



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del Jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó el material didáctico y será registrada por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia a los alumnos que cumplan como mínimo el 80% de asistencia.

Recomendamos a los asistentes recojan su constancia en la fecha que se les señale al término del evento. La DECFI solo las retendrá por el periodo de un año, pasado este tiempo no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los alumnos participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

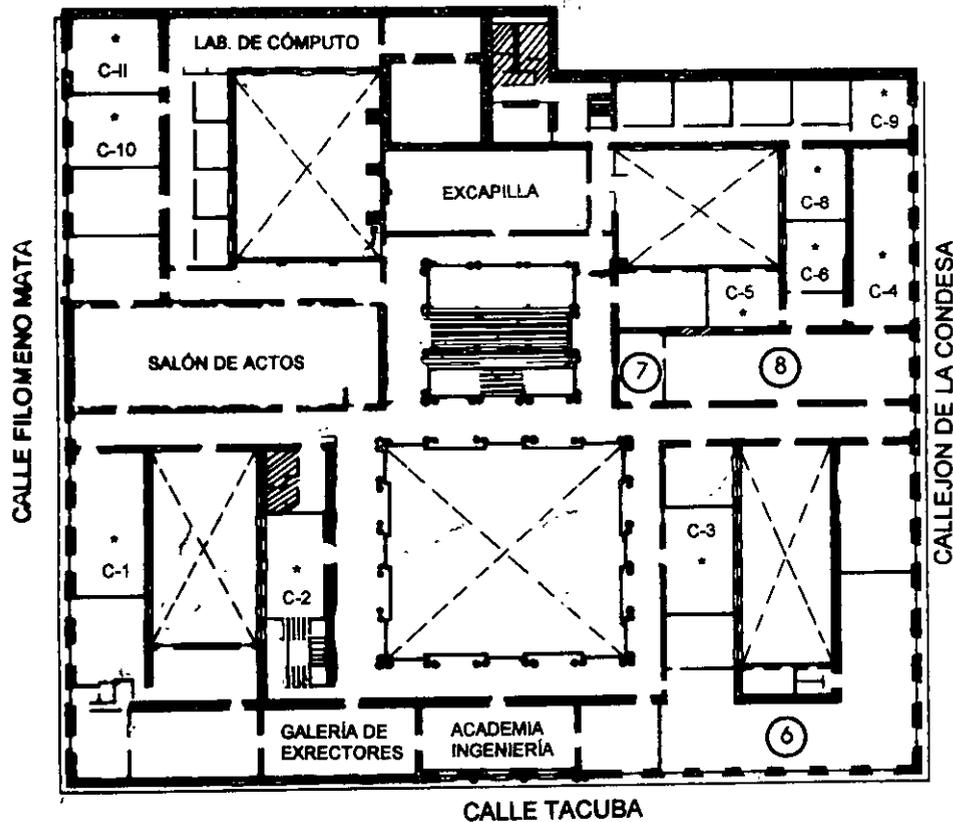
Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su solicitud de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes.

Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán requisitar y entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

Atentamente
División de Educación Continua

PALACIO DE MINERÍA



GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

SANITARIOS

★ AULAS

1er. PISO

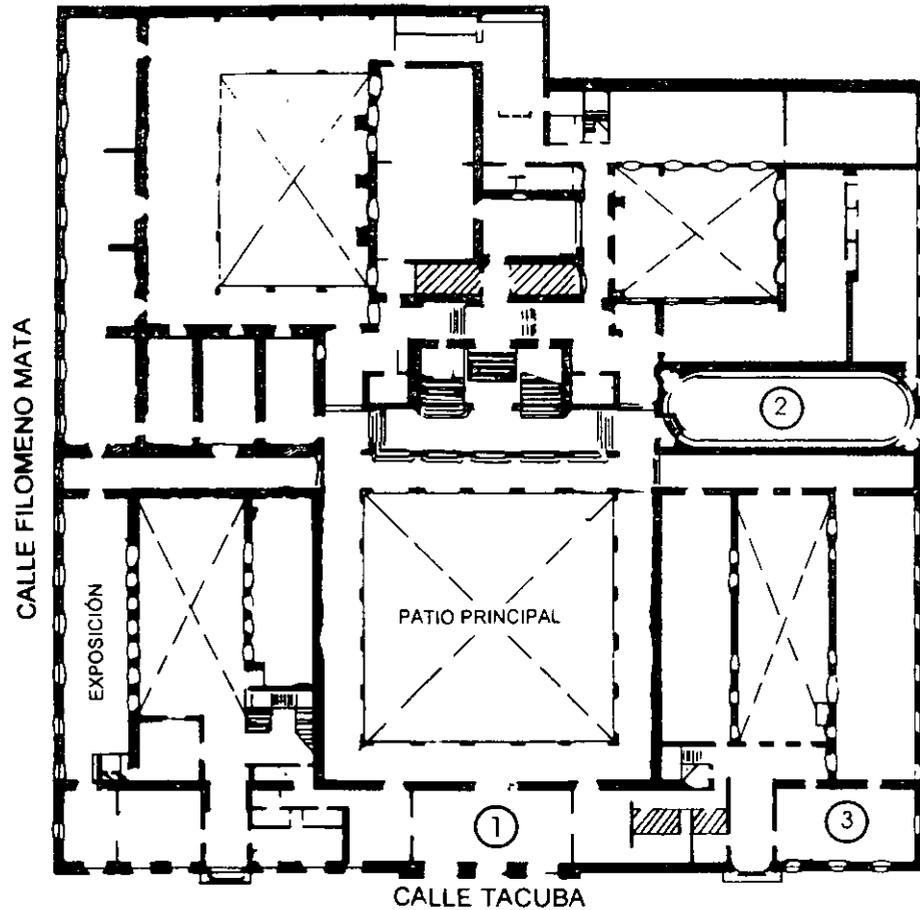


DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS

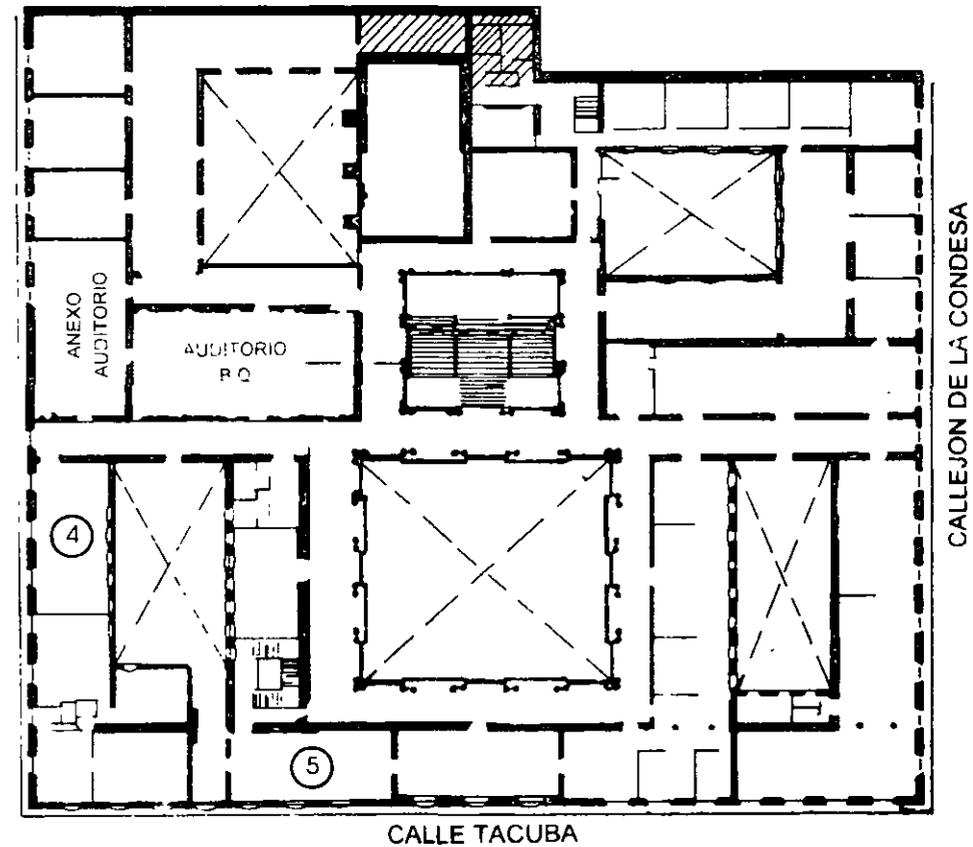
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



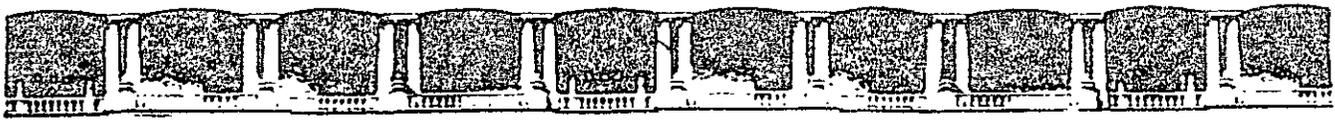
PALACIO DE MINERIA



PLANTA BAJA



MEZZANINNE



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, UNAM.

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO EN REFRIGERACIÓN

MÓDULO II

EL CICLO DE REFRIGERACIÓN
CA 250

TEMA

APUNTES GENERALES



INGENIERIA MECANICA

**EXPOSITOR: ING. ARTURO ALBA AGUILAR
DEL 28 DE MAYO AL 01 DE JUNIO DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

**El ciclo de refrigeración
UNAM 2007
Modulo II
Diplomado en Refrigeración**

Índice

Introducción	
Proceso de refrigeración	
Ciclos de refrigeración	
Unidad de refrigeración	
Diagrama presión entalpía	
Diagrama temperatura-entropía	
Limites de las temperaturas.	
Ciclo teórico de refrigeración por compresión de vapor.	
Refrigerador de Carnot reversible y bomba de calor	
Aspectos imprácticos asociados al ciclo de Carnot	
Ciclo teórico de una sola etapa de refrigeración por compresión de vapor.	
Mezclas de Líquido y Vapor, Calidad	
Ejemplos	
Componentes de un sistema de refrigeración	
Subenfriamiento y sobrecalentamiento	
Conservación de la energía.	
Ciclo real de una sola etapa de refrigeración por compresión de vapor.	
Ejemplos	
La bomba de calor	
Refrigeración por absorción	
Bibliografía	

Introducción.

Casi todos los sistemas de HVAC que producen enfriamiento dependen de un subsistema de refrigeración que proporciona agua o salmuera frías o que remueve directamente el calor sensible y latente de un torrente de aire. Los sistemas de refrigeración también proporcionan calefacción al sistema de HVAC se denominan bombas de calor. La refrigeración es un área de especialización distinta del área de diseño de sistemas de HVAC y pocos ingenieros son expertos en ambas. Debido a que tanto el control como el rendimiento de los sistemas de HVAC se ven afectados de manera significativa por el desempeño de los sistemas de refrigeración, los ingenieros de sistemas de HVAC deberán de tener algunos conocimientos básicos de refrigeración. Este conocimiento les ayuda a hacer una selección inteligente del equipo de refrigeración y les permite adaptar apropiadamente este equipo al sistema general.

Proceso de refrigeración.

Un proceso de refrigeración indica los cambios en las propiedades termodinámicas del refrigerante y la energía transferida entre el refrigerante y sus alrededores. Los siguientes procesos de refrigeración ocurren durante la operación del sistema de refrigeración por compresión de vapor.

Evaporación. En este proceso, el refrigerante se evapora a una temperatura baja que la de sus alrededores, absorbiendo el calor latente de vaporización.

Sobrecalentamiento. Refrigerante de vapor saturado es generalmente sobrecalentado para asegurar que refrigerante líquido no entre al compresor.

Compresión. El refrigerante es comprimido a una alta temperatura y presión para condensarse.

Condensación. El gas refrigerante es condensado a una forma líquida siendo desobrecalentado, entonces condensado, y finalmente subenfriado, transfiriendo su calor latente de condensación a un enfriador.

Estrangulamiento y expansión. El líquido refrigerante a alta presión es estrangulado a una baja presión de evaporación y está listo para evaporarse.

Los siguientes procesos de refrigeración ocurren durante la operación de un sistema de refrigeración por expansión de aire o gas:

Compresión. Comprimir aire o gas a una alta temperatura y presión.

Rechazo de calor. El calor es rechazado a los alrededores a una presión constante y en orden para reducir la temperatura del aire o gas.

Estrangulación y expansión. Estrangular y expandir el aire o gas para que su temperatura sea reducida.

Absorción de calor. El calor es absorbido de los alrededores por la baja temperatura del gas o aire.

Ciclos de refrigeración.

Muchos refrigerantes sufren una serie de procesos de evaporación, compresión, condensación, estrangulamiento y expansión, absorbiendo calor de un medio de baja temperatura y rechazándolo a un medio a alta temperatura y que de alguna manera el estado final de este es igual en todos los estados con respecto al estado inicial. Se dice que tiene que sufrir estos procesos en un ciclo de refrigeración cerrado. Cuando el aire o gas sufren una serie de procesos de compresión, rechazo de calor, estrangulamiento, expansión, y calor de absorción, y su estado final no es igual a su estado inicial, se dice que tiene que sufrir esto en un ciclo de refrigeración abierto.

Unidad de refrigeración

En unidades libra-pulgada (I-P), la refrigeración es expresada en unidades térmicas británicas por hora, o simplemente Btu/h.

La unidad térmica británica es definida como la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura de una libra de agua un grado Fahrenheit desde 59 °F A 60 °F; y un Btu/h = 0.293 watt (W).

Otra unidad de refrigeración mundialmente utilizada en la industria del HVAC & R es la tonelada de refrigeración, o simplemente tonelada. Como se menciona antes, 1 Ton= 12000 Btu/h de calor removido. Este es igual al calor absorbido por una tonelada (2000 lb) de hielo que se funde o derrite a una temperatura de 32°F en 24 hr.

Porque el calor de fusion del hielo es de 32°F y 144 Btu/ lb,

$$1 \text{ ton} = \frac{1 \times 2000 \times 144}{24} = 12,000 \text{ Btu/h}$$

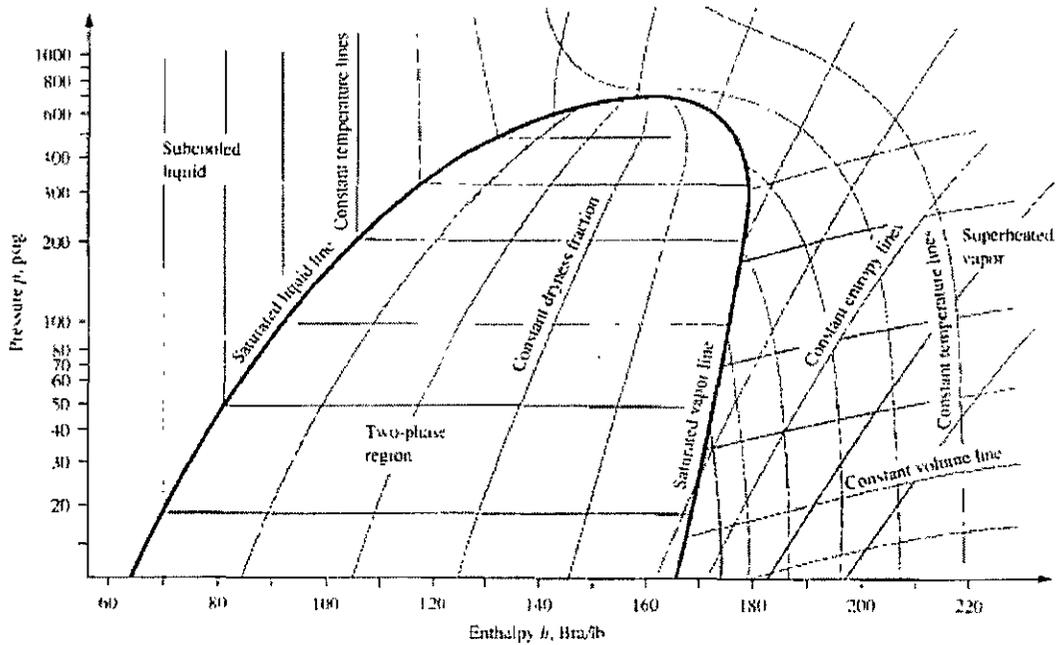
También

$$1 \text{ ton} = 3.516 \text{ kW}$$

Diagrama presión entalpía.

El diagrama presión entalpía es la herramienta gráfica más comúnmente utilizada para analizar y calcular el calor y el trabajo transferido y el desempeño del ciclo de refrigeración. Un ciclo simple-etapa consiste de dos regiones: una región de alta presión, y una región de baja presión, o lado de baja. El cambio en la presión puede ser claramente ilustrado sobre el diagrama p-h. También, ambos calor y trabajo transferido de los diferentes procesos pueden ser calculados así como el cambio de entalpía y son fácilmente mostrados en el diagrama p-h.

En la figura se muestra el esqueleto de un diagrama para el refrigerante HCFC-22. La entalpía h (en Btu/lb) es la abscisa, y la presión absoluta (psia) o presión manométrica (psig), ambas expresadas en la escala logarítmica, como la ordenada. Las líneas de líquido separa el líquido subenfriado de la región de dos fases en la cual coexiste vapor y líquido. La línea de vapor saturado separa estas dos fases de la región de vapor sobrecalentado. En la región de dos fases, la mezcla de vapor y líquido es subdividida por la línea de calidad.



Las líneas de temperatura constante se encuentran verticalmente cerca de la región de subenfriamiento de líquido. Las altas temperaturas, se encuentran cerca de las líneas de líquido saturado. En la región de dos fases, las líneas de temperatura constante están en forma horizontal. En la región de sobrecalentamiento, las líneas curvas se deslazan hacia abajo. Porque las líneas de temperatura constante y presión constante en la región de dos fases son horizontales, tienen una relación cercana. La presión específica de un refrigerante en la región de dos fases determina su temperatura y viceversa.

También en la región de sobrecalentamiento, las líneas inclinadas de entropía constante empiezan a descender, y las líneas de volumen son perpendiculares, ambas están ligeramente curvas.

Para analizar los diversos ciclos de refrigeración que se usan comúnmente, se verá primero el ciclo ideal o prototipo de cada uno, para comprender los principios termodinámicos en que se basan, para después considerar como se logra la realización práctica de cada uno.

Por ahora, existen en uso varios ciclos comunes de refrigeración.

1. ciclo de compresión de vapor
2. ciclo de bomba de calor (heat pump)
3. ciclo de refrigeración por gas
4. ciclo de refrigeración por absorción
5. ciclo de refrigeración por vacío

Por ser el ciclo de compresión de vapor el de mayor utilización, se estudiara con mayor detalle y los ejemplos servirán de apoyo utilizando los diferentes refrigerantes que se utilizan en este tipo de sistemas.

Posteriormente y por orden de utilización se estudiara el ciclo de bomba de calor que en los últimos años ha ganado una gran aceptación.

Diagrama Temperatura- Entropía.

El diagrama temperatura-entropía es frecuentemente usado para analizar la irreversibilidad en un ciclo de refrigeración, también como en el sistema, y ordenar para seleccionar los parámetros óptimos de operación y mejorar el desempeño del sistema. En un diagrama temperatura-entropía $T-s$, entropía s , Btu/lb * °R, se encuentra en el eje de las abscisas del diagrama y la temperatura T , °R esta en la ordenada. Un diagrama $T-s$ es muy recomendable para evaluar la efectividad de un ciclo de refrigeración de expansión de aire.

Del mismo modo como se encontró que era posible invertir el ciclo de Carnot, es posible, teóricamente, invertir el ciclo de Rankine. En la figura 1 se muestra un ciclo elemental de compresión de vapor, en la figura 2 su correspondiente diagrama Ts .

El ciclo reversible de Carnot, es la teoría básica para cualquier sistema práctico de refrigeración.

La máxima cantidad de trabajo se puede obtener dejando pasar una cantidad de calor de un cuerpo, que sea una fuente de calor, a otro que sea un receptor, a través de una máquina que trabaje de una manera reversible. Reversible no solo respecto de su acción interna, sino también de la transferencia de calor de la fuente de calor a la máquina y de la máquina al receptor de calor.

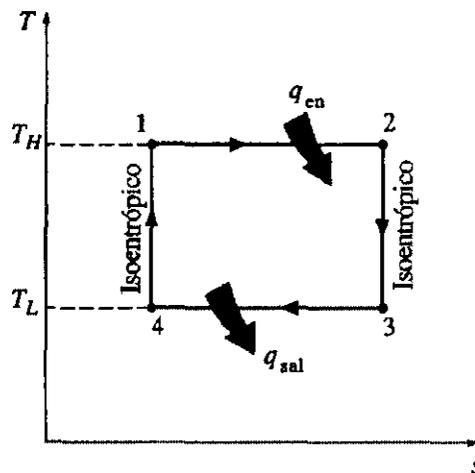
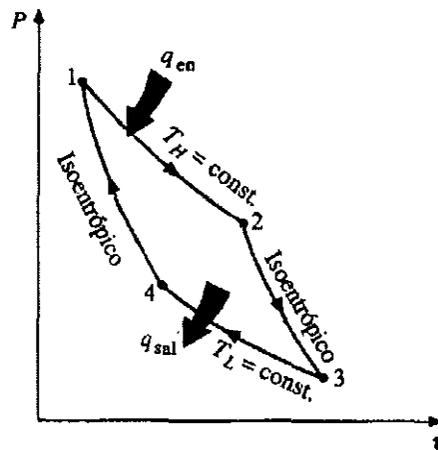
El ciclo de Carnot, para un gas perfecto consiste de cuatro operaciones sucesivas figura 1

Se compone de **4 procesos totalmente REVERSIBLES:**

1. Adición de calor isotérmica
2. Expansión isentrópica
3. Rechazo de calor isotérmico
4. Compresión isentrópica

El ciclo de Carnot se ejecuta en un sistema cerrado (dispositivo cilindro-émbolo) o en un sistema de flujo estable (con dos turbinas y dos compresores)

Es el **ciclo de vapor más EFICIENTE** que opera entre dos niveles de temperatura especificados (fuente de E térmica a **TC** y un sumidero a temperatura **TF**)



La TQ isotérmica reversible es muy difícil de lograr en la realidad porque requeriría cambiadores de calor muy grandes y requeriría mucho tiempo

No es práctico construir una máquina que operase en un ciclo que se aproximase al de CARNOT

USO REAL del ciclo de Carnot: estándar contra el cual pueden compararse ciclos reales u otros ideales

"La eficiencia térmica (rpto. Máx.) Aumenta con un incremento en la temperatura promedio a la cual el calor se añade al sistema o una disminución en la temperatura promedio a la cual se rechaza calor del sistema"

Límites de las temperaturas:

TC: T_{max} de los componentes de la máquina térmica (émbolo, álabes de la turbina) TF: T del medio de enfriamiento utilizado en el ciclo (aire, lago...)

Es esencial poder determinar el funcionamiento de un sistema de refrigeración. Entre las diferentes características importantes del funcionamiento se encuentran la capacidad de enfriamiento (refrigeración), potencia requerida por el compresor, flujo de refrigerante y cantidad de calor rechazado (removido) en el condensador.

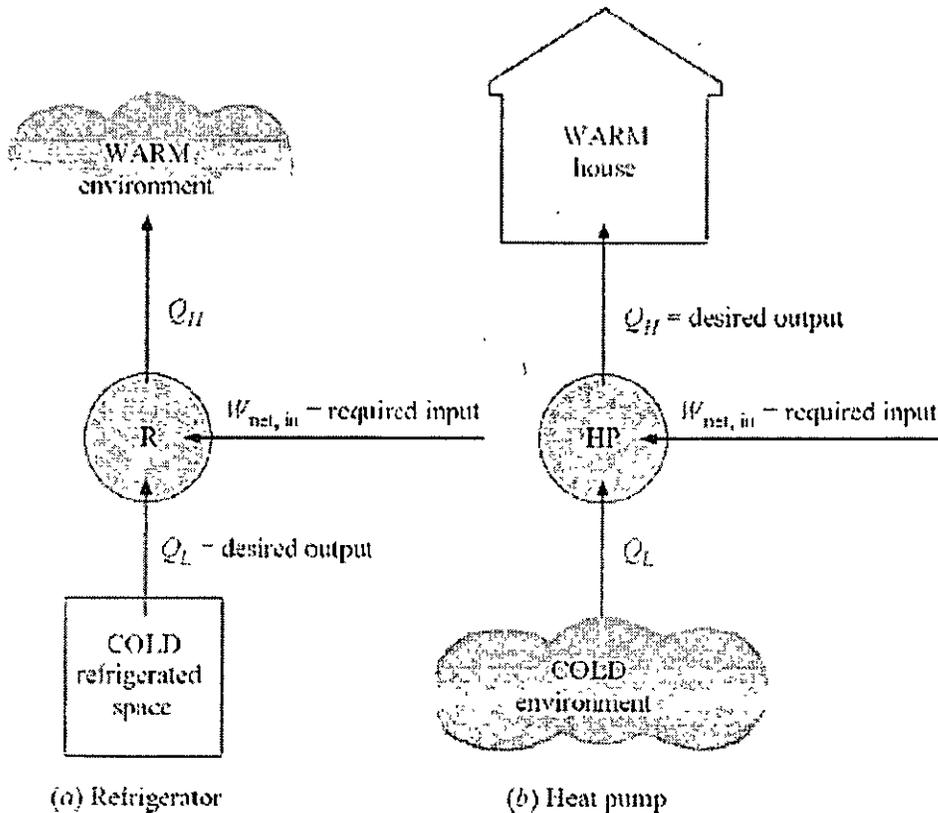
El funcionamiento del sistema se determina examinando su ciclo termodinámico. Este ciclo termodinámico representado por la serie completa de procesos o cambios físicos que experimenta el refrigerante en el sistema. En cada componente del equipo de la planta, cambian algunas propiedades físicas del refrigerante; esto es cambian las condiciones.

Estos cambios se conocen con el nombre de procesos. Debido a que el refrigerante circula en un circuito cerrado, a la serie de cambios se le llama ciclo. Esto es, cuando el refrigerante retorna al mismo lugar en el sistema, recobra también la misma condición física, a esta situación se le aplica el nombre de estado uniforme. El refrigerante fluye a un régimen constante, y sus propiedades en cualquier punto son siempre las mismas. En el caso de ocurrir alguna perturbación, tal como un cambio en la carga, o el ajuste de una válvula, la operación puede volverse inestable por corto tiempo, ya que al cambiar el régimen de flujo, cambian las propiedades. No obstante, después de un breve periodo, se tienen unas nuevas condiciones uniformes.

Ciclo teórico de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo de un vapor refrigerante puede considerarse como una modificación o desviación del ciclo de Carnot.

El ciclo de compresión de vapor es un método común para transferir calor desde una temperatura baja a una temperatura alta.



En la figura de arriba se muestran los objetivos de refrigeradores y bombas de calor. El propósito de un refrigerador es el de remover el calor, llamado carga de enfriamiento, desde un medio a baja temperatura. Cuando tenemos interés en remover la energía calorífica desde un espacio a baja temperatura, el dispositivo se llama refrigerador. Cuando estamos interesados en proporcionar energía calorífica a un espacio a alta temperatura, el dispositivo es llamado bomba de calor. En general, el termino bomba de calor es usado para describir al ciclo como energía calorífica que es removida de el espacio de baja temperatura y rechazada a un espacio de alta temperatura.

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica, frecuentemente llamada ley de la conservación de la energía, cuando un sistema experimenta un ciclo termodinámico, el calor neto de alimentación a el sistema es igual a el trabajo neto, o

Calor de alimentación + Calor rechazado = Trabajo neto realizado

El desempeño de los refrigeradores y bombas de calor es expresado en términos del coeficiente de desempeño (COP), definido como:

$$\begin{aligned} \text{COP}_R &= \text{Salida deseada} / \text{entrada requerida} = \\ &= \text{Efecto refrigerante} / \text{Trabajo de entrada} = \\ &= Q_L / W_{\text{net, in}} \end{aligned}$$

Para el ciclo de refrigeración de Carnot, de la ecuación anterior, sustituyendo tenemos:

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{ref}} &= \frac{q_{\#1}}{q_{\#2} - q_{\#1}} \\ &= \frac{T_{R1}(s_1 - s_4)}{(T_{R2} - T_{R1})(s_1 - s_4)} = \frac{T_{R1}}{T_{R2} - T_{R1}} \end{aligned}$$

Con una bomba de calor, el efecto util es el efecto de calefacción porque de el calor rechazado $q_{\#2}$, asi es que el:

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{HP}} &= \text{Salida deseada} / \text{entrada requerida} = \\ &= \text{Efecto de calefacción} / \text{Trabajo de entrada} = \\ &= Q_{\text{HP}} / W_{\text{net, in}} \end{aligned}$$

Ambos COP_R y COP_{HP} , pueden ser mayores a 1. Bajo las mismas condiciones de operación

Refrigerador de Carnot reversible y bomba de calor.

En la figura de abajo esta el dispositivo del ciclo de refrigeración entre dos temperaturas de reserva constantes y el diagrama T-s diagrama donde el fluido se encuentra trabajando cuando el ciclo reversible de Carnot es usado. Renombramos esto en el ciclo de Carnot el calor se transfiere de un lugar a temperatura constante. Si nuestro interes es la carga de enfriamiento, el ciclo es llamado refrigerador de Carnot. Si nuestro interes es la carga de calor, el ciclo es llamado Bomba de calor de Carnot.

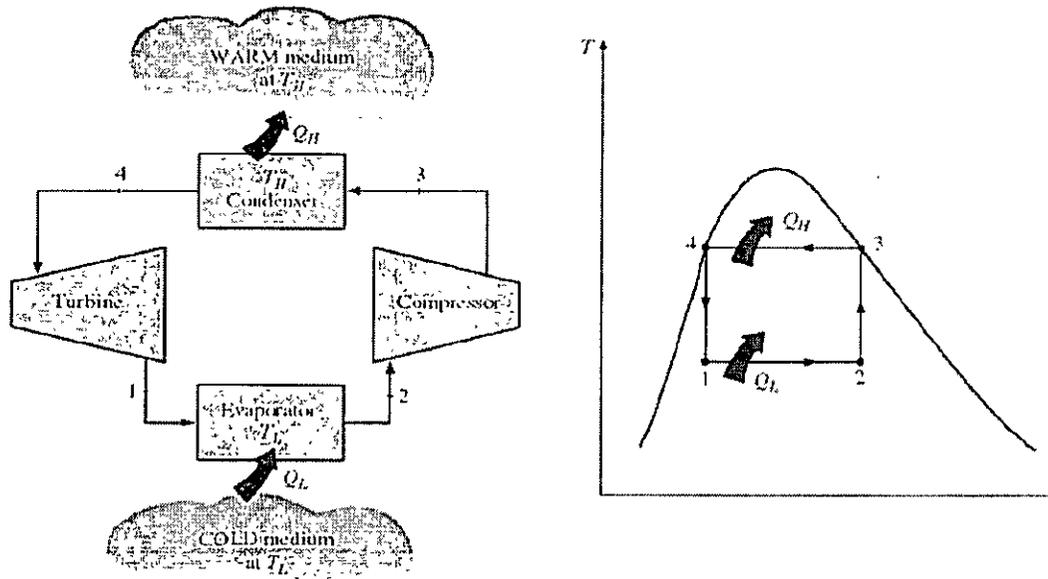
La manera de comparar los ciclos de refrigeración es el ciclo de Carnot reversible. Un refrigerador o bomba de calor operan sobre un ciclo de Carnot llamado refrigerador de Carnot o Bomba de Calor de Carnot, y sus COP son:

$$COP_R = \text{Cooling Effect/Work input} = Q_L/W_{\text{net,in}}$$

$$COP_{HP} = \text{Heating Effect/Work input} = Q_H/W_{\text{net,in}}$$

$$COP_{REF.Carnot} = \frac{q_F}{W_{\text{net,e}}} = \frac{1}{T_C/T_F - 1} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

$$COP_{BC.Carnot} = \frac{q_C}{W_{\text{net,e}}} = \frac{1}{1 - T_F/T_C} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$



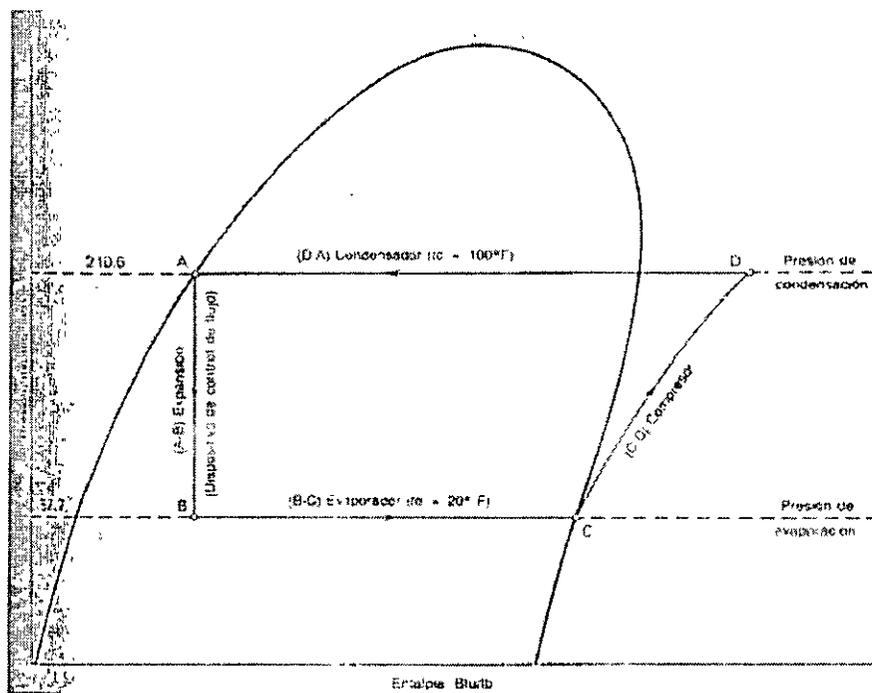
Note como una turbina es usada para el proceso de expansión entre la alta y baja temperatura. El trabajo que interactúa para el ciclo no está indicado en la figura, el trabajo producido por la turbina ayuda a alimentar algo del trabajo requerido por el compresor desde una fuente externa.

Aspectos imprácticos asociados al ciclo de Carnot invertido

- Ciclo invertido de Carnot no es un modelo realista para los ciclos de refrigeración
- Los procesos de TQ a T = cte no son difíciles de alcanzar en la práctica
- Compresión --- mejor en una sola fase (admisión: vapor saturado)
- Expansión: puede hacerse en dos fases a través de una válvula (...), pero ...
 - No se recupera el trabajo (expansión isoentálpica, o de Joule-Thomson)
 - El fluido se enfría menos para la misma ΔP

El ciclo de compresión de vapor tiene cuatro componentes; evaporador, compresor, condensador y una válvula de expansión. El ciclo de refrigeración mas utilizado es el ciclo de compresión de vapor. En un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra al compresor como un vapor saturado y es enfriado a un estado de liquido saturado en el condensador. Este es estrangulado a la presión del evaporador y vaporizado cuando absorbe calor de el espacio refrigerado.

Se supone en el ciclo ideal, así mismo, que no ocurren efectos en las tuberías entre los diferentes dispositivos. Esto es, no solamente disminuye la presión en la tubería, sino que tampoco ocurre intercambio de calor con el medio circundante. Conforme el refrigerante fluye por la tubería.



Ciclo teórico de una sola etapa de refrigeración por compresión de vapor.

Suponiendo que todos los procesos se llevan a cabo sin pérdidas de presión ni de calor (además de las especificadas), e ignorando las diferencias de energía cinética y potencial, es posible analizar el sistema como sigue:

1. Trayectoria A a B, estrangulamiento:

$$h_1 = h_2$$

2. Trayectoria B a C, evaporador (efecto de enfriamiento)

$$Q_{\text{ent}} = h_3 - h_2 = h_3 - h_1$$

3. Trayectoria C a D, compresor

$$\text{Trabajo} = h_4 - h_3$$

(Para el ciclo de refrigeración, el trabajo en el ciclo se considera positivo)

4. Trayectoria D a A, condensador (extracción de calor)

$$Q_{\text{des}} = h_4 - h_1$$

De las cantidades señaladas, se observa que la energía extraída en el condensador debe ser igual numéricamente a la ganancia de calor en el evaporador más el trabajo del compresor. Sin embargo, la capacidad de refrigeración es solo el efecto en el evaporador.

El peso del refrigerante circulado por tonelada de refrigeración puede encontrarse de manera inmediata a partir de la definición de tonelada y del calor absorbido en el evaporador:

$$\text{Peso de refrigerante / minuto} = 200 \times \text{tons} / h_3 - h_2 =$$

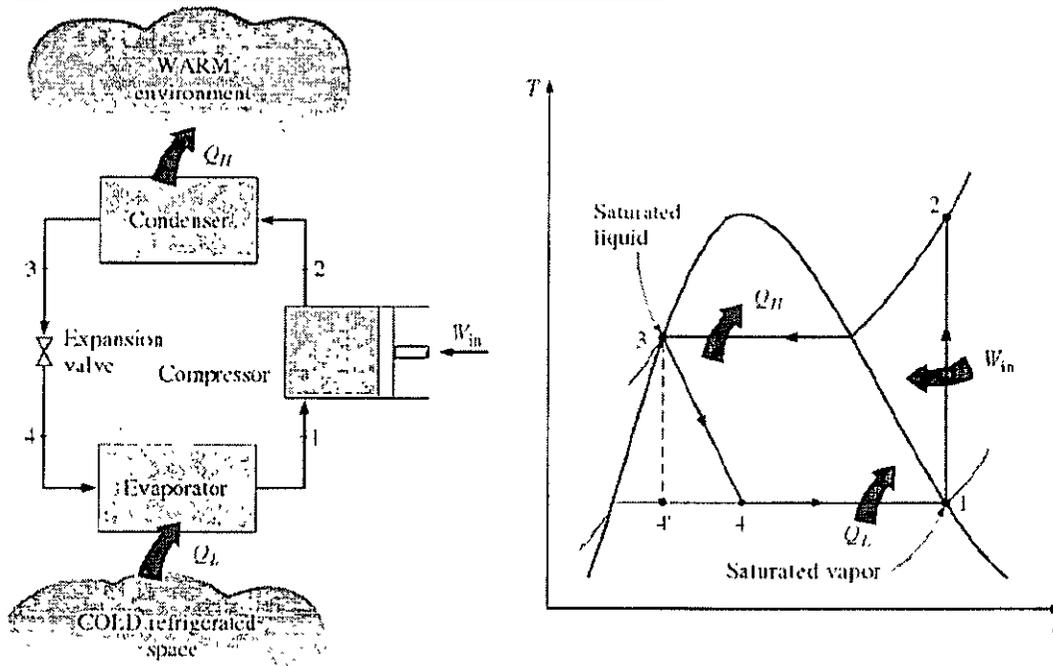
$$200 \times \text{tons} / h_3 - h_1$$

La definición del COP (en términos de este ciclo) es la relación del calor absorbido en el evaporador al trabajo neto que entra al ciclo. En unidades de calor compatibles, esto puede escribirse como:

$$\text{COP} = h_3 - h_1 / h_4 - h_3$$

Para el ciclo ideal, el trabajo por tonelada de refrigeración estará dado por:

$$\text{Caballo de potencia / tonelada} = 4.717 (h_4 - h_3 / h_3 - h_1)$$



Es preciso conocer dos propiedades independientes a fin de determinar la condición del refrigerante y a partir de este valor poder hallar cualquiera de sus otras propiedades. En ciertas circunstancias puede ser que dos propiedades no sean independientes; si así fuera, no serían suficientes para determinar la condición.

Mezclas de líquido y vapor. Calidad

A fin de determinar el punto de la condición del refrigerante cuando se encuentra en estado de saturación, es preciso conocer otra propiedad además de la presión y temperatura. Una vez que se localiza el punto en la condición de una mezcla de líquido y vapor, se pueden determinar los porcentajes de las masas de vapor y del líquido en la mezcla. El porcentaje de masa en la mezcla se llama calidad, x . la calidad se puede hallar mediante:

$$x = (h_x - h_f / h_g - h_f) * 100$$

Ejemplo.

Hallar la calidad y el porcentaje de líquido en la mezcla correspondiente a l refrigerante R-22 a una presión de 25 psia y una entalpía de 15 btu/lb.

Solución.

Primero se localiza la condición en el diagrama presión entalpía para el R-22, y se ve que se halla en la región de la mezcla de líquido y vapor. Se utiliza la ecuación anterior y se halla que la calidad es:

$$X = (15.0 - 5.3 / 102.8 - 5.3) * 100 = 10\%$$

El porcentaje de masa del líquido es por consiguiente. $100 - 10 = 90$ por ciento. Esto es, en cada libra de refrigerante 0.1 lb es vapor, y 0.9 lb es líquido.

Refrigerant 22 (Chlorodifluoromethane) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor

(c) 1997 ASHRAE Handbook, Fundamentals, Chapter 19

Ejemplo.

Un ciclo teórico de simple etapa utiliza R-134^a como refrigerante para operar con una temperatura de condensación de 90 °F y una temperatura de evaporación de 0 °F. El sistema produce 15 toneladas de refrigeración. Determinar: la calidad del refrigerante.

Solucion.

Los estados del refrigerante son obtenidos de la tabla de propiedades del refrigerante 134^a

$$X = 41.43 - 12.09 / 103.015 - 12.09 = 0.3227$$

Refrigerant 134a (1,1,1,2-Tetrafluoroethane) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor

(c) 1997 ASHRAE Handbook, Fundamentals, Chapter 19

Ejemplo

Una planta refrigeradora de amoniaco se opera entre un liquido saturado a 120 psia en la salida del condensador y vapor saturado a 15 psia en la salida del evaporador. Si se requiere que tenga una capacidad de 30 toneladas, calcular lo siguiente, con base solo en un ciclo ideal:

(termodinámica, Irving Granet. Prentice hall)

1. coeficiente de operación COP
2. trabajo de compresión, btu por libra
3. efecto refrigerante, btu por libra
4. libras por minuto de amoniaco necesarias.
5. caballos de potencia ideales por tonelada de refrigeración

Solución

A 120 psia, la temperatura de saturación correspondiente es 66 F, con referencia a la tabla de propiedades del amoniaco tenemos:

Refrigerant 717 (Ammonia) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor
(c) 1997 ASHRAE Handbook, Fundamentals, Chapter 19

$H_1 = 116.0 \text{ Btu / lb}$ (valores de la tabla de propiedades del amoniaco)

A. Alba A.

$$H2 = 116.0 \text{ Btu / lb} \quad (\text{la expansion nos da } H1 = H2)$$

$$H3 = 602.4 \text{ Btu / lb}$$

De la consideración de que $S3 = S4$, se encuentra $H4$: a 15 psia, $S3 = 1.398$; en consecuencia, por interpolación en las tablas de sobrecalentamiento a 120 psia, $T4 = 237.4 \text{ }^\circ\text{F}$ y $H4 = 733.4 \text{ Btu / lb}$.

1. $\text{COP} = 602.4 - 116.0 / 733.4 - 602.4 = 3.71$

2. El trabajo de compresión es:

$$H4 - H3 = 733.4 - 602.4 = 131.0 \text{ Btu / lb}$$

3. El efecto refrigerante es

$$H3 - H1 = 602.4 - 116.0 = 486.4 \text{ Btu / lb.}$$

4. las libras de amoniaco por minuto que circulan son:

$$m = 200 \times 30 / 602.4 - 116.0 = 12.33 \text{ lb / min}$$

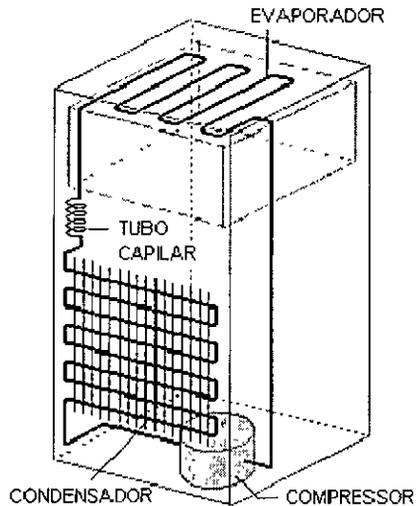
5. La potencia en caballos de potencia ideal por tonelada de refrigeración es igual a:

$$4.717 (733.4 - 602.4 / 602.4 - 116.0) = 1.27 \text{ hp/ton}$$

Se deja como ejercicio que el participante realice el mismo ejemplo con los siguientes refrigerantes R-22, R-134^a y R-404.

Componentes de un sistema de refrigeración.

Antes de continuar con la discusión sobre los ciclos de refrigeración, se verán algunos de los componentes usados en su arreglo práctico. En un refrigerador doméstico típico, el compresor por lo general está físicamente en la parte posterior, cerca de la base de la unidad. El motor y el compresor están ubicados por lo general en un solo gabinete con las conexiones eléctricas para el motor pasando por este. En tanto que esto se hace para evitar fugas de refrigerante, impone la condición de que este debe ser inerte con respecto al aislamiento. Un refrigerante común, el freón, no puede usarse con el hule natural puesto que esta clase de refrigerante actúa como solventes con ciertos tipos de materiales aislantes y barnices. Asimismo, la resistencia eléctrica del refrigerante, es la parte más importante en las unidades selladas herméticamente, como las que se usan en los refrigeradores domésticos, en los que las aspas del motor están expuestas al refrigerante. En la figura siguiente se muestra el diagrama esquemático de un sistema de refrigeración de un refrigerador doméstico.

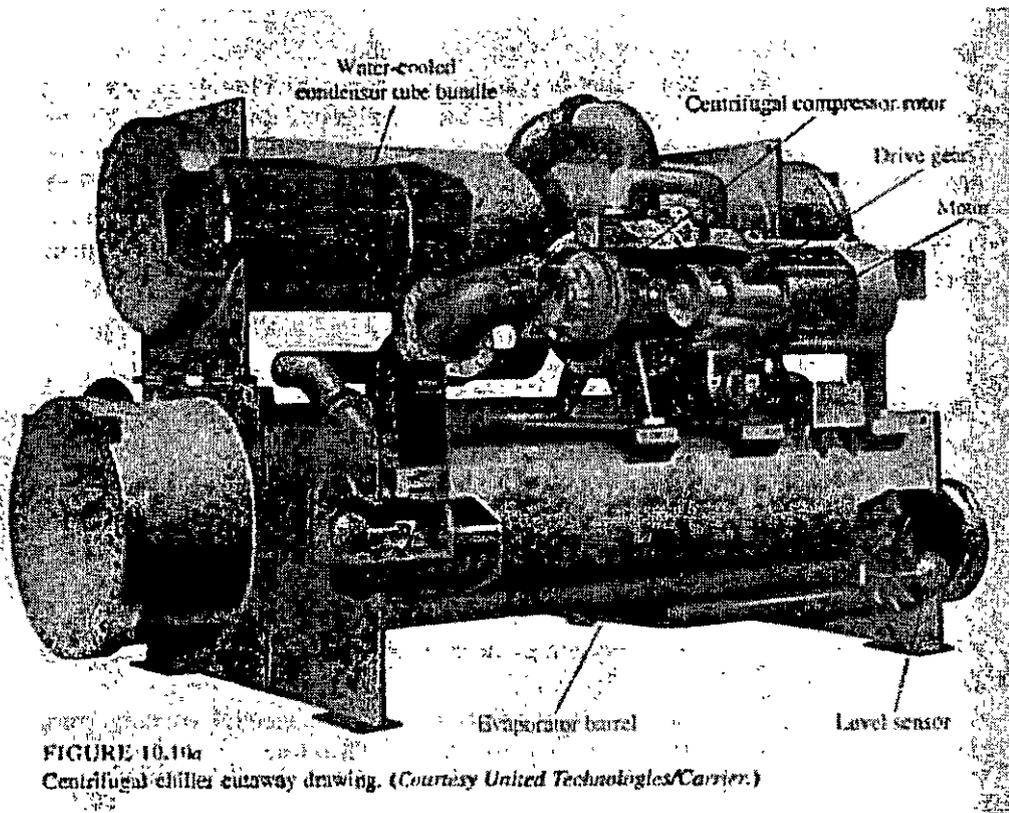


El condensador se dispone físicamente de modo que el aire del local fluya a través del condensador por convección natural. La válvula de expansión es un tubo capilar grande y el evaporador se muestra alrededor de la parte externa del compartimiento congelador dentro del refrigerador. El compresor es una unidad recíprocante, existen unidades giratorias pequeñas, eficientes y económicas para refrigeradores domésticos.

Su funcionamiento inicia cuando el refrigerante en fase de vapor entra al compresor a baja presión y temperatura. Una compresión isentrópica (idealmente) eleva la presión y temperatura a p_2 y T_2 . La temperatura de saturación correspondiente a P_2 debe ser algún valor por encima de la temperatura atmosférica, o por encima de la temperatura del agua de enfriamiento que puede usarse en el condensador. Saliendo del compresor en la condición 2, el vapor entra en el condensador donde se condensa hasta la fase líquida a alguna temperatura t_3 . Después del

condensador, el líquido entra a una válvula de expansión que separa las presiones de alta y baja presión y pasa a través de la válvula en un proceso de estrangulamiento con $h_3 = h_4$. el refrigerante entra entonces al evaporador (o compartimiento congelador) donde hierve debido a que recibe calor del refrigerador y su contenido. El vapor del evaporador entra al compresor y el ciclo vuelve a comenzar. El núcleo de cualquier sistema de refrigeración es el compresor. En tanto que los tipos de compresores son similares a los que se usan para el aire u otros gases, el compresor recíprocante de desplazamiento positivo es la unidad mas utilizada en las instalaciones industriales de refrigeración por compresión de vapor. También se usan compresores centrífugos y de desplazamiento positivo de tipo de engranes. Este ultimo tiene buenas eficiencias volumétricas, pero los compresores centrífugos por lo regular son ineficientes en tamaños pequeños, y se usan cuando el tamaño de una unidad recíprocante sería demasiado grande.

En la figura se observa un compresor centrifugo de dos etapas de grandes dimensiones. Unidades como estas se usan en sistemas de gran capacidad superiores a 75 toneladas de refrigeración. Esta unidad se usa en un sistema de aire acondicionado, donde se enfria salmuera y luego se recircula para proporcionar enfriamiento cuando se necesita. El condensador, que es enfriado por agua, se muestra en la parte superior de la figura, y el evaporador de tipo de tubos usado para el enfriamiento de la salmuera se muestra en la parte inferior izquierda de la unidad. Las maquinas de una sola unidad del tipo de las que se muestran se construyen en capacidades que oscilan entre 75 y 500 toneladas.

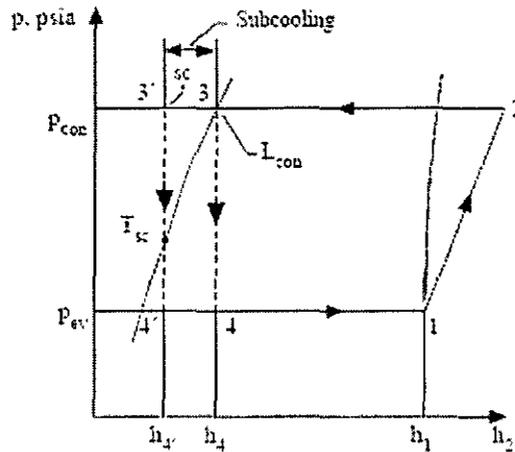


Centrifugal chiller cutaway drawing (Courtesy United Technology / Carrier)

Subenfriamiento y sobrecalentamiento.

El refrigerante líquido puede subenfriarse, ya sea en el condensador o en el intercambiador adicional de calor, el efecto de refrigeración aumenta con el subenfriamiento y que se produce menor cantidad de gas de vaporización súbita.

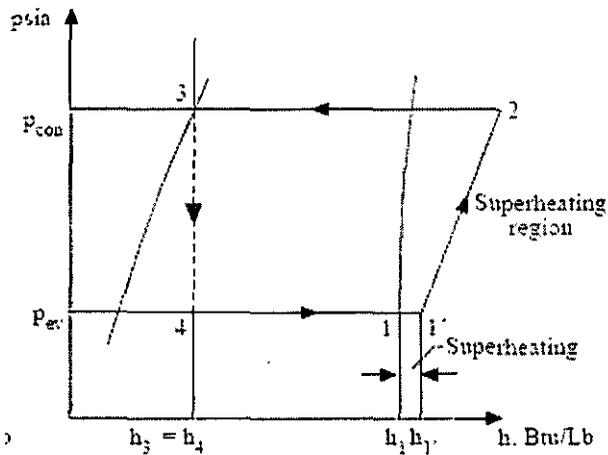
El subenfriamiento resulta en una potencia mas baja requerida por el compresor, por unidad de capacidad, y un mayor coeficiente de rendimiento. Además, también disminuye el desplazamiento requerido por el compresor.



$$q_{\text{ifsc}} = (\dot{h}_{4'} - \dot{h}_3) > (\dot{h}_4 - \dot{h}_3)$$

Desde el punto de vista de ahorro de energía, el subenfriamiento puede fácilmente reducir el consumo de energía de un 5 a un 15%. Existen diferentes maneras de alcanzar el subenfriamiento sin tener que utilizar un condensador de mayor capacidad.

En los evaporadores del tipo de expansión directa, el refrigerante está por lo regular sobrecalentado antes de salir del evaporador. Esta condición provee un buen método para controlar el flujo del refrigerante, cuando se utiliza una válvula de expansión termostática, asimismo ayuda a evitar que entre líquido al compresor, ya que esto puede ocasionar daño al compresor.



En realidad algo hay que pagar por el sobrecalentamiento del refrigerante que se efectúa en el evaporador. Es necesario aumentar la superficie del evaporador, a fin de proveer la transferencia adicional de calor, para sobrecalentar el vapor. Las temperaturas típicas de control del sobrecalentamiento varían entre 5°F y 14°F.

Ejemplo

Conservación de la energía

Se presenta un resumen de los efectos de los ciclos que dan como resultado una reducción en el consumo de energía por unidad de capacidad de refrigeración.

Operar a bajas temperaturas de condensación. Esto se puede lograr utilizando condensadores de gran capacidad y manteniendo limpias las superficies de transferencia de calor. (no se recomienda una condensación extremadamente baja)

Operar a elevadas temperaturas de evaporación, esto se puede lograr utilizando evaporadores de gran capacidad.

Seleccionar diámetros de tuberías mayores para evitar una excesiva caída de presión.

Diseñar, operar y controlar el sistema a fin de proveer un subenfriamiento óptimo.

Utilizar intercambiadores de calor para mejorar el rendimiento del sistema, previamente analizar si es factible su utilización.

Seleccionar equipos de alta eficiencia (evaporadores, condensadores, motores)

Seleccionar el refrigerante que mejor se adapte a las necesidades de enfriamiento con un mayor COP y REE

Ciclo real de una sola etapa.

Existen otros factores que también contribuyen a que el ciclo teórico se desvíe del ciclo teórico. Estos factores son las pérdidas de presión en todos los tubos de conexión que incrementan los requerimientos de potencia para el ciclo y la transferencia de calor hacia y desde diferentes componentes. La transferencia de calor generalmente es desde el sistema, en el lado de alta presión del ciclo, en cuyo caso mejora el desempeño del ciclo. Las superficies expuestas en el lado de baja presión del ciclo por lo general están a una temperatura mas baja que la temperatura del medio ambiente, y aquí la transferencia de calor generalmente degradara el desempeño del ciclo. Debe mencionarse que las superficies de transferencia de calor del condensador y del evaporador tienen perdidas de presión que también contribuyen a incrementar el requerimiento de potencia del compresor.

Los sistemas actuales operan en un estado diferente de los ciclos ideales considerados en las secciones previas en varios aspectos. Las caídas de presión ocurren en cualquier parte del sistema excepto en el proceso de compresión. La transferencia de calor ocurre entre el refrigerante y el medio ambiente en todos los componentes. El proceso de compresión real difiere sustancialmente de la compresión isentrópica. El fluido trabajando en el sistema no es una sustancia pura es una mezcla de refrigerante y aceite. Todas estas desviaciones de un ciclo teórico causan una irreversibilidad en el sistema. Cada irreversibilidad requiere potencia adicional en el compresor. Esto es utilizado para entender como estas irreversibilidades son distribuidas a través de un sistema real. En el entendido que estas ganancias pueden ser utilizadas cuando los cambios en el diseño son contemplados o las condiciones de operación son modificadas. En el siguiente ejemplo se ilustra como las

irreversibilidades pueden ser computadas en un sistema real y como estas requieren de potencia adicional en el compresor para vencerlas. Los datos de entrada han sido incluidos para facilitar los cálculos.

Ejemplo.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, UNAM.

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO EN REFRIGERACIÓN

MÓDULO III

EL CICLO DE REFRIGERACIÓN

CA 250

TEMA

COMPLEMENTO



INGENIERIA MECANICA

**EXPOSITOR: ING. ARTURO ALBA AGUILAR
DEL 28 DE MAYO AL 01 DE JUNIO DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

La bomba de calor

La bomba de calor, conocida también generalmente como unidad de ciclo reversible para calefacción y enfriamiento. Ambos nombres significan lo mismo: un sistema en el cual, el equipo de refrigeración es usado en tal forma que toma calor de una fuente, para entregarlo al espacio acondicionado cuando éste requiere calefacción, o que remueve el calor del espacio acondicionado y lo descarga fuera cuando se desea enfriamiento.

Después de la segunda Guerra Mundial, las instalaciones de aire acondicionado se multiplicaron tanto que la carga eléctrica debida al acondicionamiento del aire durante el verano sobrepasó el consumo debido a la calefacción durante el invierno. Cuando esta situación se hizo notoria, las compañías de electricidad, debido a factores económicos, comenzaron a promover activamente el uso de bombas de calor totalmente eléctricas con el objeto de equilibrar las cargas que tenían durante el verano y el invierno.

Puesto que el agua, a la temperatura, cantidad y costo apropiados no está generalmente disponible para uso en aire acondicionado y puesto que los serpentines enterrados son demasiado grandes y costosos, se ha recurrido al siguiente medio más práctico que es el aire, llegando éste a ser ahora la principal fuente de calor. El desarrollo de estos equipos fue paralelo al de los equipos enfriados por aire y las actuales bombas de calor son conocidas como unidades de aire a aire.

Ciclo de la bomba de calor de aire a aire.

Primero, si recordamos el ciclo de enfriamiento convencional, encontramos que el calor es absorbido por el evaporador interno y descargado por el condensador exterior enfriado por aire. Si se pudiera físicamente reversar los componentes y absorber calor del aire exterior y, por

medio del refrigerante, descargarlo en el espacio interior, entonces se obtendría un sistema de calefacción. Esto es exactamente lo que hace la bomba de calor con su ciclo reversible, excepto que realmente los serpentines del evaporador y condensador no son intercambiados de sitio. Esto se logra por medio de una válvula reversible, en la cual se puede controlar la dirección del flujo del refrigerante para que produzca frío o calor dentro del área acondicionada. Así pues, el ciclo de la bomba de calor queda conformado como lo ilustra la figura 1.

De ahora en adelante nos referiremos a los serpentines únicamente como el serpentín interior y el exterior. La válvula reversible dirige la descarga y la succión del gas como lo indican las flechas. Válvulas cheque se instalan a la salida de cada serpentín para ayudar a controlar el flujo. Siga cuidadosamente las flechas que indican el flujo durante el enfriamiento. El gas de la descarga entra en el serpentín exterior de modo usual. Este gas es condensado y fluye hacia la derecha a través de la válvula check No.1 abierta, puesto que no es posible forzar refrigerante líquido a alta temperatura a través de la válvula de expansión en sentido inverso al normal. La válvula check No. 2 está cerrada, de modo que el refrigerante líquido pasa por la válvula de expansión interior (TVX o tubo capilar) y se evapora del modo usual. El gas de succión sale por la parte alta del serpentín interior y es llevado hasta el compresor a través de la válvula reversible.

Durante la calefacción, el sistema se invierte. El gas descargado por el compresor va hasta el serpentín interior donde entrega su calor y es condensado. La válvula check No. 2, abierta al flujo, hacia la izquierda. La válvula check No.1 está ahora cerrada al flujo y el líquido se ve obligado a pasar a través de la válvula de expansión hasta el serpentín exterior donde es evaporado absorbiendo el calor.

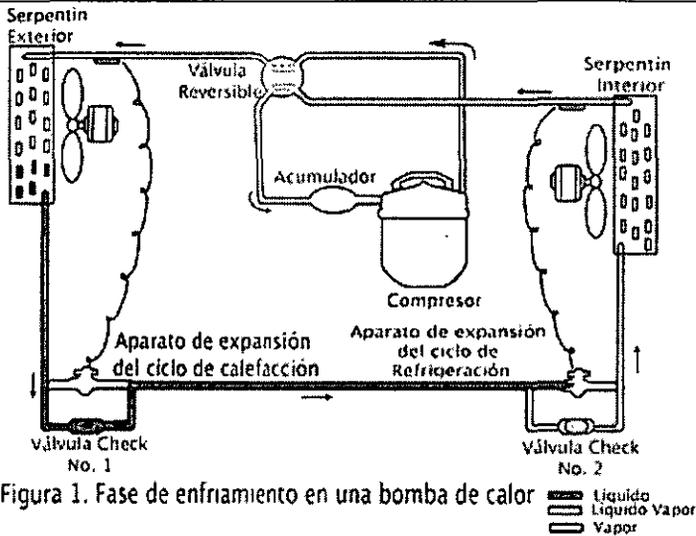


Figura 1. Fase de enfriamiento en una bomba de calor

El elemento adicional de mayor importancia que encontramos en una bomba de calor es el acumulador de la línea de succión, el cual protege el compresor de inundaciones con refrigerante líquido durante la inversión del ciclo (de calefacción a enfriamiento y viceversa) y durante el ciclo de descongelamiento. El volumen físico de este elemento depende de la capacidad de la unidad. Su forma es una función del fabricante.

La explicación anterior ilustra cómo opera un sistema de bomba de calor. En los equipos de los distintos fabricantes hay algunas variaciones en el diseño del sistema y en los componentes, pero el resultado final es esencialmente el mismo. El técnico del aire acondicionado está generalmente mejor familiarizado con la marca de bomba de calor que instala y la cual presta servicio, llegando a conocer sus especificaciones y características operacionales a fondo.

Una válvula reversible típica internamente está compuesta de dos pistones que conforman un carrito que desplaza dentro de un cilindro con dos aberturas. La ilustración Fig. 2-A y Fig. 2-B muestra las fases de calefacción y enfriamiento.

La válvula de cuatro vías reversible es accionada por una válvula solenoide que usa el gas a alta presión del compresor para mover el carrito hacia la izquierda o derecha dependiendo de qué fase de la operación se necesite.

El vástago de la válvula solenoide cambia la línea de desfogue de acuerdo con el modo de operación. Las líneas blancas delgadas en los pistones representan orificios de diámetro muy reducido a través de los cuales el gas a alta presión puede pasar lentamente haciendo el accionamiento de la válvula mucho más suave y silencioso.

En el momento del cambio de una fase a otra, una variación demasiado rápida en las presiones podría resultar en excesivo ruido y sacudidas del sistema.

Cuando la bomba de calor está operando en el ciclo de calefacción y el refrigerante se está evaporando en el serpentín exterior, la temperatura en la superficie del serpentín puede caer por debajo de los 0° C (32° F) y comenzará a aparecer escarcha sobre éste. Si se permite que el congelamiento continúe, aumentará gradualmente la capa de hielo hasta que el flujo del aire a través del serpentín quede obstruido.

Esto disminuirá la transferencia de calor y la eficiencia del sistema se verá seriamente afectada. Así pues, se hacen necesarios periódicos ciclos de descongelamiento para derretir el hielo.

El proceso de descongelamiento consiste simplemente en invertir el flujo del gas caliente y llevarlo hasta el serpentín exterior por un periodo lo suficientemente largo para derretir el hielo, el ventilador exterior permanece "apagado" durante este tiempo.

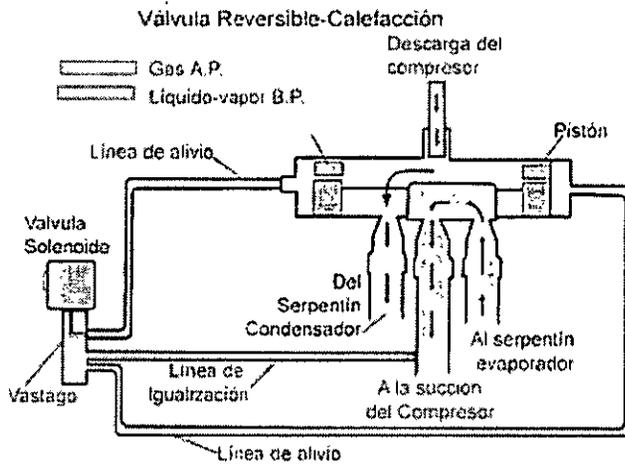


Figura 2b Válvula reversible-calefacción

No se está produciendo calefacción dentro del espacio acondicionado (realmente el serpentín exterior está enfriando) de modo que es necesario proveer calor suplementario usando las resistencias eléctricas instaladas en la sección interior.

El arranque y parada del ciclo de descongelamiento se logra a través de varias técnicas.

Un método para iniciar automáticamente el ciclo de descongelamiento es midiendo la caída de presión del aire a través del serpentín exterior.

A medida que el hielo aumenta sobre el serpentín, se hace más difícil para el aire encontrar un paso a través del serpentín haciendo que la presión en el lado de la salida disminuya y que la presión en el lado de la entrada aumente.

Cuando la diferencia entre las presiones alcanza un valor predeterminado en un control, la válvula reversible será activada.

Otro medio muy popular de iniciar el ciclo de

descongelamiento usa una combinación de tiempo y temperatura. El mecanismo de un reloj se calibra para invertir el flujo del refrigerante cada ciertos intervalos predeterminados.

Sin embargo, si la temperatura del serpentín está por encima de los 0°C (32°F), el ciclo de descongelamiento no podrá arrancar.

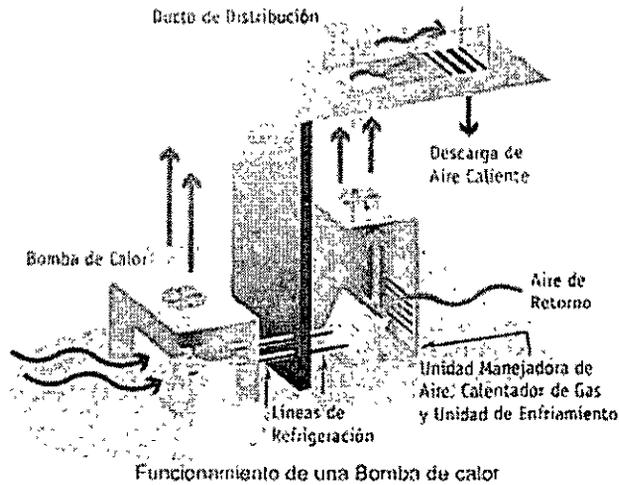
El reloj continúa a través de todo su ciclo y al siguiente punto predeterminado, la temperatura es verificada de nuevo y el ciclo de descongelamiento arranca solamente si las condiciones de temperatura en el exterior son suficientemente bajas como para que se forme hielo.

Ahora veamos cómo el ciclo de descongelamiento puede ser detenido. Varios métodos diferentes han sido usados; uno basado en tiempo, otro basado en temperatura y un tercero basado en presión.

Un mecanismo temporizador puede ser activado cuando el ciclo de descongelamiento arranca de modo que se mantenga activo por un determinado periodo de tiempo. Al final de este periodo de tiempo la válvula reversible regresa de nuevo al ciclo de calefacción.

El periodo de tiempo puede ser ajustado dependiendo de la severidad del invierno y de la cantidad estimada de hielo que podría formarse.

Es algunas veces difícil calibrar el temporizador de modo que cubra todas las condiciones de congelamiento, manteniendo siempre el ciclo de descongelamiento dentro de unos límites razonables.



Un método más positivo de terminar el ciclo de descongelamiento es el de temperatura. Mientras el hielo se está derritiendo, la temperatura en el serpentín exterior permanecerá bastante constante, alrededor de los 0°C (32°F).

Cuando todo el hielo ha desaparecido, la temperatura comenzará a subir. Este cambio de temperatura puede ser usado para invertir de nuevo el flujo de refrigerante. Si se usa un dispositivo térmico para iniciar el descongelamiento, el mismo bulbo puede también ser usado indicar el inicio del ciclo de congelamiento.

La presión del refrigerante por el serpentín exterior puede ser también usada para terminar el ciclo de descongelamiento.

Lo mismo que la temperatura, la presión del refrigerante también permanecerá muy constante mientras el proceso de descongelamiento se está llevando a cabo.

Cuando todo el hielo ha desaparecido, la presión del refrigerante dentro del serpentín comenzará a subir y este

cambio puede ser usado para indicarle a la válvula de cuatro vías que es tiempo de cambiar de nuevo flujo.

El diferencial de presión del aire como medio para terminar el ciclo de descongelamiento es, por supuesto, usado en combinación con el control de presión de aire utilizado para iniciar el ciclo.

Cuando la obstrucción es removida, el control indicará a la válvula reversible que puede retornar a la fase de calefacción.

Refrigeración por absorción.

A partir de este principio es posible concebir una máquina en la que se produce una evaporación con la consiguiente absorción de calor, que permite el enfriamiento de un fluido secundario en el intercambiador de calor que actúa como evaporador, para acto seguido recuperar el vapor producido disolviendo una solución salina o incorporándolo a una masa líquida. El resto de componentes e intercambiadores de calor que configuran una planta frigorífica de Absorción, se utilizan para transportar el vapor absorbido y regenerar el líquido correspondiente para que la evaporación se produzca de una manera continua.

En los ciclos de absorción hablamos siempre de agente absorbente, designando así a la sustancia que absorbe los vapores, y de agente refrigerante, o agente frigorífico, a la sustancia que se evapora y da lugar a una producción frigorífica aprovechable. Serían absorbentes el agua y la solución de Bromuro de Litio, y refrigerantes el Amoniaco y el agua destilada, en los ciclos de absorción Agua-Amoniaco y Bromuro de Litio-Agua, respectivamente.

Para conseguir una mejor comprensión del funcionamiento de un ciclo de absorción, haremos una comparación entre este y un ciclo de refrigeración por compresión mecánica, de uso más extendido y, por tanto más conocido a todos los niveles técnicos. En un ciclo de compresión mecánica, los vapores del agente refrigerante (como debe ser denominado) que se producen en el evaporador de la máquina dando lugar a la producción frigorífica, son aspirados por un compresor que ejerce las funciones de transportar el fluido y de elevar su nivel de entalpía. El vapor comprimido a alta presión y con un elevado nivel térmico se entrega a un intercambiador de calor, el condensador, para que ceda su energía a otro fluido, que no es utilizable para la producción frigorífica, y

cambie de estado, pasando a ser líquido a alta presión y temperatura, y por lo tanto tampoco utilizable para la producción frigorífica. Este líquido relativamente caliente se fuerza a pasar a través de un dispositivo en el que deja parte de la energía que contiene, por fricción mecánica fundamentalmente, y a partir del cual entra en una zona del circuito frigorífico en la que la presión se mantiene sensiblemente mas baja, debido a que el compresor está aspirando de ella, que la presión de saturación que correspondería en el equilibrio a la temperatura a la que se encuentra el agente frigorígeno en estado líquido. Este desequilibrio entre las presiones y temperaturas de saturación y las reales a las que el refrigerante se encuentra, origina la evaporación parcial del líquido, que toma el calor latente de cambio de estado de la masa del propio líquido, enfriándola hasta la temperatura de saturación que corresponde a la presión a la que se encuentra, punto en el que la evaporación se interrumpe. El refrigerante en estado líquido a baja temperatura entra en el evaporador, donde se evaporará, cerrando así el ciclo frigorífico.

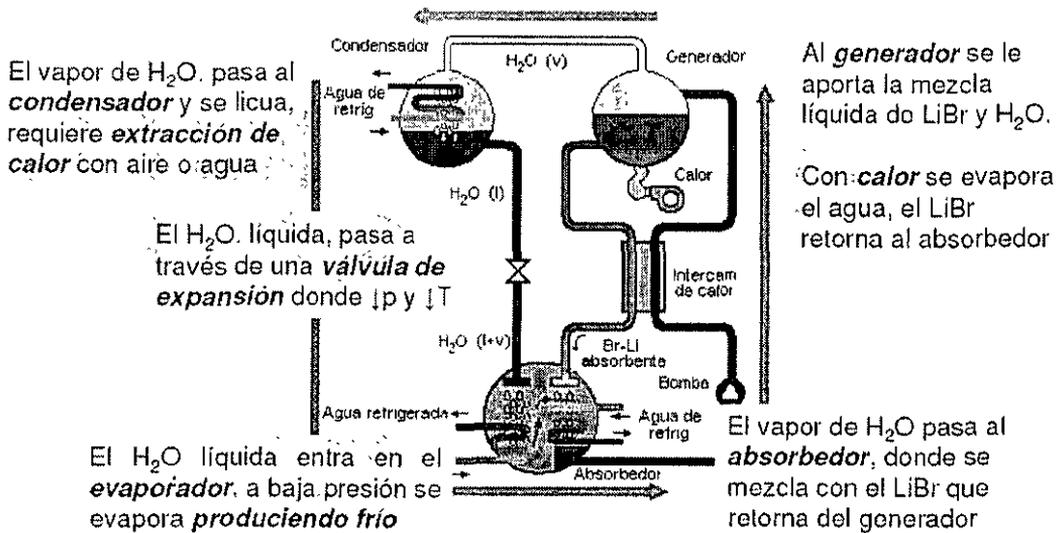
En la máquina de absorción se produce un proceso similar: El refrigerante, agua o amoniaco, se evapora en el evaporador tomando el calor de cambio de estado del fluido que circula por el interior del haz tubular de este intercambiador. Los vapores producidos se absorben por el absorbente, agua o solución de bromuro de litio, en un proceso de disolución endotérmico que requiere de refrigeración externa para que la solución se mantenga en condiciones de temperatura correctas y no aumente la presión en la cámara en la que se produce la absorción y que se denomina Absorbedor. En este circuito de refrigeración externa se utilizan normalmente torres de refrigeración de agua de tipo abierto o cerrado.

El agua enfriada en la torre se hace circular a través del interior del haz tubular de otro intercambiador que se encuentra situado en el interior de la cámara del absorbedor

y sobre el que se rocía el absorbente para facilitar el proceso de la absorción. La masa de absorbente conteniendo el refrigerante absorbido se transporta, mediante bombeo, hasta otro intercambiador de calor cuya función es separar el refrigerante del absorbente, por destilación del primero. Este intercambiador de calor se denomina Concentrador o Generador y es de tipo inundado. Por su haz tubular se hace circular el fluido caliente, normalmente agua o vapor de agua, que constituye la fuente principal de energía para el funcionamiento del ciclo de absorción, y que procede como efluente de cualquier tipo de proceso en el que se genere calor residual. En el concentrador se produce la ebullición del refrigerante, que se separa del absorbente y que como consecuencia aumenta su concentración, en el caso de solución salina, o su pureza cuando se trata de agua, para que pueda ser utilizado de nuevo en el proceso de absorción. El FLUJO de absorbente vuelve al absorbedor siguiendo un camino mas o menos diferente según cada tipo de máquina, mientras que el flujo de vapores del refrigerante destilado en el concentrador pasa, por simple diferencia de presión, a otro intercambiador de calor por el interior de cuyo haz tubular circula agua procedente también de la torre de refrigeración, y que se denomina condensador porque alrededor de su haz tubular se produce la condensación de los vapores del agente frigorífico para volver al estado líquido. El líquido obtenido en el condensador se canaliza hacia la cámara de evaporador, por gravedad y por diferencia de presión, ya que esta se encuentra a una presión inferior a la de la cámara del condensador. Cuando el líquido llega a la cámara del evaporador sufre un fenómeno idéntico al comentado en la descripción hecha del ciclo de compresión mecánica, y se evapora parcialmente, llevando la temperatura de la masa del líquido a la temperatura de saturación que corresponde a la presión en la que la cámara del evaporador se encuentra. De esta forma, el líquido frío está en condiciones de tomar calor del fluido que circula por el interior del haz tubular del

evaporador, hasta evaporarse, cerrando así su ciclo. Si comparamos ambos ciclos, comprenderemos que en el de absorción los intercambiadores de calor del Absorbedor y del Condensador, junto con la bomba o bombas que hacen la función de transporte del absorbente, equivalen a su trabajo al compresor del ciclo de compresión mecánica. Mientras que en el evaporador, condensador y dispositivo de expansión de las máquinas de absorción se desarrollan procesos similares, por no decir idénticos, a los que tienen lugar en sus homónimos del ciclo de compresión mecánica.

Sería válido referirse al Concentrador y Condensador de la máquina de absorción como Sector de Alta Presión, y al Absorbedor y Evaporador como Sector de Baja Presión, siguiendo la similitud con el ciclo de compresión mecánica.



Consideraciones Sobre Operación Y Mantenimiento

Uno de los rasgos característicos de la maquinaria frigorífica de absorción ha sido siempre su hermeticidad y dificultad de comprensión para los operadores. Por principio, la necesidad de confinar sustancias de cierto riesgo como el Amoniaco, y de mantener presiones relativas muy altas en su interior, para conseguir la evaporación de refrigerantes, tales como el agua, a temperaturas lo suficientemente bajas para hacerlas utilizables en procesos de refrigeración; recordemos que para que el agua se evapore a 5°C se requiere una presión absoluta de 870 Pa; condicionan un diseño mecánico muy robusto y hermético, que dificulta en buena medida la interpretación desde el exterior de lo que esta sucediendo en el interior de la máquina, durante su funcionamiento. Por otra parte, los técnicos frigoristas que se encuentran por primera vez delante de una planta enfriadora por ciclo de absorción, por muy expertos que sean en el servicio de maquinaria de compresión mecánica de vapor, tardan bastante tiempo en comprender que la mayoría de los criterios de servicio y las "reglas del arte" válidas en la refrigeración "convencional", no son de aplicación inmediata a las máquinas de absorción. El comportamiento de los fluidos interiores de la máquina de absorción, refrigerante y absorbente, durante el proceso de funcionamiento del ciclo está directamente condicionado por la evolución energética de los fluidos exteriores a la máquina; agua a enfriar en el evaporador, agua de la torre de recuperación, y agua caliente o vapor aportado al concentrador. El equilibrio energético entre todos los intercambiadores de calor de la máquina es el que condiciona la estabilidad del ciclo. A diferencia de cómo se comporta un ciclo de compresión mecánica en el que el trabajo del compresor es determinante, en un ciclo de absorción el equilibrio se consigue a partir de efectos puramente termodinámicos. Esto también hace más compleja la comprensión del comportamiento de la máquina para los operadores, ya que

esta se adapta en cada instante a las condiciones cambiantes de los circuitos exteriores, buscando el equilibrio, como un ser vivo se adapta a las condiciones del medio que le rodea. Los americanos llaman a la máquina de absorción "the living machine". Además, la gran inercia térmica de las máquinas de absorción para adaptarse a las variaciones externas, debido fundamentalmente a su volumen y a las cantidades importantes de absorbente y refrigerante que contienen, son también inconvenientes para la buena comprensión de su respuesta en unas determinadas condiciones de estado. Desde el punto de vista de su operación y mantenimiento, las máquinas de absorción requieren intervenciones específicas que no son de aplicación en otro tipo de circuitos frigoríficos. Por ejemplo: Es preciso efectuar mediciones periódicas del estado de pureza del agua y de las soluciones salinas, mediante la extracción de muestras y análisis de las mismas; el conocimiento de los niveles de concentración en las soluciones es imprescindible para determinar si el rendimiento instantáneo de un determinado equipo es o no correcto; la medición del nivel de vacío interior en una máquina es fundamental para comprender si la producción frigorífica se está llevando a cabo correctamente, etc. En el servicio de las máquinas de absorción se utilizan útiles e instrumentos tales como bombas de trasiego, densímetros, vacuómetros y aditivos químicos que se aplican en otros equipos de refrigeración. Sin embargo no se utilizan manómetros frigoríficos que son de uso común en los circuitos de compresión mecánica⁵.

Interés energético

En todo proceso de definición de las posibles soluciones a un determinado problema de aprovechamiento energético, las consideraciones que más fuertemente influyen en la decisión

de los proyectistas y de las propiedades son de índole económica, fundamentalmente, aunque hoy en día las consideraciones de impacto ambiental tienen también una importancia prioritaria. Las relaciones entre el coste de la inversión inicial requerida y el beneficio esperado y entre los costes y resultados de explotación previstos, en resumidas cuentas el "cash flow" del proyecto, son determinantes en la elección de la solución idónea. A partir de estas premisas, es preciso analizar en detalle todas las posibles soluciones teniendo en consideración no solo el coste de los equipos a instalar, sino también el coste de las energías a consumir, con una proyección de futuro sobre la evolución que, previsiblemente, puedan experimentar estos últimos durante el periodo que se establezca como plazo de amortización de la instalación a realizar. Este criterio, normalmente, reduce de forma drástica el abanico de posibles opciones. El coste inicial de una planta frigorífica de absorción resulta, en la mayoría de los casos, superior al de un equipo de compresión mecánica de la misma capacidad. La razón para esta diferencia está en la muy superior cantidad de materiales metálicos que son necesarios para la fabricación de los intercambiadores de calor, en equipos que se basan en procesos termodinámicos sin prácticamente aportación del equivalente térmico del trabajo mecánico. Sin embargo, cuando se analizan los costes de explotación a partir del valor de las energías consumibles, la balanza puede desplazarse a favor de los equipos de absorción, si se dan las condiciones de partida necesarias⁶. **C.O.P.** El concepto de C.O.P. (Coefficient of Performance) en refrigeración, es sinónimo de Eficiencia Energética en el evaporador. C.O.P. se define "oficialmente" como: "La cantidad de refrigeración obtenida de una máquina dividida entre la cantidad de energía que se requiere aportar para conseguir esta refrigeración (ASHRAE 1993)"⁷. En este cómputo no se incluyen los consumos auxiliares de energía eléctrica necesarios para el funcionamiento de bombas y ventiladores. Los C.O.P.s esperables de los ciclos de

absorción son también muy bajos comparados con los de los ciclos de compresión mecánica. En máquinas de absorción de una etapa, con Bromuro de Litio, no se superan C.O.P.s de 0,7, en máquinas de doble etapa se alcanzan valores que pueden ser hasta 1,5 veces a los esperables en una etapa, es decir de hasta 1,2, esto significa que las máquinas de doble etapa aprovechan mejor la energía que las de etapa simple. En ciclos de baja temperatura Amoniaco/ Agua se consiguen valores de C.O.P. de 0,5 y pueden alcanzarse máximos de 0,8. Por el contrario en equipos de compresión mecánica de gran cantidad, con compresores centrífugos y de tornillo, se consiguen en la actualidad rendimientos frigoríficos entre 4,5 y 5,5 kW/kW (C.O.P.s en el evaporador de 4,5 a 5,5). A igualdad de costes de las energías consumibles, estas diferencias tan espectaculares habrían convertido a las máquinas de absorción, hace mucho tiempo, en piezas de museo o "curiosidades tecnológicas". ¿Cuál puede ser, entonces, la razón para que los ciclos de absorción sigan teniendo actualmente una aplicación práctica?. La respuesta es bastante sencilla: El coste de producir el trabajo mecánico necesario para obtener un kW de refrigeración por ciclo de compresión mecánica de vapor es, normalmente, superior al coste necesario para recuperar la cantidad de calor a aplicar para obtener el mismo kW en un ciclo de absorción. El coste de la energía básica es el único factor que determina la posible competitividad de los sistemas de absorción frente a los de compresión mecánica. Por ejemplo: Si comparamos un sistema de refrigeración por compresión con un C.O.P. esperable de 5,5, y un sistema de absorción de doble etapa con un C.O.P. de 1, en una aplicación en la que se dispone de una fuente de calor recuperable cuyo coste por kW recuperado es de 1 unidad mientras que el coste de la energía eléctrica necesaria para hacer funcionar las máquinas de compresión es de 6 unidades, será evidente el interés de utilizar el sistema de absorción, simplemente a partir de los costes de las energías, sin tener en consideración otras posibles

ventajas. Este es un análisis demasiado simplificado, ya que no se han tenido en consideración los costes energéticos que implica el funcionamiento de las torres de recuperación, las bombas de agua de torre, ni las bombas de agua fría. Un estudio más completo nos llevaría a la conclusión de que, teniendo en cuenta todos los consumos de todo tipo de energías en una aplicación dada, el coste de la energía eléctrica debería ser de 8 a 9 veces superior al de la energía térmica recuperada por hacer que la opción por absorción fuera competitiva con la de compresión mecánica. Lo que es evidente es que siempre que exista la posibilidad de utilizar energías térmicas desechables, gratuitas, o de muy bajo coste, procedentes de energías renovables, o efluentes de procesos industriales o de sistemas de cogeneración, la aplicación de sistemas de absorción para la producción frigorífica será competitiva e interesante (*Application Guide for absorption cooling/refrigeration using recovered heat ASHRAE, 1995*) También es preciso citar que aún existen lugares en los que la disponibilidad de energía eléctrica para grandes potencias no está garantizada, o bien implica un coste muy elevado, y sin embargo existen combustibles fósiles accesibles, gas natural por ejemplo, a un precio aceptable. Esta es otra posibilidad de aplicación de los sistemas de absorción, utilizando en estos casos máquinas con combustión directa que consumen un combustible líquido o gaseoso directamente para la producción de calor y frío de forma simultánea o alternativa, con C.O.P.s que pueden alcanzar valores de 1,5. Así mismo puede resultar interesante la aplicación de sistemas «híbridos», que se basan en la instalación de máquinas de absorción en serie, o en paralelo, con máquinas de compresión mecánica sobre el mismo circuito de agua enfriada. En estos sistemas, las máquinas de compresión se utilizan para hacer frente a las cargas térmicas básicas, o en horas valle, mientras que las máquinas de absorción se utilizan exclusivamente en horas punta o para combatir las demandas punta. Esto permite dimensionar las máquinas que consumen energía mas cara

para condiciones de menor carga, lo que repercute favorablemente en los costes de explotación de la instalación.

Reducción De Consumos Primarios

De todo lo comentado hasta ahora puede extraerse otra conclusión importante; Teniendo en cuenta que los sistemas de absorción son tanto más interesantes, económicamente hablando, cuanto más barata es la energía térmica disponible para el accionamiento de las máquinas, está claro que este tipo de equipos son especialmente útiles para recuperar calor de deshecho, y esta particularidad permite enfocar el problema de aprovechamiento energético desde otro punto de vista. Los sistemas de absorción no solo hacen posible la utilización de energías térmicas que serian evacuadas a la atmósfera de no utilizarse estos sistemas para su recuperación y aprovechamiento, sino que además, al mismo tiempo, evitan el consumo de energías más caras, fósiles o eléctricas, para su utilización en la producción frigorífica. Es decir, de alguna manera, dan lugar a un doble ahorro de energía; uno por la recuperación de energías desechables y otro por la reducción de consumos primarios en la producción de energía eléctrica.

Impacto Ambiental

Por ultimo, pero no por menos importante, vamos a comentar las peculiaridades de los equipos de refrigeración por absorción en lo relativo a la incidencia de su utilización sobre el medio ambiente. Me centraré en el comentario de los ciclos Agua-Bromuro de Litio, cuya influencia medioambiental considero menos conocida, ya que los ciclos Amoniaco-Agua están mas condicionados en su efecto medioambiental por la presencia del Amoniaco como refrigerante, y su divulgación ha sido más amplia por esta

razón, al ser este agente frigorífico plenamente ecológico, sobre todo en lo relativo a su ODP (Potencial de Destrucción de Ozono) y GWP (Efecto Invernadero). Los aspectos de impacto indirecto, en función de la contaminación originada en la producción de energía eléctrica, y de TEI (Impacto Ambiental Global), son prácticamente comunes a ambos tipos de ciclos y están en relación directa con los COPs de cada máquina, para cada aplicación concreta, por lo que serán válidas para el ciclo Amoniaco-Agua las consideraciones que se harán sobre los ciclos Agua-Bromuro de Litio.

Absorción Versus Compresión Mecánica.

Dejando a un lado el impacto medioambiental de los agentes frigoríficos, que se tratará en el apartado siguiente, entre las máquinas frigoríficas de absorción y las de compresión mecánica de vapor, existen diferencias muy significativas en cuanto a la influencia de su utilización sobre el medio ambiente.

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

ODP (Potencial de destrucción de Ozono).

GWP (Potencial de calentamiento global-Efecto Invernadero)

Consumo de los equipos (COP).

Vida atmosférica.

Carga de los equipos (Refrigerante).

Emisiones de los equipos.

De todos estos parámetros el de mayor importancia, cuando nos referimos a la maquinaria frigorífica, resulta ser el consumo de los equipos, englobando tanto los consumos directos de energía de cada máquina como los de energías primarias y fósiles necesarios para la producción de la energía eléctrica que después se va a consumir en ella, e incluyendo las emisiones de gases invernadero (CO₂, fundamentalmente) que van aparejadas con la producción de esta energía. La Agencia Internacional del Medio Ambiente ha determinado que el 98% del TEI de una planta frigorífica se debe a la emisión de gases invernadero que se originan en la producción de la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.

Solo el 2% restante se debe a las emisiones originadas por la propia máquina.

Si consideramos ahora que el consumo eléctrico de una planta de absorción es, por término medio, un 7% del correspondiente a un equipo de compresión mecánica, y que la energía térmica que consume, salvo en las aplicaciones de combustión directa, procede como efluente de un proceso, es decir que su impacto medioambiental se debe a otras necesidades ajenas a las de la producción frigorífica, concluiremos que el TEI de una planta de absorción es tan solo el 7,15% respecto al equipo de compresión mecánica equivalente. Este valor se reduce hasta el 7% si tenemos en cuenta que un equipo de absorción no origina emisiones propias, ya que su interior, por principio, se encuentra en depresión frente a la atmósfera, y que aun en el supuesto de que por una avería se produjera algún vertido o emisión al exterior de sus fluidos interiores, esto no tendría ningún efecto contaminante para el medio, dadas las características de estas sustancias. En equipos que funcionan con combustión directa, el efecto de las emisiones propias se acentúa, no por lo que se refiere a las emisiones indirectas que se originan en la producción de energía eléctrica que

supondrían un porcentaje equivalente al comentado para equipos actuados por vapor o agua caliente, sino por la emisión de los productos de la combustión que se generan en la máquina. En este sentido, considerando un COP medio de 1 en la producción frigorífica, y un rendimiento en la combustión de un 90%. con gas natural, alcanzaríamos un valor de TEI prácticamente idéntico al que correspondería a un equipo de compresión de la misma capacidad frigorífica accionado eléctricamente y con un COP de 4,5. Esto sin tener en cuenta los efectos debidos a los agentes frigoríficos, que en caso de la absorción serían nulos.

Refrigerantes

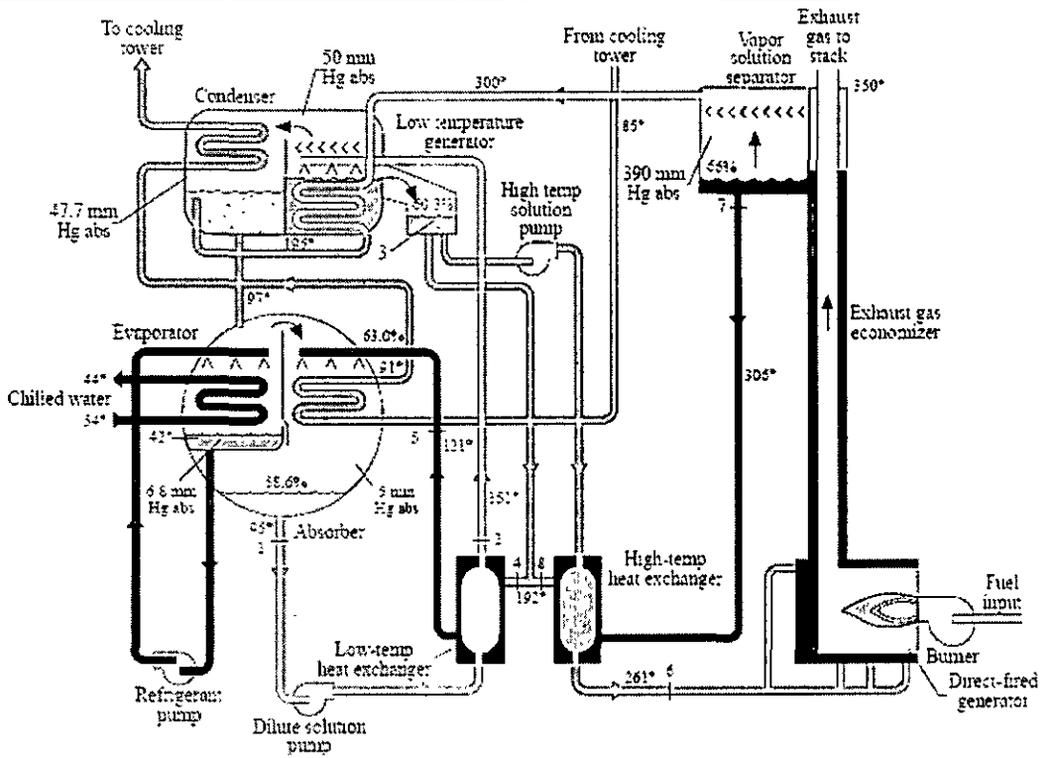
En lo que a agentes refrigerantes se refiere, la balanza se inclina favorablemente a favor de la utilización de ciclos de absorción frente a los de compresión mecánica para la producción de refrigeración. Desde el punto de vista medioambiental el interés de los primeros es evidente, por las siguientes razones: En los ciclos Agua-Bromuro de Litio el refrigerante que se utiliza R-718 (agua destilada), y el absorbente es una solución de Bromuro de Litio. En los ciclos Amoniaco-Agua se utiliza R-717(Amoniaco) como refrigerante y agua destilada como absorbente.

Las tres sustancias tienen un comportamiento muy favorable con el medio ambiente, como se resume en la tabla siguiente, si bien se precisan precauciones especiales para la manipulación y mantenimiento de los equipos que trabajan con Amoniaco, dada la peligrosidad de esta sustancia para el ser humano, sobre la que no es preciso abundar ya que es sobradamente conocida. Por lo que respecta al agua, solo cabe señalar la necesidad de controlar su pureza cuando se emplea como refrigerante, más por lo que puede afectar al rendimiento de los equipos que por sus efectos sobre las personas y el medio ambiente para los que es completamente inocua. La sal de Bromuro de Litio es, así

mismo inocua, aunque en solución acuosa tiene efectos detergentes bastante acusados por lo que no debe ser ingerida y conviene ser manipulada con la precaución necesaria para evitar derrames que pueden decolorar los suelos de madera y otros materiales orgánicos. No se requieren mas prevenciones.

Aprovechamientos Alternativos

Por último no queremos dejar de comentar las posibilidades de los equipos de absorción para ser utilizados para la refrigeración y climatización en aplicaciones en las que se dispone de fuentes alternativas de energía. Energías no convencionales como la Geotérmica, la Biomasa y la Solar Térmica pueden ser empleadas como fuente de aporte energético a los concentradores de plantas de absorción de simple efecto, para valores de temperatura de agua comprendidos entre 80 y 130°C, bien es verdad que con COPs bastante bajos, alrededor de 0,5, pero con la ventaja que supone la independencia de fuentes convencionales de energía y, sobre todo, el ahorro de combustibles fósiles y la reducción del impacto ambiental que su uso lleva aparejado.



Ciclo de refrigeración por gas

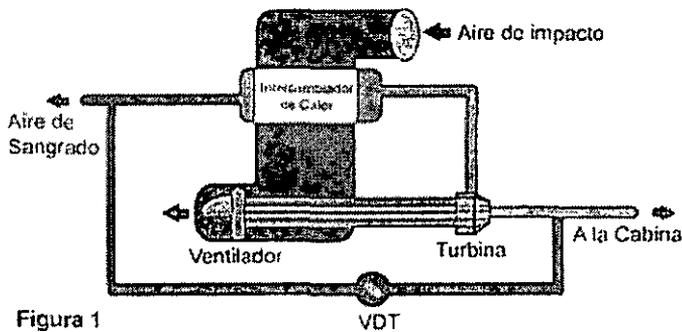
Mantener una correcta temperatura en un avión comercial con cientos de pasajeros a bordo viajando a 40,000 pies de altura (12,000 metros) representa un enorme reto para los especialistas en acondicionamiento de aire.

Lograr un ambiente de cabina confortable para los pasajeros y tripulantes de un avión requiere el control de distintas variables como: Temperatura del aire, Humedad, Presión, Control de la calidad del aire.

Estos son los factores que intervienen en la operación del sistema de acondicionamiento de aire. La cabina de un avión comercial representa un volumen enorme para la única fuente de aire disponible para el acondicionamiento del mismo, nos referimos al aire caliente a presión que se saca de los motores. Por lo que es normal que existan limitaciones sobre la cantidad de aire que se puede extraer en las distintas fases de vuelo, debido a que entre los objetivos principales del aire que pasa por el motor no está el acondicionamiento del aire para los pasajeros sino la propulsión para que el avión vuele, y tan sólo una pequeña parte de él debe desviarse a esta función además de atender la presurización y otros servicios requeridos en la cabina del avión. Para entender aún mejor la complicación del acondicionamiento de aire en las aeronaves hay que considerar, además, otras cuestiones, como las limitaciones de aire a bordo y las condiciones en las que debe de operar el sistema, enfrentando temperaturas exteriores de hasta -60° C, así como la falta de humedad.

Los sistemas de refrigeración que se emplean en la aviación son el de ciclo de aire y el de ciclo de vapor. El primero se basa en el principio de eliminación de calor por transformación de la energía calorífica en trabajo mecánico,

este es empleado en aviones comerciales, transportes militares y aviones de combate, funciona con el aire que se extrae del compresor del turbo reactor, dicho aire caliente y a presión, se emplea para calefacción, refrigeración e incluso para la presurización de la cabina. El segundo sistema por ciclo de vapor es más limitado ya que proporciona únicamente la refrigeración del aire; este funciona mediante la evaporación de un líquido refrigerante en una unidad muy similar a la que es utilizada ampliamente en la industria automotriz; dicho sistema se usa generalmente en vuelos realizados a baja altitud y corta distancia. Cabe resaltar que en los aviones turbohélices se pueden emplear ambos tipos.



Ahora con respecto a la unidad de aire acondicionado, el avión, según su tamaño, dispone de una o más unidades independientes. La figura 1 muestra el esquema de dicha unidad, está consta de: a) un conducto de aire de impacto, b) un intercambiador de calor, c) el conjunto de turbina de refrigeración.

a) El conducto de aire de impacto.- es una tubería que está conectada a una compuerta situada en la superficie exterior del avión, de manera que en el vuelo el aire frío y con presión dinámica suficiente entra por la compuerta y sigue el curso del conducto. Por esta razón esta corriente se denomina "aire de impacto". El conducto (en azul en la figura) está abierto por sus dos extremos, de manera que continuamente entra y sale del aire captado del exterior del avión.

máquina con movimiento autónomo. Se dispone así de una fuente de aire muy frío para la cabina. Es bien entendido que si este flujo de aire se introduce directamente en cabina el frío sería extremo congelando a los pasajeros, por lo que es claro que debe modularse su temperatura de la siguiente manera.

La función moduladora se hace con la válvula de derivación de la turbina de refrigeración VDT. Dicha válvula está situada en un conducto paralelo al intercambiador de calor.

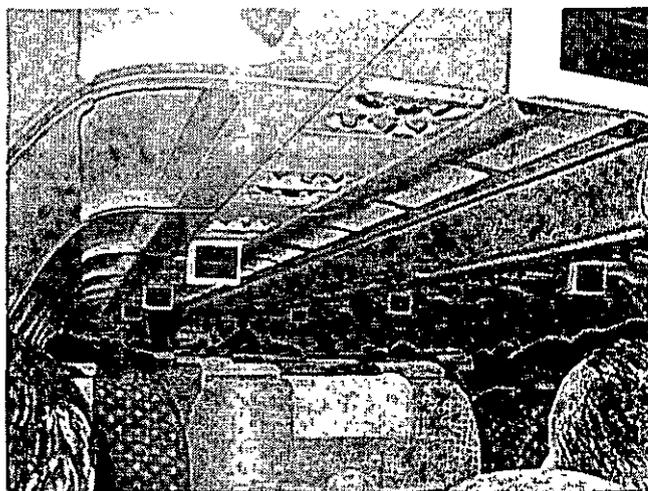
Si la válvula VDT está muy abierta el flujo de aire expulsado por el motor sigue principalmente esta vía, ya que es más fácil para el aire, que introducirse en el camino interno del intercambiador de calor el cual está hecho de tubos estrechos. El trayecto por la VDT elude el paso del aire por el intercambiador de calor y la turbina de expansión, de manera que es un flujo de aire caliente, más o menos a la temperatura del aire en el compresor del motor. Por el contrario, si la válvula VDT está muy cerrada casi todo el aire es forzado a pasar por el trayecto del intercambiador de calor, es decir, por el trayecto donde el aire se somete a un fuerte enfriamiento.

La temperatura del aire de la cabina se regula por la posición que tiene la válvula VDT. Si la válvula está muy abierta se envía calor a la cabina; si está muy cerrada el aire que sale de la unidad es frío porque ha mezclado poco aire caliente proveniente del conducto de la VDT. Sería este el caso típico de funcionamiento de la unidad en un vuelo crucero a gran altitud, donde el avión experimenta fuertes pérdidas de calor y la cabina necesita calefacción. En vuelo a baja altitud, normalmente es necesario introducir en la cabina gran cantidad de aire frío, de manera que la VDT tienda a situarse en posiciones más cerradas. El piloto cuenta con un mando para seleccionar la posición de la válvula, pero lo normal es que el sistema funcione en modo

automático regulando la temperatura de la cabina a un valor establecido previamente.

Los actuales aviones comerciales requieren unidades de aire acondicionado especiales. Mucho del equipo se hace de aluminio para ahorrar peso. Las unidades de refrigeración y de aire acondicionado para los aviones grandes se establecen generalmente en las alas. En un avión más pequeño, estas unidades pueden estar en el cuerpo de la aeronave. El aire proveniente de la unidad es distribuido a la cabina a través de los difusores y rejillas situadas en el techo.

El sistema de aire acondicionado de la cabina en las aeronaves actuales se diseña para proporcionar un ambiente seguro y cómodo de la cabina en las altitudes de vuelo que pueden alcanzar arriba de 40,000 pies.



Por una regulación de gobierno y de la FAA, la presión de la cabina no puede ser menos, en la altitud máxima de la travesía, que el equivalente de la presión de aire exterior a 8,000 pies de altura. El sistema de aire acondicionado además de controlar la temperatura y proporcionar confort a los pasajeros controla la presurización de la cabina, el flujo

de aire y la filtración del mismo de la siguiente manera. El aire enfriado proveniente de la unidad de aire acondicionado fluye a un compartimiento donde se mezcla con una cantidad aproximadamente igual de aire altamente filtrado de la cabina de pasajeros.

Combinado el aire de afuera y el aire filtrado se canaliza a la cabina y se distribuye a través de los difusores situados en el techo de la misma. Dentro de la cabina, los flujos de aire siguen un patrón circular y su salida es a través de parrillas situadas en el piso o de cualquier lado de la misma, en algunos aviones esta salida se hace a través de ductos situados arriba de los compartimientos de equipaje de mano. El aire que sale se envía debajo del piso de la cabina en el lóbulo más bajo del fuselaje. La circulación de aire es continua y elimina rápidamente olores mientras que también mantiene una temperatura cómoda en la cabina.

Alrededor de la mitad del aire que sale de la cabina se elimina inmediatamente de la aeronave a través de una válvula de salida en el lóbulo más bajo, que también controla la presión de dicha cabina. La otra mitad es dirigida por los ventiladores a través de los filtros especiales debajo del piso, y después es mezclada con el aire exterior que viene de los compresores del motor. Estos filtros de alta eficacia son similares a los usados para mantener el aire limpio en hospitales, tales filtros son muy eficaces sobre las partículas microscópicas ya que son capaces de filtrar bacterias y virus. Se estima que entre 94 y 99.9 por ciento de los microbios aerotransportados que alcanzan estos filtros están capturados.

Hay varias características del sistema de aire acondicionado de la cabina que merecen énfasis especial:

- La circulación de aire es continua.
- El aire está fluyendo siempre dentro y fuera de la cabina.

- La cabina tiene un alto intercambio del aire. Todo el aire en la cabina es substituido por la mezcla entrante del aire exterior y del aire filtrado durante intervalos de solamente dos a tres minutos, dependiendo del tamaño de la aeronave. Esto representa de 20 a 30 cambios del aire total de la cabina por hora.

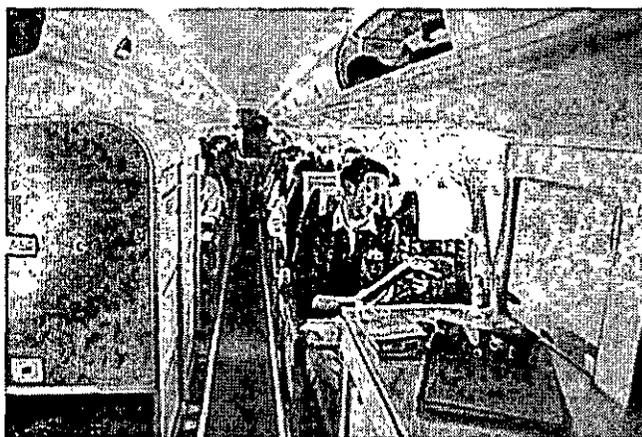
- La mezcla exterior de aire llena la cabina constantemente. El aire exterior guarda los límites admisibles de bióxido de carbono y de otros contaminantes en conformidad con límites estándares y sustituye el oxígeno más rápido que lo que se consume. El relleno también asegura que la porción recirculada del aire no tenga un ciclo sin fin ya que rápidamente se diluye y se sustituye por aire exterior nuevo.

Recientes estudios han confirmado la seguridad y la eficacia total de los sistemas de aire acondicionado de la cabina de los aviones. Uno de los estudios, conducido para el gobierno de Estados Unidos, era el más comprensivo de todos. Implicó una prueba independiente que tomaba muestras de aire en 92 vuelos aleatoriamente seleccionados de una línea aérea comercial. Los niveles de agentes contaminantes tales como hongos y bacterias fueron evaluados y resultaron ser similares o más bajos que los encontrados en ambientes de interior normales. También, los niveles de bióxido de carbono fueron evaluados resultando ser en promedio menor a la mitad del límite recomendado por la conferencia americana de higiene industrial.

Por lo anterior podemos ver que es inverosímil que el aire de la cabina de una aeronave comercial contenga los suficientes contaminantes para causar las condiciones de vez en cuando divulgadas tales como dolor de cabeza, fatiga, náusea o problemas respiratorios.

Es más probable que estas condiciones sean causadas por la compleja interacción de factores tales como: la salud del individuo, el retraso del vuelo, el uso de medicamentos, el

consumo de alcohol y la enfermedad de movimiento (vértigo) conjuntamente con efectos de la altitud de la cabina y la baja humedad de la misma.



Vale la pena comentar que la salida de humo en algunas ocasiones por los conductos del aire acondicionado de un avión es una simple señal de que el equipo funciona perfectamente debido a que si la temperatura en el aeropuerto y la humedad del aire es elevada, la salida del aire frío por los conductos, produce la rápida condensación de esa agua, con la consiguiente aparición de humo que no es mas que vapor de agua similar al que forma las nubes.

Al mezclarse el aire frío con el caliente y, por lo tanto aumentar la temperatura de este (al tiempo que baja la del caliente), el agua vuelve a su estado gaseoso e incoloro por lo que ese vapor desaparece a los pocos segundos. Solo en casos extremos la presencia del vapor se prolonga mas allá de unos segundos sin representar esto problema alguno.

Bibliografía

2001 ASHRAE Handbook
Fundamentals
ASHRAE

Handbook of Air Conditioning and Refrigeration Second edition.
Shan K. Wang
Mc Graw Hill

Principios y sistemas de Refrigeración
Edward G. Pita
Limusa-Noriega

Termodinámica
Irving Granet
Prentice hall

Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración
Hernandez Goribar
Limusa-Noriega

Calefacción Ventilación y Aire Acondicionado
Mcquiston, Parker, Spitler.
Limusa - Noriega

Termodinámica
Kenneth Wark, Donald E. Richards
Mc Graw Hill

Mechanical Engineering Handbook Air-Conditioning and Refrigeration
Wang, S.K. and Lavan, Z.
Ed. Frank Kreith
Boca Ratón: CRC Press LLC, 1999