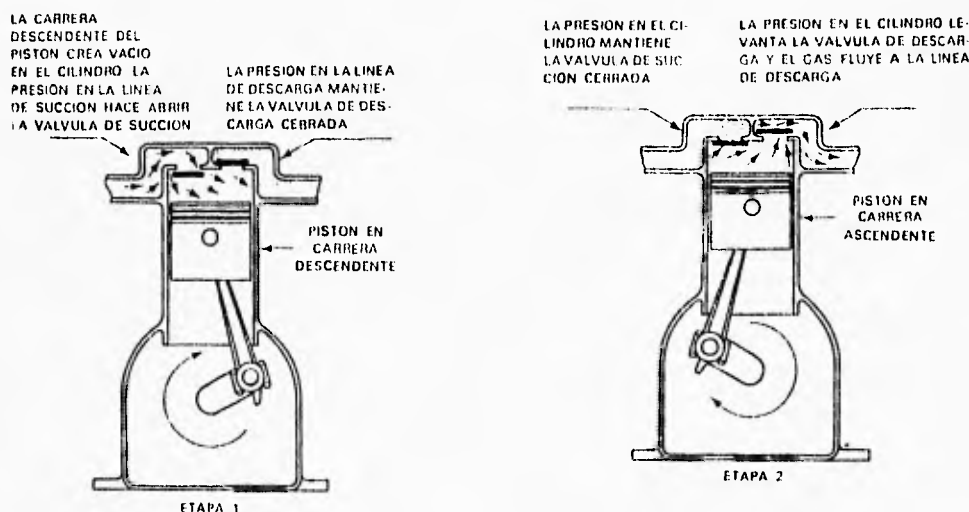


Fig. 4.1 Esquema de un compresor y las válvulas de succión y descarga en diferentes etapas del ciclo de compresión.

Todos los componentes del sistema recíprocante a pistón son maquinados con precisión, cuidadosamente balanceados para evitar vibraciones y acoplados con tolerancias precisas para asegurar que el compresor tendrá una alta eficiencia en el bombeo de vapor refrigerante.

Un tipo diferente de cigueñal, es el de tipo excéntrico; la biela se coloca sobre la excéntrica asegurada con pesas de balanceo. Si el cigueñal no está completamente maquinado debe balancearse dinámicamente.

Las válvulas internas de un compresor reciben bastante uso y golpeteo durante la operación normal, ya que ellas deben abrir y cerrar cientos de veces cada minuto mientras el compresor está operando. Las pequeñas unidades comerciales tienen válvulas de disco de acero de alto grado, o válvula de tipo compuerta, ambas son más silenciosas en operación y eficientes, más simples en construcción y de mayor duración que las válvulas de tipo placa no flexibles. La figura 4.2 muestra el esquema de una válvula interna de un compresor.

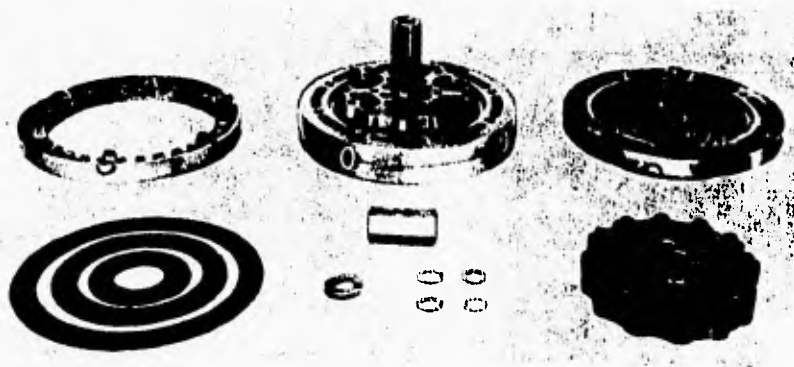


Fig. 4.2 Diseño de una válvula interna de un compresor

En un compresor de tipo abierto, un extremo del cigueñal se extiende a través de la carcasa del mismo para la conexión directa al exterior con el motor o una banda provista con una polea y accionada por un motor externo. Debe tenerse cuidado para evitar fugas de gas y aceite alrededor del cigueñal que se extiende a través de la carcasa del compresor; se logra con la adición de un sello de eje.

La mayoría de los compresores reciprocantes utilizan empaques en las partes que se acoplan para asegurar condiciones de prueba de fuga a

considerando que la mayoría de las superficies no son finamente maquinadas para garantizar juntas a prueba de escape tipo metal-metal. Primeramente los empaques se utilizan entre la culata y la coraza de compresor, entre el cuerpo del compresor y la placa inferior y también entre las válvulas de servicio exterior y sus bases para montaje.

Como ya se mencionó con anterioridad, los compresores reciprocantes de tipo abierto necesitan motores conducidos externamente, los cuales pueden conectarse directamente a través del uso de coples. Esto causa que el compresor opere a la misma velocidad del motor conductor. Un compresor puede tener un volante sobre el extremo del eje del cigueñal, el cual girará por medio de una o más bandas en V entre el volante y la banda montada sobre el eje del motor. La velocidad a la cual el compresor girará depende de la relación de los diámetros del volante y la polea del motor.

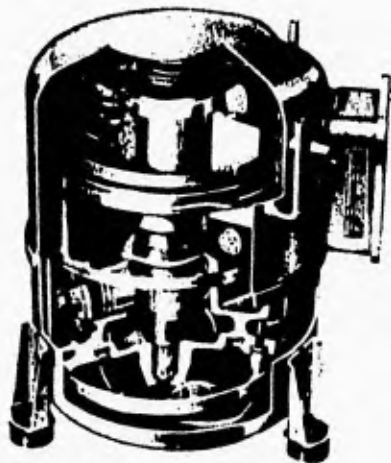


Fig. 4.3 Esquema de un compresor hemético típico.

El objetivo del compresor hermético es el mismo que del compresor abierto, bombear y comprimir el vapor; difiere en construcción en que el motor está sellado en la misma carcasa del compresor. Un compresor típico completamente sellado se muestra en la figura 4.3

Notese el cigüeñal vertical con la biela y el pistón en posición horizontal. La unidad completamente hermética tiene la ventaja de que no hay eje saliente; por lo tanto no necesita sello, y no existe posibilidad de fugas de refrigerante del sistema cuando está operando en vacío.

Como ya se estudió, un compresor hermético no puede ser reparado en campo; las reparaciones internas deben de hacerse en las estaciones de reparación regional o donde fue fabricado.

Algunos compresores herméticos se construyen con motores internos de resorte para absorber la vibración causada por la pulsación del vapor refrigerante que es bombeado por los pistones.

La parte interior del compresor hermético actúa como un sumidero de aceite, en forma similar al carter de un compresor abierto. Como el aceite circula y lubrica las partes internas que mueven recoge algo de calor causado por la fricción de las partes móviles. El aceite transfiere calor a la carcasa externa del compresor, la mayoría de los compresores herméticos se construyen de tal manera que el vapor de succión es llevado a través del embobinado del motor antes de que llegue al cilindro o cilindros.

Esto por supuesto ayuda a remover calor de los devanados del motor y también evapora refrigerante líquido que pudiera haber entrado al compresor.

Algunos compresores herméticos de tamaño pequeño tienen incorporados silenciadores en la descarga y en la succión para disminuir el ruido causado por el vapor cuando es bombeado a través del compresor.

Ya que el cigüeñal y el eje del motor son la misma unidad, la operación a velocidad alta provoca considerablemente más ruido que los compresores que operan a bajas revoluciones y por lo tanto requieren silenciadores.

Otro tipo de compresor conocido como semihermético combina el motor en la misma coraza del compresor, pero a diferencia de la unidad completamente hermética, este tipo de compresor puede ser abierto para repararlo en campo. Los compresores usados en equipos de ultracongelación son los reciprocantes abiertos, semiherméticos y herméticos.

CONDENSADORES

El condensador es la parte del mecanismo refrigerante que recibe calor y gas refrigerante a alta presión del compresor y enfría el refrigerante gaseoso hasta que el retorna a su estado líquido.

Básicamente el condensador es una unidad para intercambiar calor en el cual el calor extraído por el refrigerante en el evaporador (y también el añadido al vapor en la fase de compresión) se disipa a un medio condensante. El vapor a presión y temperatura altas que sale del compresor está sobrecalentado y este sobrecalentamiento generalmente se retira en la línea de descarga de gas caliente y en la primera parte del condensador. Como la temperatura del refrigerante es bajada a su punto de saturación, el vapor se hace líquido para utilizarse nuevamente en el ciclo, los tipos de condensadores más empleados son los siguientes;

- Enfriados por aire
- Enfriados por agua
- Evaporativos

Existen cuatro tipos básicos de condensadores enfriados por agua:

- 1.- *De doble tubo*
- 2.- *De carcaza y tubo vertical, tipo abierto*
- 3.- *De carcaza y tubo horizontal*
- 4.- *De carcaza y serpentín*

Los refrigeradores domésticos generalmente tienen condensadores enfriados por aire. Las unidades que estudiaremos son unidades enfriadas por aire que usan ventiladores para secar o extraer grandes volúmenes de aire a través del serpentín del condensador.

Este condensador depende del suministro amplio de aire para tener una transferencia de calor del refrigerante en el condensador al enfriarse; el aire debe estar a una temperatura mas baja que el refrigerante. Aún cuando la temperatura de los alrededores sea cerca de 100°F o 38°C, el aire es aún más frío que el refrigerante que en el condensador el cual puede ceder o dar calor para retornar a su estado líquido.

Los condensadores enfriados por aire son construidos en forma similar a otros tipos de intercambiadores de calor, con serpentines de cobre o aluminio equipados con aletas. Los condensadores deben ser limpiados frecuentemente para evitar la reducción de su capacidad.

El movimiento de aire a través del serpentín es logrado bien sea por un ventilador centrífugo conducido con banda o por un ventilador de tipo hélice de conducción directa. El ventilador tipo hélice de baja velocidad y álabe ancho mueve el volumen de aire requerido sin incrementar considerablemente el molesto ruido.

En la figura 4.4 se muestra condensador enfriado por aire. Nosotros tenemos preferencia por los condensadores enfriados por aire con ventilador ya que estos son los más usados en los equipos de ultracongelación.

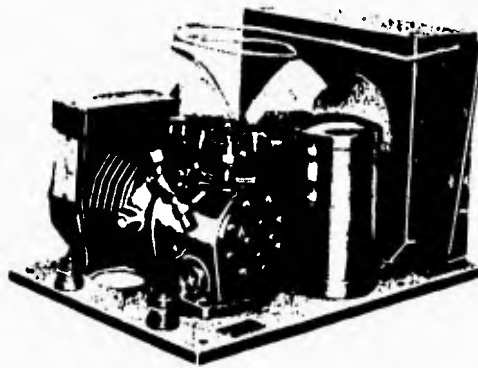


Fig. 4.4 Condensador enfriado por aire.

Los refrigeradores domésticos generalmente tienen condensadores enfriados por aire. Las unidades que estudiaremos son unidades enfriadas por aire que usan ventiladores para secar o extraer grandes volúmenes de aire a través del serpentín del condensador.

Este condensador depende del suministro amplio de aire para tener una transferencia de calor del refrigerante en el condensador al enfriarse; el aire debe estar a una temperatura mas baja que el refrigerante. Aún cuando la temperatura de los alrededores sea cerca de 100°F o 38°C, el aire es aún más frío que el refrigerante que en el condensador el cual puede ceder o dar calor para retornar a su estado líquido.

Los condensadores enfriados por aire son construidos en forma similar a otros tipos de intercambiadores de calor, con serpentines de cobre o aluminio equipados con aletas. Los condensadores deben ser limpiados frecuentemente para evitar la reducción de su capacidad.

El movimiento de aire a través del serpentín es logrado bien sea por un ventilador centrífugo conducido con banda o por un ventilador de tipo hélice de conducción directa. El ventilador tipo hélice de baja velocidad y álabe ancho mueve el volumen de aire requerido sin incrementar considerablemente el molesto ruido.

En la figura 4.4 se muestra condensador enfriado por aire. Nosotros tenemos preferencia por los condensadores enfriados por aire con ventilador ya que estos son los más usados en los equipos de ultracongelación.

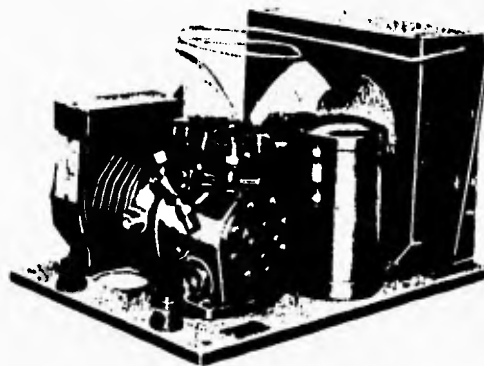


Fig. 4.4 Condensador enfriado por aire.

DESHIDRATADORES

En el sistema no debe existir humedad principalmente en aquellos sistemas que usen refrigerantes de hidrocarburos halogenados. Sin embargo si entra humedad al sistema, esta debe ser retirada. Un método de retirar humedad es mediante el deshidratador como el mostrado en la figura 4.5

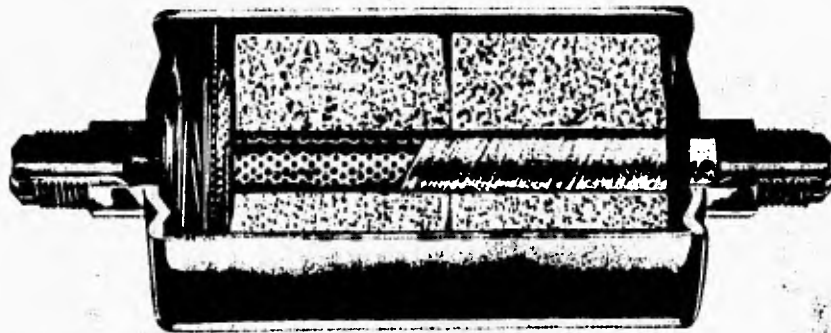


Fig. 4.5 Deshidratador.

Este accesorio consiste de una carcasa a través de la cual circula refrigerante líquido. La carcasa tiene una sustancia encargada de remover el exceso de humedad (material desecante). En cada pasada

por el deshidratador se retira humedad adicional hasta que el refrigerante este suficientemente seco.

El deshidratador realiza una segunda función al filtrar partículas sólidas que arrastra el refrigerante. El deshidratador por lo general se coloca en la línea de líquido. A causa de que el volumen es más pequeño que el gas, puede usarse un secador más pequeño reduciéndose el costo, también la línea de líquido se protege de partículas sólidas cuando el filtro esta en esta posición.

Al emplear filtros deshidratadores es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones: 1) Cuando el desecante se satura el filtro debe cambiarse; 2) El deshidratador crea una pequeña caída de presión por lo tanto debe tenerse cuidado al dimensionar correctamente para evitar excesivas caídas de presión con la respectiva evaporación.

TUBO CAPILAR

El más simple de los dispositivos de control de flujo es el tubo capilar el cual es una restricción deliberada en la línea de líquido. A causa de su pequeño diámetro, crea una considerable caída de presión. Un pedazo de tubo capilar puede cortarse a una longitud preprobada para crear bajo condiciones dadas la caída de presión deseada, este tipo de aparato de medición se usa sobre equipo pequeño con cargas casi uniformes, tales como refrigeradores, congeladores y ultracongeladores. Un tubo capilar se localiza entre el condensador y el evaporador al final de la línea de líquido o en lugar de una línea de líquido.

Debido a su pequeño diámetro puede ensuciarse y taparse rápidamente hasta con pequeñas partículas sólidas. La figura 4.6 muestra un sistema de tubo capilar.

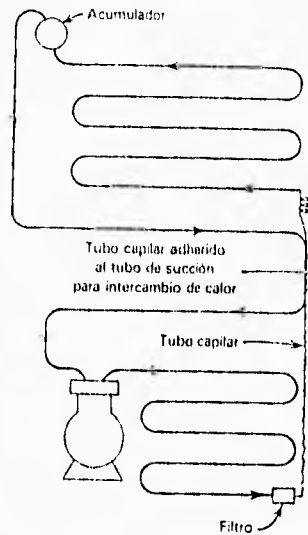


Fig. 4.6 Sistema de tubo capilar.

EVAPORADORES

El evaporador o serpentín de enfriamiento es la parte del sistema de refrigeración donde se retira calor del producto, agua, aire o algo que deba enfriarse. Cuando el refrigerante entra a los pasajes del evaporador absorbe calor de la carga que empieza a hervir y se vaporiza. En este proceso el evaporador ejecuta el propósito total del sistema, la refrigeración.

Existe una gran variedad de tipos, tamaños, diseños para una gran cantidad de aplicaciones. De acuerdo a su tipo de construcción pueden distinguirse los siguientes tipos:

- De tubo desnudo. Por lo general se fabrican de tubos de acero o de cobre. Los tubos de cobre se utilizan para la fabricación de evaporadores pequeños.
- De superficie de placa. Pueden ser contruidos con dos placas planas de metal realzadas y soldadas una con la otra de tal forma

que el refrigerante pueda circular entre las dos placas. Otro tipo de evaporador de placa consiste en tubería doblada e instalada entre las dos placas metálicas, las cuales se encuentran soldadas en sus extremos. Los evaporadores de superficie de placa son muy utilizados en refrigeradores comerciales.

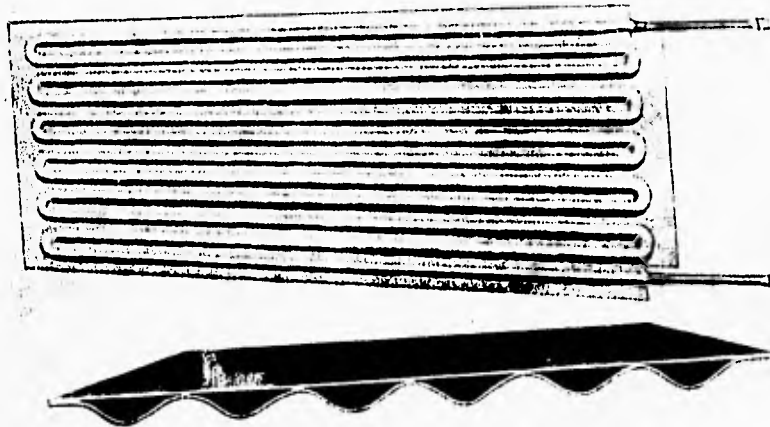
- Evaporadores aleteados. Son serpentines de tubos descubiertos sobre los cuales se colocan placas metálicas o aletas. Las aletas funcionan como superficies secundarias que absorben calor y tienen la cualidad de aumentar el área de transferencia de calor en el evaporador, mejorando por lo tanto la capacidad de enfriamiento; un aleteado excesivo no necesariamente incrementa la capacidad del evaporador. En la figura 4.7 se muestran algunos tipos de evaporadores de placas.

ACUMULADOR

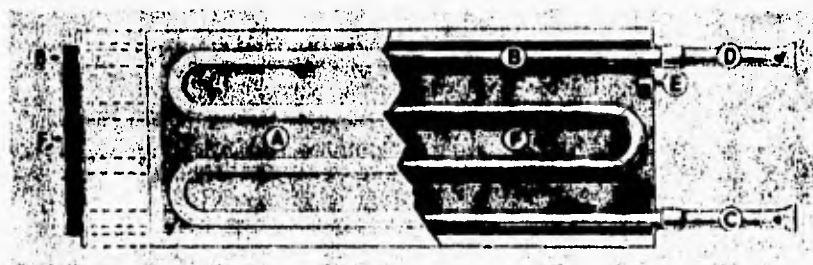
En algunos evaporadores, la acción del elemento de control de flujo no es tan rápida, para responder a los cambios de carga. También los tubos capilares no están diseñados para "cerrarse" bajo cargas ligeras, en ambos casos algo de líquido saldrá ocasionalmente del evaporador a través de la línea de succión, lo cual puede dañar al compresor. El acumulador es una trampa que puede recoger el líquido antes que llegue al compresor y evaporarlo.

Algunas veces las limitaciones de espacio requieren que se use el evaporador completo para la evaporación de líquido, aquí el acumulador en la succión puede utilizarse con ventaja, porque permite el uso total del evaporador sin temor de pasar líquido a la succión del compresor.

El acumulador consiste en un recipiente que se emplea para recolectar y evaporar el refrigerante líquido. El uso de la línea de líquido y la línea de retorno de aceite son aditamentos opcionales.



Evaporador Serpentin estándar de placa



Evaporador de placa.

- (A) Cubierta exterior de placa. Placa pesada, de acero, soldada eléctricamente. De superficie lisa.
 - (B) Tubería de acero continua a través de la cual circula el refrigerante.
 - (C) Entrada, del compresor.
 - (D) Salida, hacia el compresor. Se usan conexiones de cobre para todos los refrigerantes, excepto para el amoníaco donde se usan conexiones de acero.
 - (E) Conexión para efectuar vacío y después sellar permanentemente.
 - (F) Espacio de vacío en placa seca. El espacio entre placas contiene solución eutéctica bajo condiciones de vacío.
- No se requiere mantenimiento debido a su construcción simple y fuerte. No tiene partes en movimiento; obsérvese que su aspecto es para no descomponerse; no necesita de ningún servicio.

Fig. 4.7 Algunos tipos de evaporadores de placas

TUBERIA PARA EQUIPOS DE REFRIGERACION

Un sistema de refrigeración requiere de algunos medios para conectar los componentes mayores como el evaporador, compresor, condensador y elementos de control de flujo de la misma forma como las carreteras unen poblaciones. La tubería o líneas complementan el sistema de tal manera que el refrigerante no se pierda en la atmósfera.

La línea de succión conecta el evaporador o serpentín de enfriamiento al compresor, la línea de gas caliente o descarga, conecta el compresor con el condensador y la línea de líquido es la tubería de conexión entre el condensador y el aparato de medición.

La mayoría de la tubería usada en sistemas de refrigeración son de cobre, pero también el aluminio es utilizado ampliamente para la fabricación de circuitos internos. La tubería de acero se usa para ensamblar sistemas de refrigeración muy grandes donde se necesita tubería de 6 pulgadas de diámetro o más .

El tubo de cobre usado se conoce como tubo ACR, significando con esto que se ha diseñado especialmente para equipos de refrigeración. Se presuriza con gas nitrógeno para mantenerlo libre de aire, humedad, polvo y también como protección contra óxidos nocivos que se forman durante la soldadura.

La clasificación de los tubos de cobre se realiza en base al espesor de pared, así tenemos los siguientes:

K - Pared gruesa.- Se usa en donde se presentan condiciones de corrosión severas.

L - Pared media.- Se utiliza bajo condiciones normales de operación.

M - Pared delgada .- No se usa en sistemas de refrigeración.

En sistemas de ultrabajas temperaturas se usa tubo de cobre suave, el cual es recido para hacerlo flexible y fácil de doblar. Comercialmente esta disponible en tamaños desde 3.1 mm (1/8") hasta 41.2 mm

(1 5/8") de diámetro exterior. La tubería de cobre suave soldarse o usar accesorios tipo campana u otro tipo mecánico, pero en equipos de temperaturas muy bajas se recomienda la soldadura con el fin de evitar fugas de refrigerante.

Corte del tubo de cobre.

Un primer método es la segueta la cual debe tener un mínimo de 32 dientes por pulgada, lo cual no es muy recomendable. El cortador manual es la mejor opción para el corte de tubos de cobre, ya que pueden cortar tubo suave o duro, los cortadores pueden conseguirse en varios modelos para cortar tubos desde 3 hasta 108 mm de diámetro exterior.

Es muy importante que al cortar tubo este quede limpio y liso en su interior para garantizar un buen servicio.

Para doblar tubo suave puede hacerse manualmente pero hay que tener cuidado de no alpastarlo. Por regla general el radio mínimo para darle forma es una curvatura de 5 veces el diámetro del tubo.

Para unir el equipo se recomienda soldadura con la finalidad de evitar fugas que se producen al unir los equipos y líneas con acoplamientos mecánicos. Por ejemplo cuando soldamos cobre con cobre se utiliza soldadura de cobre con fosforo (fosco), pero cuando se une fierro con cobre se utiliza plata al 35% y cobre al 65%. Cuando se solda fierro con fierro se usa una aleación de plata mayor del 35%.

INTERCAMBIADOR DE CALOR .

El intercambiador de calor transfiere calor del líquido refrigerante al gas en la succión. El intercambiador tiene dos funciones principales. La primera es reducir la temperatura o subenfriamiento de líquido

refrigerante que fluye del condensador a los elementos de control de flujo. Esta reducción de temperatura es necesaria en sistemas que tienen alta caída de presión para evitar evaporación en la línea de líquido.

La segunda función del intercambiador es asegurar que el gas de la succión fluya seco al compresor. En sistemas de fluctuaciones de carga rápida no es difícil encontrar líquido proveniente del evaporador, el intercambiador de calor permitirá sobrecalentamientos mas bajos en el evaporador ya que algún arrastre de líquido no se considera peligroso.

Existe un intercambiador de calor de tres tubos, el cual consiste en un aparato de contraflujo con líquido caliente que entra por un extremo mientras el gas frío entra por el otro. Como el líquido está a mayor temperatura que el gas, el calor fluye del líquido al gas. Esto subenfria el líquido para reducir su evaporación y supercalienta el gas para evitar inundación. Otros tipos de intercambiadores de calor son los de tubos concéntricos o doble tubo, los cuales son más usados en ultracongeladores.

La localización del intercambiador dependerá del uso, si se utiliza con la finalidad de subenfriar líquido, se colocará tan cerca del condensador como lo permita la tubería. Un intercambiador de calor que se utilice como protección contra arrastre de líquido debe montarse en la línea de succión cerca del evaporador. A causa de que las líneas de líquido y succión deben llevarse al intercambiador de calor, la ubicación de los equipos esta condicionada a la posición del intercambiador.

Aunque los intercambiadores de calor sirven para muchos propósitos debe tenerse cuidado sobre todo cuando existen compresores herméticos ya que estos tienen motores enfriados por gas de succión y frecuentemente tendrán límites bien definidos respecto a esta temperatura. A causa de que los intercambiadores tienden a incrementar las temperaturas del gas de succión, el uso indiscriminado

de estos sin la investigación apropiada de ingeniería puede ser peligrosa

A continuación se presenta el diagrama de un ultracongelador de dos etapas .

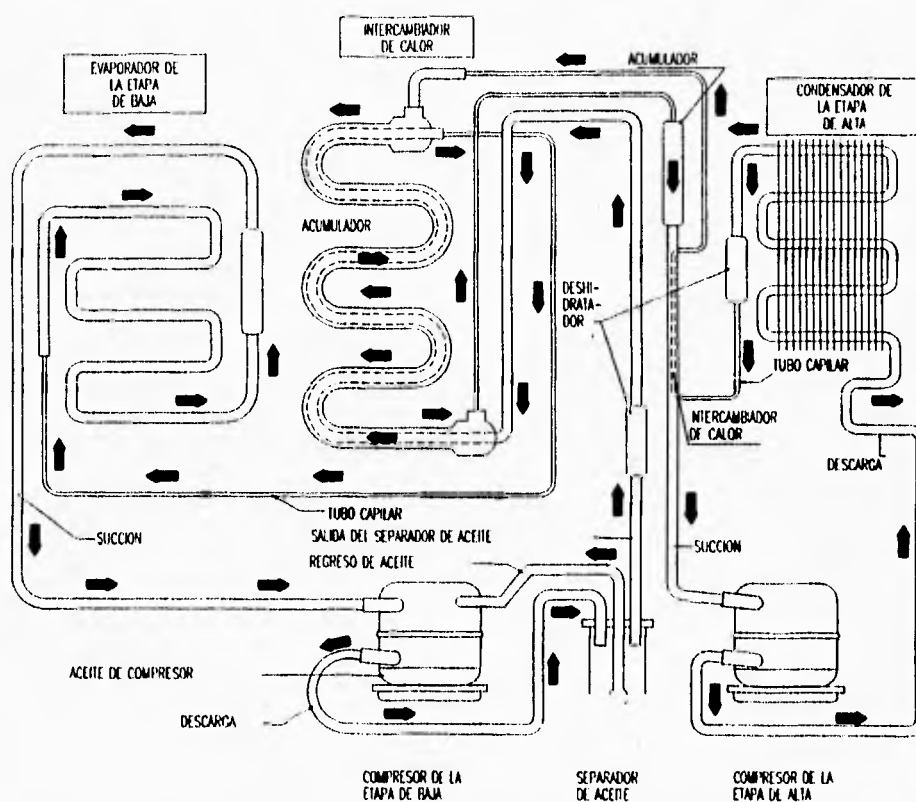


Fig. 4.8 Sistema de Ultracongelación de dos etapas

INSTALACION Y ARRANQUE

La instalación de un equipo depende del tipo de producto y el sistema utilizado. Las instrucciones del fabricante describen los procedimientos específicos, que deben seguirse, pero hay algunos factores que son comunes a casi cualquier situación.

No importa que tan bien realizado haya sido diseñado y fabricado un ultracongelador o que bien realizaron los ingenieros el sistema, una instalación mal realizada echará a perder el mejor equipo. Una buena instalación requiere que además de las habilidades técnicas y mecánicas, se sigan los códigos y normas tanto nacionales como internacionales.

COLOCACION DEL EQUIPO.

En cualquier instalación deben considerarse algunos factores importantes en la ubicación del equipo como son: 1) Cuando se instala un equipo de condensación por aire, debe suministrarse amplio espacio para que el aire circule libremente y una superficie razonablemente nivelada; 2) Todos los componentes deben instalarse de manera que fácilmente pueda darseles mantenimiento, ya que cuando no se tiene fácil acceso a los equipos el costo en tiempo y dinero es excesivo, 3) Siempre deben evitarse las vibraciones en las tuberías de interconexión y los ductos para garantizar la correcta operación.

El ruido es también un factor importante en la colocación del equipo condensado por aire. Es muy usual apuntar la descarga de aire en la dirección en donde el ruido no perturbe lugares donde trabaje mucha gente, por ejemplo oficinas.

El compresor está considerado como la mayor fuente de vibración del sistema de refrigeración, además de los ventiladores y motores. Las vibraciones pueden romper las líneas de refrigerante y causar ruido.

Otros aspectos importantes son la selección de la tubería de refrigerante, el trabajo eléctrico y de espacios para ductería que son parte importante de las instalaciones.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Se espera que un equipo de ultracongelación opere continuamente por muchos años libres de problemas. En muchas aplicaciones los equipos deben operar 24 horas diarias los 365 días del año. Tal operación continua, a menudo es dura donde las temperaturas cambian constantemente. Un ultracongelador debe diseñarse para soportar el trabajo bajo condiciones normales y anormales periódicas. La industria de productos de ultracongeladores ha hecho un trabajo digno al diseñar y producir máquinas que soporten un castigo extra. La mayoría de fallas en ultracongeladores se deben a fallas del sistema mecánico y eléctrico y no al exceso de operación.

La habilidad técnica y sentido común que los técnicos usen para instalar, operar y mantener el equipo determinara finalmente la vida real esperada del sistema. Aunque el técnico no pueda seleccionar el equipo, puede llamar la atención sobre las deficiencias antes que lleguen a ser problemas serios.

Es importante por lo tanto darle servicio de mantenimiento preventivo, el cual debe realizarse por lo menos una vez por mes. Los servicios incluídos en cada revisión mensual son los siguientes:

- Lubricación de compresores y revisión de nivel de aceite.
- Verificar temperaturas y ajustar controles y válvulas.
- Verificar la tensión de bandas y ajuste de poleas si es necesario.
- verificar la carga de refrigerante y revisar posibles fugas.
- Limpiar los condensadores.
- Revisar filtros.
- Purgar el aire y otros no condensables en el sistema .

Los beneficios que se obtienen del mantenimiento preventivo son muchos ya que el sistema operará con su máxima eficiencia y con mayor seguridad, reduciendo los tiempos en que el equipo este fuera de servicio y por lo tanto también en el aspecto económico trae grandes beneficios.

Limpieza

Un factor de mucha importancia durante toda la vida del ultracongelador es la limpieza, ya que debemos de mantener libre de polvo, aceite sucio y mugre al sistema. Una operación limpia de equipo ahorrara muchas dificultades durante su funcionamiento.

Aunque la limpieza es importante en todos los componentes del sistema hay algunos que merecen atención especial, a continuación mencionaremos los más importantes.

a) Filtros.- Mantener los filtros limpios evitará que el flujo de refrigerante sea parcial o totalmente bloqueado.

b) Tubos.- La limpieza de tubos es la acción de remover material o fluidos no deseados de las partes del sistema refrigerante purgandolos a la atmósfera usando nitrógeno, refrigerantes baratos u otros flúidos. También se debe tener cuidado cuando se soldan tubos de no dejar residuos de óxidos porque pueden tapar los filtros.

c) Condensador.- Un condensador enfriado por aire se verá afectado seriamente si el condensador es bloqueado por polvo, lodo hojas y mugre, sobre todo si el condensador está localizado en el exterior. Si la unidad se localiza en el interior de un laboratorio el grado de ensuciamiento es menor, pero la grasa del colector de aire sobre las aletas puede ocasionar la acumulación de polvo y suciedad la cuál actuará como aislante térmico evitando la correcta transferencia de calor requerida.

Esta falla puede detectarse mediante una inspección visual del equipo. La limpieza externa de las aletas del condensador y el serpentín puede realizarse con un cepillo duro, otra opción es sopletear con aire a presión en dirección opuesta al flujo normal de aire a través del condensador

El polvo y la suciedad deben retirarse enjuagando el condensador con agua y jabón; también se puede limpiar por medio de agua a presión nuevamente en dirección opuesta al flujo normal de aire.

En caso de acumulación de grasa sobre la unidad la limpieza se realiza con un solvente desengrasante, aplicado con un cepillo o un

vaporizador, posteriormente debe enjuagarse con agua y jabón. Durante la limpieza deben cubrirse las conexiones eléctricas para evitar daños eléctricos.

d) Aire y gases no condensables.- Si en el sistema hay solamente aire seco no hay mucho problema, pero si existe aire húmedo entonces si hay problema. En ambos casos el oxígeno puede reaccionar con el aceite o los metales y producir lodo y óxidos de metal. Lo mismo ocurre si han sido usados para probar a presión el sistema con nitrógeno seco o dióxido de carbono y no han sido retirados completamente.

La humedad del aire se introduce normalmente al sistema cuando fue abierto para reparaciones, la eliminación de humedad y aire es indispensable.

El aire en el condensador puede afectar en la remoción del calor del vapor sobrecalentado y en la condensación del vapor saturado.

La limpieza de aire, no condensables y suciedad en los ductos se hace por bombeo a presión de nitrógeno pero también con algún refrigerante económico.

e) Ventilador.- Las aletas del ventilador deberán estar siempre libres de polvo, grasa y suciedad puesto se provoca una pérdida en el suministro de aire, así como vibración en el ventilador.

Nivel de aceite

Existen varios métodos para introducir la cantidad apropiada de aceite al sistema. En sistemas nuevos, un método consiste en pesar el aceite en forma semejante cuando se carga el refrigerante. Las instrucciones de la instalación de la unidad incluyen los requisitos de aceite del compresor en medidas de peso o líquido. También es empleado cuando se realiza una reparación del compresor cuando se vacía todo el aceite. Otro método es mediante una varilla de medición, normalmente es usado cuando se trabaja con compresores herméticos pequeños de eje vertical, pero algunos compresores abiertos pueden tener ranuras

diseñadas para el empleo de la varilla. El nivel de aceite adecuado es proporcionado por el fabricante.

Cuando un compresor es cambiado, la nueva unidad debe cargarse con la misma cantidad de aceite que la anterior.

Un método más de llegar a una carga correcta de aceite es la utilización de una mirilla que generalmente es colocada en la carcasa del compresor, cuando se determina la cantidad adecuada de aceite mediante este método el sistema debe operar por un período de tiempo bajo condiciones normales antes de la determinación final del nivel correcto; este procedimiento garantizará un buen retorno de aceite a la carcasa. También permitirá que las líneas aceite y carburos halogenados den la oportunidad de absorber el contenido de aceite normal de operación

Cuando la carcasa esta a presión atmosférica el aceite puede ser cargado directamente, este método normalmente se utiliza antes de la deshidratación debido a que la el interior de la carcasa sera expuesta al aire y su humedad.

Cuando el sistema está en operación se encuentra bajo la presión atmosférica y el aceite es absorbido. Al usar este método, el tubo y el recipiente no deben quedar cerca de la superficie del aceite porque pueden absorber aire.

Instalación eléctrica

Para la instalación eléctrica son importantes las conexiones eléctricas finales entre la unidad instalada y el interruptor de fusibles.

Toda la potencia eléctrica circula a través de este interruptor. Este mismo interruptor de fusibles impide el flujo de corriente, cuando de presenta una sobrecarga eléctrica. Este mecanismo es una protección contra incendios, explosiones y choques eléctricos.

Existen códigos eléctricos nacionales e internacionales de seguridad que deben seguirse para proteger el equipo pero sobre todo salvar vidas humanas. Los códigos recomiendan que el interruptor de fusibles sea colocado a la vista de la unidad que recibe potencia a través de interruptor.

Cuando los circuitos eléctricos deben ser conectados por el técnico de refrigeración, deben seguirse técnicas adecuadas para asegurar buenos contactos eléctricos.

Cuando se usa cable eléctrico un sólo alambre puede separarse y causar un riesgo potencial. Un alambre flojo puede hacer contacto con otros alambres o aterrizarse causando daños eléctricos. Los deben cortarse a la longitud requerida y asegurar sus extremos con soldadura suave para asegurar buen contacto y eliminar los riesgos de cables sueltos.

Una caída de voltaje del 10% causará mal funcionamiento en motores, contactores y aparatos eléctricos similares.

El sistema eléctrico de equipo de ultracongelación cuenta con los siguientes elementos:

1) Protectores de motor

Los protectores de motor permiten que este trabaje hasta un límite seguro de temperatura sin corte de potencia. La mayoría de las normas y códigos son estrictas con respecto a los protectores de sobrecarga, ya que el mal funcionamiento de un motor o equipo conectado a él ponen en peligro la vida de personas y al equipo mismo.

Existen dos tipos de protección incorporadas. La primera es de tipo térmico y la segunda por medio de corriente eléctrica en el motor.

Los protectores térmicos pueden ser bimetálicos o de tipo termistor, ambos operan a una temperatura fija del motor o del tipo varilla y tubo que tienen una sensibilidad anticipatoria o velocidad de incremento.

Los protectores bimetálicos usan láminas o discos bimetálicos para controlar un interruptor normalmente cerrado y está diseñado para requerir el mínimo espacio de tal modo que en la mayoría de los casos puedan colocarse en los devanados del motor. Los termistores son semiconductores cuya resistencia eléctrica varía con la temperatura. Son extremadamente sensibles a los cambios de temperatura mínimos, pero el cambio en la resistencia debe amplificarse mediante un circuito electrónico o relevador mecánico para activar la bobina de retención.

Los protectores de tipo incremento de velocidad son generalmente de tipo varilla y tubo operando como un circuito piloto. Un tubo exterior de metal y una varilla interior de metal se conectan de tal forma que

opran como un elemento térmico de expansión diferencial para accionar un interruptor de resorte autocontenido. El metal del tubo tiene un coeficiente de expansión mayor que la varilla. El elemento se instala en el devanado del motor en donde se verá afectado por el calentamiento del mismo. Bajo cambios de temperatura lentos, tanto el tubo como la varilla se calientan a la misma velocidad y el interruptor se coloca para abrir cuando el tubo alcanza una temperatura predeterminada. Cuando el cambio de temperatura es rápido, el tubo se calienta a una velocidad superior que la varilla de tal modo que el movimiento de expansión diferencial requerido para operar el interruptor alcanza una temperatura más baja del tubo que opera a una velocidad de cambio lenta. Esta anticipación en la temperatura hace posible al protector de varilla y tubo proveer protección en condiciones de bloqueo.

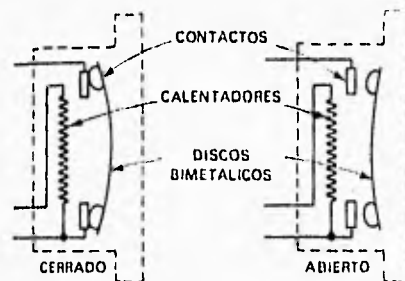


Fig. 4.9 Protector térmico de motor respuesta dual.

Los protectores de respuesta dual (fig. 4.9) se emplean para proteger contra incrementos de temperatura lentos y rápidos y sirven para condiciones de sobrecarga en operación y bloqueo del rotor. Estos protectores son generalmente termostatos bimetalicos con elementos

de calefacción incorporados en serie con los devanados del motor. Se destinan para arreglos en devanado o como interruptores. El elemento de calefacción puede ser lámina o disco bimetálico, un calentador separador o ambos. La calefacción del elemento bimetálico es una función de la temperatura alrededor del protector y el calor interno generado por la corriente del motor a través del elemento.

Las resistencias del disco y el calentador están coordinadas con el valor de la temperatura del disco, para establecer un punto de operación al límite de temperatura en el devanado. En el caso de una sobrecarga de operación, la mayoría del calor alcanza al elemento térmico que se produce en los devanados del motor, en condiciones de bloqueo del rotor la velocidad del incremento es demasiado rápida para hacer que el protector opere rápidamente en respuesta al calor del motor únicamente. En esta situación el calor generado dentro del protector aumenta el calor del devanado resultando así una respuesta lo suficientemente rápida para evitar el daño.

Para motores monofásicos hasta de 1942 W (2 hp) se usan protectores térmicos, mientras que, para motores trifásicos, un sólo protector con tres elementos de calefacción se conectan en serie con los devanados del motor en el punto neutro. El protector abre las fases como se muestra en la figura 4.10.

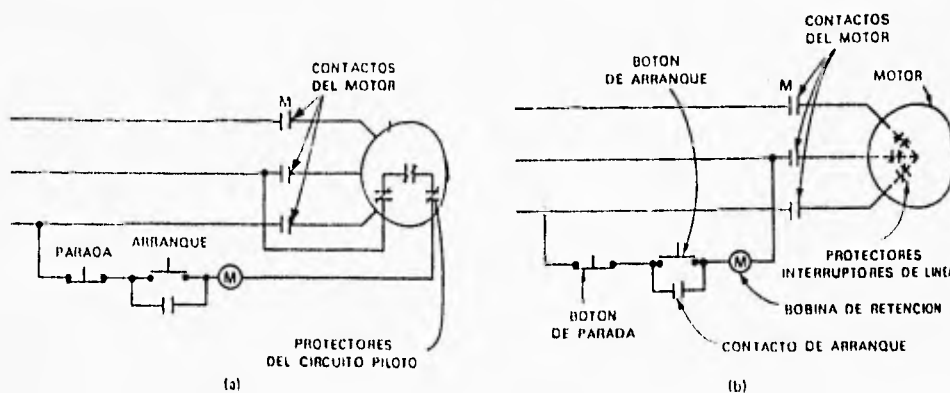


Fig. 4.10 Arreglo de circuitos de protectores de motor

2) Capacitores

Un capacitor es un dispositivo de almacenamiento eléctrico usado para arrancar y/o operar el circuito en muchos motores eléctricos. Existen dos tipos de capacitores que son:

- **Capacitores de arranque (CSR).**

Los capacitores de arranque están diseñados para funcionar de modo intermitente. Su construcción es de tipo electrolítico con el fin de obtener una elevada capacidad.

Algunos capacitores de arranque se suministran con resistencia de descarga firmemente conectada y soldada a sus terminales. El empleo de condensadores sin estas resistencias puede provocar que se apaguen los contactos del relevador y/o un erróneo funcionamiento de éste, especialmente cuando es posible que ocurran ciclos cortos, lo cual es debido a la descarga del condensador de arranque a través de los contactos del relevador cuando estos se cierran, siguiendo un ciclo de funcionamiento muy corto la resistencia permitirá que la carga del condensador se disipe a través de ella rápidamente, evitando que se produzcan arcos entre los contactos y que se caliente el relevador.

Se recomienda el empleo de condensadores de arranque con resistencia, sin embargo en caso de emergencia deberá colocarse una resistencia de 2 watts, 15 a 18 MΩ entre las terminales del capacitor de arranque. Deberá tenerse cuidado de evitar corto circuito con el gabinete exterior u otros objetos metálicos cercanos.

En caso de que se encuentren pegados los contactos de cualquier relevador de arranque, el primer elemento que debe comprobarse es la resistencia del relevador de arranque. En caso de que no exista o esta dañada, deberá instalarse una nueva resistencia y limpiar los contactos del relevador o sustituir el relevador.

- **Capacitores de marcha**

La función de un relevador de marcha consiste en mejorar el factor de potencia, reduciendo así el consumo de corriente en un compresor monofásico con arranque y marcha.

3) Relevadores

Un relevador de un capacitor es un dispositivo de contacto automático diseñado para desconectar el embobinado de arranque después que el motor alcanza su velocidad de operación. Los relevadores empleados en refrigeración son de dos tipos:

- Relevador de corriente

El relevador de corriente es usado normalmente en compresores de refrigeración pequeños hasta de 560W (3/4 hp) . Cuando se aplica energía al relevador, la bobina solenoide atrae la armadura del relevador hacia arriba. Esto causa que los contactores móviles y estacionarios se toquen esto energiza a la bobina de arranque, cuando los compresores alcanzan su velocidad de operación la corriente de la bobina de operación desenergiza la bobina del solenoide del relevador. De este modo se mantienen abiertos los contactos de la bobina de arranque cuando está activada la bobina de operación del compresor.

Un relevador debe ser montado en posición vertical de modo que la armadura y el contacto móvil caigan libremente cuando la bobina solenoide del relevador este desenergizada. Ver figura 4.11

- Relevador de voltaje

Un relevador de voltaje se usa generalmente en compresores cuyos motores sean de más de 3730 W (5 hp) de potencia. Los contactos de estos relevadores están normalmente cerrados y la bobina del relevador está alamburada a través del embobinado de arranque. El voltaje en la bobina de arranque se incrementa con la velocidad del motor, el voltaje se incrementa hasta cierto valor, en el que la armadura de los tectos se abren y desenergiza el embobinado de arranque.

Hay una cantidad suficiente de voltaje inducido en el embobinado de arranque como para mantener la bobina del relevador energizada y los contactos de arranque abiertos. Cuando se desenergiza el motor el voltaje cae hasta cero reestableciéndose los contactos de arranque.

Muchos de estos relevadores se encuentran en posición extremadamente sensitiva. Cuando se cambia el relevador debe tenerse cuidado en instalarlo en la misma posición así como no cambiarlo por un relevador de distinta potencia. Para esto uno debe basarse en el

manual del fabricante del equipo. En la figura 4.12 se muestra un relevador de voltaje.

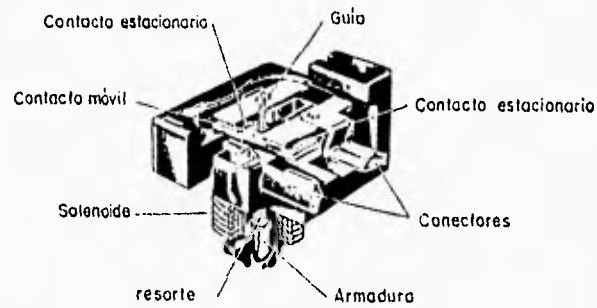


Fig.4.11 Relevador de corriente

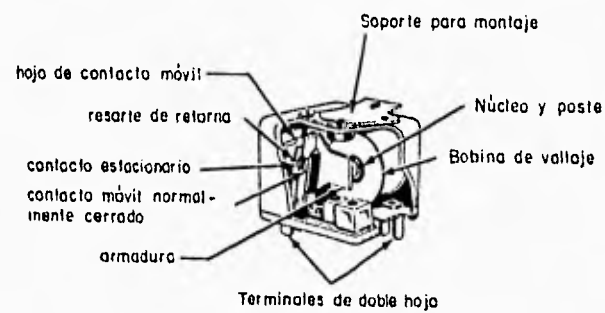


Fig. 4.12. Relevador de voltaje.

ACEITES

Los aceites refrigerantes deben tener buenas cualidades lubricantes y la capacidad de sellar en el lado de baja con respecto al de alta presión en el compresor. Una función de los aceites es suavizar los cojinetes del compresor, también actúa como un medio refrigerante removiendo calor de los cojinetes que se produce por la fricción de las partes móviles cuando el compresor está en operación.

Las cualidades buscadas en los aceites son:

- Buena fluidez a bajas temperaturas.
- Estabilidad a temperaturas altas.
- No debe reaccionar químicamente con el refrigerante, metales, aislamiento del motor (cuando se usan compresores herméticos), aire u otros contaminantes.
- No debe carbonizarse bajo condiciones normales de operación.
- No debe depositar cera cuando está sujeto a temperaturas de operación bajas.
- Debe ser seco y libre de humedad.

Todos los aceites disponibles en equipos de ultracongelación son de origen mineral y pueden clasificarse en tres categorías:

- 1) Base parafínica
- 2) Base nafténica
- 3) Una combinación de las anteriores.

Esta clasificación se deriva del crudo hallado en diferentes partes del mundo. Con procesos apropiados de refinación se retiran las parafinas mas pesadas y nafténicas del aceite crudo.

Algunas de las características de los aceites que debemos conocer son:

- Viscosidad
- Punto de fluencia
- Punto de encendido
- Fuerza dieléctrica

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- Punto de encendido
- Tendencia corrosiva
- Resistencia a la oxidación
- Color

Los compuestos azufrosos en un aceite refrigerante son indeseables. El ácido sulfuroso se forma cuando la humedad se mezcla con el compuesto de azufre. Dichos ácido no se considera entre los aceites hoy en día, aún cuando puede ser corrosivo a los componentes metálicos del sistema de refrigeración.

El color de un buen aceite de refrigeración comúnmente es amarillo claro, indicando que la mayoría de los hidrocarburos han sido refinados, sin pérdida de sus cualidades lubricantes

EQUIPO DE PRUEBA Y MEDIDA PARA REFRIGERACION

MANIFOLD.

Es un aparato que incluye tanto un manómetro para medir alta presión, el cual mide la descarga del compresor a presiones de condensación. Normalmente se gradúa de 0 a 500 psi en intervalos de 5 psi. y también contiene al manómetro compuesto el cuál se utiliza en el lado de baja (presiones de succión) y normalmante se gradúa desde 30 pulgadas de vacío hasta 120 psi; así se puede medir presiones sobre y bajo la presión atmosférica. Este manómetro tiene una resolución de 1 psi. Hay disponibles otros intervalos de presión para ambos manómetros, pero estos son los mas usuales.

El manifold se utiliza para verificar presiones de operación del sistema, cargar o retirar refrigerante, añadir aceite, purgar no condensables, hacer derivaciones del compresor (by-pass) analizar condiciones del sistema y realizar muchas otras operaciones sin reemplazar manómetros o tratar de operar conexiones de servicio en sitios inaccesibles.

El manifold y los manómetros son herramientas necesarias para realizar varias operaciones del sistema. Una vez que el sistema ha sido reparado se procede a limpiarlo, cargarlo, eliminar aire y una vez purgado debe probarse que no existan fugas en el mismo. La figura 4.13 muestra un manifold.

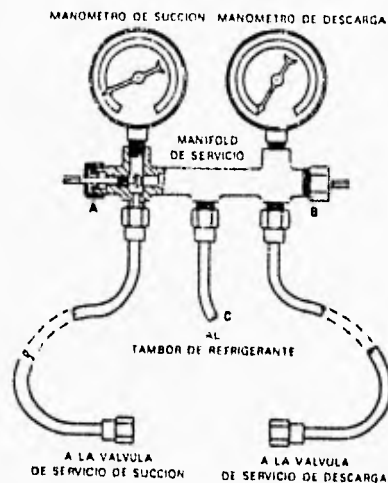


Fig. 4.13 Manifold

BOMBA DE VACIO

Una bomba de vacío trabaja como un compresor a la inversa. La mayoría de estos equipos son movidos por motores eléctricos por medio de poleas o bandas, pero existen también bombas de vacío con motor de gasolina. Aunque hay bombas de vacío de una y dos etapas, en equipos de refrigeración se utiliza por lo general de una sola etapa; las bombas de servicio son portátiles, algunas tienen manija para desplazarlas pero algunas están montadas sobre ruedas. El tamaño de la bomba de vacío se determina en base al desplazamiento libre de aire

en pies cúbicos por minuto o litros por minuto. Las especificaciones incluyen también el grado de vacío que pueden alcanzar en términos de micrones.

Considerando que en los sistemas de refrigeración se requieren realizar vacíos de 10^{-3} mm Hg, las bombas mecánicas son apropiadas para dichos sistemas.

¿Qué es un micrón.? Cuando la presión de vacío se aproxima a 29.5 a 30 pulg, el manómetro esta trabajando dentro de la última media pulgada de presión y la lectura mas allá de 29.5 pulgadas no es posible para un vacío profundo. La industria ha adoptado otra medida llamada micrón. El micrón es una unidad de medida lineal igual a $1/25.4$ de pulgada y se basa en la medida sobre la presión absoluta tota, a diferencia de la presión manométrica la cual puede ser afectada por los cambios de presión atmosférica. El objetivo principal de la evacuación es reducir la presión de vacío lo suficiente para hervir o vaporizar agua y posteriormente bombearla fuera del sistema. Se notará que el manómetro compuesto no puede ser leído a tan mínimos cambios en pulgada de mercurio. En la figura 4.14 se muestra una bomba de vacío

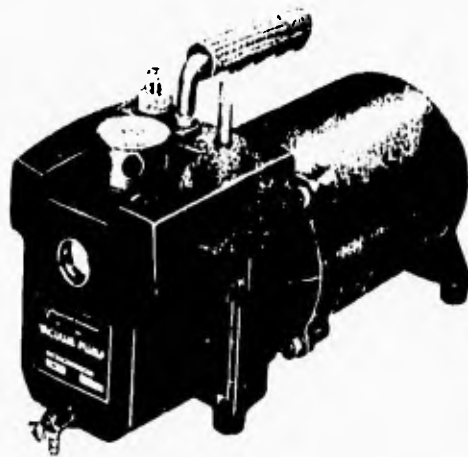


Fig. 4.14 Bomba de vacío

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Actividades a desarrollar en los siguientes periodos

MENSUAL

Las actividades de mantenimiento mensual cubren los siguientes servicios:

- Lubricación de motores abiertos o semiherméticos y ventiladores.
- Ajuste de controles y válvulas cuando sea necesario.
- Verificación de tensión y estado de bandas, así como ajuste de poleas.
- Verificación de la carga de refrigerante por medio de las presiones de trabajo, siempre y cuando sea posible.
- Nivel de aceite.
- Limpieza de condensadores enfriados por aire.
- Limpieza de condensadores enfriados por agua.
- Limpieza de piezas expuestas al medio ambiente.
- Purga de aire y no condensables en el sistema.

SEMESTRAL

Revisión del estado de fusibles y conectores eléctricos

Revisión del sistema de alarma

Revisión de válvulas

Inspección visual de posibles grietas en el aislamiento de cables eléctricos.

NOTA: Los componentes eléctricos pueden fallar por el uso y el desgaste

FALLAS	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES	OBSERVACIONES
El compresor no arranca	Revelador P.T. en mal estado Capacitores quemados Embobinados flameados o quemados	Cambio Cambio Reembobinado Cambio de empaques y sellos	Cuando se trata de compresores herméticos es necesario cambiar toda la unidad (compresor)
Ruido excesivo en un compresor	Trampas naturales de aceite en el sistema Inundación del compresor durante la operación debido a una válvula de expansión. Arranque con inundación debido a la acumulación de refrigerante durante las paradas. Disminución de refrigerante, la cual causa atrapamiento de aceite Desgaste excesivo de pieza debido a la falta de lubricación	Estabilizar el nivel de aceite Purgar aceite de las trampas naturales. Abrir la culata del cilindro y revisión de válvulas, empaques rotos o válvulas torcidas idem idem	Muchos compresores herméticos no tienen válvulas de servicio, así que las suposiciones se hacen sobre presiones y temperaturas
El compresor se sobrecalienta y para en respuesta a su elemento de control de temperatura	Bajo voltaje (hermético) Alto voltaje, baja succión (hermético) Disminución de refrigerante (hermético) Alta presión de succión (alta carga) Baja carga de aceite Relación de compresión muy alta	Estabilizar voltaje Suministrar la carga de refrigerante y aceite adecuada idem idem idem idem	

Cantidad reducida de aire en el evaporador	Filtros tapados Serpentines sucios Ductos restringidos Ventilador operando en sentido contrario Desplazamiento de la banda del ventilador o correa dañada Poleas sueltas o flojas Deflectores ajustados incorrectamente	Cambio Limpieza Limpieza Cambio de dirección Ajuste o cambio Ajuste Ajuste	Los síntomas que presenta el sistema son: - Baja presión de succión - Serpentín congelado - Serpentín escarchado - Temperatura muy baja a la normal Estos síntomas desaparecen al retornar a la cantidad de aire adecuada
Cantidad reducida de refrigerante en el serpentín del evaporador	Falta de refrigerante Filtro - secador obstruido Línea o accesorios restringidos Válvula de expansión defectosa Mala distribución de aire	Adición de refrigerante Cambio Limpieza Cambio Los deflectores deberán redistribuirse correctamente.	Síntomas: - Baja presión de succión. - Posible congelamiento o escarcha en el serpentín. - Caída de temperatura en la línea de líquido (si se debe a restricción). - Alto calentamiento en la válvula de expansión. - Evaporación de gas debido a líneas verticales de líquido largas.
Cantidad reducida de aire en el condensador	Serpentín sucio Restricción de aire en la entrada o salida Aletas sucias del ventilador Rotación incorrecta del ventilador Velocidad del ventilador baja Motor del ventilador disparándose por sobrecargas	Limpieza Eliminar restricción Limpieza Ajuste de velocidad idem idem	
No condensables en el sistema de refrigeración	Infiltración de no condensables en el lado de baja presión (sistema en vacío)		Los síntomas son: La presión en el sistema de saturación no corresponde a la temperatura ambiente

Sobrecarga de refrigerante	Sobrecarga de refrigerante por exceso de refrigerante en el sistema	Cargar el sistema con la cantidad de refrigerante adecuada	Cuando se carga con un compresor hermético en un sistema de dos etapas, se carga primero el compresor de alta y posteriormente el de baja con una bomba de vacío.
Accesorios defectuosos	Filtro secador obstruido Válvulas solenoides con fuga Alarmas con mal funcionamiento Intercambiador de calor quemado	Cambio Cambio Revisión eléctrica Cambio	El intercambiador de calor sólo se utiliza en ultracongeladores de 2 etapas.

CONCLUSIONES

Los sistemas de refrigeración toman cada día mayor importancia tanto en la conservación de alimentos como en aplicaciones clínicas, las cuales requieren temperaturas extremadamente bajas (ultrabajas temperaturas) que van de -40°C a -80°C . Los equipos que operan en dicho intervalo de temperaturas son los ultracongeladores de una y dos etapas por compresión mecánica de vapores, por lo cual es importante conocer el funcionamiento adecuado de dichas unidades.

Los ultracongeladores se componen de diversas partes como son condensadores, evaporadores, compresores, tubos capilares y líneas de tuberías principalmente, las cuales deben operar con la máxima eficiencia y es aquí donde se debe de tener mucho cuidado en darles el mantenimiento preventivo y correctivo para que funcionen libres de fallas durante muchos años, evitando con esto pérdidas económicas y del producto.

Por otro lado el empleo de refrigerantes juega un papel muy importante en los equipos de ultracongelación, pues como se sabe no existe un refrigerante estándar, ya que la refrigeración por compresión mecánica de vapores maneja un amplio intervalo de temperaturas.

Algunos refrigerantes son más apropiados en aplicaciones de temperaturas bajas, como el caso del área biomédica, en la creación de antisueños, conservación de virus, huesos y arterias por ejemplo.

Con el continuo deterioro de la capa de ozono se hace indispensable la creación de refrigerantes menos tóxicos, tales como el refrigerante R-134a, el cual es considerado uno de los refrigerantes ecológicos más conocido hoy en día y que sustituirá en breve al R-12.

Por otra parte es muy útil conocer las tablas de propiedades termodinámicas, físicas, etc, así como los diagramas de presión-entalpía y temperatura-entropía para poder predecir el comportamiento

de un sistema de refrigeración y detectar con mayor facilidad posibles fallas en el equipo.

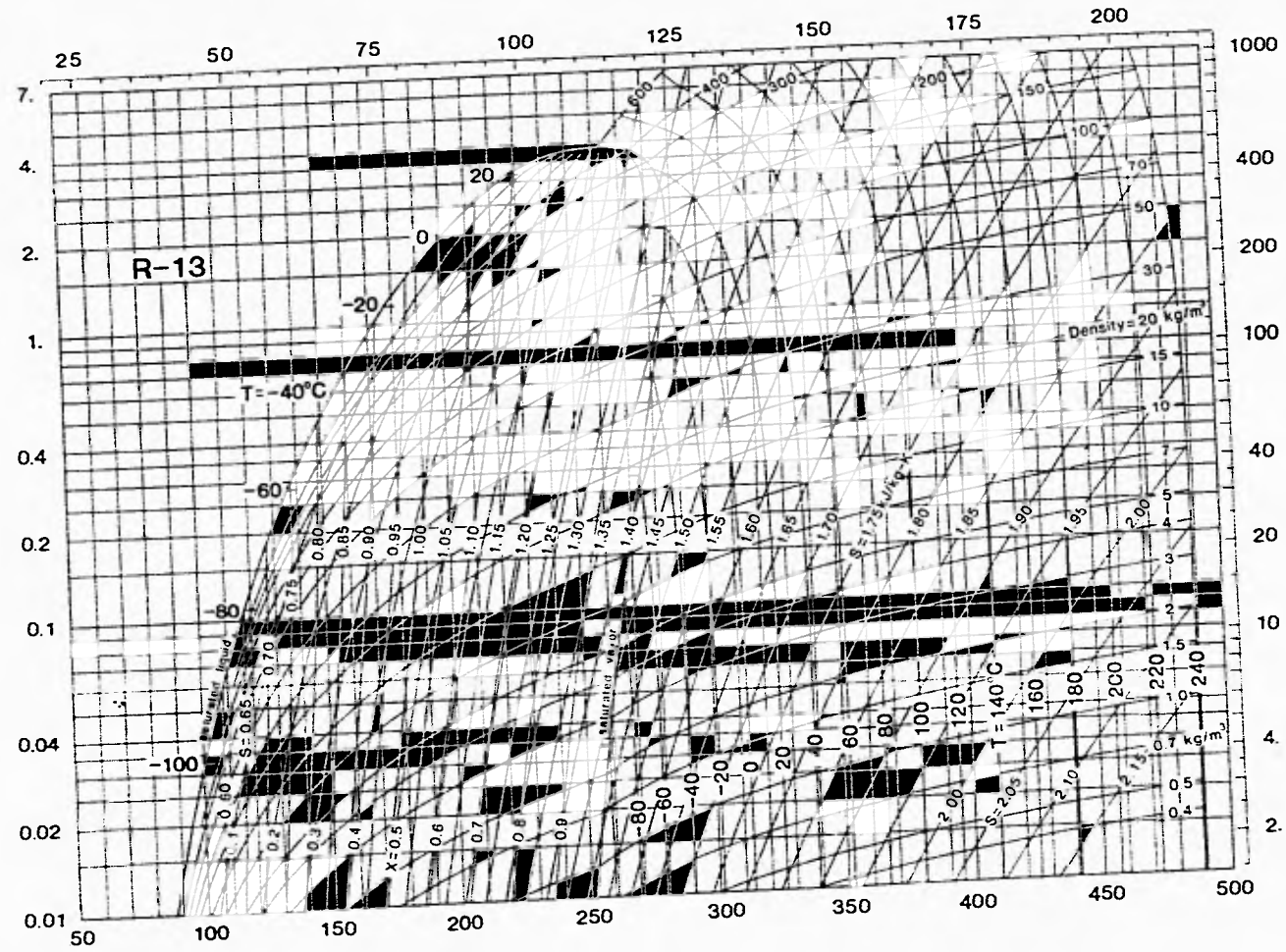
Por lo anteriormente expuesto, se ha elaborado un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de ultracongeladores, para que sirva como apoyo para lograr el buen funcionamiento de los equipos de ultracongelación, evitando en lo posible, el simple reemplazo de partes de importación de alto costo, tal y como son los compresores, entre otras, lo cual contribuirá a operar los sistemas de refrigeración con la máxima eficiencia al menor costo posible.

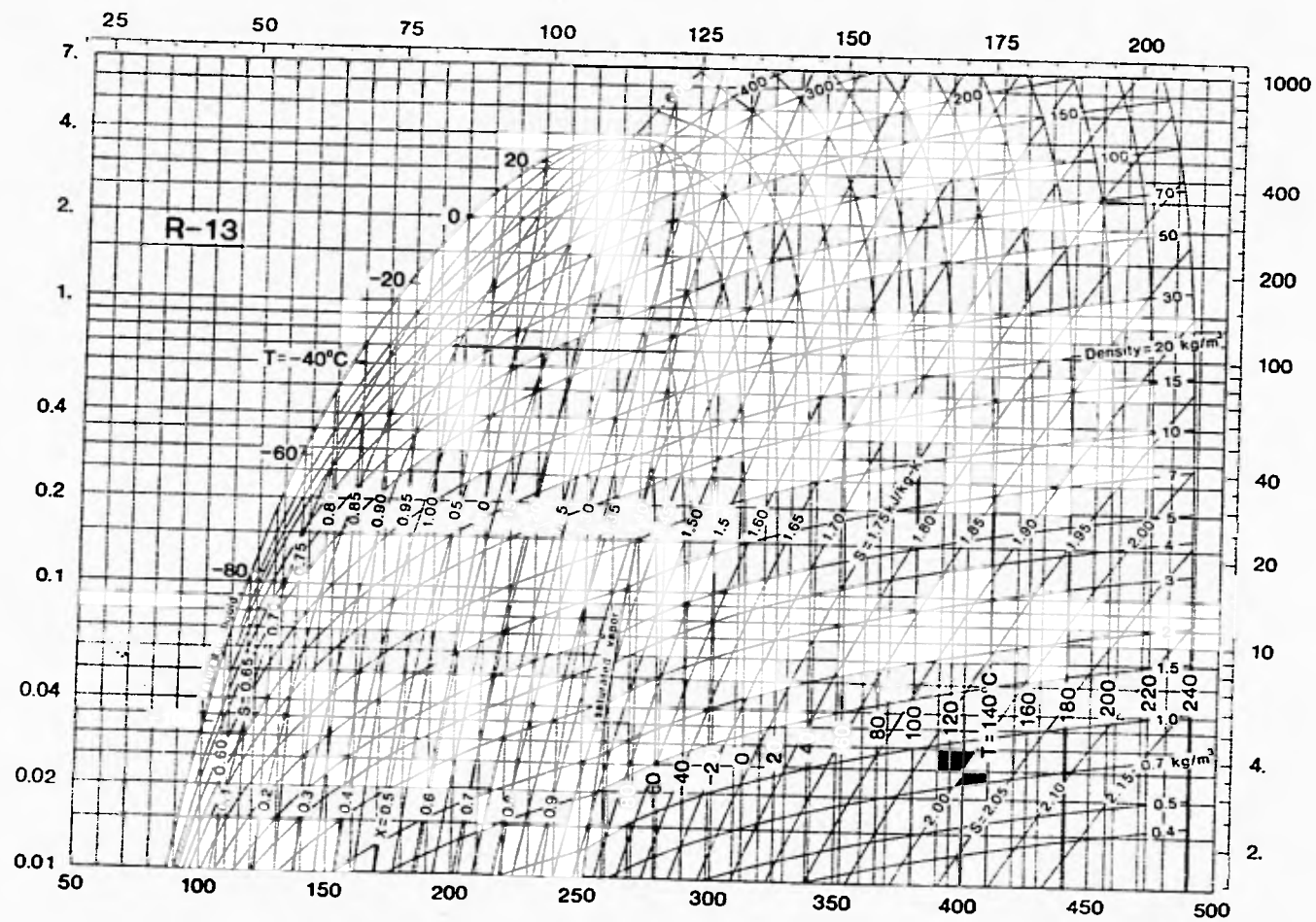
A P E N D I C E

Table 2A Refrigerant 12 Properties of Superheated Vapor

TEMP °C	DENSITY kg/m ³	ENTHALPY kJ/kg	ENTROPY kJ/kg K	DENSITY kg/m ³	ENTHALPY kJ/kg	ENTROPY kJ/kg K	DENSITY kg/m ³	ENTHALPY kJ/kg	ENTROPY kJ/kg K	DENSITY kg/m ³	ENTHALPY kJ/kg	ENTROPY kJ/kg K
PRESSURE = 0.01 MPa (SAT'N TEMP = -29.8°C)			PRESSURE = 0.04 MPa (SAT'N TEMP = -21.5°C)			PRESSURE = 0.08 MPa (SAT'N TEMP = -17.0°C)			PRESSURE = 0.101325 MPa (SAT'N TEMP = -14.5°C)			
SAT'N (LIQUID)	(1607.0)	(331.93)	(3.9108)	(1342.7)	(374.03)	(4.0057)	(1502.0)	(386.14)	(4.0395)	(1486.5)	(391.33)	(4.0797)
(VAPOR)	(0.7327)	(337.13)	(4.8264)	(2.6178)	(378.08)	(4.7842)	(15.061)	(338.81)	(4.7670)	(6.3048)	(357.33)	(4.7612)
210	0.69712	342.03	4.8505									
220	0.66469	347.13	4.8142									
230	0.63324	352.38	4.8974	2.5178	311.33	4.7994						
240	0.60355	357.73	4.9226	2.4433	358.98	4.8226	5.0113	335.97	4.7719			
250	0.57570	363.17	4.9424	2.3394	382.52	4.8452	4.7878	361.64	4.7950	5.1128	361.16	4.7773
260	0.54900	368.73	4.9642	2.2644	368.16	4.8673	4.1399	367.33	4.8173	5.8485	366.96	4.8001
270	0.52402	374.40	4.9836	2.1939	373.89	4.8903	4.4022	373.21	4.8395	5.6089	372.85	4.8222
280	0.50058	380.18	5.0006	2.0969	379.72	4.9101	4.2340	379.11	4.8609	5.2906	378.77	4.8438
290	0.50150	386.03	5.0272	2.0225	385.64	4.9309	4.0792	385.08	4.8819	5.1903	384.79	4.8649
300	0.48364	391.92	5.0475	1.9139	391.63	4.9513	3.9361	391.13	4.9023	5.0036	390.87	4.8856
310	0.46688	398.09	5.0674	1.8889	397.73	4.9712	3.8032	397.29	4.9226	4.8346	397.04	4.9056
320	0.45113	404.25	5.0869	1.8387	403.93	4.9909	3.6795	403.31	4.9423	4.6756	403.28	4.9256
330	0.44728	410.50	5.1061	1.7723	410.20	5.0102	3.5639	409.61	4.9617	4.5272	409.60	4.9450
340	0.42825	416.85	5.1250	1.7193	416.55	5.0293	3.4555	416.18	4.9808	4.3885	415.99	4.9641
350	0.41997	423.34	5.1436	1.6695	422.98	5.0478	3.3540	422.64	4.9995	4.2583	422.64	4.9829
360	0.40637	429.73	5.1619	1.6225	429.49	5.0661	3.2583	429.17	5.0179	4.1360	429.00	5.0015
370	0.39341	436.30	5.1799	1.5781	436.07	5.0842	3.1680	435.77	5.0359	4.0207	435.61	5.0194
380	0.38102	442.94	5.1978	1.5361	442.72	5.1019	3.0828	442.44	5.0535	3.9118	442.28	5.0372
390	0.37116	449.45	5.2150	1.4963	449.44	5.1194	3.0021	449.17	5.0712	3.8088	449.03	5.0547
400	0.36383	456.45	5.2322	1.4585	456.23	5.1365	2.9256	455.97	5.0884	3.7117	455.83	5.0719
410												
420												
430												
440												
450												
460												
470												
480												
490												
500												
510												
520												
530												
540												
550												
560												
570												
580												
590												
600												
610												
620												
630												
640												
650												
660												
670												
680												
690												
700												
710												
720												
730												
740												
750												
760												
770												
780												
790												
800												
810												
820												
830												
840												
850												
860												
870												
880												
890												
900												
910												
920												
930												
940												
950												
960												
970												
980												
990												
1000												

FALLA DE ORIGEN





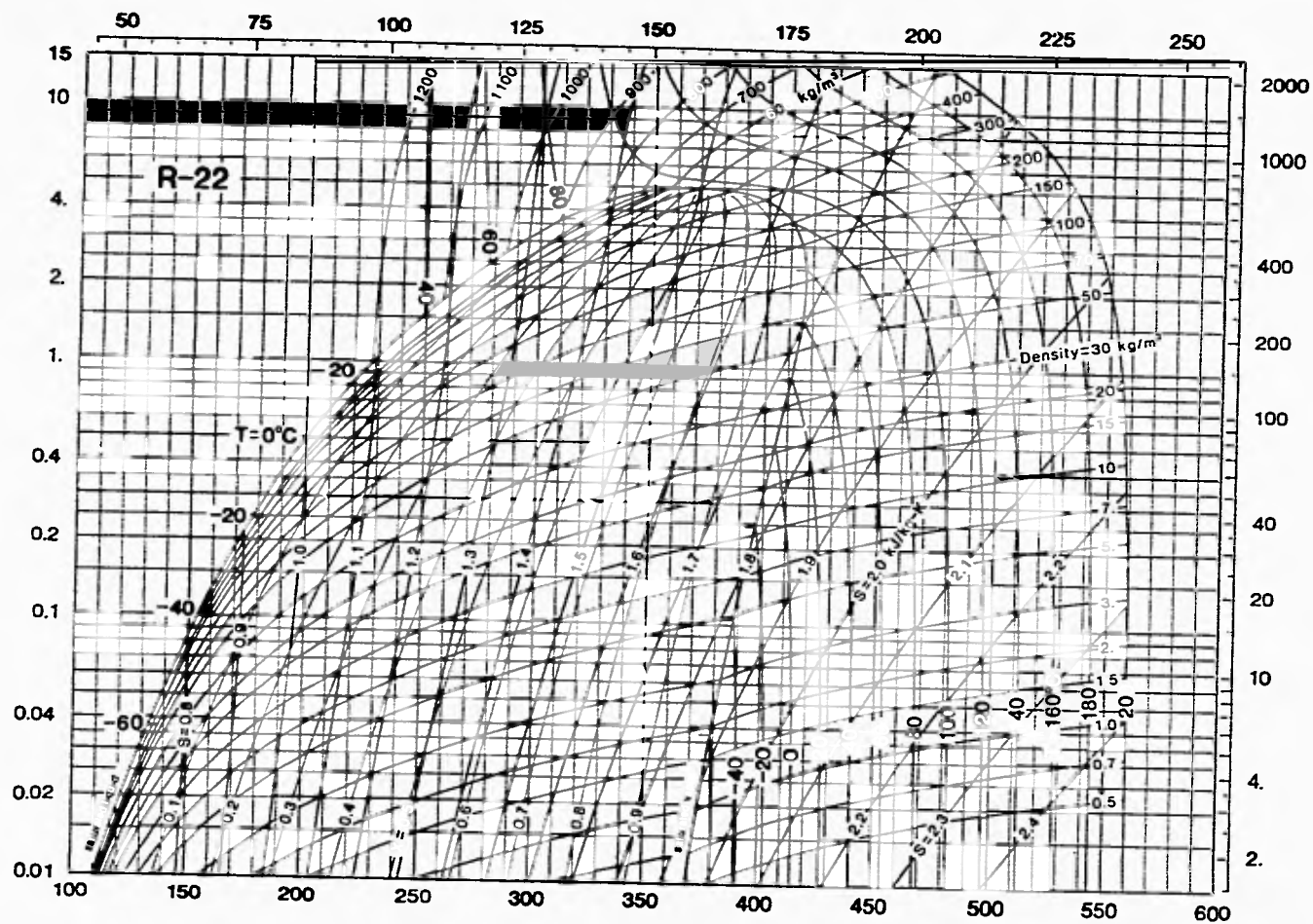


Table 13 Refrigerant 502 (Azeotrope of R-22 and R-115) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor
(Azeotropic Temperature = 19°C)

Temp °C	Pressure MPa	Volume Vapor m³/kg	Density Liquid kg/m³	Enthalpy		Entropy		Temp °C	Pressure MPa	Volume Vapor m³/kg	Density Liquid kg/m³	Enthalpy		Entropy	
				Liquid kJ/kg	Vapor kJ/kg	Liquid kJ/kg K	Vapor kJ/kg K					Liquid kJ/kg	Vapor kJ/kg	Liquid kJ/kg K	Vapor kJ/kg K
-70	0.027567	0.56041	1537.8	131.58	319.03	0.21457	1.6077	0	0.37112	0.03064	1232.5	300.00	346.81	1.0330	1.5368
-68	0.031043	0.48397	1551.6	123.22	314.01	0.22234	1.6040	2	0.60963	0.02901	1214.7	302.27	347.47	1.0382	1.5319
-66	0.034870	0.43440	1565.3	114.87	313.06	0.23056	1.6004	4	0.64786	0.02751	1206.8	304.33	348.29	1.0444	1.5270
-64	0.039072	0.39078	1579.3	106.54	316.08	0.23837	1.5970	6	0.68779	0.02572	1198.8	306.87	349.10	1.0514	1.5241
-62	0.043680	0.35231	1592.4	98.23	317.10	0.24660	1.5937	8	0.72931	0.02476	1190.7	309.19	349.19	1.0587	1.5212
-40	0.048718	0.31829	1597.2	89.94	318.11	0.25464	1.5905	10	0.77303	0.02288	1182.4	311.59	350.67	1.0669	1.5223
-38	0.054117	0.28814	1591.1	81.65	319.12	0.26269	1.5875	12	0.81843	0.02160	1174.1	314.85	351.44	1.0749	1.5213
-36	0.060205	0.26137	1584.9	73.41	320.14	0.27075	1.5846	14	0.86577	0.02040	1165.6	318.24	352.20	1.0832	1.5206
-34	0.066514	0.23753	1578.6	65.18	321.15	0.27883	1.5818	16	0.91501	0.01927	1157.0	321.81	352.94	1.0913	1.5208
-32	0.073175	0.21627	1572.4	56.97	322.16	0.28692	1.5791	18	0.96634	0.01822	1148.3	325.62	353.66	1.0994	1.5200
-30	0.081422	0.19716	1466.1	48.77	323.16	0.29502	1.5763	20	1.0197	0.01723	1139.4	329.42	354.36	1.0815	1.5282
-28	0.089687	0.18024	1489.7	40.60	324.15	0.30314	1.5741	22	1.0751	0.01631	1130.4	323.64	355.07	1.0896	1.5274
-26	0.098666	0.16496	1483.4	32.44	325.17	0.31127	1.5717	24	1.1327	0.01544	1121.2	328.28	355.72	1.0976	1.5265
-24	0.108325	0.15082	1481.3	24.28	326.14	0.31943	1.5700	26	1.1923	0.01462	1111.9	333.71	356.34	1.1055	1.5257
-22	0.10821	0.13723	1478.9	16.10	327.17	0.32761	1.5694	28	1.2545	0.01383	1102.3	339.19	357.01	1.1137	1.5249
-20	0.11634	0.12485	1470.3	8.00	327.16	0.33582	1.5672	30	1.3189	0.01312	1092.4	345.87	357.42	1.1217	1.5240
-18	0.12964	0.11289	1464.0	0.00	328.15	0.34372	1.5651	32	1.3856	0.01244	1082.7	353.16	358.20	1.1297	1.5231
-16	0.14151	0.11159	1457.4	160.01	329.13	0.35189	1.5631	34	1.4547	0.01179	1072.6	360.66	359.74	1.1377	1.5222
-14	0.15424	0.10843	1450.9	161.95	330.13	0.35997	1.5612	36	1.5262	0.01118	1062.2	368.18	359.30	1.1457	1.5212
-12	0.16786	0.10016	1444.2	165.91	331.09	0.36804	1.5593	38	1.6002	0.01060	1051.6	375.72	359.81	1.1537	1.5204
-10	0.18339	0.09262	1437.3	165.89	332.06	0.37643	1.5573	40	1.6770	0.01005	1040.7	383.23	360.28	1.1617	1.5194
-8	0.19788	0.08377	1430.8	167.89	333.02	0.38466	1.5558	42	1.7565	0.00953	1029.6	390.64	360.73	1.1696	1.5183
-6	0.21432	0.07732	1424.0	169.90	333.99	0.39287	1.5541	44	1.8383	0.00904	1018.1	397.42	361.18	1.1776	1.5172
-4	0.23186	0.07162	1417.2	171.94	334.94	0.39939	1.5526	46	1.9231	0.00857	1006.3	404.04	361.31	1.1855	1.5160
-2	0.25042	0.06661	1410.3	173.99	335.89	0.40513	1.5511	48	2.0107	0.00812	994.1	410.64	361.85	1.1935	1.5148
0	0.27014	0.06284	1403.4	176.06	336.83	0.41094	1.5497	50	2.1013	0.00770	981.5	417.32	362.12	1.2015	1.5134
2	0.29101	0.05966	1396.4	178.15	337.76	0.41776	1.5482	52	2.1949	0.00729	968.4	424.99	362.37	1.2094	1.5120
4	0.31308	0.05545	1389.3	180.26	338.68	0.42460	1.5469	54	2.2916	0.00691	954.9	432.70	362.53	1.2173	1.5105
6	0.33641	0.05119	1382.2	182.39	339.61	0.43151	1.5456	56	2.3913	0.00654	940.8	440.44	362.67	1.2253	1.5088
8	0.36102	0.04836	1375.0	184.52	340.51	0.43846	1.5444	58	2.4947	0.00618	926.0	448.22	362.72	1.2334	1.5069
10	0.38697	0.04511	1367.7	186.69	341.42	0.44549	1.5432	60	2.6014	0.00584	910.9	456.05	362.70	1.2418	1.5049
12	0.41430	0.04234	1360.4	188.87	342.31	0.45261	1.5420	62	2.6840	0.00550	895.7	463.98	362.19	1.2498	1.4988
14	0.44304	0.03967	1353.0	191.06	343.20	0.45973	1.5409	64	2.7815	0.00518	879.5	472.00	360.80	1.2581	1.4901
16	0.47328	0.03721	1345.3	193.27	344.07	0.46685	1.5399	66	2.8844	0.00487	862.3	480.14	359.79	1.2668	1.4800
18	0.50498	0.03492	1337.9	195.50	344.94	0.47398	1.5388	68	3.0008	0.00457	845.1	488.42	358.77	1.2759	1.4700
20	0.53826	0.03281	1330.3	197.74	345.79	0.48108	1.5378	70	3.1312	0.00428	827.8	496.85	357.74	1.2853	1.4599

*Critical Point

FALLA DE ORIGEN

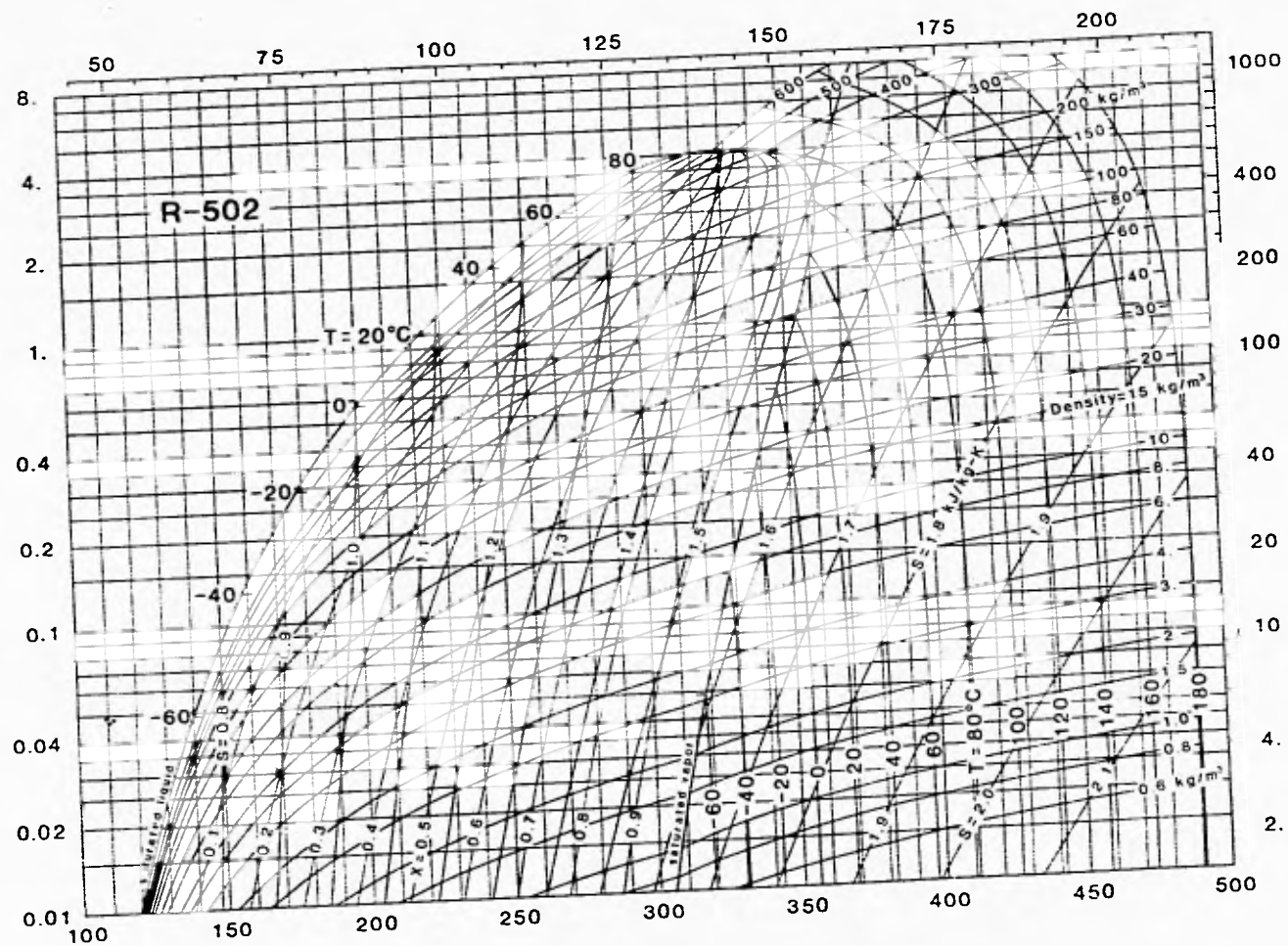


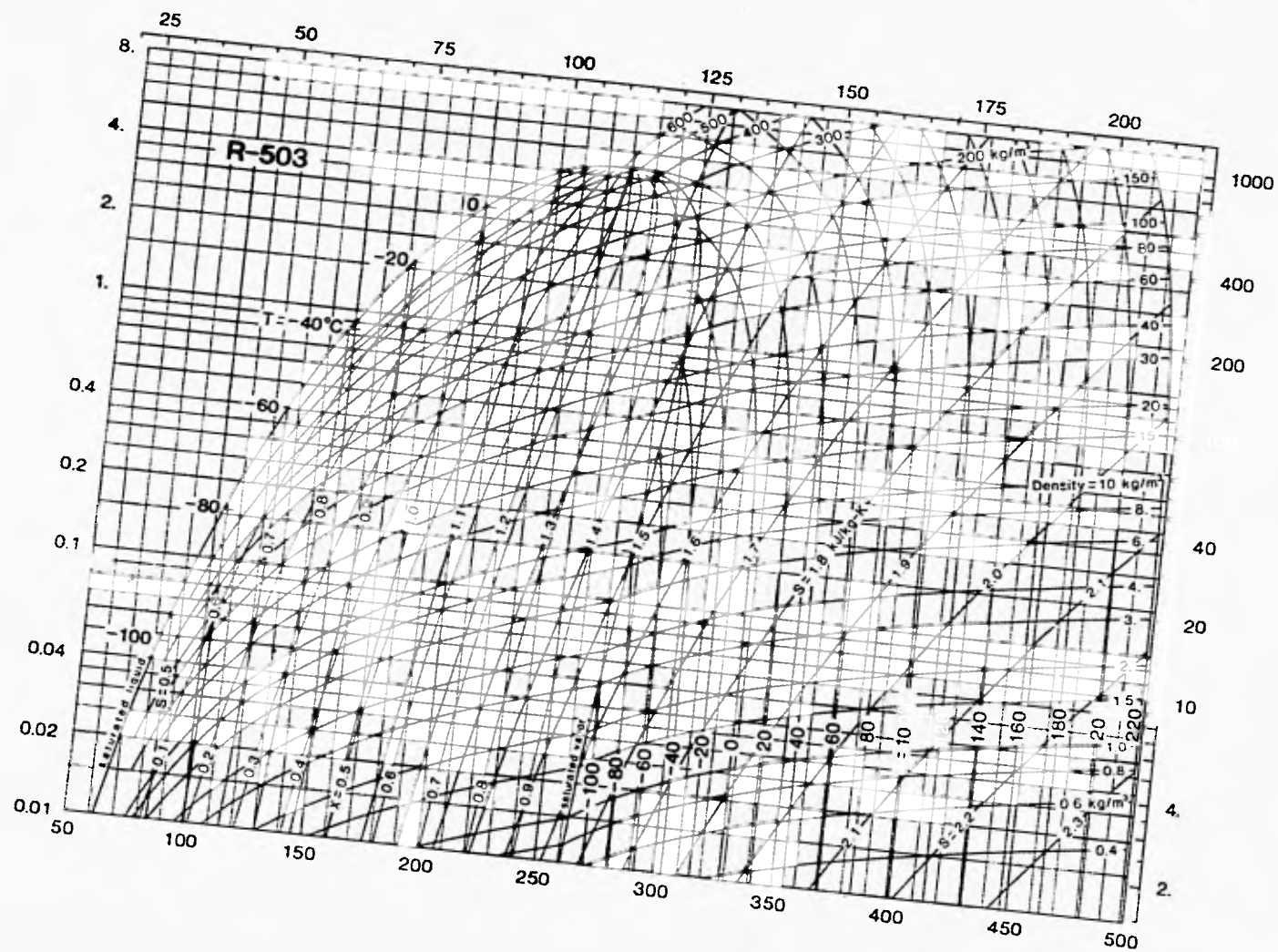
Table 14 Refrigerant 503 (Azeotrope of R-23 and R-13) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor
(Azeotropic Temperature = 52°C)

Temp C	Pressure MPa	Volume Vapor m ³ /kg	Density Liquid kg/m ³	Enthalpy		Entropy		Temp C	Pressure MPa	Volume Vapor m ³ /kg	Density Liquid kg/m ³	Enthalpy		Entropy	
				Liquid kJ/kg	Vapor kJ/kg	Liquid kJ/kg K	Vapor kJ/kg K					Liquid kJ/kg	Vapor kJ/kg	Liquid kJ/kg K	Vapor kJ/kg K
-125	0.006181	2.2340	2570.2	54.546	236.14	0.32992	1.6807	-90	0.01980	0.01701	1332.8	136.42	286.69	0.73170	1.4231
-120	0.010017	1.4441	1559.4	81.416	260.35	0.33223	1.6512	-88	0.01550	0.02864	1325.7	138.71	287.22	0.76174	1.4314
-115	0.015439	0.96468	1548.1	64.361	262.54	0.38398	1.6244	-86	0.01376	0.02462	1314.4	141.00	287.73	0.77172	1.4177
-110	0.023073	0.66318	1534.0	71.387	264.31	0.41525	1.6002	-84	0.01167	0.02169	1297.4	143.30	288.23	0.78164	1.4141
-108	0.024888	0.57312	1531.0	73.418	265.57	0.42780	1.5911	-82	0.01008	0.02023	1275.3	145.74	288.73	0.80133	1.4070
-106	0.031192	0.50073	1528.0	75.462	266.42	0.43968	1.5824	-80	0.00818	0.01891	1264.9	147.94	289.19	0.81115	1.4033
-104	0.036040	0.43783	1530.8	77.518	267.38	0.45020	1.5739	-78	0.00658	0.01767	1254.3	150.28	289.59	0.82057	1.4001
-102	0.041477	0.38388	1515.4	79.585	268.12	0.46041	1.5658	-76	0.00521	0.01675	1243.5	152.00	290.37	0.83009	1.3966
-100	0.047533	0.33792	1510.0	81.665	268.96	0.47036	1.5580	-74	0.00408	0.01615	1232.3	153.34	290.72	0.84024	1.3932
-98	0.054225	0.29843	1504.5	83.753	269.79	0.48004	1.5504	-72	0.00317	0.01567	1221.1	154.64	291.03	0.84994	1.3898
-96	0.061861	0.26464	1498.8	85.853	270.62	0.48935	1.5431	-70	0.00243	0.01526	1209.3	155.80	291.60	0.85923	1.3870
-94	0.070140	0.23503	1493.1	87.963	271.42	0.53184	1.5361	-68	0.00186	0.01471	1197.6	157.11	291.82	0.86892	1.3793
-92	0.079340	0.20931	1487.2	90.084	272.24	0.53368	1.5292	-66	0.00141	0.01411	1185.3	158.60	292.07	0.86859	1.3760
-90	0.089640	0.18719	1481.3	92.314	273.04	0.53534	1.5227	-64	0.00106	0.01356	1172.8	159.78	292.17	0.86929	1.3725
-88	0.10032	0.16788	1475.1	94.215	273.83	0.54681	1.5163	-62	0.00081	0.01304	1160.1	160.68	292.27	0.86902	1.3689
-86	0.11133	0.15064	1474.7	94.501	273.89	0.54771	1.5159	-60	0.00061	0.01253	1146.5	161.22	292.57	0.87160	1.3652
-84	0.12265	0.13588	1468.9	96.301	274.62	0.53861	1.5101	-58	0.00046	0.01200	1132.8	161.91	292.33	0.87261	1.3615
-82	0.13439	0.12277	1463.0	98.018	275.39	0.54062	1.5062	-56	0.00034	0.01147	1118.7	162.59	292.28	0.87358	1.3578
-80	0.14651	0.11032	1454.0	100.32	276.15	0.54116	1.4984	-54	0.00024	0.01091	1104.1	163.22	292.18	0.87460	1.3534
-78	0.15997	0.10113	1444.4	103.00	276.90	0.53941	1.4928	-52	0.00017	0.01039	1088.9	163.11	291.98	0.87571	1.3495
-76	0.17394	0.09482	1443.6	105.18	277.64	0.54039	1.4874	-50	0.00012	0.00987	1073.2	163.96	291.71	0.87683	1.3451
-74	0.19130	0.09165	1433.8	107.37	278.37	0.54168	1.4821	-48	0.00008	0.00934	1056.9	164.89	291.33	0.87848	1.3406
-72	0.21111	0.08349	1428.7	109.34	279.08	0.53969	1.4770	-46	0.00005	0.00879	1040.0	165.90	290.90	0.88112	1.3358
-70	0.23245	0.07621	1421.4	111.74	279.80	0.53661	1.4730	-44	0.00003	0.00823	1023.0	166.22	290.22	0.88300	1.3307
-68	0.25339	0.06969	1414.3	115.87	280.50	0.54746	1.4672	-42	0.00002	0.00766	1005.2	166.73	289.42	0.88512	1.3252
-66	0.28091	0.06284	1408.9	118.19	281.18	0.55823	1.4625	-40	0.00001	0.00709	987.27	167.54	288.54	0.88747	1.3193
-64	0.30838	0.05618	1399.2	118.81	281.83	0.56891	1.4579	-38	0.00001	0.00653	969.00	168.04	287.70	0.89000	1.3138
-62	0.33418	0.05184	1391.5	120.94	282.51	0.57952	1.4535	-36	0.00001	0.00595	950.06	168.42	286.42	0.89270	1.3084
-60	0.36468	0.04954	1383.6	122.87	283.13	0.58805	1.4491	-34	0.00001	0.00539	931.91	168.65	284.85	0.89560	1.3035
-58	0.39477	0.04569	1375.4	125.11	283.38	0.70051	1.4449	-32	0.00001	0.00483	913.80	168.90	283.90	0.89870	1.2981
-56	0.43092	0.04219	1367.4	127.36	284.39	0.71089	1.4408	-30	0.00001	0.00427	895.82	169.17	282.52	0.90200	1.2932
-54	0.46722	0.03900	1358.0	129.62	284.99	0.72119	1.4367	-28	0.00001	0.00371	878.04	169.47	281.65	0.90550	1.2889
-52	0.50374	0.03610	1350.4	131.88	285.57	0.73143	1.4328	-26	0.00001	0.00315	860.44	169.70	280.43	0.90920	1.2842
-50	0.54033	0.03346	1341.7	134.13	286.14	0.74160	1.4289	-24	0.00001	0.00259	843.00	169.87	278.87	0.91310	1.2791

*Critical Point

FALLA DE ORIGEN

10/



LISTA DE FIGURAS

- 1.1 Esquema de las parte y el diagrama T-s de un ciclo de refrigeración por compresión de vapores.
- 1.2 Esquema de un ciclo básico de absorción.
- 1.3 Esquema de refrigeración por adsorción.
- 1.4 Ciclo intermitente de refrigeración por adsorción.
- 1.5 Esquema del diagrama T-s de un ciclo básico de licuefacción de gases.
- 1.6 Diagrama T-s del ciclo para producir dióxido de carbono sólido.
- 1.7 Esquema y diagrama T-s del proceso de licuefacción de gases que incluyen un esparsor de turbina.
- 2.1 Diagrama P-h de un ciclo saturado simple teórico
- 2.2 Comparación entre dos ciclos simples saturados trabajando con diferentes temperaturas vaporizantes
- 2.3 Diagrama P-h mostrando el efecto de la temperatura de succión. Este esquema es una comparación entre dos ciclos saturados simples trabajando a diferentes temperaturas vaporizantes.

- 2.4 Efecto de sobrecalentamiento en la succión del compresor.
- 2.5 Efecto del subenfriamiento en la succión del compresor.
- 2.6 Diagrama del ciclo real de refrigeración mostrando los efectos de subenfriamiento y pérdidas de presión. Para comparación se dibujo un ciclo saturado simple.
- 2.7 Esquema del equipo y diagrama T-s de un ciclo de refrigeración en cascada.
- 2.8 Esquema del equipo y diagrama T-s de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor de dos etapas con enfriamiento intermedio regenerativo.
- 4.1 Dibujo de un compresor y las válvulas de succión y descarga en diferentes etapas del ciclo de compresión.
- 4.2 Diseño de una válvula interna de un compresor.
- 4.3 Compresor hemérico típico.
- 4.4 Condensador enfriado por aire.
- 4.5 Deshidratador.
- 4.6 Sistema de tubo capilar.
- 4.7 Algunos tipos de evaporadores de placas.
- 4.8 Ultracongelador de dos etapas.

- 4.9 Protector de motor respuesta dual.
- 4.10 Arreglos de circuitos de protectores de motor.
- 4.11 Relevador de corriente.
- 4.12 Relevador de voltaje.
- 4.13 Manifold.
- 4.14 Bomba de vacio.

BIBLIOGRAFIA

1. Hernández G. Eduardo, Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración, 9ª edición 1990, Limusa, México
2. Air-Conditioning and Refrigeration Institute, Refrigeración y Aire Acondicionado, Prentice/Hall Internacional, 1981.
3. Perry Robert H., Chilton Cecil H., Chemical Engineers Handbook 5ª edición, Mc Graw Hill, New York.
4. Carrier Air Conditioning Company, Manual de Aire Acondicionado, Marcombo S.A., de Boixareu Editores, Barcelona 1974.
5. Dossat Roy J., Principios de Refrigeración 2ª edición, Compañía Editorial Continental, S.A., México 1980.
6. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., ASHRAE Guide and Data Book 1961, Fundamentals and Equipment, New York. 1961
7. Ibidem, ASHRAE Handbook 1983, Equipment, Atlanta.
8. Ibidem, ASHRAE Handbook 1984, Sistem, Atlanta.
9. Ibidem, ASHRAE Handbook 1985, Fundamentals, Atlanta.
10. Ibidem, ASHRAE Handbok 1986, Refrigeration Systems and Aplication, Atlanta.
11. REVCO, Ultralow Temperature Cabinets Service Manual, U.S.A., REVCO, Inc.