

43
2ef.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

**REFRIGERACION CON CLOROFLUOROCARBONOS
EN LA INDUSTRIA QUIMICA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
ALFREDO DIAZ GARCIA



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO

PRESIDENTE: Antonio Reyes Chumacero

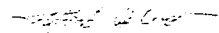
VOCAL: Caritino Moreno Padilla

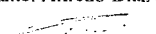
SECRETARIO: Genovevo Silva Pichardo


1er. SUPLENTE: José Agustín Texta Mena

2º SUPLENTE: Norma Gisela González Mariscal

Sitio donde se desarrolló la tesis: Biblioteca de la Facultad de Química. UNAM.


Sustentante: Alfredo Díaz García


Asesor: M. en C. Caritino Moreno Padilla


Supervisor Técnico: I.Q. Norma Gisela González M.

"...Y si tuviese profecía, y entendiese todos los misterios y toda ciencia, y si tuviese toda la fe, de tal manera que trasladase los montes, y no tengo amor, nada soy..."

1 Corintios 13:2

INDICE

	PAGINA
CAPITULO I	1
Introducción.	
CAPITULO II	6
Generalidades del ciclo de refrigeración	
Refrigeración mecánica	
Ciclo de Carnot de refrigeración	
Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	
Desviaciones entre el ciclo de refrigeración real por compresión de vapor y el ciclo ideal.	
CAPITULO III	18
Diversos sistemas de refrigeración	
Clasificación	
Sistema de absorción	
Sistema de enfriamiento por vacío	
CAPITULO IV	24
Gases Refrigerantes	
Gases alternativos	
Consideraciones en la selección de equipo utilizando gases alternativos al R22 y al R502	
CAPITULO V	39
Especificación de la Carga Térmica y selección del equipo	
Estimación de la carga térmica en refrigeración comercial	
Estimación de la carga térmica en aplicaciones de aire acondicionado	
Estimación de la carga térmica en procesos con enfriamiento de líquidos	
Generalidades para seleccionar equipos de refrigeración	
CAPITULO VI	60
Comparación con otros procesos de refrigeración	
CAPITULO VII	64
Conclusiones y recomendaciones	
BIBLIOGRAFIA	70
APENDICES	73

CAPITULO I

INTRODUCCION

La refrigeración industrial, es un campo que ha tenido un crecimiento sostenido, gracias a la expansión de industrias tales como la petroquímica, la alimentaria y la farmacéutica. Por tal razón es necesario que los profesionales de la Ingeniería Química, tengamos un firme conocimiento y comprensión de los procesos de refrigeración; ya que dicha información es fundamental para la planeación, el diseño, construcción, operación y servicio de las industrias citadas.

La aplicación del principio de refrigeración no tiene límites. Sin embargo, el uso más común y conocido es la preservación de alimentos. De tal suerte que la refrigeración se ha convertido en una comodidad esencial de la vida moderna.

En los inicios de la refrigeración mecánica, el equipo disponible era voluminoso, caro y no muy eficiente, inclusive requería continuamente los servicios de un técnico; por tanto, el uso de la refrigeración mecánica se limitaba a su aplicación dentro de las fábricas de hielo, plantas empacadoras, bodegas ó cámaras de almacenamiento.

El explosivo crecimiento de la refrigeración se debe al hecho de contar con la producción de equipos altamente eficientes y pequeños sumando el desarrollo de refrigerantes "seguros". Ejemplo de esto son las pequeñas unidades condensadoras utilizadas en los refrigeradores y congeladores utilizados en las casas y en los comercios.

El impacto que tiene la refrigeración mecánica en nuestra vida cotidiana es poco conocida, quizá con excepción quizá de aquellas gentes que están relacionadas directamente con esta industria. Por ejemplo pocos se imaginan el viaje de un trozo de carne desde su lugar de origen hasta nuestro refrigerador. Primero tuvo que viajar ya congelado de su lugar de producción a su lugar de distribución utilizando un camión refrigerado, después pasar a una cámara de conservación para ser procesada, ser colocada en un estante refrigerado para su exhibición y venta y finalmente esperar en un refrigerador doméstico para ser finalmente cocinado después de un tiempo.

Una aplicación más obvia es el uso de aire acondicionado para fines de confort, sin el cual muchos hoteles, oficinas, restaurantes, centros de cómputo y centros comerciales serían un fracaso como prestadores de servicio.

La lista de procesos ó productos que es posible realizar ó perfeccionar mediante la refrigeración mecánica es muy larga, por citar tan solo algunos cuantos casos y ver su diversidad tenemos:

La producción de plásticos, de hule sintético y de polímeros en general, así como de productos fabricados con estos materiales. La fabricación de telas, la elaboración de pan, el tratamiento térmico

de aceros, pasteurización de lácteos y de otras bebidas, cultivo de hongos, fabricación de chocolates, producción de medicamentos, los procesos de impresión y el proceso de cromado; no olvidando la conservación o congelación de alimentos, el acondicionamiento de aire y el licuado de gases.

En particular desarrollaremos los aspectos más relevantes de la refrigeración basada en cloro fluorocarbonos (CFC), dado que este es el proceso más común en el mercado y que sufrirá grandes cambios en los años venideros; así mismo, se presentan los métodos comunes de cálculo para cargas térmicas y recomendaciones para la selección del equipo.

En primer lugar se entiende por refrigeración la disminución artificial de la temperatura (1). Dicho de otra manera, un proceso para disminuir la temperatura de un cuerpo u objeto por abajo de la temperatura de los alrededores (2). De ahí se entiende el por qué la industria de los procesos químicos sea una gran consumidora de refrigeración. El frío o enfriamiento es un término relativo que se refiere a la ausencia de calor; así para producir "frío o enfriamiento" se debe eliminar calor.

Desde la antigüedad, en forma empírica el hombre encontró la manera de "enfriar" alimentos y bebidas; se dice (3) que los chinos fueron los primeros en utilizar el hielo en las bebidas, ya que se mejoraba el sabor de éstas. Conforme avanzó la civilización, la gente aprendió a enfriar las bebidas y los alimentos para su mejor deleite, lo que ocasionó el aumento del uso del hielo y de la nieve. Dichos materiales estaban limitados, pues se desconocía la manera de producirlos artificialmente, por lo que en invierno, se almacenaban en fosas aisladas con paja y ramas.

El siguiente avance, digno de mencionar, fueron las investigaciones encaminadas a la licuefacción de los gases. A finales del siglo XVIII, Monge consiguió la licuefacción del anhídrido sulfuroso al pasarlo por un tubo en U sumergido en una mezcla de hielo y sal. Guyton de Morveau logró por un procedimiento similar la licuefacción del amoníaco. (4)

La imposibilidad de obtener temperaturas inferiores a las conseguidas por la mezcla de hielo con sales, orientó a usar presiones superiores a la atmosférica para obtener la licuefacción de algunos gases. Faraday por ejemplo consiguió licuar el dióxido de carbono a 36 atmósferas. Mas no todos los gases fueron susceptibles de ser licuados, por lo que fueron denominados "gases permanentes". Este mito terminó con la fijación de los puntos críticos, ya que por debajo de su temperatura crítica cada gas puede ser fácilmente licuado.

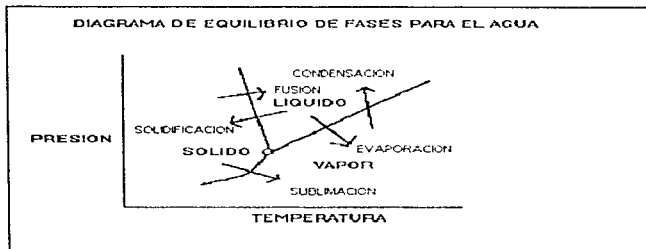
La obtención del aire líquido fue otro logro importante, el procedimiento se basa en la expansión brusca de un gas previamente comprimido a alta presión y enfriado a la temperatura ambiente, para obtener un gran descenso en la temperatura. Primeramente Linde y más tarde Claude desarrollaron y perfeccionaron los métodos para la obtención del aire líquido. (5)

Para obtener una refrigeración continua y económica es necesario recurrir a procedimientos que aseguren la continuidad y la economía con la garantía apropiada. Existen varios fenómenos que pueden ser aprovechados para la reducción de la temperatura de un sistema por debajo de su temperatura inicial, dichos fenómenos pueden ser químicos o físicos. Dentro de los primeros

encontramos a las reacciones endotérmicas y dentro de los segundos encontramos a los cambios de estado.

A manera de ejemplo, se muestra un diagrama presión temperatura para el agua, en el cual se distinguen las distintas formas de equilibrio y los nombres que reciben las transiciones de fase.

Fig. 1-1



Los procesos físicos para la refrigeración son:

- 1) Intercambio de calor sin cambio de fase.
- 2) Intercambio de calor con cambio de fase.
- 3) Expansión de un líquido.
- 4) Proceso de vaciado.
- 5) Expansión de un gas.
- 6) Procesos electromagnéticos.

Uno de los medios obvios de enfriar un producto es ponerlo en contacto con una sustancia más fría. Las personas y los objetos situados dentro de un edificio se "refrigeran" al estar en contacto con aire a baja temperatura dentro del edificio. La cantidad de calor Q , absorbida por el refrigerante en un proceso a presión constante es:

$$Q = m c_p (t_2 - t_1)$$

siendo :

- m la masa en kg.
- c_p el calor específico en Cal / kg°C
- $t_2 - t_1$ la elevación de temperatura del refrigerante en °C (temperatura final - temperatura inicial)

2 El cambio de fase sólida a líquida se llama fusión y el calor absorbido durante la transición se llama calor de fusión. El ejemplo más notable es la fusión del hielo a agua líquida. El hielo actúa como refrigerante al absorber calor del medio y pasar al estado líquido, de hecho la demanda de hielo continúa y se hace amplio uso de él tanto en la industria como en los hogares.

El cambio de fase líquida a vapor se llama "vaporización" y el calor involucrado se denomina calor latente de vaporización. Este proceso de refrigeración es el más usado, debido a que tiene lugar en el ciclo de compresión de vapor también conocido simplemente como ciclo de refrigeración. Los líquidos con puntos de ebullición bajos son usados como refrigerantes en la refrigeración mecánica. Los líquidos que cambian del estado líquido a fase vapor después de absorber calor son conocidos como refrigerantes primarios. La salmuera, el aire y el agua que actúan como transportadores de calor, son conocidos como refrigerantes secundarios.

Otro cambio de fase empleado para la refrigeración es la transición de un sólido a vapor, este proceso se denomina "sublimación" y el calor absorbido por el sólido se llama calor de sublimación. La característica de la sublimación es que la sustancia pasa a gas directamente sin pasar por el estado líquido. El ejemplo más común es el del Hielo Seco (CO_2).

La ecuación fundamental para los cambios de fase es:

$$Q = m \lambda$$

donde :

- Q es la cantidad de calor
- m es la masa
- λ es el calor latente de cambio de fase.

El cambio final de fase que proporciona la refrigeración puede combinar la fusión con la disolución. Si el hielo se pone en contacto con una sal tal como el cloruro sódico, las dos sustancias forman una solución salina. Para formar la disolución hay que añadir calor, así es que aislando la sal y al hielo del medio ambiente, las únicas fuentes disponibles son la misma sal, el hielo y la disolución. Al proporcionar su propio calor, la temperatura de la mezcla desciende por debajo de la temperatura original de las sustancias.

3 La expansión de un líquido origina el descenso de su temperatura. El descenso de temperatura es ligero si permanece en estado líquido durante la expansión, pero es apreciable si la expansión se realiza dentro de la región de mezcla líquido-vapor. La expansión de un líquido es uno de los procesos del ciclo de refrigeración.

4 El proceso de vacío. Cuando un gas llena un recipiente cerrado se expande hasta una presión más baja, reduce su temperatura. El efecto inverso puede observarse cuando el aire atmosférico entra un recipiente en el cual se ha hecho vacío. En el proceso de llenado, la temperatura del aire del recipiente después de que se iguala, será más alta que la que tenía originalmente.

5 Cuando un gas real se expande, aunque permanezca constante la entalpía puede variar la temperatura. En un gas ideal la temperatura permanece constante cuando la entalpía permanece constante; en un gas real, la temperatura puede permanecer constante, disminuir o aumentar.

El término que expresa la magnitud y la dirección del cambio de temperatura se llama coeficiente de Joule-Thomson, el cual se define como:

$$\text{Coeficiente de Joule-Thomson} \quad \mu = \left(\frac{\delta T}{\delta P} \right)_{H}$$

siendo pues, la variación de temperatura con respecto a la presión en un proceso a entalpía constante.

La pendiente en un punto de las líneas de entalpía en un diagrama temperatura-presión es el coeficiente en dicho punto. Se puede lograr que un gas experimente una transformación a entalpía constante haciéndolo pasar por un estrangulamiento. Como la presión disminuye en el estrangulamiento, el movimiento a lo largo de la curva es hacia la izquierda. En el punto 2 de la gráfica, se tiene un máximo y el coeficiente vale cero, este punto se llama punto de inversión, pues si ocurre un estrangulamiento, la temperatura se eleva.

6 Se puede refrigerar por métodos electromagnéticos, existen dos métodos diferentes. En un método se utiliza la orientación molecular bajo un campo magnético y el otro método consiste en invertir el efecto de un termopar.

El enfriamiento magnético se ha utilizado para aproximarse al cero absoluto. Una sustancia con propiedades magnéticas especiales se somete a un campo magnético. El campo magnético eleva la temperatura de la sustancia, pero el calor es extraído rápidamente por el helio que rodea a la sustancia y ebulle a 1°K. A continuación se aísla térmicamente a la sustancia del helio y se aleja bruscamente el campo magnético. La temperatura de la sustancia desciende 0.001°K. (6)

Un termopar consiste en dos uniones interconectadas de metales diferentes. Cuando las uniones están a temperaturas diferentes, el circuito genera una fuerza electromotriz, lo que se conoce con el nombre de efecto Peltier. El efecto inverso se establece al aplicar una F.e.m. en el circuito del termopar, aumentando la temperatura de una unión y disminuyendo la de la otra.

La selección del sistema de refrigeración que cumpla los requisitos del proceso al menor costo posible, se basa generalmente en el nivel de temperatura a la cual se requiera enfriar, la disponibilidad de los medios de refrigeración, de la experiencia que se tenga con los sistemas de refrigeración y de los problemas por contaminación y seguridad inherentes.

CAPITULO II

GENERALIDADES DEL CICLO DE REFRIGERACION Y DESCRIPCION DEL PROCESO.

En este capítulo se hace un análisis termodinámico del ciclo de refrigeración, no se discute ni los detalles ni el diseño de los equipos, esto se reserva para más adelante. Así mismo, se procura que las bases de la refrigeración se entiendan claramente explicando los conceptos de manera lógica y ordenada.

El término refrigeración es un proceso de transferencia térmica que implica el mantenimiento de un sistema dado en una temperatura menor a la del medio ambiente o alrededores. Esto implica una transferencia térmica de los alrededores hacia el sistema debido a la diferencia de temperatura que hay entre ellos; por lo tanto, como la temperatura en el sistema debe mantenerse baja, es necesario tomar continuamente energía a un nivel bajo de temperatura, lo cual requiere un proceso de flujo constante de energía.

La mejor forma de tomar energía a baja temperatura es por medio de la evaporación de un líquido, de tal manera que a la presión de evaporación, la temperatura de ebullición sea baja, ver figura 2-1 (A,B,C):

Fig. 2-1-A

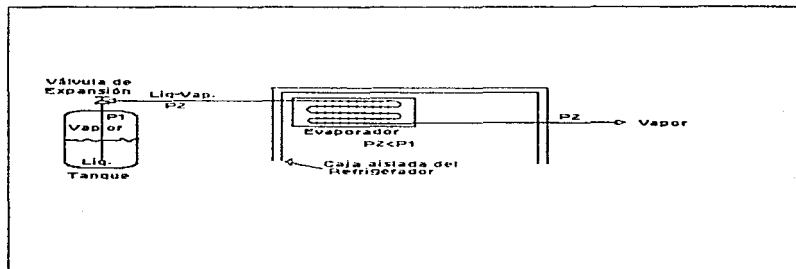


Fig. 2-1-B

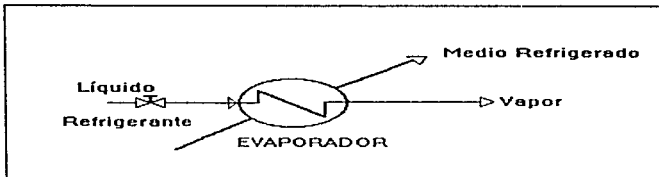
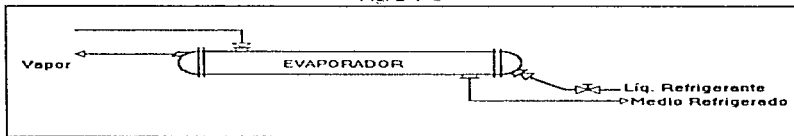
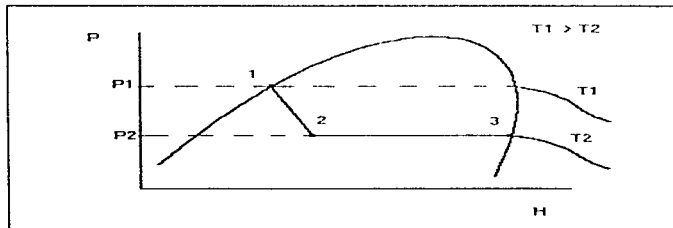


Fig. 2-1-C



En la figura 2-1-A, al abrir la válvula de expansión, el líquido fluye hacia el evaporador por la diferencia de presiones P_1 mayor a P_2 , el líquido sufre una expansión, vaporizándose debido a la disminución de su temperatura de ebullición, el líquido se evapora a P_2 , ver la figura 2-2:

Fig. 2-2. Diagrama P- vs- H



La fracción masa es: $XL = ML / Mm$ y $XL + Xv = 1.0$

$$XL \times HL + Xv \times Hv = Hm$$

$$Hv - XL (Hv - HL) = Hm$$

$$Hm = Hv - XL \times HLv$$

$$HLv = Hv - HL = \text{entalpía de vaporización}$$

$$XL = (Hv - Hm) / (Hv - HL)$$

Con esto podemos calcular la cantidad de líquido refrigerante para obtener un efecto de refrigeración ER, determinado.

Es así como el refrigerante toma energía térmica cambiando de fase líquida a gaseosa, en el evaporador, proporcionando un efecto refrigerante determinado. Ahora, para la operación continua, el fluido evaporado debe regresarse a su estado líquido original para que así pueda tomar nuevamente energía a un bajo nivel de temperatura, por lo cual, debemos hablar de un proceso cíclico. La serie completa de etapas por las cuales pasa el fluido constituye el ciclo de refrigeración y cada una de ellas desempeña una función o trabajo especial.

Existen dos métodos principales con los que se puede recuperar un líquido refrigerante de un gas para que se pueda usar como medio de refrigeración y cualquiera de estos métodos terminan la serie de procesos que constituyen el ciclo de la refrigeración, estos métodos son:

- a) Sistema de absorción de gas refrigerante.
- b) Sistema mecánico o de compresión de vapor.

El sistema por compresión de vapor es el más ampliamente usado tanto a nivel de refrigeración doméstica como comercial e industrial y a ésta nos referiremos en este trabajo; en el siguiente capítulo se comentará la refrigeración por absorción de gas como otro de los sistemas de refrigeración existentes.

REFRIGERACION MECANICA

MODIFICACION DE LA TEMPERATURA DE EBULLICION CON LA PRESION

Ya se ha mencionado en este capítulo, que al modificarse la presión de un líquido saturado éste cambia su temperatura de ebullición, en el diagrama presión P vs entalpia H , de la figura 2-2, se observa este fenómeno, en este caso, al disminuir la presión la temperatura de ebullición del líquido disminuye.

En general, un líquido en equilibrio con su vapor cambiará su temperatura de ebullición de manera proporcional al cambio de la presión de su vapor. Es entonces que un vapor que sea comprimido, aumentará su temperatura de condensación; y, un líquido cuya presión de su vapor disminuya, descenderá su temperatura de ebullición.

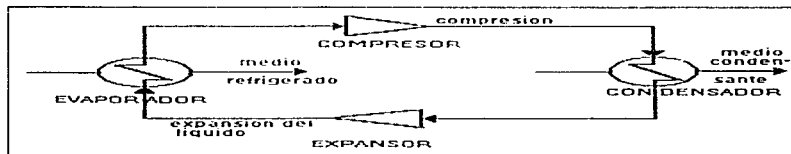
La refrigeración moderna, se fundamenta en este principio, pues depende de la presión para operar.

Un vapor frío proveniente de un líquido saturado que ha tomado energía y en consecuencia se ha vaporizado, se le puede aumentar mecánicamente su presión para aumentar su temperatura de condensación y de esta forma condensarlo, transfiriendo energía a un nivel más accesible de temperatura que a condiciones bajas de la misma.

El aire y el agua son los medios más comunes empleados para transferencia térmica con el vapor comprimido, por lo que la temperatura de condensación de este debe ser más alta que la del aire ambiente o del agua de enfriamiento para que se lleve a cabo la transferencia térmica haciendo líquido a dicho vapor y poderlo utilizar una y otra vez.

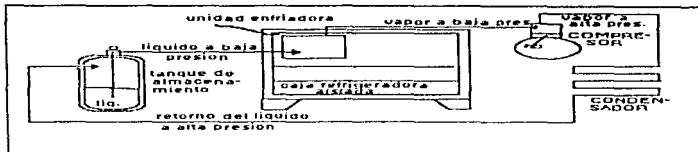
De manera que para regresar un vapor a su estado líquido original, es necesario comprimirlo para obtener una temperatura apropiada para condensarlo y hacerlo líquido de nuevo a la presión que se encontraba. En la figura 2-3 se ilustra un diagrama sencillo de refrigeración que combina los principios antes mencionados:

Fig. 2-3. Diagrama Simple y Esquemático del Ciclo de Refrigeración.



A continuación se muestra el ciclo de refrigeración, con una representación más próxima a la realidad que en la figura anterior.

Fig. 2-4. Sistema Simple de Refrigeración Mecánica.



Nótese pues, que son cuatro los procesos básicos del ciclo de refrigeración:

- 1) EVAPORACION. En el cual se lleva a cabo a temperatura y presión constantes.
- 2) COMPRESION. En el cual tanto la temperatura como la presión cambian.
- 3) CONDENSACION. El vapor es condensado a temperatura y presión constantes.
- 4) EXPANSION. En éste, el liquido es expandido para disminuir su presión y enfriarlo.

Estos 4 pasos permiten que el refrigerante tome energía térmica y la transporte a través del sistema de refrigeración, cambiando su estado de liquido a gas, después cede energía térmica y cambia de fase gaseosa a líquida, volviendo a su estado original.

CICLO DE CARNOT DE REFRIGERACION

Es un proceso de refrigeración continua en el cual se toma energía térmica a baja temperatura, existe una eliminación continua del mismo a los alrededores, pero a una temperatura más alta. El ciclo de Carnot de refrigeración consiste en dos procesos isotérmicos y dos adiabáticos. En uno de los procesos isotérmicos, la evaporación, la energía térmica Q_2 se toma a una temperatura más baja T_2 y la energía térmica Q_1 es eliminada a la temperatura más alta T_1 , en la condensación. Los procesos adiabáticos tienen como resultado la adición de trabajo neto W al sistema. Como el cambio de energía interna del sistema es cero para un ciclo, de la primera ley de la termodinámica se obtiene:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Del diagrama temperatura T vs entropía S, de la Fig. 2-5, se puede asentar que:

$$Q_1 = T_1 \Delta S$$

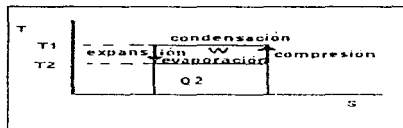
$$Q_2 = T_2 \Delta S$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$W/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1 \quad \text{o} \quad W/Q_2 = (T_1 - T_2)/T_2$$

La primera ecuación corresponde a la expresión conocida como la eficiencia de Carnot para el ciclo de refrigeración, nos compara el trabajo dado al ciclo contra la energía térmica de condensación.

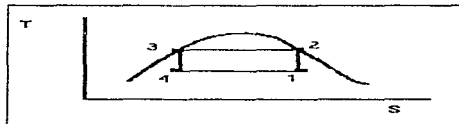
Fig. 2-5. Diagrama T-vs-S



Con la segunda ecuación, puede calcularse el trabajo requerido para una cantidad de refrigeración dada Q2. Se muestra en estas ecuaciones que el trabajo requerido se incrementa a medida que la temperatura T2 del refrigerador disminuye y conforme aumenta la temperatura T1 a la cual se elimina energía térmica.

Acudiendo al diagrama de T-vs-S de la figura 2-6, observamos:

Fig. 2-6. Diagrama T-vs-S.

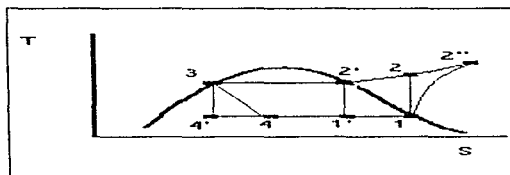


- Etapa 1-2: El vapor húmedo es comprimido isoentrópica y adiabáticamente, hasta obtener un vapor saturado.
- Etapa 2-3: El vapor saturado se condensa a T constante.
- Etapa 3-4: El condensado se expande isoentrópica y adiabáticamente obteniéndose una mezcla líquido vapor.
- Etapa 4-1: El líquido remanente se evapora a T constante.

CICLO IDEAL DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR

El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor puede observarse en la figura 2-7, mediante los pasos 1-2-3-4-1.

Fig. 2-7. Ciclos de Refrigeración.



Podemos ver también en esta misma figura, al ciclo de Carnot de la refrigeración mediante la secuencia de procesos 1'-2'-3'-4'-1' y una tercera secuencia de procesos resulta en el ciclo 1-2-3-4'-1 que es equivalente al ciclo de Carnot, excepto por la necesidad de enfriar el vapor sobrecalentado a su punto de saturación antes de empezar la condensación.

Esta diferencia con el ciclo de Carnot es debido a que es más conveniente tener un compresor que opere sólo vapor y no una mezcla de líquido y de vapor, como sería necesario en el ciclo de Carnot. A este nuevo ciclo podría llamársele ciclo de Carnot modificado; y en él, el vapor que sale del evaporador puede comprimirse de 1 a 2, a una presión mas alta, no exactamente a entalpía constante sino mediante alguno que se aproxime a esta trayectoria, dependiendo del cuidado que se tenga en eliminar las irreversibilidades en la operación del compresor.

En este mismo ciclo de Carnot modificado, el líquido del condensador debe regresar a su estado original a través de un proceso de expansión, lo cual podría hacerse en un equipo que operase en forma aproximadamente reversible y del cual pueda obtenerse trabajo, trayectoria 3 a 4' mostrada

en el diagrama. Para este ciclo de Carnot modificado, la energía tomada en el evaporador por Kg de fluido puede calcularse mediante:

$$Q_2 = \Delta H = H_1 - H_4'$$

y la energía térmica eliminada en el condensador será:

$$Q_1 = H_2 - H_3$$

De la primera ley: $W = (H_2 - H_3) - (H_1 - H_4')$

Por lo que el coeficiente de rendimiento definido como $B = Q_2/W =$ relación de la refrigeración obtenida al trabajo requerido, será:

$$B = (H_1 - H_4') / ((H_2 - H_3) - (H_1 - H_4'))$$

La etapa de expansión de este proceso, requiere una turbina o un equipo de expansión que opere con una mezcla de dos fases líquido-vapor. Para una operación eficaz, este equipo es relativamente costoso y difícil de construir; por tanto, es mucho más fácil que el proceso de expansión se efectúe haciendo pasar el líquido del condensador a través de una válvula parcialmente abierta. Esta operación de estrangulamiento es altamente irreversible a diferencia del proceso aproximadamente reversible de la turbina; y, la caída de presión se debe por completo a la fricción en la válvula. Para los sistemas de refrigeración conocidos, la simplicidad y el bajo costo de la válvula presentan más ventajas que la mayor eficiencia de la turbina. Con una expansión irreversible de este tipo, el proceso puede llevarse a cabo a entalpía constante, de la figura 2-7, la etapa de 3 a 4 del diagrama T -vs- S, representa este proceso.

La descripción de la secuencia de procesos del ciclo ideal de la refrigeración por compresión de vapor, queda descrita a continuación, y se puede ver en la figura 2-7.

- Entra vapor saturado a baja presión al compresor y sufre una compresión reversible y adiabática. 1-2.
- La energía térmica es cedida a presión constante en 2-3 y la sustancia de trabajo sale del condensador como líquido saturado.
- Sigue un proceso irreversible adiabático de estrangulamiento durante 3-4.
- La sustancia de trabajo se evapora a presión constante durante 4-1.
- Vuelve a repetirse el ciclo.

Como en este ciclo $H_3 = H_4$, el coeficiente de rendimiento queda:

$$B = (H_1 - H_4) / (H_2 - H_1)$$

Es necesario conocer también, además de B, el flujo de la sustancia de trabajo para diseñar y dimensionar correctamente el compresor, el condensador, los serpentines del refrigerador o el

evaporador y el equipo auxiliar. Los equipos de refrigeración se especifican en toneladas de refrigeración, T. R.; 1 T. R. corresponde aproximadamente a la cantidad de energía que se necesita eliminar para congelar 1 tonelada de agua (a 0 °C) por día:

$$1 \text{ T. R.} = 3024 \text{ kcal/hr}$$

La energía térmica tomada en la evaporación por Kg de sustancia de trabajo, será:

$$Q_2 = (H_1 - H_4)$$

El flujo másico de sustancia de trabajo, por tonelada de refrigeración, será:

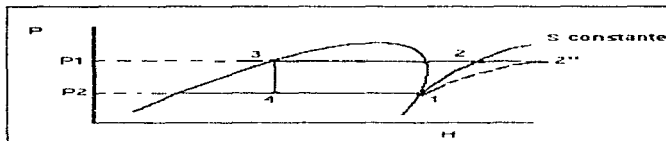
$$M = 3024/Q_2 = 3024/(H_1 - H_4)$$

Obsérvese que Q_2 es el efecto refrigerante ER, del cual se hablaba anteriormente.

$$M \text{ en Kg.}(\text{hr} \times \text{T. R.})$$

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor se muestra en el diagrama de Presión P -vs- Entalpia H de la figura 2-8. Este diagrama se emplea más frecuentemente en la refrigeración que los diagramas T -vs- S, ya que los valores de entalpías requeridos pueden determinarse con facilidad.

Fig. 2-8. Diagrama Presión -vs- Entalpia para el Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor.

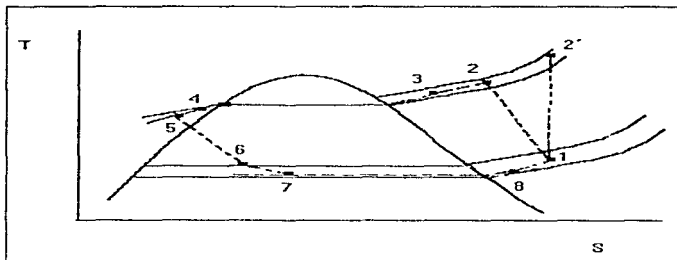


Un diagrama de temperatura entropía tiene las ventajas de que los efectos mecánicos y térmicos pueden verse como áreas sobre los diagramas y las diferencias entre los procesos adiabáticos reversibles e irreversibles aparecen claramente con la desviación respecto a las líneas verticales. En la Fig. 2-7 y 2-8, la línea 1-2'' representa un proceso adiabático irreversible: la compresión, esto es fácil hacerlo ver en el diagrama T -vs- S, en cambio, en el diagrama P -vs- H de la fig. 2-8, el proceso se observa en la línea de 1 a 2'' y es relativamente menos fácil visualizarlo. El proceso de 1-2'', por ser irreversible deja de ser isoentrópico.

DESVIACIONES ENTRE EL CICLO DE REFRIGERACION REAL POR COMPRESION DE VAPOR Y EL CICLO IDEAL.

La divergencia principal se debe al descenso de presión asociada con el flujo del fluido y la transmisión térmica hacia o desde el medio circundante. La figura 2-9, representa aproximadamente el ciclo real de refrigeración mediante un diagrama T -vs- S:

Fig. 2-9. Diagrama de T -vs- S, para el ciclo real.



El vapor que entra al compresor es sobrecalentado debido a que es un vapor con una temperatura inferior a la del medio ambiente, por lo que el vapor toma energía térmica y se sobrecalienta entrando así al compresor, este gas requerirá mayor trabajo de compresión que uno que salga menos sobrecalentado.

Durante el proceso de compresión hay irreversibilidades y transferencia térmica, hacia o desde el medio circundante, dependiendo de la temperatura de la sustancia de trabajo y del medio exterior, la entropía podría aumentar o disminuir durante este proceso; la irreversibilidad y la transmisión térmica al refrigerante ocasionan un incremento en la entropía y la energía térmica transmitida de la sustancia de trabajo ocasiona una disminución en la entropía. Este último caso es el que se presenta en la refrigeración y ayuda a que el aumento de trabajo por el sobrecalentamiento del vapor a la succión del compresor, no sea tan alto.

Estas dos posibilidades se han representado en la figura 2-9 como las líneas punteadas 1-2 y 1-2'.

La presión del líquido que sale del condensador será menor que la presión del vapor que entra a consecuencia de la fricción del flujo del fluido con la tubería y accesorios mismos del equipo. La temperatura del refrigerante en el condensador será superior a la del medio exterior, generalmente la temperatura del líquido que sale del condensador es más baja que la temperatura de saturación y baja más en la tubería entre el condensador y la válvula de expansión; esto representa sin embargo, un beneficio. Como resultado de esta transmisión térmica, la sustancia de trabajo entra al evaporador con una entalpia baja y esto permite mayor transmisión térmica a la misma en el evaporador.

A medida que la sustancia de trabajo fluye a través del evaporador hay un descenso de presión; puede ser sobrecalentada ligeramente a medida que sale del evaporador y hacer que la energía térmica transmitida del medio circundante aumente la temperatura en la tubería entre el compresor y el evaporador como se mencionó anteriormente. Esta transmisión térmica representa una pérdida, porque aumenta el trabajo del compresor como resultado del incremento del volumen específico del fluido que entra a él.

En concreto, el ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el más ampliamente utilizado en el mercado de la refrigeración, tiene por objeto, mantener a un sistema dado en una temperatura por debajo de la temperatura ambiente. Consiste en la manipulación de un fluido de trabajo o refrigerante, sometándolo a cuatro etapas básicas: EXPANSION, EVAPORACION, COMPRESION Y CONDENSACION. Cada una lograda respectivamente mediante una válvula de expansión isoentálpica, un intercambiador donde se toma energía, un compresor donde se eleva su presión y temperatura y un segundo intercambiador donde se desprende la energía térmica que se había tomado.

CAPITULO III

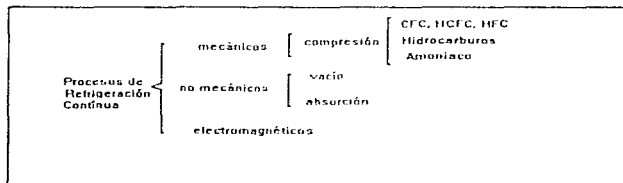
DIVERSOS SISTEMAS DE REFRIGERACION

Una forma de producir refrigeración es por medio de la evaporación de un refrigerante como ya se ha indicado en el capítulo anterior; esta evaporación del refrigerante produce el enfriamiento de aire, agua u otros fluidos que a su vez pueden utilizarse como medios de enfriamiento de otros sistemas, incluso de sistemas sólidos.

Existen otros medios para producir refrigeración como es el método termoeléctrico, que depende del paso de la energía eléctrica por un par metálico de dos semiconductores distintos; y, el otro, llamado enfriamiento magnético, donde se pueden obtener temperaturas más bajas que las que se producen por métodos ordinarios.

La evaporación implica el cambio de fase líquida a gas, para ello deben darse ciertas condiciones de presión. Se debe de implementar otra serie de dispositivos para hacer continua a la refrigeración. Por lo tanto, los métodos para dar las condiciones de presión para que se dé la evaporación adecuada y luego para hacer a la refrigeración continua, pueden ser varios.

Existen los sistemas mecánicos y no mecánicos, por chorro de vapor o vacío, los sistemas mecánicos que usan amoníaco como refrigerante y los que usan halocarburos. Entonces, los métodos para producir refrigeración continua los podemos clasificar como sigue:



Para decidir qué sistema utilizar, se deben tomar en cuenta varios factores y circunstancias que se analizarán más adelante.

SISTEMA DE ABSORCIÓN

La refrigeración por absorción, tiene una ligera modificación con respecto al sistema de refrigeración por compresión, y consiste en que se usa la energía térmica en lugar de la energía mecánica para completar el ciclo de refrigeración.

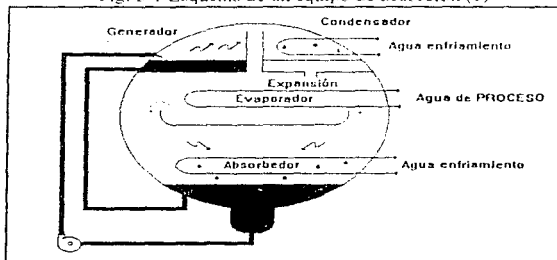
Existen varias combinaciones de productos que se pueden absorber entre sí, sin que se lleve a cabo alguna reacción química, de tal modo que uno de los productos pueda absorber al otro cuando la temperatura sea baja y lo pueda liberar cuando se eleve la temperatura.

Los sistemas de absorción actuales utilizan principalmente agua como refrigerante y bromuro de litio como el absorbente. En consecuencia este tipo de equipo está limitado a enfriamiento de agua. Para temperaturas de operación bajas, se prefiere el sistema de absorción agua - amoníaco. El agua a temperaturas ordinarias puede absorber grandes cantidades de amoníaco, el cual podrá ser separado por adición de energía a la disolución.

En el sistema por absorción el enfriamiento de la corriente de proceso se logra por medio de la evaporación de un refrigerante. Cuando hierve un refrigerante en el evaporador se absorbe calor; para que tenga lugar esta ebullición a una temperatura suficientemente baja para refrigerar, la presión en el evaporador debe ser también baja. La baja presión se puede producir eliminando el vapor refrigerante tan pronto como se forme.

Los vapores se pueden absorber fácilmente por medio de un segundo líquido capaz de absorber el vapor cuando éste está frío. El líquido absorbente debe también ser capaz de dejar libre al vapor refrigerante cuando éste está caliente.

Fig. 3-1 Esquema de un equipo de absorción (1)



Al igual que en los sistemas mecánicos, la operación continua de un sistema de absorción necesita un condensador, un receptor de líquido, una control de flujo del refrigerante y un evaporador, pero además un tanque con el absorbente para poder extraer al vapor refrigerante del evaporador, allí se forma la solución concentrada del refrigerante.

Se requiere que circule agua de enfriamiento a través de un serpentín dentro del tanque, pues el absorbente requiere de un nivel adecuado de temperatura para obtener un grado alto de absorción. Pueden disponerse varios tanques absorbentes con el fin de optimizar la absorción.

Del tanque de absorbente, la solución concentrada es bombeada al generador, donde se extrae el vapor de refrigerante del absorbente o solución concentrada al calentarse dicha solución con vapor a través de un serpentín colocado en el interior.

El vapor de agua desempeña dos funciones:

- 1) Separa el refrigerante del solvente.
- 2) Eleva al vapor refrigerante a un nivel alto de temperatura y presión.

Por lo tanto, la bomba de solución concentrada es necesaria porque el tanque absorbente opera a la presión del evaporador en contraste con la presión del generador.

Del tanque generador el vapor refrigerante viaja hasta el condensador y la solución diluida cae en el separador y después fluye de regreso al tanque absorbente por gravedad y por la diferencia de presiones. En el condensador el vapor refrigerante se condensa por medio de agua o aire, si es a través de agua, ésta misma se puede usar en los absorbentes.

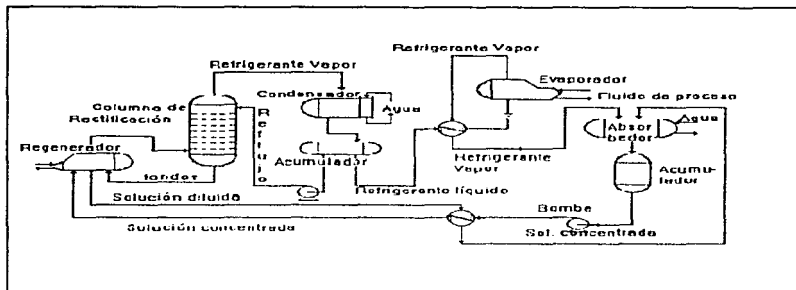
El refrigerante líquido fluye hacia el receptor y de allí sólo sale el líquido necesario que se requiera en el evaporador, pasando por la válvula de expansión adiabática. En el evaporador el refrigerante líquido hierve a presión reducida y así se produce el efecto de refrigeración. Con objeto de establecer el ciclo de los vapores, éstos deben ser llevados nuevamente a la fase líquida y a las condiciones a las que se evapora el refrigerante.

La figura 3-2 muestra un proceso de absorción como el que se ha descrito anteriormente y se observan también algunas implementaciones para hacer eficiente al sistema. (2)

El vapor refrigerante separado del tanque generador, es una mezcla de refrigerante y absorbente la cual se envía a una columna rectificadora o separadora, el vapor refrigerante intercambia calor con el líquido refrigerante que viene del receptor o tanque acumulador y por el domo de la columna se obtiene el refrigerante con una alta pureza.

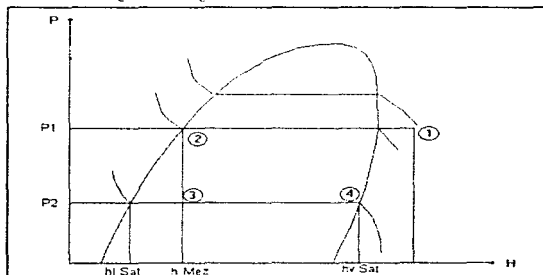
Los fondos de la columna rectificadora se envían al regenerador, del cual se extrae la solución pobre en refrigerante, ésta es enviada al absorbedor, pero antes se enfría con la solución concentrada proveniente del tanque de solución concentrada a través de un intercambiador, precalentándose al mismo tiempo la solución concentrada antes de entrar al generador.

Fig. 1-3. Diagrama de Flujo de un Sistema de Refrigeración por Absorción.



En la siguiente figura se muestra un sistema típico de refrigeración por absorción y se presentan los procesos de condensación y evaporación que sufre el refrigerante, en un diagrama presión entalpía.

Fig. 3-3 Diagrama P vs H en un sistema de absorción



En el tanque de refrigerante se tiene éste como líquido saturado (punto 2), de este tanque se obtienen dos corrientes, una servirá como reflujo para la columna rectificadora y la otra se expande adiabáticamente a través de una válvula hasta las condiciones de operación del evaporador (punto 3), en donde se evapora el líquido conforme toma energía de la corriente de proceso. Del evaporador sale el refrigerante como vapor saturado (punto 4) e intercambia energía con el refrigerante líquido proveniente del tanque acumulador de refrigerante y se envía al absorbedor enfriado por agua, en donde los vapores son absorbidos por una solución pobre de refrigerante.

La solución rica en refrigerante es enviada al tanque acumulador de solución concentrada de donde se bombea al regenerador, intercambiando energía con la solución diluida en refrigerante que sale del regenerador. Al regenerador llega la solución concentrada en refrigerante a alta presión, en donde éste es desorbido por medio de un calentamiento. El vapor generado en esta desorción es una mezcla de refrigerante y absorbente la cual es rectificada en una columna de rectificación.

Del domo de la columna se obtiene el refrigerante con una alta pureza (punto 1), y es condensado en el condensador obteniéndose el refrigerante como líquido saturado (punto 2) que es enviado al acumulador de refrigerante. Los fondos de la columna rectificadora se envían al regenerador, del cual se extrae la solución diluida en refrigerante, y es enviada al absorbedor.

En el evaporador puede enfriarse agua, aire o algún otro fluido como la salmuera, como se observa en la figura 3-3. Las combinaciones de absorbente y refrigerante más usadas en la industria son:

- a) Agua como refrigerante y bromuro de litio como disolvente. Con este sistema no se pueden tener temperaturas inferiores a 0°C ya que el refrigerante se congela.
- b) Amoníaco como refrigerante y una solución acuosa de amoníaco como absorbente. Se pueden obtener temperaturas de -33°C.

El agua a temperaturas entre 32°C y 38°C puede absorber grandes cantidades de vapores de amoníaco, con tal rapidez que es tan eficaz como un compresor mecánico.

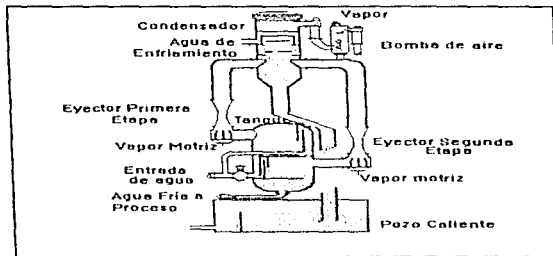
La solución concentrada de agua y amoníaco puede llegar a contener hasta un 30% de este último.

SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR VACIO.

El principio de este medio es el enfriamiento de agua o disoluciones acuosas a temperaturas menores a la ambiente, mediante una evaporación parcial del agua. La evaporación parcial se logra sometiendo el agua a un vacío tal que la presión de vapor del líquido sea mayor o igual a la presión que se está ejerciendo; así la energía necesaria para la vaporización la suministra el mismo líquido a expensas de su "calor sensible", lo que se refleja en una disminución de temperatura en el líquido.

La siguiente figura muestra un diagrama de un sistema de refrigeración por vacío. El líquido que va a ser enfriado entra al tanque de refrigeración fluyendo por un vertedero, cuando el líquido que va a ser enfriado se pone en contacto con el vacío en el tanque, se vaporiza parcialmente lográndose el enfriamiento del líquido, el cual es extraído del tanque de refrigeración por medio de una pierna barométrica o por una bomba.

Fig. 3. Refrigeración por vacío



Para generar el vacío en el tanque de refrigeración se emplea un sistema de eyectores con vapor de agua como medio motriz. El vapor motriz y el vapor extraído del tanque se condensan en un condensador que emplea agua como medio de enfriamiento.

Este sistema de refrigeración se emplea para enfriar agua entre 4 y 16°C que implican presiones de operación de 6 a 13 mmHg (abs) respectivamente.

CAPITULO IV

GASES REFRIGERANTES

Se han desarrollado un número importante de refrigerantes que permiten la selección óptima para una aplicación específica. Los factores que son importantes incluyen:

- 1) Propiedades químicas, termodinámicas y físicas
- 2) Requerimientos de capacidad del sistema
- 3) Tipo de compresor utilizado
- 4) Nivel de temperatura deseado
- 5) Consideraciones de seguridad

Los hidrocarburos halogenados son usados predominantemente tanto para servicios de aire acondicionado como de refrigeración. Sus ventajas son su no inflamabilidad, no explosividad y que no son tóxicos. Consecuentemente estos refrigerantes han reemplazado a la gran mayoría de los refrigerantes primeramente usados como el cloruro de metilo, el dióxido de carbono y el dióxido de azufre.

Todo refrigerante debe reunir en el mayor grado posible las siguientes características:

- a) Entalpia latente de evaporación.- La cantidad de energía térmica que se requiere para su ebullición ha de ser muy elevada, a fin de emplear la menor cantidad posible de refrigerante en el proceso de evaporación, para obtener una temperatura determinada. Esta propiedad afecta la cantidad de refrigerante circulando por el sistema, el tamaño y el costo de las tuberías auxiliares y accesorios.
- b) Capacidad térmica del líquido.- Un valor bajo es deseable. De otra forma es necesario un enfriamiento excesivo para el líquido "caliente" que entra al evaporador.
- c) Punto de ebullición.- Deberá ser lo suficientemente bajo para que sea siempre inferior a la temperatura deseada de operación. Es deseable que la presión sea mayor a la atmosférica para evitar contaminación por aire o humedad dentro del sistema.
- d) Temperatura de congelación.- El refrigerante seleccionado deberá tener una temperatura de congelación lo suficientemente por debajo del nivel de temperatura deseado.
- e) Temperatura y presiones de condensación.- Habrán de ser bajas para condensar rápidamente a las presiones de trabajo normales y a las temperaturas usuales del medio enfriador que se emplee en el condensador (usualmente aire o agua). Mientras mayor sea la presión de operación mayor será el gasto para el equipo y la tubería.

f) **Temperatura de descarga.**- Los refrigerantes que tienen temperaturas relativamente altas de descarga en el compresor, tienen problemas por descomposición del aceite y formación de sedimentos.

g) **Volumen específico.**- Es el espacio que ocupa el refrigerante en estado de vapor, el cual ha de ser lo más reducido posible. Esta propiedad implica directamente el tamaño del compresor, es deseable tener volúmenes de succión bajos para compresores recíprocos y volúmenes de succión altos para compresores centrífugos. Los compresores recíprocos normalmente usan R-12, R-22, R-500, R-502, R-13 y R-717. Los compresores centrífugos son adaptables al R-11, R-12, R-113, R-114 y en toneladas muy grandes R-22.

h) **Masa Molecular.**- Está relacionada directamente con el volumen específico del vapor, mientras mayor sea la masa molecular mayor será el volumen específico.

i) **Temperatura y presión crítica.**- Todos los refrigerantes tienen un punto en que no condensan, por grande que sea la presión que se les aplique. Esta temperatura se llama presión crítica. Por consiguiente, resulta necesario que dicho punto crítico sea elevado. La temperatura y presión de operación del sistema deberá estar por debajo de los valores críticos.

j) **Efecto sobre el aceite lubricante.**- Todos los compresores requieren lubricación, por lo que el refrigerante no ha de reaccionar con el aceite, descomponiéndolo. Así mismo se requiere que el refrigerante sea miscible con el aceite, de esta forma ayudará al retorno de aceite del evaporador en las aplicaciones del compresor recíproco.

k) **Propiedad de inflamación o explosión.**- Es muy conveniente que no sean inflamables ni explosivos. Los refrigerantes están agrupados de acuerdo a su inflamabilidad y toxicidad. Los hidrocarburos halogenados como el R-12, R-22, R-500 y R-13 están clasificados por la ASA Standard B9.1 como del grupo 1, el cual comprende las sustancias menos peligrosas en cuanto a inflamabilidad y explosividad, con toxicidad casi nula. Al aumentar el número de clasificación, la peligrosidad aumenta, el R-717, el cloruro de metilo y el dióxido de azufre están incluidos entre los refrigerantes como grupo 2, los cuales son tóxicos ó inflamables o ambas cosas. El grupo 3 de refrigerantes son altamente inflamables y explosivos, se incluyen el propano, el propileno, el etileno, el etano, el metano, el butano y el isobutano.

l) **Acción sobre los metales.**- No deben atacar los metales empleados en las diversas piezas de la instalación.

m) **Propiedades tóxicas.**- No deben ser tóxicos y, por consiguiente, no han de ser nocivos para el cuerpo humano.

n) **Facilidad de localización de fugas.**- Es muy interesante que por su composición resulten de fácil localización en las fugas que se produzca en el sistema.

o) **Potencia teórica** requerida por tonelada de refrigeración.- Para los procesos de acondicionamiento de aire este valor es aproximadamente el mismo para la mayoría de los refrigerantes. A temperaturas menores se convierte en un factor importante pues aumenta la potencia necesaria.

p) **Otras propiedades**.- Adicionalmente un refrigerante debería tener una alta conductividad térmica, una baja viscosidad y ser estable. Un costo bajo por kilogramo es ideal, pero no es decisivo.

Designación Numérica y Composición Química de Refrigerantes

R-10	Tetracloruro de carbono
R-11	Triclorofluorometano
R-12	Diclorodifluorometano
R-12 B1	Bromoclorodifluorometano
R-12 B2	Dibromodifluorometano
R-13	Clorotrifluorometano
R-13 B1	Bromotrifluorometano
R-14	Tetrafluoruro de carbono
R-20	Triclorometano
R-21	Diclorofluorometano
R-22	Clorodifluorometano
R-23	Trifluorometano
R-30	Diclorometano
R-31	Fluoroclorometano
R-32	Difluorometano
R-40	Clorometano
R-41	Fluorometano
R-50	Metano
R-110	Hexacloroetano
R-111	Pentaclorofluoroetano
R-112	1,1,2,2 Tetracloro-1,2 difluoroetano
R-112 a	1,1,1,2 Tetracloro-2,2 difluoroetano
R-113	1,1,2 Tricloro-1,2,2 trifluoroetano
R-113 a	1,1,1 Tricloro-2,2,2 trifluoroetano
R-114	1,2 Dicloro- 1,1,2,2 tetrafluoroetano
R-114 a	1,1 Dicloro- 1,2,2,2 tetrafluoroetano
R-114 B 2	1,2 Dibromo- 1,1,2,2 tetrafluoroetano
R-115	Cloropentafluoroetano
R-116	Hexafluoroetano
R-120	Pentacloroetano
R-123	2,2 Dicloro-1,1,1 trifluoroetano
R-123 a	1,2 Dicloro - 1,1,2 trifluorometano

R-124	2 Cloro-1,1,1,2 tetrafluoroetano
R-124 a	1 Cloro-1,1,2,2 tetrafluoroetano
R-125	Pentafluoroetano
R-133 a	2 Cloro-1,1,1 trifluoroetano
R-140 a	Tricloroetano
R-142 b	1 Cloro-1,1 difluoroetano
R-143a	Trifluoroetano
R-150 a	Dicloroetano
R-152a	Difluoroetano
R-160	Cloroetano
R-170	Etano
R-216 ca	1,3 dicloro-1,1,2,2,3,3-hexafluoropropano
R-218	Ocatafluoropropano
R-245 cb	1,1,1,2,2 - Pentafluoropropano
R-290	Propano
R-C 316	Diclorohexafluorociclobutano
R-C 317	Cloroheptafluorociclobutano
R-C 318	Octafluorociclobutano
R-500	Azeótropo de R-12 y R-152a
R-501	Azeótropo de R-22 y R-12a
R-502	Azeótropo de R-12 y R-115
R-503	Azeótropo de R-23 y R-13
R-504	Azeótropo de R-32 y R-115
R-600	n-Butano
R-600 a	Isobutano
R-610	Eter etílico
R-611	Metil formaldehído
R-630	Metilamina
R-631	Etilamina
R-702	Hidrógeno
R-704	Helio
R-717	Amoníaco
R-718	Agua
R-720	Neón
R-727	Aire
R-728	Nitrógeno
R-732	Oxígeno
R-740	Argón
R-744	Dióxido de carbono
R-744 a	Oxido Nitroso
R-764	Dióxido de azufre
R-1112a	1,1 - Dicloro 2,2 difluoroetano

R-1113	1 Cloro 1,2,2 trifluoroetano
R-1114	Tetrafluoroetano
R-1120	Tricloroetano
R-1130	1,2 Dicloroetano
R-1132a	Difluoroetano
R-1140	Cloroetano
R-1141	Fluoroetano
R-1150	Etileno
R-1270	Propileno

Este sistema de numeración es el propuesto por la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), en su Norma 34 - 1992.

Con la excepción del amoníaco, el bióxido de carbono, bióxido de azufre, y algunos otros refrigerantes, la mayoría de los refrigerantes se derivan principalmente del metano y del etano. La forma en que están químicamente estructurados ha hecho que a los refrigerantes se les nombre por las siglas, CFC, HCFC Y HFC.

Si todos los átomos de hidrógeno han sido reemplazados por cloro y flúor, el refrigerante está completamente halogenado y es referido como un clorofluorocarbono (CFC), tal como el R11 y el R12. Los CFC's son muy dañinos para la atmósfera y tienen el grado más alto en cuanto a provocar el agotamiento de ozono. El cloro en la molécula del CFC es el responsable de su estabilidad, lo cual hace que no se descomponga fácilmente (los CFC's tienen una vida atmosférica de 75 a 120 años)(2) y llegue a la estratósfera, reaccionando con la capa de ozono que protege al planeta de la radiación ultravioleta proveniente del sol.

Cuando la molécula base (metano o etano) está parcialmente halogenada, es decir todavía contiene uno o varios átomos de hidrógeno, recibe las siglas de HCFC (HidroCloroFluoroCarbono). Los HCFC's al contener cloro dañan a la capa de ozono, sin embargo las posibilidades de llegar a la estratósfera son menores, debido a que los enlaces con el hidrógeno los hacen menos estables y el período de vida es más corto y la mayoría se descomponen en la parte inferior de la atmósfera. Es así que tienen un potencial más bajo de agotar el ozono (ODP), sin embargo, aún tienen el peligro de elevar la temperatura global mientras permanecen en la parte inferior de la atmósfera. Ejemplo de HCFC's son el R-22 y el R-123.

Cuando la molécula base es halogenada por átomos de flúor y no se tienen átomos de cloro, tenemos un HFC (hidrofluorocarbono). Debido a que los HFC's no contienen cloro, el potencial de agotar el ozono es nulo y, tienen un potencial mínimo de elevar la temperatura global. Entre los HFC's que se han hecho populares tenemos al R-32 y al R-134a.

No existe un refrigerante universal que pueda ser usado para todas las aplicaciones y lo mismo es válido para el equipo de refrigeración. A continuación se listan las propiedades de algunos gases refrigerantes:

Bióxido de azufre (SO₂).- Se produce al quemar azufre en el aire, ebulle a -10°C a la presión atmosférica. Para su condensación se precisa que cuando se halle en estado comprimido, a su paso por el condensador, alcance una diferencia de temperatura, como mínimo, de 14°C sobre la del medio enfriador empleado. La presión de trabajo normal es de 0 a 6 pulgadas de vacío en la condensación con una temperatura media de evaporación de -12°C. Cuando el contenido de humedad es menor al 0.003 por 100, no se tiene efecto corrosivo sobre el compresor, si se introduce una cantidad apreciable de humedad al sistema, se forma ácido sulfúrico, el cual ataca inmediatamente a los metales. La humedad se detecta por la formación de sulfatos. El aceite lubricante no se mezcla con el SO₂, y por ser más denso este último, flota encima del SO₂ líquido, facilitando de esta forma el retorno del aceite al compresor.

Los aceites más usados con SO₂ deben tener una viscosidad de 75 a 150° Saybolt. El SO₂ no es inflamable ni explosivo. Sus fugas son muy fáciles de detectar ya que tiene un olor característico. En grandes concentraciones ataca al sistema respiratorio, causa irritación a las mucosas y a los ojos. En forma líquida produce quemaduras en la piel. Actualmente se encuentra en desuso.

R-40. Cloruro de metilo (o clorometano CH₃Cl).- Su punto de ebullición normal es de -23.76 °C. Se disuelve en el aceite refrigerante en forma considerable aunque a temperaturas y presiones ordinarias no lo hace en el grado suficiente como para que se pierdan las propiedades lubricantes. La viscosidad de los aceites usados es de 150 a 300 Saybolt, teniendo en cuenta que de usarse a bajas temperaturas existe la posibilidad de separación de ceras. Los efectos del cloruro de metilo son similares a los producidos por una intoxicación de alcohol. El contacto del líquido con los ojos es muy doloroso. El cloruro de metilo no se mezcla fácilmente con el agua, la humedad del sistema puede formar hielo en la válvula de expansión, dificultando u obstruyendo el paso del refrigerante líquido. Este gas es inflamable y explosivo bajo ciertas circunstancias. (8.1 a 17.2% en volumen). Su olor es casi imperceptible, es además incoloro, por lo que la localización de fugas se realiza por medio de una solución jabonosa o por la localización de manchas de aceite. Se encuentra en desuso a nivel comercial.

R-11. CCl₃F. al igual que otros refrigerantes fluorocarbonados, el R11 no es corrosivo ni tóxico y, no es inflamable, pero disuelve al hule natural. Tiene el punto de ebullición a 23.7°C a la presión atmosférica. Debido al pequeño valor de las presiones de funcionamiento y al desplazamiento de compresor relativamente alto, el R-11 se emplea con compresores centrífugos, sobre todo en sistemas de aire acondicionado. El R-11 fue usado como refrigerante secundario y como disolvente. Sin embargo dada su acción nociva a la capa de ozono su uso está discontinuado.

R-12. CCl₂F₂. Es uno de los compuestos de la familia de los llamados freones, muy usado en la refrigeración comercial. No tiene olor ni color, su punto de ebullición normal es de -30°C. Tiene un calor latente de evaporación menor en comparación con el SO₂ y el CH₃Cl por lo que se necesita una cantidad ligeramente superior de R -12 para producir una cantidad de refrigeración igual. Se recomienda el empleo de aceites con un viscosidad de 150 a 300 Saybolt, es soluble en el aceite y más denso que este último. No es inflamable ni explosivo, sus fugas se detectan al igual que las

del CH_3Cl . Si los vapores del R-12 se exponen a la flama se descomponen en productos tóxicos sumamente irritantes a la nariz, garganta, ojos y pulmones. Se mezcla ligeramente con agua formando ácido fluorhídrico. Aunque el efecto refrigerante por unidad de peso del R-12 es relativamente pequeño, no necesariamente significa una desventaja; de hecho, para los sistemas pequeños es una ventaja que permite llevar un control más preciso del líquido. En sistemas de gran capacidad, la desventaja del bajo valor del calor latente se ve compensada por la densidad alta que se tiene en el evaporador, de tal manera que el desplazamiento del compresor requerido por tonelada de refrigeración no es mucho más grande que lo requerido por otros refrigerantes.

R-22.- CHClF_2 . Su punto de ebullición normal es de -40°C . con su empleo se eleva en un 60% la capacidad del compresor del R-12, con el mismo pistón, recorrido y velocidad. La selección del aceite está muy relacionada con la temperatura de evaporación, pues el gas y el aceite se mezclan en la compresión, pero se separan en el evaporador, formando 2 capas, con el aceite en la capa superior, se recomienda por tanto un separador automático de aceite. Su toxicidad y características físicas son similares a las del R-12. Originalmente fue desarrollado como refrigerante para temperatura baja. Se le ha usado extensamente en congeladores domésticos y en sistemas comerciales e industriales. Actualmente se le usa sobre todo en acondicionadores de aire ya que resulta de gran ventaja el calor relativamente pequeño del desplazamiento del compresor.

Se ha incrementado el interés en las mezclas azeotrópicas de refrigerantes. El R-500 es una mezcla de R-12 y R-152a con una composición porcentual en peso de 73.8 y 26.2 respectivamente, ha sido usado en compresores recíprocos para dar una capacidad intermedia ente el R-12 y el R-22. El R-502 ha sido desarrollado para aplicaciones en compresores recíprocos en forma primaria, en donde las temperaturas de aplicación comprenden -17.8 a -28.9°C . Es una mezcla de R-22 y R-115 en proporción de 48.5 a 51.2 en peso, respectivamente. Un compresor recíproco operando con R-22 en este rango aumenta de capacidad entre un 4 a un 15% al cargarse con R-502.

R-502.- Es una mezcla azeotrópica de R-22 y R-115 (48.8 y 51.2% respectivamente). Al igual que los demás freones no es inflamable ni tóxico. Su punto de ebullición es de -45°C . En general la capacidad y características de estabilidad son iguales o mejores que las del R-22, con temperaturas de descarga más bajas. Su aplicación se ha extendido al requerirse temperaturas de descarga más bajas y cuando se necesita mayor capacidad frigorífica (10-12% superior al R-22) Su solubilidad con el aceite es similar a la del R-22, por lo que se recomienda el empleo de un separador de aceite.

R-134a.- Es el refrigerante alternativo para reemplazar al R-12, en temperaturas medias y altas de refrigeración y aplicaciones de aire acondicionado. La industria automovilística empieza a usar HFC134a en lugar de CFC12 , debido a la baja permeabilidad en las mangueras del primero, así como su eficiencia más satisfactoria. El R-134a pierde capacidad cuando es usado como refrigerante de baja temperatura. La diferencia de polaridad entre los aceites minerales usados comúnmente en refrigeración y aire acondicionado y el R-134a, los hacen inmiscibles, teniendo que usar aceites

sintéticos de polialquilenglicol o aceites de poliésteres. El R-134a está también reemplazando al R-12 y al R-500 en equipos con compresores de tipo centrífugo, donde se ha mejorado la eficiencia con alguna pérdida en la capacidad.

R123.- Es el refrigerante alternativo para reemplazar al R-11 en aplicaciones de enfriadores centrífugos. Tiene una presión de condensación y una presión de evaporación menores que las del R11. El resultado neto es un ratio de compresión mayor. El flujo de gas es por lo tanto también mayor. El R123 es adaptable al diseño de los enfriadores de R11, no teniendo incompatibilidades de materiales.

GASES ALTERNATIVOS

La teoría Molina-Rowald de 1974 indicando que los CFC's y el bromo producidos por el hombre y emitidos hacia la atmósfera son responsables por el desgaste de la capa de ozono, causó mucha controversia y debates. Como consecuencia los Estados Unidos y 22 otros países firmaron el protocolo de Montreal para controlar la emisión de sustancias que desgastan la capa de ozono.

El protocolo tiene provisiones para países que originalmente no lo firmaron y eventualmente prohíbe la importación y exportación de CFC's y de productos que contienen CFC's en los países que no firmaron el protocolo.

Los refrigerantes de mayor uso y que de alguna forma es necesario modificar son el R11, R12, R22 y R502. Se han tomado ya algunas medidas específicas para estos gases y otras están en proceso de desarrollo. Esto aplica tanto para equipos nuevos como para equipos existentes.

Todas las mezclas de refrigerantes y compuestos puros necesitan cierto tipo de procedimiento de reajuste que en su mayoría irán acompañados con cambios de aceite. Instrucciones específicas son provistas por el fabricante original del equipo (OEM).

A continuación se enumeran las diferentes propuestas para estos gases:

Propuestas para el R-11

El R11 es un refrigerante de baja presión usado en enfriadores centrifugos, que tienen un repuesto de reajuste interino conocido como R123. Los enfriadores nuevos incluyen refrigerantes alternativos tales como el amoniaco, el R123, R22, R134 y bromuro de litio. El uso de gases alternativos HCFC sera corto porque contienen cloro en su composición. De tal suerte que el R123 por causa del contenido de cloro en su composición se irá eliminando en producción para el año 2030.

Propuestas para el R-12

El R12 tiene un refrigerante de repuesto con una temperatura media y alta de largo término llamado R134a. Mezclas de refrigerantes de reemplazo provisionales casi azeotrópicas consistentes en R22, R152a y R124 (HCFC, HFC, HCFC) con porcentajes variables para diferentes aplicaciones de temperatura pueden ser usadas. Estas varían desde 53/13/34 para refrigeración comercial; 53/15/32 para aire acondicionado de automóviles hasta 61/11/38 para refrigeración de transporte y aplicaciones de baja temperatura.

Dupont esta comercializando las mezclas anteriores con sus nombres propios como SUVA MP39, MP52 y MP66 respectivamente. MP significa presión media (del inglés Medium Pressure).

Algunas de esas mezclas reemplazan al R-12 en ciertas aplicaciones de temperatura y no necesitaran muchos cambios en el ajuste.

Propuestas para el R-22

Varias compañías de productos químicos y organizaciones profesionales están en la actualidad investigando gases alternativos para el R-22.

La compañía de productos químicos DuPont ha introducido varios. El SUVA9000 es un candidato con mucha posibilidad de reemplazar al R-22 (HCFC22) en las aplicaciones de aire acondicionado y bombas de calor. El SUVA9000 es una mezcla casi azeotrópica de R-32, R125 y R134a (todos HFC) en una proporción 30/10/60 en peso respectivamente. Dicha mezcla tiene un potencial cero de agotar el ozono y un potencial de 0.21 de elevar la temperatura global. Se espera que provea eficiencia y capacidad equiparables al R-22.

El Genetron AZ-20 manufacturado por Allied Signals, es una mezcla de refrigerante azeotrópico de R-125 (HFC) y R-32 (HFC), es otro candidato, dado que es azeotrópico no se dividirá en partes cuando sea vaporizado.

ICI Americas ha introducido el KLEA66, el cual es un refrigerante compuesto por una mezcla de R-32 y R134a (HFC's). KLEA66 está siendo probado en aplicaciones de refrigeración comercial.

Propuestas para el R-502.

El R-502 es una mezcla de R-22 y R-115 y tiene un gas de reemplazo compuesto por una mezcla ternaria de R-22, R-125 y R290 (HCFC, HFC, HC); los porcentajes de composición pueden cambiar para aplicaciones en sistemas específicos.

Dupont ha puesto en venta productos casi azeotrópicos, llamados SUVA HP080 y HP081 (HP significa alta presión -High Pressure en inglés-). El propano, siendo un hidrocarburo puro puede contribuir a la solubilidad del aceite y al mismo tiempo contribuir a los resultados de refrigeración. El propano está en proporciones tan pequeñas que la mezcla no es inflamable aún cuando las partes han sido separadas. Una mezcla ternaria a base de HFC y que consiste de R125, R143 y R134a, será la respuesta hasta que un compuesto puro sea descubierto. Dupont la comercializa bajo el nombre de SUVA HP62.

Genetron AZ-50 fabricado por Allied Signal es un candidato con posibilidades de sustituir al R502. Es una mezcla azeotrópica de R-125 y R143 (HFC's) y no se dividirá en partes cuando se vaporice.

Elf Atochem ha fabricado Forane FX40 como refrigerante de reemplazo del R502. Forane FX40 es una mezcla de HFC (R32, R125 y R143a).

ICI Americas ha introducido el KLEA60 para reemplazar al R-502 en las aplicaciones de refrigeración comercial. KLEA60 es una mezcla de HFC a base de R32, R125 y R-143a.

CONSIDERACIONES EN LA SELECCION DE EQUIPO UTILIZANDO GASES ALTERNATIVOS AL R22 Y AL R502

Como se ha discutido, existen muchas mezclas de HFC's que pueden ser viables como reemplazo del R22 y del R502 en aplicaciones de aire acondicionado y refrigeración. Numerosos estudios sobre los gases alternativos están siendo desarrollados. Estos estudios incluyen el análisis de compatibilidad con los materiales comunes de construcción, la selección de lubricantes adecuados y sus características de solubilidad y miscibilidad, ecuaciones de estado y propiedades de transporte, tópicos de toxicidad e inflamabilidad. Todas éstas son materias importantes que afectan el rediseño del equipo usando los nuevos refrigerantes.

Podemos encontrar 3 clases de equipos, los dedicados a aire acondicionado, los dedicados a enfriamiento de agua en largas proporciones y los dedicados a refrigeración propiamente dicha.

Una gran parte de esta extensiva investigación está siendo llevada por el Programa de Evaluación de Refrigerantes Alternativos (AREP Alternative Refrigerants Evaluation Program), el cual fue organizado por ARI (Air conditioning and Refrigeration Institute) en 1991.

La siguiente tabla muestra las diferentes propuestas para el R22 y el R502 (1)

Propuesta de Reemplazo para el R-22	Proporcion %	Caracteristica
R32/R135	50/50	alta presión, azeótropo bajo CFM ton
R32/R134a	30/70	azeótropo, cercano al R22
R32/R134a	25/75	alternativa a la mezcla 50/50
R32/R125/R134a	10/70/20	azeótropo, reduce el desplazamiento en las bombas de calor.
R32/R125/R134a	30/10/60	azeótropo, para aire acondicionado
R32/R125/R290/R134a	20/55/5/20	azeótropo mejores propiedades térmicas
R32/R227ca	35/65	azeótropo, también alternativo para el R502
R134a	-	Presión y capacidad similar al R12
R290 (Propano)	-	
R717 (amoníaco)	-	

Propuesta de Reemplazo para el R-22	Proporción %	Característica
R125/143a	50/50	azeótropo, reemplaza al R502
R125/R143a/R134a	44/52/4	menor presión y mayor margen de inflamabilidad
R32/R125/R143a	10/45/45	mezcla de reemplazo
R32/R125/R134a	20/40/40	azeótropo, reemplazo a largo término

En resumen existen tres candidatos para reemplazar al R22, el azeótropo R32/R125 y la mezcla casi azeotrópica R32/R134a y la de R34/R125/R134a. Las mezclas casi azeotrópicas están más cercanas en comportamiento al R22 en sistemas y parecen requerir sólo cambios menores en los sistemas diseñados para el R22. Estas mezclas pueden no ser fáciles de utilizar en sistemas con evaporadores múltiples.

El tercer candidato es un azeótropo que requiere desplazamientos menores en el compresor y niveles de presión operativa significativamente mayores. Sin embargo, es posible que brinde mayores COPs en comparación al R22. Cambios de diseño significativos son necesarios para poder usar esta mezcla.

El refrigerante de un solo componente R134 puede ser sugerido como un reemplazo potencial en los sistemas para aire acondicionado. Sin embargo el desplazamiento volumétrico de un compresor para R134 debe ser aproximadamente 50% mayor que el desplazamiento de un compresor para R22 de la misma capacidad de enfriamiento. La caída de presión por tubería puede tener un efecto significativo en el COP de un sistema de R134, luego entonces una tubería más larga puede ser requerida en comparación a la usada con el R22.

A causa de estos factores, los equipos para acondicionamiento de aire con R134 tenderán a ser físicamente mayores y más costosos que sus contrapartes con R22. Esto implica que el R134a no será la mejor opción para los equipos dirigidos para aire acondicionado a menos que los problemas con las mezclas casi azeotrópicas no puedan ser solucionados.

La mayor parte de los enfriadores de líquido (agua) emplean compresores de desplazamiento positivo (recíprocos y recientemente scroll y tornillo) con refrigerante 22. En capacidades de hasta 150 toneladas, los enfriadores con desplazamiento positivo utilizan evaporadores de expansión directa con el refrigerante evaporando dentro de los tubos. Por arriba de 150 toneladas, los evaporadores del tipo inundado son a veces empleados en los compresores de tipo tornillo.

Algunos fabricantes ofrecen chillers del tipo centrífugo, generalmente con condensador enfriado por agua y en tamaños por arriba de 300 toneladas. Los enfriadores centrífugos usan evaporadores inundados.

El R134 no está siendo considerado para un uso amplio en los enfriadores recíprocos por las mismas razones anteriormente expuestas. Sin embargo, como una alternativa a los enfriadores tipo tornillo y centrífugos con R22, el R134 está siendo ofrecido por varios fabricantes en la actualidad. A pesar de que el costo en un enfriador tornillo con R134 es significativamente mayor, hay usuarios dispuestos a pagar un sobreprecio para eliminar las incertidumbres respecto a la disponibilidad y costo futuro del R22. En contraste el costo de un compresor centrífugo con mayor flujo de volumen con R134 es no substancialmente mayor que el costo de un compresor equivalente con R22.

Para aplicaciones menores donde los enfriadores recíprocos han sido dominantes, los futuros reemplazos del R22 están todavía en etapa de evaluación.

Cabe mencionar que muchos fabricantes ofrecen enfriadores con amoníaco. Estos enfriadores utilizan compresores tipo tornillo o bien recíprocos. Los enfriadores con amoníaco son alternativas viables en procesos donde el aspecto de seguridad del amoníaco puede ser manejado por los operadores de la planta con el suficiente conocimiento y habilidad. Sin embargo los enfriadores de amoníaco son utilizados fácilmente en aplicaciones de confort con instalaciones convencionales.

Dentro del ámbito de los sistemas de refrigeración, tres alternativas fueron desarrolladas R125/R143a; R125/R143a/R134a y R32/R125/R143. De hecho el R22 es un refrigerante de reemplazo para el R12 y el R502 en los sistemas de refrigeración comercial. El diseño de sistemas va a estar en un período de cambio mientras los ingenieros y operadores tratan de acomodar las características menos atractivas de los reemplazos del R502.

La mezcla casi azeotrópica R125/R143a/R134a es cercana en comportamiento al R502. La mezcla tiene un nivel menor de presión y un margen de inflamabilidad en comparación con la mezcla R125/R143. También ofrece una temperatura de descarga menor que el R502 con mayor capacidad y eficiencia para temperaturas de refrigeración medias y bajas. Esta mezcla puede ser usada en sistemas existentes después de modificaciones y cambio de aceite. Un fabricante principal ha recomendado esta mezcla como un sucesor a largo plazo del R502 y del R22 en refrigeración de temperaturas bajas y medias.

La mezcla R32/R125/R143a es casi azeotrópica. Ofrece COP similar al R502 y tiene ventajas de capacidad (15 a 30%) en comparación si se utiliza subenfriamiento. Si no se utiliza subenfriamiento el COP es menor que el R502. Las temperaturas de descarga son mayores que el R502 pero menores que las del R22 para el mismo trabajo.

Los fabricantes de refrigeración anunciaron reemplazos del R502 con anticipación al R22 debido a las fechas límite para la prohibición del R115, componente del R502. Actualmente hay mayor interés e investigación en la mezcla R125/R143a/R134a que por los otros candidatos. Queda esperar con interés los reportes de otros gases que son investigados.

Como se ha visto en esta sección de las tres categorías de equipos (aire acondicionado, enfriadores de líquido y equipo de refrigeración), existen tres candidatos que están siendo probados

como potenciales reemplazos para el R22 y el R502. Los fabricantes de equipo piensan que los reemplazos son viables para equipos nuevos, pero se debe desarrollar una infraestructura de servicio para los equipos existentes, haciéndose necesaria una más extensa investigación en el laboratorio y en el campo.

Impacto ambiental de los refrigerantes					
Refrigerante	Vida atmosférica (años)	Punto de Ebullición °C (°F)	ODP	GWP	
CFC-11	50	23.6 (74.5)	1	4000	
CFC-12	102	-29.9 (-21.6)	1	8500	
HCFC-22	13.3	-40.8 (-41.5)	0.051	1700	
HCFC-134a	14	-26.1 (-15.1)	0	1300	
HCFC-123	1.4	27.8 (82.1)	0.016	93	
ODP - Potencial de daño a la capa de ozono (Ozone Depletion Potential)					
GWP - Potencial de efecto Invernadero (Greenhouse Warming Potential)					
Basado sobre el CO2 y una expectativa de 100 años.					

Gases Alternativos Propuestos para Equipos de Refrigeración

Aplicaciones	Alternativa HCFC 22	Propuesta HCFC 22 HFC152a HFC124 Senes MP	Equipo Existente Mezclas HCFC22 Propano HFC125 Senes HP	HFC134a	Alternativa para Equipos Nuevos Sistemas Amoníaco	HCFC22	HCFC22 Propano HFC125 Senes HP	HFC134a
CFC12 Almacenaje Frio	•	•		•		•		•
CFC12 Máquinas de Hielo Comerciales		•			•	•		•
CFC12 Proceso Industrial	•	•		•	•			•
CFC12 Transporte Refrigerado		•		•		•		•
CFC12 Alimentos al por menor	•	•		•	•	•		•
CFC12 Vendedor automático	•	•		•		•		•
CFC500 Transporte Refrigerado		•	•	•		•	•	•
CFC502 Almacenaje Frio	•		•		•	•		•
CFC502 Máquinas de hielo comerciales	•			•		•		•
CFC502 Transporte Refrigerado	•		•	•		•		•
CFC502 Alimentos al por menor	•		•		•	•		

ASHRAE 15-1992
FUENTE EPA

CAPITULO V

ESPECIFICACION DE LA CARGA TERMICA Y SELECCION DEL EQUIPO

En general se define la refrigeración como cualquier proceso de eliminación de energía. La velocidad a la que la energía se elimina de un espacio o material para alcanzar y mantener una temperatura se le llama carga de refrigeración, carga de enfriamiento o carga térmica.

Para un sistema determinado es necesario considerar cuáles son sus límites con respecto a su alrededor y determinar la temperatura de operación; este último punto, puede hacer que en el momento de seleccionar el sistema de enfriamiento se puedan utilizar unidades un tamaño comercial más grandes ó más pequeñas que lo estimado originalmente.

La refrigeración solamente retrasa el proceso natural de descomposición de los alimentos y de otros productos perecederos. La condición inicial del producto determinará el tiempo de almacenamiento del mismo.

Una vez establecidos los límites del sistema, se procede a realizar un balance de materia y energía. En casi todas las aplicaciones de refrigeración la carga de enfriamiento del equipo de refrigeración es el resultado de las ganancias térmicas de diferentes fuentes. Entre éstas, debido a que la energía térmica siempre fluye de una región de temperatura alta a una región de temperatura baja, siempre se tendrá un flujo térmico hacia la región refrigerada de los alrededores. Resulta necesario entonces aislar la región de sus alrededores con un material aislante térmicamente.

Algunas de las fuentes térmicas son:

- 1.- Energía ganada por conducción a través de las paredes.
- 2.- Energía ganada por radiación directa través de vidrios u otros materiales transparentes.
- 3.- Energía ganada por infiltraciones de aire del exterior.
- 4.- Energía cedida por el producto "caliente" a medida que su temperatura es bajada hasta el nivel deseado (Entalpia latente y/o sensible). Cabe aclarar que ciertos productos, por su propia naturaleza, tales como los vegetales y las frutas, generan energía adicional por su metabolismo; energía que se conoce como de respiración.
- 5.- Energía cedida por las personas u operarios dentro del sistema
- 6.- Energía cedida por equipo productor de energía térmica localizado dentro del espacio, tal como resistencias eléctricas, motores, etc.
- 7.- Energía generada como consecuencia de alguna reacción química.

No necesariamente todas las fuentes de térmicas son apreciables y dependiendo de cada aplicación su aportación e importancia a la carga total varía considerablemente.

Debe tenerse en mente que para la posterior selección del equipo; no sólo es importante la cantidad de energía a remover sino que también es crucial el tiempo en que el equipo debe de remover dicha carga. Normalmente la capacidad nominal de un equipo se expresa en Toneladas de refrigeración, y para fines prácticos, se debe evaluar la carga que se tiene que remover en una hora.

No resulta práctico diseñar los sistemas de refrigeración de tal manera que el equipo opere en forma continua. Encontramos dos razones para ello, la primera es por razones de mantenimiento y la segunda por la operación y vida útil del equipo. En los sistemas donde se hace circular aire a través de un serpentín, si la temperatura del serpentín es menor al de la temperatura de congelamiento del agua, la humedad condensada del aire se congela y se adhiere a la superficie del serpentín, lo que origina que el serpentín se "escarche" y se llegue a congelar completamente, teniendo como consecuencia la reducción de capacidad del sistema.

Se han desarrollado algunas reglas específicas de cómo determinar la carga térmica. Antes de describir los métodos de cálculo, vamos a encontrar un marco de referencia. Teniendo como referencia la temperatura, podemos encontrar cuatro clases de procesos, que involucran refrigeración:

Tabla 5-1 Aplicaciones

Proceso de Temperatura	Ejemplo	Temperatura típica requerida
Alta	Intercambiadores Industriales	Arriba de 20°C
Media	Refrigeración comercial	5°C
Baja	Congelación	-20°C
Criogénicos	Procesos especializados, licuefacción de gases	-150°C

De estas cuatro clases, las primeras dos son más frecuentes y tangibles que las últimas. Si bien es cierto que la distribución y proceso de alimentos involucra temperaturas bajas, que caen en el concepto de congelación y en este sentido son muy tangibles; los procesos industriales que involucran intercambio de energía son parte de la formación de los Ingenieros Químicos.

Los procesos criogénicos, por su propia naturaleza son procesos altamente especializados, ejemplos de estos son la estabilización metalúrgica, almacenaje de productos médicos y biológicos, separación y purificación de gases componentes del aire. Esta aplicación sale del enfoque de esta tesis por lo cual únicamente se hace mención de ella y no se incluyen mayores detalles de los cálculos de carga térmica ni de selección de equipo.

Existen tres procesos de refrigeración y/o licuefacción que son prácticos, éstos son:

- 1) Vaporización de un líquido
- 2) El efecto Joule-Thompson en un gas
- 3) La expansión de un gas en una máquina que produce trabajo.

El sistema en cascada es el más usual para obtener temperaturas extremadamente bajas (200 °K), en este método dos o más sistemas de refrigeración están arreglados en serie, usando refrigerantes con puntos de ebullición progresivamente menores. El refrigerante de la primera etapa sirve como enfriador para que condense el refrigerante de punto de ebullición más bajo que está en la segunda etapa. Si no hay un líquido adecuado para tomar la energía de la expansión a la temperatura requerida, un gas frío debe ser producido para la eliminación térmica. Esto generalmente se alcanza usando una máquina de expansión que produzca trabajo.

Las aplicaciones de la refrigeración se han agrupado en seis categorías generales:

- | | |
|-----|---|
| 1.- | Refrigeración doméstica |
| 2.- | Refrigeración comercial. |
| 3.- | Refrigeración industrial. |
| 4.- | Refrigeración marina y de transportación. |
| 5.- | Acondicionamiento de aire para confort |
| 6.- | Acondicionamiento de aire industrial. |

No existe en realidad una separación entre las diferentes categorías pues todas están basadas en los mismos principios, sin embargo el intervalo de temperaturas usadas típicamente así como el equipo empleado pueden ser las pautas a seguir para diferenciar una categoría de la otra.

En este capítulo se darán tres generalizaciones para los cálculos de carga térmica, estas generalizaciones estarán enfocadas a aplicaciones específicas: para los procesos de alta temperatura hablaremos de enfriadores de líquido e intercambiadores térmicos así como de los procesos de acondicionamiento de aire, para los procesos de media temperatura hablaremos de los procesos de refrigeración y que en este caso involucra media y baja temperatura.

Para tener una visión más completa a continuación se presenta un resumen de las aplicaciones más comunes:

1.- Acondicionamiento de espacios

El acondicionamiento de espacios no es tan grande como el mercado comercial de aire acondicionado, sin embargo, es requerido en muchas aplicaciones para el control del producto o para las condiciones del proceso, para evitar el estrés térmico de los trabajadores, para incrementar la productividad, para dar condiciones de confort y para filtrar los contaminantes acarreados por el aire.

Muchos procesos requieren control de la temperatura, de la humedad o de ambas, para asegurar la calidad del producto. A continuación mencionamos algunos donde es muy importante el control de la temperatura.

Velocidad de la Reacción Química.- En la manufactura del rayón, se requiere controlar la temperatura de la reacción de mercerización. En el secado de pinturas y barnices se requiere una temperatura y una humedad específica para tener un acabado de calidad.

Velocidad de Reacción Bioquímica.- En la panificación se requiere un control preciso de la temperatura y humedad (27.7 °C y 75% HR) para la fermentación óptima de la levadura.

Velocidad de cristalización.- La velocidad de enfriamiento determina el tamaño de los cristales formados, en este proceso la temperatura y la humedad controlan la velocidad de enfriamiento y el cambio de densidad de la solución por evaporación. En las charolas de recubrimiento para píldoras, nueces o goma de mascar, una densa disolución de azúcar es adicionada dentro de un recipiente, al irse evaporando el agua, los cristales de azúcar cubren cada pieza. El enfriamiento y secado deben ocurrir a la velocidad adecuada para formar una película opaca uniforme.

Productos de precisión.- En la manufactura de instrumentos de precisión, herramientas y lentes, la temperatura y limpieza del aire afectan la calidad del trabajo. Un control de temperatura muy estrecho prevé la expansión o contracción del material donde la tolerancia de la manufactura está dentro de 0.0002 pulgadas (0.0058 mm).

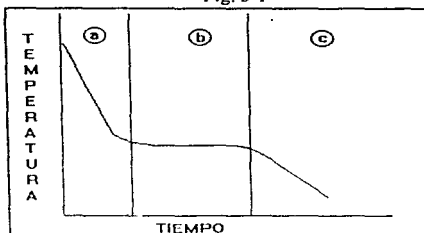
2 Enfriamiento de productos o procesos.

La refrigeración de productos o procesos es la categoría más grande del uso de equipos de refrigeración. Por mucho, el más importante uso de la refrigeración está en la industria alimenticia, para extender el período de tiempo en el cual los alimentos se pueden mantener antes de su consumo, a diferencia del enlatado, el congelamiento puede preservar los alimentos sin cambios notables a los de los alimentos frescos.

El congelamiento (o solidificación) debe ser considerado por separado del almacenamiento en hielo. El proceso de congelación es aquel donde la energía es removida del producto y la mayor parte del agua es convertida en hielo. Existen 3 etapas en este proceso:

- a) La temperatura desciende hasta el punto de congelación (se remueve "calor sensible")
- b) El agua dentro del producto se convierte en hielo mientras la temperatura permanece constante (se remueve "calor latente")
- c) La temperatura del producto se disminuye por debajo del punto de congelación hasta la temperatura final de almacenamiento, (se remueve "calor sensible" por debajo del punto de congelación).

Fig. 5-1



El equipo industrial para el congelamiento de productos es altamente especializado, sin embargo el equipo consiste en el componente de evaporación del ciclo de refrigeración. Existen tres tipos principales de congeladores para alimentos:

- a) De Corriente o echorro de aire.- Son los más comunes con un amplio intervalo de configuraciones, el aire es el medio de transferencia de térmica.
- b) Por Contacto.- La transferencia térmica se lleva a cabo por conducción, una superficie refrigerada es puesta en contacto directo con el producto o "paquete" en uno o más lados para remover la energía.
- c) Criogénicamente.- En este proceso se utiliza nitrógeno líquido o dióxido de carbono (sólido) para remover la energía a través del contacto directo con los productos..

El complemento a los evaporadores consiste en una unidad condensadora que puede consistir en un compresor tipo tornillo o en conjunto de compresores semiherméticos; el intervalo puede variar desde unas 100 hasta unas 400 toneladas de refrigeración.

En las aplicaciones dentro de la industria química propiamente dicha tenemos la producción de compuestos inorgánicos, materiales plásticos, drogas, jabón, limpiadores, pinturas y productos similares, compuestos orgánicos y, agroquímicos.

Tanto la refrigeración como el acondicionamiento de espacios son requeridos como parte de muchos procesos químicos, intervienen en el control de la velocidad de reacción, de fermentación, en el control de solubilidad, la licuefacción de gases, solidificación de líquidos y en la conservación de productos. Se requiere refrigeración para la destilación y el proceso de recuperación de líquidos con bajas temperaturas de ebullición.

La energía desarrollada en la fermentación de azúcares en alcohol debe ser removido, ya que un incremento en la temperatura afecta la eficiencia de la operación. El enfriamiento es necesario para controlar las reacciones en la producción de blanqueadores basado en cloro. Las grasas de las disoluciones alcohólicas de ciertos perfumes son separadas por congelación, de tal suerte que los aromas no sean destruidos. Los aceites pueden ser separados por procesos de enfriamiento. Muchas sales son cristalizadas por enfriamiento.

Al igual que en el caso de congelación, en este caso tenemos intercambiadores especializados, en los cuales circula agua fría por un lado y en el otro tenemos al producto; salvo unos cuantos procesos que utilizan la expansión directa, el enfriador de líquido es el que predomina en este segmento, sus capacidades varían desde una hasta las 1000 toneladas, no teniendo una preferencia definida por el tipo usado.

3.- Deshumidificación.

Contamos con seis aplicaciones generales de deshumidificación:

a) **Prevención de la corrosión.**- La corrosión u oxidación de los metales y otros materiales es un problema industrial común, este proceso se ve acelerado por un alto contenido de humedad. A un 60% de humedad relativa la corrosión se ve reducida, a un 40% de humedad relativa la corrosión es prácticamente nula. La deshumidificación es usada para evitar la corrosión y proteger los componentes electrónicos y los circuitos, en la producción de pilas de litio.

b) **Evitar la condensación.**- Cuando las superficies frías se encuentran rodeadas de aire húmedo, el vapor de agua condensa en esas superficies. La condensación ocurre en las superficies enfriadas de los moldes plásticos afectando la calidad del producto.

c) **Evitar la contaminación biológica.**- Los mohos y los hongos se encuentran en casi todos los materiales, el la ausencia de humedad estos organismos microscópicos permanecen en estado latente. En presencia de humedad o condensados, estos agentes biológicos causan daños por millones de dólares en archivos, librerías, bibliotecas, museos, almacenes de comida o de semillas, en muebles y, por si fuera poco, provocan un olor muy desagradable.

d) **Estabilización de materiales higroscópicos.**- Casi todos los materiales tienen alguna afinidad por la humedad, al absorber la humedad durante el proceso pueden modificar su apariencia, propiedades químicas, textura y otros factores. La madera, el plástico, la piel y las tabletas farmacéuticas son afectados negativamente por altos niveles de humedad. La deshumidificación mantiene a los materiales lejos de ser pegajosos, difíciles de manejar o visualmente no apetecibles; mantiene a los materiales en polvo sin aglomerar y provee el mezclado adecuado en la producción de materiales compuestos incluyendo el vidrio, plástico, cerámica o incluso los metales.

e) Facilita el proceso de secado.- El proceso de secado usa típicamente la adición térmica para eliminar la humedad. Para ciertos tipos de productos sensibles, la deshumidificación del aire de proceso puede facilitar el secado a temperaturas menores a 48.9°C (120°F). La deshumidificación puede facilitar el secado de resinas para eliminar las imperfecciones del producto causadas por las burbujas de vapor de agua que aparecen en la fusión de la resina si la humedad está presente.

f) Acondicionamiento de cuartos limpios y secos.- Muchas instalaciones de alta tecnología requieren un control preciso en ambientes críticos de producción, prueba y almacenamiento. Los cuartos secos evitan la recuperación de humedad en materiales tales como los circuitos impresos.

4.- Refrigeración para almacenamiento.

Los productos que requieren refrigeración y congelación durante su proceso requieren almacenamiento refrigerado en la fábrica, durante el transporte y en el almacenaje en bodegas de distribución antes de ser repartido a su destino final. Los almacenes refrigerados deben ser capaces de mantener congelado y refrigerado el producto, sin embargo no están diseñados para el congelamiento del producto.

ESTIMACION DE LA CARGA TERMICA EN REFRIGERACION COMERCIAL

Dos de las aplicaciones más comunes son el diseño de áreas o cuartos acondicionados a cierta temperatura. Dadas las similitudes entre los cálculos, se describen a continuación los conceptos involucrados en la evaluación de la carga térmica en cámaras o cuartos de refrigeración y en aplicaciones de aire acondicionado. Estos son dos temas muy recurridos y existe una extensa bibliografía al respecto. Ambos temas tienen diversos grados de profundidad y complejidad, y han sido tratados en otras tesis. En el presente trabajo se hará mención de las "formas rápidas" de estimación de la carga térmica.

Para simplificar los cálculos de la carga, la carga total de enfriamiento se divide en un determinado número de partes de acuerdo a las fuentes térmicas. La suma de las cargas parciales será la carga de enfriamiento total del equipo. Básicamente la carga térmica consiste en:

1. Carga de transmisión por paredes
2. Carga por cambios de aire
3. Carga del producto
4. Cargas varias

1.- La carga de transmisión por paredes, se debe a la transferencia térmica por conducción que adquiere el espacio acondicionado a través de las paredes. Dicha ganancia se debe a la diferencia de temperaturas entre el exterior y el espacio interior. Si cualquier parte del área refrigerada está

expuesta al sol, debe agregarse una valor adicional, por efectos de radiación solar, a la carga normal. Las ondas de energía radiante son o reflejadas o absorbidas por cualquier material opaco contra el cual choquen. Bajo las mismas condiciones, las superficies lisas y de colores claros reflejan más y absorben menos energía radiante que las superficies oscuras y de textura rugosa.

Se debe tomar en cuenta la ganancia a través de todas las paredes incluyendo piso y techo. Debido a las diferente rigidez de los materiales de construcción, es muy común que las paredes sean de varios materiales, teniendo entonces diferentes factores U involucrados.

Una vez que el espesor del aislante y la diferencia de temperaturas son determinadas, la carga térmica de la pared puede calcularse multiplicando el área exterior por el factor de ganancia térmica que sea aplicable.

2.- Carga por cambios de aire. Es difícil determinar exactamente cuantos cambios de aire ocurrirán al día: puesto que las aperturas de las puertas varían de acuerdo a la aplicación. No obstante, se han elaborado tablas para indicar el número promedio de cambios de aire en diversos casos. Cuando se conoce la masa de aire exterior que entra al espacio acondicionado, el energía ganada depende de la diferencia de entalpías del aire a las condiciones interiores y exteriores y puede calcularse como:

$$Q = m (h_o - h_i)$$

m = masa del aire que entra al espacio Kg (lb)

h_o = entalpia del aire exterior Joules/Kg (BTU/lb)

h_i = entalpia del aire interior Joules/Kg (BTU/lb)

Sin embargo, ya que las cantidades de aire por lo general se dan en pies cúbicos en vez de libras, para facilidad de cálculos se tiene una lista de las ganancias térmicas por pie cúbico en diferentes condiciones.

La carga por cambios de aire se calcula multiplicando el volumen interno por el número de cambios de aire y los factores de eliminación térmica mencionados anteriormente.

3.- Carga del producto. Esta se debe a la diferencia de temperatura entre el producto colocado dentro del área acondicionada y la temperatura de dicho cuarto. La carga del producto será afectada por uno o más de los siguientes factores:

- a) Capacidad térmica (calor específico) Debe considerarse si el producto se enfriará por arriba o por debajo del punto de congelación.
- b) "Calor latente" de congelación.
- c) "Calor" de respiración.

Como se ha mencionado, en el caso de productos "vivos" se tendrá que considerar el "calor de respiración".

Debe considerarse que si el producto es enfriado por debajo del punto de congelación, el proceso tendrá tres etapas. La primera removiendo "calor sensible" por arriba del punto de congelación; la segunda removiendo "calor latente" en el punto de congelación y una tercera etapa removiendo "calor sensible" hasta la temperatura final deseada.

4.- Cargas varias.- Aquí se incluyen los aparatos que consumen energía eléctrica, tales como luces, motores y otros equipos eléctricos. Las personas que trabajan u ocupan el espacio refrigerado transfieren energía térmica y ésta debe ser considerada.

Una vez que la carga térmica total es determinada, es recomendable tener un factor de seguridad. Normalmente un diez por ciento es aceptable.

Así mismo la carga térmica por hora debe considerar el tiempo deseado de operación de la unidad. Cuando la cámara opera a 4°C o más, el horario de operación puede seleccionarse de 16 a 20 horas. Para cuartos con temperaturas de 0°C o menores, y con el sistema de descongelamiento adecuado, el funcionamiento puede fijarse en 18 horas.

Desde luego que se tiene un cierto número de aplicaciones donde el enfriamiento del producto es más o menos continuo, en cuyo caso la carga del producto es una carga continua sobre el equipo. Esto es cierto, por ejemplo, en sistemas de enfriamiento donde la función principal consiste en enfriar al producto caliente hasta la temperatura deseada de almacenaje. Cuando el producto ha sido enfriado hasta la temperatura de almacenaje por lo general se le saca del cuarto de enfriamiento y se lleva al almacén para que el cuarto de enfriamiento vuelva a ser cargado con producto caliente. En este caso, la carga del producto es continua y por lo general constituye una parte considerable de la carga total del equipo.

La conservación de alimentos perecederos mediante refrigeración, se efectúa a temperaturas medias con el fin de eliminar o retardar la actividad de los agentes destructores. Aunque esta acción no es tan efectiva como el sometimiento a alta temperatura para la eliminación de los agentes destructores, el almacenamiento bajo refrigeración reduce la actividad tanto de las enzimas como de los microorganismos, proporcionando por tanto un medio práctico de conservación de alimentos y otros productos perecederos.

La temperatura necesaria para conservar adecuadamente el producto, variará con las características del mismo producto y con el periodo de tiempo que el producto deba estar almacenado. El almacenamiento de los alimentos expuestos a descomponerse estando en su forma natural requiere de un control estricto de la temperatura y de la humedad del espacio refrigerado, así mismo es importante el movimiento del aire. La diferencia de presión de vapor entre el producto y el aire de sus alrededores es principalmente una función de la humedad relativa y de la velocidad del aire en el espacio del almacén.

La importancia de la humedad relativa en los cuartos de enfriamiento depende principalmente del producto que se está enfriando y de si está o no empacado. Durante los estados iniciales de enfriamiento la humedad deberá de ser alta si los envases se encuentran con humedad, pero ésta bajará con rapidez una vez que la humedad libre se haya evaporado. El enfriamiento de los productos en su estado natural (no envasado) pierden rápidamente humedad, con frecuencia se produce neblina en el cuarto de enfriamiento cuando la temperatura del producto y la presión de vapor son altas. Es favorable tener enfriamiento rápido y velocidad alta del aire durante este tiempo de manera que tanto la temperatura como la presión de vapor sean bajadas lo más rápido posible con el fin de evitar pérdidas excesivas de humedad y encogimiento. Es necesario tener velocidad alta a fin de extraer el vapor y de esa manera prevenir la condensación de la humedad sobre la superficie del producto.

Como regla general, la humedad deberá de conservarse en un nivel alto cuando los productos sujetos a deshidratación están siendo enfriados.

Cuando se desea conservar un producto en su estado fresco original por períodos relativamente largos, por lo general se les congela y almacena a aproximadamente -32°C .

ESTIMACION DE LA CARGA TERMICA EN APLICACIONES DE AIRE ACONDICIONADO

El acondicionamiento de aire puede ser desde el tipo residencial usando compresores herméticos de 3/4 de tonelada de refrigeración hasta compresores centrifugos de mil toneladas o más. La diferencia con el industrial depende no sólo de la cantidad sino también de la calidad del aire requerida, incluyendo humedad, distribución, nivel de ruido e higiene del aire.

Para los fines de estudio que nos propusimos, a continuación se enunciarán las 4 clases de aplicaciones más comunes en el ámbito industrial.

- 1.- Acondicionamiento (enfriamiento) de espacios ó áreas confinadas.
- 2.- Enfriamiento de productos o procesos (refrigeración).
- 3.- Deshumidificación.
- 4.- Refrigeración para almacenamiento.

En el acondicionamiento de espacios se incluyen las variables de temperatura, humedad, distribución (movimiento del aire) e higiene. Dependiendo de la aplicación puede llegar a ser más importante el proceso o el producto que el confort o comodidad de los empleados. El control de los contaminantes transportados por el aire en un área o en un sistema puede ser un tema de seguridad específico en algunas entornos industriales, por ejemplo tenemos a las plantas farmacéuticas.

La refrigeración de productos o procesos domina la demanda de tecnología para enfriamiento. En la industria química la aplicación se caracteriza por tener temperaturas de evaporación muy bajas y emplear evaporadores especializados que interactúan directamente con el producto o proceso.

Existen productos o procesos en donde la deshumidificación juega un papel tan importante que se debe tratar por separado.

En aplicaciones de aire acondicionado tenemos las siguientes variables a controlar:

- a) Temperatura.
- b) Humedad.
- c) Calidad de aire (limpieza).
- d) Nivel de ruido.
- e) Distribución.
- f) Ahorro de energía.

Tradicionalmente se habían considerado únicamente las primeras cinco variables arriba mencionadas; sin embargo, los avances en los sistemas de control (electrónicos, por ejemplo), la variedad de compresores y el abaratamiento de los dispositivos para variar la velocidad han hecho que el consumo energético haya cobrado tanto interés como para ser considerado como un punto a considerar dentro del diseño.

Existen varias similitudes con el cálculo descrito anteriormente, pero se describirá a continuación una forma rápida de evaluación para aplicaciones de aire acondicionado. Cabe mencionar que se debe distinguir entre el calor latente y el calor sensible para la selección de un equipo de aire acondicionado. Esta distinción se debe a que el equipo para acondicionamiento de aire tiene un máximo de calor sensible y un máximo de calor latente que puede remover para un conjunto dado de condiciones de operación. (8)

La suma de todas las ganancias térmicas instantáneas dentro del espacio no son necesariamente iguales a la carga térmica al mismo tiempo. Las ganancias térmicas por radiación son parcialmente absorbidas por la superficie y el contenido dentro del espacio acondicionado y no afecta a el aire del área hasta algún tiempo posterior. La energía radiante debe ser primero absorbida por las superficies dentro del espacio (paredes, piso y techo) tan pronto como estas superficies y objetos estén a una temperatura mayor que el aire interior, parte de su energía será transferido por convección a el aire en el cuarto.

Las ganancias térmicas ocurren en las siguientes formas:

- 1) Radiación a través de superficies transparentes.
- 2) Ganancias térmicas por conducción a través de particiones interiores, techo y piso.
- 3) Energía generada por los ocupantes, luces y aparatos eléctricos.
- 4) Ganancias térmicas como resultado de la ventilación o de infiltración de aire exterior.
- 5) Cargas misceláneas.

Para comenzar el cálculo, el diseñador debe especificar las condiciones de temperatura de bulbo seco y la humedad relativa requerida. Si se trata de una aplicación de confort, ASHRAE ha reportado las condiciones que se consideran aceptables ya que el confort de un individuo es afectado por muchas variables tales como edad, sexo, alimentación, etc.

Estas condiciones de confort se basan en un movimiento de aire de 30 pies cúbicos por minuto; la temperatura de las paredes es igual a la del aire del cuarto y en que los ocupantes están ejerciendo una actividad sedentaria. La temperatura de bulbo seco de diseño interior recomendada, según el estándar ASHRAE 90-75, es 78° F (25,55° C).

La humedad relativa es luego seleccionada en la base de que se obtenga un consumo mínimo de energía. (9) Desde el punto de vista de energía tanto de refrigeración como de manejo de aire; así como el punto de vista del confort, una humedad relativa del 50% es un buen compromiso.

Una vez determinadas las condiciones de diseño las condiciones de diseño exterior deben de ser establecidas. Una buena colección de datos se halla en el ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1977. Para nuestro país, diversas instituciones y entidades han publicado las condiciones de diseño en las ciudades más importantes. Sin embargo los esfuerzos por normar esta situación no han terminado. En 1994 se hizo una propuesta en el Diario Oficial de La Federación, pero fue objetada y se encuentra en revisión.

1.- La ganancia térmica por radiación solar a través de vidrios se puede estimar como:

$$SG = A (SF) (SC)$$

A = Área en metros cuadrados (o pies cuadrados)

SF= Factor solar en Joules/metro cuadrado (o BTU/ft²)

SC= Shading Factor o factor de sombreo.

El factor solar es la cantidad de energía por pie cuadrado entrando al espacio acondicionado, a través de los vidrios menos el porcentaje de sombreo debido a la estructura del vidrio.

El factor de sombreo es un factor para cada tipo de vidrio que determina la cantidad de radiación que el vidrio refleja y que no penetra al espacio acondicionado.

En algunos casos una cantidad considerable de radiación es atenuada cuando una sombra es proyectada hacia la pared afectada por radiación solar.

2.- Las ganancias por conducción. Estas siguen la forma:

$$Q = A U \Delta T.$$

donde A es el área en metros cuadrados (pies cuadrados)

U es el coeficiente de transferencia térmica (Joules °C m² (BTU °F ft²))

ΔT es la diferencia de temperatura (exterior - interior)

En el caso de que la pared esté formada por varios materiales se puede estimar U a partir de los valores individuales encontrados en las tablas.

3.- Las cargas internas.- Las personas transfieren calor "sensible y latente", la cantidad depende de la actividad que se este realizando. Los motores eléctricos, incluyendo a los que mueven el aire (siempre y cuando estén en el mismo espacio acondicionado), el alumbrado y aparatos eléctricos entran en esta categoría. Existen tablas del ASHRAE en donde se indican valores típicos.

4.- Ventilación e infiltración. De recién revisión el estándar ASHRAE 62, la calidad de aire dentro de los edificios introduce una carga a abatir al tomar aire del exterior para renovación. En algunos casos se llega a tomar mayor cantidad de aire del exterior para enfriar el interior cuando las condiciones exteriores así lo permiten. En ningún caso sin embargo, la cantidad de aire exterior debe ser menor a 5 pcm por persona.

Las infiltraciones pueden añadir carga significativa, si se trata de un área de uso continuo. En casos especializados en donde la presurización del cuarto es determinante es indispensable tener un buen conteo de las infiltraciones; en otros casos el tener un estimado es suficiente.

5.- Cargas varias. Se pueden incluir aquí las ganancias térmicas debidas a los conductos que llevan el aire a las áreas acondicionadas (llamados comúnmente ductos) y a cualquier otra carga específica que se tenga.

Un factor de seguridad del 10% es también una práctica aceptable.

ESTIMACION DE LA CARGA TERMICA EN PROCESOS CON ENFRIAMIENTO DE LIQUIDOS

El enfriamiento de líquidos es otra aplicación donde el producto proporciona una carga continua sobre el equipo de refrigeración. El flujo del líquido que está siendo enfriado y que pasa a través del enfriador, es continuo ya que entra líquido caliente al enfriador y sale líquido frío del mismo. En este caso, la carga del producto es prácticamente la única carga del equipo, ya que no hay carga por cambio de aire y es despreciable la ganancia térmica por las paredes.

La transferencia térmica por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido adyacente a las paredes calientes recibe energía que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él. La *convección libre* o natural ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica, cuando así sucede, la energía se transfiere por *convección forzada*.

La agitación puede aplicarse por medio de un agitador, o bien, se induce circuleando los fluidos calientes o fríos a velocidades considerables en lados opuestos. La transferencia por convección forzada es más rápida y por tanto es la más empleada en las industrias de proceso.

No es posible generalizar acerca de los intercambiadores térmicos ya que no existe un diseño único y existe una gran variedad de estos equipos. La característica en común es la transferencia térmica desde una fase caliente hasta una fase fría, manteniendo las fases separadas mediante un límite sólido. Los fluidos son bombeados a través del intercambiador y la velocidad de transferencia térmica es una función de las propiedades físicas de los fluidos, las velocidades de flujo y de la geometría del sistema.

El flujo por lo general es turbulento y la geometría de conducción de flujo varía en complejidad desde tubos concéntricos a intercambiadores con balles y superficies extendidas. El análisis de transferencia térmica con flujo turbulento se basa en algunas suposiciones y modelos, aunque para geometrías complejas solo se cuenta con relaciones empíricas y frecuentemente, dichas relaciones son limitadas y sólo operan en determinadas condiciones.

En general las aplicaciones del enfriador de líquido o "chiller" utilizan un segundo intercambiador térmico, en donde, utilizando el líquido frío proveniente del enfriador (normalmente agua a 7°C), se enfría un proceso o producto. Pocas veces se utiliza el intercambiador cuando se lleva a cabo una expansión para enfriar el proceso o producto.

Dado que el agua es el fluido que normalmente es enfriado, cuando se requieren temperaturas menores a 7°C se utiliza etanol para disminuir el punto de congelación. Así mismo otra práctica frecuente es contar con un tanque de mezcla en la succión o entrada del enfriador para que el enfriador no reciba un golpe "térmico" y desestabilice la operación del equipo.

Aunque quizá la aplicación más conocida sea la de acondicionamiento del aire, en donde el agua del enfriador pasa por un serpentín aletado y un ventilador fuerza a pasar el aire a través de éste para enfriarse.

La utilización en el área de procesos es muy variada. En particular la industria de los polímeros se destaca por utilizar agua refrigerada. Primero para controlar la reacción de polimerización y luego durante el proceso de formado (inyección, extrusión o soplado). La industria alimenticia utiliza agua refrigerada para enfriar el producto antes de envasarlo. En los procesos de impresión se utiliza agua para enfriar los rodillos de estampado y evitar que las superficies se peguen al rodillo. El proceso de cromado o depósito electrolítico requiere que se controle la temperatura de la tina en donde se lleva a cabo el proceso.

Como se puede ver de la diversidad de aplicaciones, no existe una geometría determinada para los intercambiadores. Sin embargo el intercambiador que contiene el proceso o el producto principal es determinado por el proceso. Por dicha circunstancia el área de transferencia queda fija, por otra parte se conocen las temperaturas iniciales y finales, por lo que en realidad una vez hecho el balance de materia y energía, se podrá determinar la carga de refrigeración requerida.

Dependiendo del proceso involucrado se podrán utilizar diferentes aproximaciones para estimar la carga. Por otra parte existen industrias que tienen procesos operando y que requerirán de ser optimizados por el Ingeniero Químico.

Se desarrollará a manera de ejemplo, la aplicación de un enfriador para la industria de transformación del plástico.

La regulación de la temperatura del molde determina en forma decisiva la calidad y el tiempo de ciclo de las piezas moldeadas. Bajas temperaturas en el molde llevan a bajos tiempos de ciclo y, por consiguiente, a altos niveles de producción, pero al mismo tiempo se obtienen niveles más bajos de calidad en las piezas. Es por esto, que la producción de un artículo se realiza como un compromiso entre el costo y el nivel de calidad requerido por dicho artículo. (10)

La reducción y el control adecuados de la temperatura del molde llevan a una disminución en la contracción de las piezas, a una elevación de las propiedades mecánicas y a la obtención de un nivel uniforme de calidad en la producción.

Los enfriadores de líquido se encargan de recoger el agua que sale del sistema de enfriamiento del molde para hacerla pasar por un sistema de expansión, disminuir así la temperatura del agua hasta un valor predeterminado y poder reciclarla. Los enfriadores regulan temperaturas generalmente entre los -5 y los 20°C.

GENERALIDADES PARA SELECCIONAR EQUIPOS DE REFRIGERACION

No hay un refrigerante universal que pueda ser usado para todas las aplicaciones, ni existe un único equipo que cumpla los requerimientos específicos de una carga determinada. Identificar la mejor selección entre las muchas y muy eficientes opciones disponibles requiere un examen detallado de varios factores, que a menudo son específicos de un determinado proyecto.

Las variables a considerar incluyen (3) :

- 1.- La carga de refrigeración.
- 2.- La temperatura al cual el fluido debe ser enfriado.
- 3.- La fuente de energía que utiliza la unidad de refrigeración.
- 4.- Disponibilidad y temperatura del medio de condensación.
- 5.- Espacio disponible.

La selección de un equipo de refrigeración se ha vuelto un proceso complejo. En ocasiones más de un tipo de equipo puede ser técnicamente adecuado. Se vuelve entonces necesario hacer la selección del equipo basándose en consideraciones prácticas tales como la capacidad comercial disponible, costos iniciales y de operación, flexibilidad, costos de mantenimiento y confiabilidad.

Cuando se evalúa un sistema, el ciclo de vida del equipo tiende a ser el principal factor; sin embargo algunas veces se olvidan otros costos involucrados. Estos son el costo de operación, el costo de mantenimiento y el costo de instalación. En el costo de operación se debe incluir el costo de la energía que se utiliza, ya sea eléctrica o fósil. Así mismo se debe considerar el consumo de las bombas y servicios auxiliares.

En algunas aplicaciones se tiene vapor de escape que se puede emplear para alimentar el enfriador por absorción; en otros casos el consumo energético comparará los Joules/h (BTU/h) generados por KW consumido y de ahí se obtendrá el costo por tonelada de refrigeración.

En ciertas localidades el costo y disponibilidad del agua pueden determinar la selección del tipo de enfriador a utilizar. Por otra parte, el costo del tratamiento de agua y el mantenimiento de la torre de enfriamiento pueden hacer que los enfriadores con condensador enfriado por agua queden descartados.

Las aplicaciones de refrigeración en temperatura media normalmente se encuentran en lo que se llama refrigeración comercial. Aquí encontramos por una parte lo que se conoce como la refrigeración doméstica, teniendo a los refrigeradores y congeladores caseros como los elementos principales; por otra parte tenemos las unidades empleadas en los establecimientos comerciales para su venta al menudeo, restaurantes, hoteles e instituciones que se dedican al almacenamiento, exhibición, procesamiento y a la distribución de productos perecederos. Estas unidades tienen

algunas variaciones en su gabinete y/o arreglo exterior, pudiendo ser gabinetes cerrados o abiertos y reciben el nombre de vitrinas, paletteras o islas de refrigeración.

Las unidades domésticas generalmente son de tamaño pequeño y con capacidades fraccionarias, que fluctúan entre 1/20 y 1/2 H.P., y son del tipo hermético. En años recientes los compresores rotativos han ganado cierta popularidad dado que son muy compactos.

El término refrigeración comercial también se usa para unidades de refrigeración más grandes como es el caso de cuartos que se utilizan para dicho propósito. La refrigeración comercial emplea refrigeradores y congeladores de mayor tamaño que los domésticos, ya que se emplean para almacenamiento y exhibición de los productos ahí contenidos principalmente en establecimientos comerciales para su venta al menudeo así como en restaurantes y cafeterías. En algunos supermercados es frecuente tener una unidad condensadora de mayor capacidad que sirve a un gabinete con varios componentes.

Al igual que en la refrigeración doméstica, utilizan compresores herméticos principalmente del mismo rango que los domésticos. Debido al auge de los alimentos congelados también se emplean equipos de mayor capacidad, ya sea del tipo hermético o semihermético llegando hasta los 3 ó 5 HP de potencia, ya que se emplean para acondicionar cámaras de conservación, donde se almacenan y exhiben los productos.

La refrigeración industrial se caracteriza por el tamaño de las operaciones realizadas, necesitando por, ende, equipo con gran potencia. La capacidad llega a ser de hasta los cientos de toneladas de refrigeración. Ejemplo de esto son las fábricas de hielo, las empacadoras, lecherías, plantas químicas, etc.

La refrigeración marina y de transporte comparte aplicaciones con la refrigeración comercial y con la industrial, por supuesto la refrigeración marina se refiere a la utilizada en barcos sobre todo de pesca, y la de transporte se refiere preferencialmente a los diversos transportes terrestres.

En las cámaras frigoríficas, conocidas también como cuartos refrigerados, las capacidades pueden ir desde 1.3 hasta 60 T.R. Los compresores abiertos han cedido casi por completo su lugar en las aplicaciones menores a 10 T.R. En este sector es muy común relacionar la capacidad del motor de la unidad condensadora con la capacidad en T.R.

Como regla de dedo es muy cierto que un compresor de una tonelada de refrigeración por cada H.P. de potencia en el motor. Sin embargo hay que ser muy cuidadosos en el empleo que esta regla, dado que para temperaturas de condensación elevadas (mayores de 35°C) o temperaturas de evaporación menores de 5°C la capacidad disminuye.

El compresor semihermético ha ganado popularidad en el intervalo de 1/2 a 20 T.R., desplazando a los compresores abiertos, pero por razones económicas el compresor hermético sigue ganando popularidad posicionándose prácticamente como un estándar en rango de 1/3 hasta 5

toneladas y con la aparición del compresor scroll, el rango de aplicación se incrementó hasta 15 T.R. La demanda de compresores abiertos en capacidades mayores a 15 T.R., aunado a la flexibilidad de cambiar la potencia del motor, han hecho que los compresores abiertos sigan vigentes en el mercado.

Las consideraciones para seleccionar un enfriador de líquido incluyen:

- a) Alternativas de los componentes del enfriador (incluyendo el tipo de compresor y de condensador)
- b) Localización de los componentes y sus beneficios
- c) Tendencias de diseño.

El compresor típicamente tiene el mayor impacto en la eficiencia y confiabilidad de un sistema mecánico de refrigeración. Durante los últimos 10 años (4), las mejoras en el diseño de compresores y el desarrollo de nuevas tecnologías nos han dado enfriadores más eficientes y confiables.

Los compresores recíprocos y más recientemente los compresores tipo scroll, son usados típicamente en aplicaciones de bajo tonelaje (menores a 200 T.R.). Los compresores tipo tornillo son usados en tonelajes intermedios (50 a 400 T.R.) y los compresores centrífugos se emplean en tonelajes grandes (más de 300 T.R.).

El compresor recíproco ha sido el caballo de batalla para los enfriadores pequeños durante muchos años. Típicamente se encuentra disponible desde una hasta cien T.R. El uso de varios compresores en un solo enfriador permite lograr capacidades superiores a las doscientas T.R.

Los compresores recíprocos están disponibles en las siguientes configuraciones: abierto, semihermético o totalmente hermético. La tecnología de los compresores recíprocos ha madurado a un punto en donde el potencial para un incremento en la eficiencia y confiabilidad está limitado. El compresor tipo scroll ha cambiado este panorama y está reemplazando rápidamente a los compresores recíprocos en muchas aplicaciones.

Los compresores scroll se encuentran ahora disponibles desde 1 hasta 15 T.R. y al igual que los compresores recíprocos, a menudo se usan múltiples compresores para alcanzar capacidades mayores a las 15 toneladas.

Hablando en forma general los compresores tipo scroll tienen la ventaja de ser de un 10 a un 15 por ciento más eficientes que los compresores recíprocos. Por otra parte, han probado ser muy confiables, en parte porque tienen aproximadamente un sesenta por ciento menos partes móviles que un compresor recíproco.

Los compresores tipo tornillo (también conocidos como compresores rotatorios helicoidales) han sido empleados por muchos años en compresión de aire y en aplicaciones de refrigeración. Hoy día son ampliamente usados en enfriadores de líquidos. Este compresor está disponible comenzando

con cincuenta T.R. Es muy comúnmente aplicado en aplicaciones de 100 a 400 T.R. El compresor se puede encontrar en configuraciones abiertas o semiherméticas.

Los recientes avances en ingeniería y en la disponibilidad de tecnología de alta precisión, han permitido que los fabricantes ofrezcan compresores tornillos de alta eficiencia para competir con otro tipo de compresores a escala comercial.

Los compresores tornillo como los scroll tienen la ventaja de tener menos partes móviles, así como una mayor eficiencia que los compresores recíprocos.

Los compresores centrífugos han sido por largo tiempo utilizados en aplicaciones de gran capacidad; especialmente en los enfriadores de líquido; comenzando a partir de 150 T.R. Su alta eficiencia, su confiabilidad y su costo relativamente bajo han contribuido a su popularidad.

Los compresores centrífugos están disponibles en configuraciones semiherméticas y abiertas. Su capacidad llega en forma general hasta las 2,000 T.R., pero se han hecho diseños especiales con capacidades aún mayores.

La mayoría de todos los compresores son herméticos. El término hermético significa que el motor está encerrado dentro de la misma carcasa que los componentes del compresor. Las únicas conexiones externas son las necesarias para el suministro de potencia y los dispositivos de seguridad.

El término "abierto" se refiere a los compresores con la fuente de potencia localizada en forma externa a la carcasa del compresor. La potencia es transferida al compresor a través de una flecha externa y un acoplamiento. Un sello especial de alta precisión es requerido para prevenir fugas de refrigerante hacia fuera del sistema o para prevenir la entrada de aire al sistema de refrigeración. Los compresores abiertos pueden usar un motor eléctrico, una máquina de gas o turbina como su fuente de potencia.

La razón principal por la cual los compresores herméticos son más populares es porque requieren menos mantenimiento y son más confiables que los compresores abiertos.

Los motores eléctricos enfriados por aire usados típicamente para mover los compresores abiertos requieren limpieza periódica para mantener la confiabilidad y la eficiencia. Aparte de esto, los compresores tienen un sello en donde la flecha sale de la carcasa. El sello de la flecha requiere mantenimiento regular y tiene un potencial significativo para fugas. Así mismo la alineación motor compresor es crítica para la vida del sello y del acoplamiento.

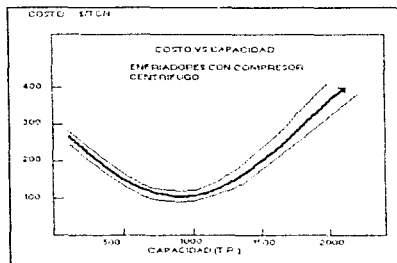
Los compresores herméticos no utilizan ni sello ni un acoplamiento externo. El motor se encuentra encerrado en el sistema de refrigeración y es entonces, enfriado por el refrigerante. Este ambiente controlado y la ausencia de interconexiones externas resultan en menor mantenimiento, mayor confiabilidad y un potencial reducido de fugas. La energía térmica del motor es expulsada a través del condensador, eliminando la necesidad de un sistema de enfriamiento en el cuarto de máquinas, tal como es necesario con los compresores abiertos.

Una ventaja de los compresores abiertos es que pueden ser usados con prácticamente cualquier fuente de potencia. Los equipos operados por combustión están siendo populares como alternativas de corte en periodos pico. Ya que éstos pueden utilizar gas natural o L.P. como combustible, proveen enfriamiento sin contribuir al consumo eléctrico. Generalmente tienen un coeficiente de eficiencia en el intervalo de 1,2 a 1,7. Típicamente su costo de mantenimiento en comparación con otros equipos es ligeramente mayor.

El por qué un compresor es utilizado en un equipo determinado y el por qué un enfriador de líquido o una unidad condensadora es seleccionada para una aplicación, tienden a ser cuestiones generalmente económicas.

Diferentes capacidades de enfriadores tienen un compresor óptimo diferente. La siguiente gráfica(6) muestra el costo de un enfriador centrífugo típico en dólares por tonelada versus su capacidad en toneladas. La aplicación de el compresor centrífugo es típicamente más económica en enfriadores de capacidades mayores a 300 T.R. Debajo de esa capacidad otros tipos de compresor son económicamente aplicados.

Fig. 5-2



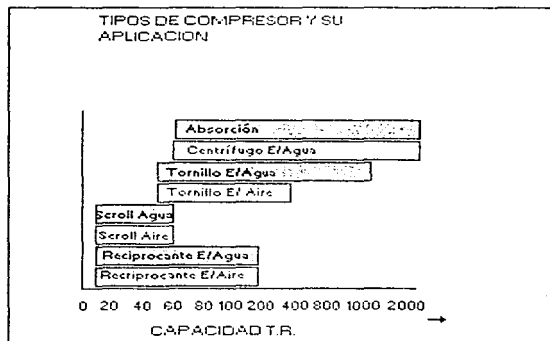
Hay varias razones para la forma de la curva. 80% de los enfriadores centrífugos son vendidos anualmente en el intervalo de 500 a 1,400 T.R. Este tonelaje provee a los fabricantes una ventaja tanto de producción como de utilización de tecnología y diseño.

El alto costo por tonelada a tonelajes menores es el resultado de los costos fijos asociados con la manufactura de enfriadores centrífugos versus sistemas integrados ofrecidos con otros tipos de compresor. Luego entonces, el costo proporcional es mayor.

El incremento en el costo inicial en los tonelajes mayores (superiores a 2,000 T.R.) es el resultado de las pocas unidades fabricadas anualmente, así como el alto costo del ensamble en el campo. Por las mismas razones, los enfriadores mayores llevan asociado un costo de instalación superior que las plantas generadoras de agua helada con múltiples unidades pequeñas.

La siguiente gráfica (7) muestra los diversos tipos de compresor utilizados en varias capacidades de enfriador. Cada tipo de compresor tiene en sí un intervalo de aplicación y costo óptimo.

Fig. 5-3



CAPITULO VI

COMPARACION CON OTROS PROCESOS DE REFRIGERACION

A manera de resumen veamos el siguiente cuadro con las ventajas y desventajas del uso de diferentes tipos de refrigerantes:

Tipo de refrigerante	Ventajas	Desventajas
HCFC's	Se descomponen rápidamente en la atmósfera, tienen menor potencial de daño a la capa de ozono.	Si se usa en exceso puede dañar la capa de ozono. Utilizado como reemplazo, el equipo utiliza más energía que el sistema original.
HFC's	No contienen cloro, por lo que no dañan la capa de ozono.	Estos compuestos tienen un potencial relativamente alto de sobrecalentamiento global.
HC's (hidrocarburos)	Baratos y rápidamente disponibles.	Pueden ser inflamables y tóxicos. Algunos incrementan la contaminación en la capa baja de la atmósfera.
Amoníaco	Una alternativa simple para refrigeración.	Debe ser manejado con cuidado pues es tóxico.

Para poder hacer un análisis entre los pros y contras de otros sistemas de refrigeración y la refrigeración con clorofluorocarbonos, se debe tener una aplicación en particular con una carga térmica definida y un entorno concreto.

Veamos las ventajas y desventajas entre el sistema por absorción comparado con el sistema por compresión:

El ciclo de absorción utiliza energía térmica como fuerza motriz para el ciclo de refrigeración. La energía puede ser suministrado en la forma de vapor, agua caliente, aceite o gas natural (combustión de estos dos últimos).

La demanda de energía eléctrica de la bomba que traslada la disolución concentrada, es pequeña si se compara con la del compresor del vapor, pero la demanda de energía térmica del sistema es alta.

Debido a que el enfriador de liquido por absorción utilizan la energía térmica, proveen la ventaja de un gran ahorro en consumo de energía eléctrica y consumos bajos en situaciones de demanda eléctrica.

El sistema de absorción tiene varios aspectos favorables que frecuentemente dictan su elección en el campo de la industria química. Cuando se dispone de vapor de agua de baja presión, como vapor de escape a bajo costo, los costos de la operación son más pequeños que para los sistemas de compresión. El equipo permite la instalación exterior, los costos de mantenimiento son bajos, el control sencillo y la operación con cargas reducidas resulta posible con pequeña pérdida de eficiencia.

La eficiencia de una maquina de absorción puede ser expresada en términos de eficiencia como:

$$R = \frac{\text{efecto refrigerante Joule/h}}{\text{suministro de calor Joule/h}}$$

Un coeficiente de 0.6 a 0.7 es normal.

Con fines comparativos se presenta la siguiente tabla comparando los consumos energéticos de un enfriador de 500 toneladas de refrigeración del tipo centrífugo y uno de la misma capacidad por absorción, suponiendo que operan a plena carga:

Enfriador Tipo	Absorción	Centrífugo
Consumo eléctrico	13 KW	350KW
Consumo térmico	6.33×10^7 Joules/h (6,000 MBtu/h)	0
Consumo eléctrico de servicios auxiliares	67 KW	49 KW
Consumo total KW	80 Kw	399 KW
Consumo total MBtu/h	6.33×10^7 Joules/h (6,000 MBtu/h)	0

Los enfriadores por absorción generalmente tienen un costo inicial mayor que otros sistemas. La diferencia de costo resulta de la sofisticada construcción interna, las aleaciones especiales para la alta transferencia de calor y el grado de hermeticidad requerido.

Debido al bajo consumo eléctrico del enfriador de absorción, es posible tener un generador de emergencia significativamente menor en comparación con el empleado con sistemas de compresión.

Los enfriadores de una sola etapa operan con vapor de baja presión (103.4 Kpa-15 psig-

máximo) o agua caliente (132°C-270°F- máximo) y tienen un coeficiente de operación cercano a 0.68. Están disponibles típicamente de 100 a 1,600 toneladas.

En muchas aplicaciones, el calor de deshecho de las cargas de proceso, plantas de cogeneración o simplemente calderas con capacidad sobrada, proveen el vapor para operar el enfriador.

Los enfriadores de absorción de doble etapa operan a presiones y temperaturas elevadas (620-1034 Kpa o 90-150 psi y 148.8-204.4°C o 300-400 °F) y están disponibles en el rango de 100 a 1500 toneladas. Son más eficientes que las de una sola etapa (coef. cercano a 1) y se utilizan en procesos especializados.

Los enfriadores de absorción operados a fuego directo, con el mismo rango de aplicación y mejor o igual eficiencia que los de doble etapa, han ganado popularidad pese a la complejidad del sistema. Estos enfriadores tienen la característica adicional de poder suministrar agua caliente. En ciertas aplicaciones esta flexibilidad elimina la necesidad de calderas o por lo menos disminuye los requerimientos de estas.

Veamos ahora una tabla comparativa de comportamiento en una aplicación de aire acondicionado de diferentes gases refrigerantes.

Comparación del Ciclo Ideal
(4 °C (40°F) Succión saturada, 37 °C (100°F) descarga, sin subenfriamiento ni sobrecalentamiento)

Refrigerante	Presión de Evaporación		Presión de Condensación		métriton	pcm/ton	COP	% de incremento en comparación con el CFC-11, kW/TR
	Kpa	psia	Kpa	psia				
CFC-11	48.40	7.02	161.75	23.46	0.449	15.85	7.57	0.0
HCFC-123	39.85	5.78	143.20	20.77	0.534	18.85	7.44	1.8
CFC-12	35.625	51.67	209.14	131.85	0.097	3.06	7.06	7.2
R-500	418.65	60.72	1074.20	155.80	0.740	2.62	6.70	13.0
HCFC-134a	343.08	49.76	957.68	138.90	0.085	2.99	6.94	9.2
HCFC-152a	312.33	45.30	856.32	124.20	0.089	3.16	7.20	5.1
HFC-22	573.71	83.21	1452.03	210.60	0.054	1.91	6.98	8.3
HCFC-125	768.83	111.51	1909.98	277.02	0.052	1.84	5.96	27.1
HFC-32	939.75	136.30	2369.72	343.70	0.033	1.18	6.75	12.1

La refrigeración por vacío tiene aplicación limitada al enfriamiento de agua, que a su vez puede usarse para enfriar otra sustancia. El límite inferior de temperatura es de unos 40°F (4.4°C) por los límites más bajos de presión que se pueden obtener económicamente con chorros de vapor.

Las demandas de espacio y peso de un sistema de vacío son mayores que los de un sistema de compresión, pero los costos de mantenimiento son muy bajos. La operación de un sistema a cargas reducidas no es eficaz, a menos que se usen varios chorros en paralelo. Estos sistemas se han usado en acondicionamiento de aire y con extensión considerable en la industria química donde se cuenta con suficiente espacio y vapor.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de esta tesis se han descrito diversos procesos industriales que involucran a la refrigeración o necesitan de ella como un servicio auxiliar. Dada la gran diversidad de procesos y de condiciones, sería imposible citar cada una de estas aplicaciones; sin embargo, se han fijado marcos de referencia, para ubicar a los procesos de refrigeración de acuerdo a las temperaturas típicas de operación.

De acuerdo a este último parametro los procesos pueden ser clasificados como de temperatura alta, media, baja y criogénica. Los procesos criogénicos como tales, salen fuera del rango de aplicación de la refrigeración con clorofluorocarbonos, aunque llegan a ser empleados durante las primeras etapas de los sistemas en cascada utilizados para dicho fin.

La refrigeración con CFC's es generalmente empleada en una etapa o paso. En algunas ocasiones, cuando se emplea agua como refrigerante secundario y el diferencial de temperatura es muy elevado con un diferencial de temperatura mayor a 10°C (la temperatura de retorno del agua por arriba de la temperatura ambiental y la temperatura de suministro por debajo de los 10°C), es posible entonces un arreglo en serie del enfriador de líquido con una torre de enfriamiento.

En el capítulo V se ha dado un repaso de las aplicaciones de la refrigeración

- 1.- Acondicionamiento de espacios
- 2.- Enfriamiento de productos o procesos.
- 3.- Deshumidificación.
- 4.- Refrigeración para almacenamiento.

Tradicionalmente las aplicaciones de la refrigeración se clasifican como refrigeración comercial, industrial y aire acondicionado; la perspectiva de acuerdo a lo descrito en el capítulo V es mucho más rica en cuanto a opciones y abre un campo de aplicación al Ingeniero Químico dentro del diseño de procesos.

El ingeniero no solo debe de evaluar la carga térmica, sino que, evaluando los recursos disponibles, puede definir el tipo de equipo que mejor satisfaga dicha demanda tanto desde el punto de vista eficiencia como desde el punto de vista económico.

No necesariamente todas estas fuentes térmicas intervienen en un proceso determinado y la importancia de cualquiera de las fuentes de energía varía considerablemente para cada aplicación. Se ha descrito a la transferencia térmica como el estudio de las velocidades a las cuales la energía se intercambia entre fuentes térmicas y receptores, tratados usualmente de manera independiente

Los procesos de transferencia térmica se relacionan con las razones de intercambio térmico tales como los que ocurren en el equipo de transferencia térmica tanto en ingeniería mecánica como en los procesos químicos. Este enfoque realza la importancia de las diferencias de temperatura que es el potencial por el cual la transferencia térmica se lleva a efecto.

Un problema típico de procesos de transferencia térmica involucra las cantidades de energía que deben transferirse, las razones a las cuales pueden transferirse debido a la naturaleza de los cuerpos, la diferencia de potencial, la extensión y arreglo de las superficies que separan la fuente, el receptor, y la cantidad de energía mecánica que debe disiparse para facilitar la transferencia térmica. Puesto que la transferencia térmica considera un intercambio de sistema, la pérdida térmica por un cuerpo deberá ser igual al calor absorbido por otro dentro de los confines del mismo sistema.

Se han descrito dos métodos para la determinación de la carga térmica en aplicaciones de aire acondicionado y refrigeración en temperaturas medias. Existe una amplia bibliografía al respecto, por lo que en esta tesis sólo se mencionan procedimientos sencillos de estimación. Por otra parte, cuando se trata de otros procesos que involucren refrigeración, se deben de realizar los balances de materia y energía correspondientes al sistema.

Durante la evaluación del sistema, se tienen que definir los puntos de operación y por tanto las variables a controlar. Generalmente las primeras variables en que se piensa son temperatura y/o humedad. A esta lista se pueden agregar otras propiedades del producto o del sistema que está siendo refrigerado, tales como densidad y resistencia eléctrica, entre otras posibles.

Del punto de operación seleccionado dependerá la carga máxima que tenga que disiparse. Cabe recordar que el funcionamiento ininterrumpido del equipo repercutirá en el detrimento de su vida útil. Para algunos sistemas el sobredimensionamiento del equipo seleccionado puede llegar a ser recomendable, sobre todo si se tiene un proceso variable o se prevé una expansión o crecimiento.

Se ha presentado un cuadro de los compresores que son capaces de operar con CFC's. En base a la capacidad del sistema se pueden tener varios tipos de compresor disponibles. Dada su eficiencia y su bajo nivel de ruido los compresores herméticos han ganado gran popularidad desplazando a los compresores abiertos y a los semiherméticos en un rango de 1 a 15 toneladas de refrigeración.

Los compresores semiherméticos seguirán siendo preferidos en las aplicaciones de temperaturas bajas (refrigeración comercial y cámaras de congelación) en tanto son susceptibles de tener mantenimiento. En particular en el rango de hasta 20 toneladas de refrigeración. Este mismo concepto, ha hecho que se sigan utilizando compresores de tipo abierto en las unidades condensadoras en este campo.

En aplicaciones mayores a 70 Toneladas se puede a empezar a emplear a los compresores tipo tornillo y evaluar su factibilidad en comparación respecto a compresores recíprocentes. Finalmente en capacidades de 300 toneladas de refrigeración se puede evaluar la utilización práctica de compresores tipo centrífugo.

Un elemento que no se ha mencionado hasta el momento es la confiabilidad del sistema y su comportamiento a cargas parciales. En ciertas aplicaciones se puede pensar en sistemas redundantes con equipos cercanos o equivalentes en capacidad. Por otra parte si la carga no es constante o el proceso es realizado en bloques de diferente tamaño, debe seleccionarse un equipo que tenga un buen comportamiento a cargas parciales, esto se traduce en equipos que tengan varias etapas o circuitos de enfriamiento o equipos con un solo compresor que pueda operar en pasos.

Una aplicación que ganará popularidad en tanto se apliquen tarifas escalonadas es el banco de hielo, este es el almacenamiento y producción de hielo en unos tanques especiales. De tal suerte que el enfriador de líquido de este sistema sólo opera cuando la tarifa eléctrica es baja. Cuando se demanda enfriamiento, se bombea agua que es enfriada en estos tanques.

En procesos de bloque una técnica similar a la anterior es utilizada, pero sin llegar a el congelamiento. En un tanque de almacenamiento aislado, un enfriador de capacidad menor a la carga requerida en el proceso, va enfriando el agua contenida en dicho tanque. Cuando el proceso demanda enfriamiento se utiliza el agua ahí enfriada. Esto es particularmente útil cuando se requiere grandes cantidades de enfriamiento en un período corto de tiempo.

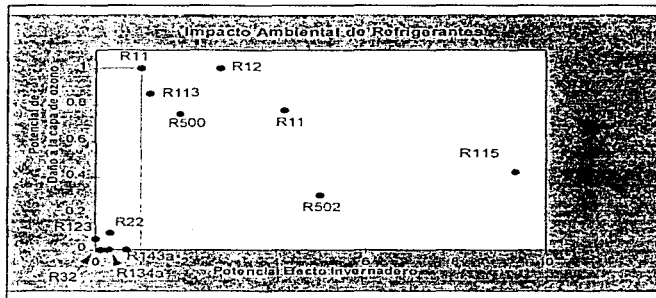
Dada su repercusión en el medio ambiente, el uso de los CFC's esta en desuso. Se han presentado los refrigerantes alternativos propuestos hasta la fecha. En las aplicaciones de refrigeración a temperaturas medias y bajas, el empleo del R22 seguirá siendo la norma, en tanto no se tenga otra solución con mejores perspectivas técnicas y económicas. El R11 ya está descartado del cartel de opciones. Para equipos existentes, el reemplazo del R11 es prácticamente ya una necesidad.

Como gases alternativos en equipos de tipo tornillo o centrífugo, se tiene al R123, al R134 y al R22. Véase el siguiente cuadro de desfaseamiento en el uso de refrigerantes.

De la tabla anterior se infiere que en los próximos años tendremos un período de pruebas de diferentes mezclas de refrigerantes, dentro de los cuales los HCFC y HFC dominarán el mercado hasta que se encuentren mejores alternativas.

El R22 se ha posicionado como el HCFC más usado. Las siguientes gráfica nos da una perspectiva de su uso actual y al mismo tiempo nos ayudan a justificar el uso del R22 en los siguientes años. Esto es, dado que tiene un bajo potencial de daño a la capa de ozono y también contribuye poco al calentamiento global, el R22 ofrece una opción técnica y económicamente viable dada la plataforma actual de producción de refrigerantes y de diseño de equipos.

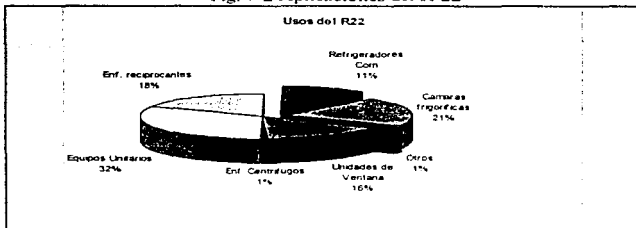
Fig. 7-1 Comparativo de refrigerantes



La gráfica anterior fue hecha en base al R11, dando un valor de 1 tanto en el potencial de daño a la capa de ozono como al potencial de efecto invernadero; los demás gases se muestran en proporción.

Como se puede apreciar el 67% del R22 se emplea para aplicaciones de R-22 y 33% en aplicaciones de refrigeración.:

Fig. 7-2 Aplicaciones del R-22



Pese a que la refrigeración por vacío o por absorción son viables técnicamente, requieren de una instalación y de un mantenimiento especializado. Estas condiciones son viables únicamente en las industrias de proceso y no se han podido emplear en gran escala en aplicaciones domésticas o comerciales de pequeña escala. La refrigeración por absorción debe tenerse en mente en las plantas que cuentan con vapor de desecho y/o en donde la cogeneración es factible.

La refrigeración con CFC's en la industria química es pues muy basta y será sustituida en los próximos años con mejores compresores que utilizarán mezclas de HCFC's y HFC's.

BIBLIOGRAFIA

Capítulo I

- (1) Pegüño Larousse Ilustrado, Ediciones Larousse, México, 1984
- (2) Perry's Chemical Engineer's Handbook, sixth edition, Robert H. Perry & Don Green, Mc Graw Hill, Japan 1988. Pág. 15-3
- (3) Principios de refrigeración, R. Warren Marsh y C. Thomas Olivo, 2a Ed. Diana, México 1976. Págs. 15-17
- (4,5) Instalaciones frigoríficas, José Vives Escobar, 3a. Ed. Mc Graw Hill México, 1956. Págs. 72-77.
- (6) Refrigeración y Acondicionamiento de Aire, W.E. Stoecker, 1a. Ed. Mc Graw Hill México, 1978. Págs. 26-36
Air Conditioning Manual, The Trane Company, 1965. LaCrosse USA Págs. 1-9.

Capítulo II

Principios de Refrigeración, Roy J. Dossat, 1a. Ed. CECSA México, 1987. Págs. 108-161.
Refrigeración y Acondicionamiento de Aire, W.E. Stoecker, 1a. Ed. Mc Graw Hill México, 1978. Págs. 38-54

Capítulo III

- (1) Process Absorption Chillers, The Trane Company, Booklet ABS-S-5, 1992 LaCrosse, USA. Pág. 4.
- (2) Evaluación de sistemas de refrigeración utilizando propano o una mezcla de hidrocarburos para una planta erigénica, Tesis, Pedro Zuñiga Arvizu, FES Cuautitlan, 1983. México Pág. 26
Perry's Chemical Engineer's Handbook, sixth edition, Robert H. Perry & Don Green, Mc Graw Hill, Japan 1988, Pág. 12-38 a 40.
Evaluación de sistemas de refrigeración utilizando propano o una mezcla de hidrocarburos para una planta erigénica, Tesis, Pedro Zuñiga Arvizu, FES Cuautitlan, 1983. México Págs. 22-29.

Capítulo IV

- (1) Redesigning equipment for R-22 and R502 alternatives, Kenneth c. Hickman, ASHRAE Journal, January 1994, USA
Comparación Técnico-Económica de Refrigerantes, Tesis, Francisco Javier Artigas Coronado, Fac. de Química, UNAM, Mexico, 1985.

Capítulo IV (cont.)

Principios de Refrigeración, Roy J. Dossat, 1a. Ed. CECSA México, 1987. Págs. 365-399.
Perry's Chemical Engineer's Handbook, sixth edition. Robert H. Perry & Don Green. Mc Graw Hill, Japan 1988. Pág. 12-24 a36.
Programa de Transición de Refrigerantes y Certificación para Recuperarlos, Contratistas de Aire Acondicionado de América. Ferris State University. USA 1993. Págs. 1-10.

Capítulo V

Principios de Refrigeración, Roy J. Dossat, 1a. Ed. CECSA México, 1987. Págs. 164-270.
Perry's Chemical Engineer's Handbook, sixth edition. Robert H. Perry & Don Green. Mc Graw Hill, Japan 1988. Pág. 10 -8 a 20; 12-28,12-48.
Procesos de Transferencia de Calor, Donald K. Quern, CECSA, México, 1987. Págs. 16-20.
Air Conditioning Manual, The Trane Company, 1965. LaCrosse USA Págs. 10-48
Selecting Chillers in the 90's, accounting for hidden costs, Donald J. Aumann; Heating, Piping and Air Conditioning, March 1996 USA.
Chiller Technologies and Application, The Trane Company, Engineering System Clinic, LaCrosse, USA, 1991 Págs. 6-8.
Application Guide, Load Calculation Digest, The Trane Company, LaCrosse, USA, 1984 Pág. 2.
Cooling Load Estimate, The Trane Company, Air Conditioning Clinic, LaCrosse, USA, 1979 Págs. 6-8.
Moldeo por inyección de plásticos, Carlos Moreno, Ed. Corso, México, 1993. Pág. 83
Process Absortion Chillers, The Trane Company. Booklet ABS-S-5, 1992 LaCrosse, USA. Págs.2-3.

Capítulo VI

Chiller Technologies and Application, The Trane Company, Engineering System Clinic, LaCrosse, USA, 1991 Págs. 14-16.
Process Absortion Chillers, The Trane Company. Booklet ABS-S-5, 1992 LaCrosse, USA. Págs.2-3.
Evaluación de sistemas de refrigeración utilizando propano o una mezcla de hidrocarburos para una planta criogénica, Tesis, Pedro Zuñiga Arvizu, FES Cuautitlan, 1983. México Págs. 22-29.
Perry's Chemical Engineer's Handbook, sixth edition. Robert H. Perry & Don Green. Mc Graw Hill, Japan 1988. Pág. 12-28-47.

Capítulo VII

HCFC22, The Trane Company, Booklet 22-8650-11, 1992 LaCrosse, USA. Págs 4-10.

Chiller Technologies and Application, The Trane Company, Engineering System Clinic, LaCrosse, USA. 1991 Págs. 6-8.

Perry's Chemical Engineer's Handbook, sixth edition. Robert H. Perry & Don Green. Mc Graw Hill, Japan 1988. Pág. 10 -8 a 20; 12-28,12-48

Apendices

Principios de Refrigeración, Roy J. Dossat, 1a. Ed. CFCSA México, 1987. Págs. 187-224.

Moldeo por inyección de plásticos, Carlos Moreno, Ed. Corso, México, 1993. Pág. 83

PLUG UNIT, York Recold Co., Forma 225R01T0786, México 1986, . Págs 8-25.

Supongamos que se requieren producir dos artículos por minuto en una máquina de inyección que actualmente está procesando 1.5 artículos por minuto. El fabricante de la máquina de inyección indica que es posible fabricar las dos piezas siempre y cuando se mejore el sistema de refrigeración. Cada pieza pesa 920 gr. y el material empleado es polietileno de baja densidad. El molde que se está empleando es de acero y tiene un peso de 1406.95 Kg., la cantidad de aire que se está inyectando para desprender el artículo es de 1104.54 Kg/hr.

En basa a la información se sabe que:

	Kg/hr	ΔT °C	c_p KCal / kg°C
Molde	1,406	20	0,1178
Aire	1,104	20	0,242
Plástico	110	220	0,5
Líquido frío	20,804	1	1

a) De la tabla anterior podemos calcular la carga térmica que hay que retirar del molde, debido a que éste se encuentra a una temperatura superior a la del medio ambiente.

Aplicando la ecuación 1 y substituyendo valores:

$$Q1 = 1406.95 \times 0,1178 \times 20 = 3314.77 \text{ Kcal/hr.}$$

$$Q1 = 3314.77 \text{ Kcal/hr. (1.096 T. R.)}$$

b) Aplicando la ecuación 1 y substituyendo datos, podemos calcular la carga térmica que hay que retirar para enfriar el polietileno que es inyectado al molde.

$$Q2 = 110.4 \times 0,5 \times 220 = 12144 \text{ Kcal/hr.}$$

$$Q2 = 12144 \text{ Kcal/hr. (4.015 T. R.)}$$

c) De la misma forma podemos estimar la carga que se debe retirar por efecto del aire que se inyecta al sistema para que la pieza se desprenda del molde.

$$Q3 = 1104.54 \times 0,242 \times 20 = 5345.97 \text{ Kcal/hr.}$$

$$Q3 = 5345.97 \text{ Kcal/hr. (1.7678 T. R.)}$$

Sumando las cargas parciales, para obtener la carga total y determinar la cantidad de fluido frío que debemos alimentar al molde.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 20804 \text{ Kcal/hr.} = 6.87 \text{ T.R.} \quad (2)$$

Una vez determinada la cantidad de energía que debemos retirar del molde es muy importante determinar la cantidad de líquido "frío" que debemos circular a través del molde para conseguir la velocidad adecuada del fluido y tener un flujo turbulento y consecuentemente el valor adecuado del coeficiente total de transferencia.

Para esto supongamos que la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del fluido es de 1°C. Con el valor obtenido en (2) y substituyendo los valores, para el caso del líquido, tenemos:

$$20804.74 = m c_p (t_2 - t_1)$$

$$\text{Como } t_2 - t_1 = 1^\circ\text{C para el líquido}$$

$$c_p = 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

Tenemos que:

$$m = 20804.74 \text{ Kg}$$

El flujo másico es entonces $W = 20804.74 \text{ Kg/hr}$ y

$$Gv = \text{Gasto volumétrico} = 87.32 \text{ G.P.M.} \quad (3)$$

convirtiendo a G.P.M. y siendo la densidad del fluido 65.34 lb/ft³

Antes de seleccionar un enfriador que retire la cantidad de calor determinada en el molde, debe de obtenerse las ganancias térmicas en tuberías, para lo cual debe hacerse las siguientes consideraciones:

- Los recorridos de las tuberías de suministro y retorno se encuentran aisladas.
- El tanque de mezcla se encuentra aislado al igual que las tuberías que lo conectan al enfriador. Siendo estas últimas distancias despreciables.
- Conociendo que:

$$C_p = \text{calor específico del fluido frío} = 1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

ΔT = Diferencia de temperatura de la salida del tanque de recirculación a la entrada del molde = 0.5°C (Para fines de cálculo incluiremos aquí tanto el suministro como el retorno)

aplicando la ecuación (1)

$$Q = 20804.74 \times 1 \times 0.5 = 10402.37 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}} = 3.44 \text{ T. R.}$$

por lo tanto la carga total será:

$$Q \text{ molde} + Q \text{ Tubería} = 6.87 + 3.44 = 10.31 \text{ T. R.}$$

por consiguiente debe seleccionar un equipo que retire 10.31 T. R. a esas condiciones de operación. Generalmente la temperatura de salida del agua del enfriador esta entre los 5 y los 10°C. La capacidad nominal de los enfriadores está basada en una reducción de temperatura de 5°C, a un volumen de agua de 600 litros por hora y por cada tonelada de refrigeración de capacidad. Cuando el condensador es enfriado por aire, la temperatura ambiente considerada para diseño es de 30°C y cuando es enfriado por agua, se consideran 22°C, requiriendo circular 660 litros por hora y por tonelada de refrigeración del enfriador.

CALCULO DE UNA CAMARA DE REFRIGERACION

A continuación se presenta el cálculo de la carga de refrigeración de un cuarto cuyo contenido se desea mantener a una temperatura arriba de los 0°C. Los datos para el diseño son los siguientes:

En la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, se tiene un cuarto para refrigerar; el cuarto tiene unas dimensiones de 18.3m de largo por 7.6m de ancho y 6.1m de alto. Posee aislamiento de un espesor de 101.6mm, dicho aislamiento tiene las mismas propiedades que el corcho. El espesor de la pared es de 15 cm y la temperatura exterior de diseño es de 32°C.

Se desea almacenar 11,350 Kg de ejotes, los cuales deberán cambiar de una temperatura de 15.5°C a una de 5°C y mantenerse en la misma. Los datos complementarios se presentan en la memoria de cálculo y así mismo se incluyen tablas de los diversos factores requeridos, dichas tablas se pueden encontrar el Refrigeration Engineering Data Book de ASHRAE.

Para la solución de este ejemplo inicialmente se obtiene el área exterior del cuarto y el volumen interior. Enseguida se calculan las diversas contribuciones:

1.- Carga de transmisión o de pared. Con base a la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura del cuarto y con el espesor del aislante se localiza en la tabla B1 el factor de 243.9 Kcal/m². Este factor se multiplica por el área exterior y se obtiene la carga de transmisión.

2.- Carga por cambios de aire. En este caso se utiliza la tabla B2, la cual proporciona 2.7 cambios de aire debidos a infiltraciones por la apertura de puertas en 24 horas. La ganancia térmica se obtiene multiplicando el volumen interior por el número de cambios y el factor de eliminación de calor, el cual se obtiene de la Tabla B-4 conociendo la humedad relativa del producto y la temperatura del cuarto de almacenamiento.

3.- Carga del producto. Para el cálculo de la carga por la reducción de temperatura del producto, se multiplica el peso del producto por la reducción de temperatura del mismo por su calor específico. Dado que es un producto "vivo" el calor de respiración se debe calcular, multiplicando el peso del producto por el calor de respiración del mismo.

4.- En las cargas misceláneas se considera el calor producido por las personas que se encuentran entrando al cuarto de almacenamiento (tabla B3) y la carga generada por iluminación u otras cargas no contempladas anteriormente.

5.- Para obtener la carga total se realiza la suma de las cargas parciales anteriores y se agrega un factor de seguridad de 10%. Esta cantidad se divide por el tiempo en que se requiere operar la unidad y se obtiene la capacidad requerida por hora.

APENDICE B

CALCULO DE LA CARGA DE REFRIGERACION TERMICA
PARA CUARTOS DE REFRIGERACION.
(ARRIBA DE 0°C)

INFORMACION PARA EL DISEÑO

Aplicación: Almacenamiento de ejotes.
Temperatura ambiente exterior 32 °C
Temperatura del cuarto: 5°C
Diferencia de temperaturas 27°C
Dimensiones exteriores del cuarto:
Largo (L): 18.3 m
Ancho (W): 7.6 m
Alto (H): 6.1 m
Espesor de la pared 15 cm

Aislante :
Material: Corcho
Espesor: 10 cm

Carga del producto:
(a) Enfriar 11,350 Kg de ejotes de 15.5°C
a 5°C y mantenerlos a 5°C
(b) Tiempo de operación de la unidad:
15 hrs./día.

Calor específico ejotes 0.91 Kcal/Kg°C
Carga de respiración ejotes 1.9 Kcal/Kg

Cargas Misceláneas:
Número de personas: 3
Cargas eléctricas (Watts): 6,000
Otras:

SOLUCION

Area exterior del cuarto (A):	Volúmen interior del cuarto (V):
(L) 18.3 x (W) 7.6 = 139.08	Volúmen (V) = 18x7.3x5.8
(L) 18.3 x (H) 6.1 = 111.63	(V) = 762.12m
(W) 7.6 x (H) 6.1 = 46.36	
Area (A) = 2 x 297.07 = 594.14	

I. CARGA DE TRANSMISION.

(a) Area (A)	594.14 m ²
(b) Factor de ganancia de calor	243.9 Kcal/ m /24 hrs.
(c) Carga = (a) 594.14 x (b) 243.9 =	144,910.75 Kcal/24 hrs.

II. CARGA POR CAMBIOS DE AIRE.

(a) Volumen (V)	762.12	m ³
(b) Cambios de aire (Tabla B2)	2.7	por 24 hrs.
(c) Eliminación de calor (Tabla B7)	16.5	Kcal/m ³
(d) Carga = $762.12 \times 2.7 \times 16.5 =$	33,952.45	Kcal/24 hrs.

III. CARGA DEL PRODUCTO.

1.- Carga por la reducción de la temperatura.

(a) Peso del Producto	11350	Kg
(b) Reducción de la temperatura	10.5	°C
(c) Calor específico	0.91	Kcal/Kg°C
(d) Carga = $11,350 \times 10.5 \times 0.91 =$	108,449.25	Kcal/24 hrs.

2.- Calor o Carga de Respiración.

(a) Peso del Producto	11350	Kg
(b) Carga de respiración	1.9	Kcal/Kg
(c) Carga = $11,350 \times 1.9 =$	21,565.00	Kcal/24 hrs.

NOTA: Los pasos descritos deben repetirse para cada tipo de producto.

IV. CARGAS MISCELANEAS.

(a) Calor equivalente por persona (Tabla B3)	211.7	Kcal/hr
(b) Número de personas $3 \times 211.7 \times 24$	15,242.40	Kcal/24 hrs.
(c) Cargas eléctricas (Watts) $6,000 \times 20.64$	123,840.00	Kcal/24 hrs.
(d) Otros (tome como referencia las Tablas B5 y B6)		

V. CARGA TOTAL DE REFRIGERACION (I+II+III+IV) 447,959.85 Kcal/24 hrs.

VI. FACTOR DE SEGURIDAD (10% DEL TOTAL) 44,795.99 Kcal/24 hrs.

VII. CARGA TOTAL (V+VI) 492,755.84 Kcal/24 hrs.

VIII. CAPACIDAD REQUERIDA POR HCRA (VII /16) 30,797.24 Kcal
(10.2 TR)

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

TABLA B1

Aislante Corcho o equivalente

K=0.3		Diferencia de temperatura (ambiente y cuarto) °C									
mm	0.56	22.2	27.8	30.6	33.3	36.1	38.9	41.7	44.4	50.0	
76.2	6.5	260.2	352.2	357.7	390.2	422.8	455.3	487.8	520.3	585.4	
101.6	4.9	195.1	243.9	268.3	292.7	317.1	341.5	365.9	390.2	439.0	
127.0	3.9	157.2	195.1	214.1	235.8	254.7	273.7	292.7	311.7	352.3	
152.4	3.3	130.1	162.6	178.9	195.1	211.4	227.6	243.9	260.2	292.7	
177.8	2.8	111.1	140.9	154.5	168.0	181.6	195.1	208.7	222.2	252.0	
203.2	2.4	97.6	122.0	135.5	146.3	159.9	170.7	184.3	195.1	219.5	
228.6	2.2	86.7	108.4	119.2	130.1	140.9	151.8	162.6	173.4	195.1	
254.0	2.0	78.6	97.6	108.4	116.5	127.4	135.5	145.3	157.2	176.2	

TABLA B2

Número promedio de Cambios de Aire
Debidos a infiltraciones y apertura de puertas en 24 horas

Volúmen m ³	Cambios de Aire	
	Arriba de 0 °C	Abafo de 0 °C
5.7	44.0	33.5
8.5	34.5	26.2
11.3	29.5	22.5
14.2	26.0	20.0
17	23.0	18.0
22.7	20.0	15.3
28.3	17.5	13.5
42.5	14.0	11.0
56.7	12.0	9.3
85	9.5	7.4
113.4	8.2	6.3
141.7	7.2	5.6
170	6.5	5.0
226.7	5.5	4.2
283.4	4.9	3.8

TABLA B3 Calor Producido por Personas

Temperatura °C	Calor Equivalente/persona Kcal/hr
15.6	151.2
10.0	181.4
-4.4	211.7
-1.1	239.4
-6.7	264.6
-12.2	302.4
-17.8	327.6
-23.3	352.8
-28.9	378.0

**TABLA B4 Cantidad de Calor Absorbido
Kcal/24 hr para un m3 del Volúmen Interior**

Volúmen m3	Servicio	Diferencia de temperatura (ambiente y cuarto de almacenamiento)									
		0.56	2.2	27.8	30.6	33.3	36.1	38.9	41.7	44.4	50
14.2	Ligero	10.8	430.7	538.3	592.6	646	700.3	753.7	807.1	861.4	969.9
	Continuo	16.6	665.6	832	916.5	996.6	1085.6	1165.7	1245.8	1334.8	1494.4
17	Ligero	10.4	416.4	520.6	569.5	622.9	676.3	729.7	783.1	836.4	934.3
	Continuo	16.5	658.5	823.1	907.6	987.7	1067.8	1156.8	1236.9	1316.9	1486
22.7	Ligero	9.9	395.1	493.9	543.7	592.6	642.5	691.4	741.2	790.2	889.9
	Continuo	15.7	629.4	783.1	861.4	943.2	1023.3	1094.5	1174.6	1254.7	1405.9
28.3	Ligero	9.8	391.5	489.4	538.4	587.3	636.2	685.2	743.1	783.1	880.9
	Continuo	14.9	594.4	743	817.8	889.8	951	1041.1	1112.3	1182.4	1334.8
34	Ligero	8.9	354.2	443.1	486.7	531.2	575.7	620.2	664.7	709.3	797.3
	Continuo	14.1	562.4	703	773.3	843.6	916.5	987.7	1058.9	1121.2	1236.6
42.5	Ligero	8.2	327.5	409.3	450.3	491.2	532.1	573.1	614	654.9	736.8
	Continuo	13.4	533.9	667.4	734.1	800.9	867.6	934.3	1005.5	1067.8	1201.3
56.6	Ligero	7.4	297.2	372	408.4	445.8	483.2	520.6	557.9	594.4	659.2
	Almacenamiento Largo	6.9	275.9	345.3	379.1	413.8	448.5	483.2	517	551.7	621.1
85	Ligero	6.7	267	333.7	367.5	400.4	434.2	467.2	500.1	533.9	600.6
	Almacenamiento Largo	5.1	204.7	256.3	292.1	307.9	331.9	358.6	384.4	410.2	460.9
142	Almacenamiento Largo	3.6	143.3	179.8	197.5	215.3	233.1	250.9	268.7	286.5	323
212	Almacenamiento Largo	2.7	108.6	136.1	149.5	162.8	176.2	190.4	203.8	217.1	244.7
283	Almacenamiento Largo	2.1	85.4	106.8	117.5	128.1	138.8	149.5	160.2	170.9	192.2
566	Almacenamiento Largo	1.7	66.6	83.2	91.7	99.7	108.6	116.6	124.6	133.5	149.5
1416	Almacenamiento Largo	1.6	63.4	79.2	87.1	95.2	103.2	111.2	119.2	126.4	142.4
2124	Almacenamiento Largo	1.6	62.5	78.3	86.1	94.3	102.3	109.5	117.5	125.5	140.6
2832	Almacenamiento Largo	1.5	51.6	77	84.7	92.5	99.7	107.7	115.7	122.8	138.8

Para servicio ligero y continuo, la carga del producto esta basada en la entrada del mismo a 5.6°C, sobre la temperatura de refrigeración; para almacenamiento largo la temperatura de entrada del producto es aproximadamente igual a la de refrigeración.

TABLA B5 Ganancia de energía debida al Efecto Solar

Tipo de Superficie	Pared Este	Pared Sur	Pared Oeste	Techo Plano	
Superficies en color obscuro tales como Pinturas negras, techos de papel impermeable con brea		4	3	4	11
Superficies en color intermedio tales como Madera sin pintar, pintura roja, gris o verde		3	2	3	8
Superficies en color claro tales como Pintura blanca, cemento ligeramente pintado		2	1	2	5

(*C que deben agregarse a la diferencia normal de temperatura)

TABLA B6 Ganancia debida a Motores eléctricos

Kcal/H.P. hr

Motor (H.P.)	Carga dentro del espacio refrigerado (1)	Pérdidas del motor fuera del espacio acondicionado (2)	Carga conectada fuera del espacio acondicionado (3)
1/8 - 1/2	1071.0	641.3	428.4
1/2 - 3.0	932.4	641.3	289.8
3.0 - 20.0	743.4	641.3	100.8

- (1) Para utilizarse cuando la salida útil y las pérdidas del motor son disipadas dentro del espacio acondicionado, motores impulsando ventiladores par forzar la circulación de los enfriadores.
- (2) Para ser usado cuando las pérdidas del motor son disipadas fuera del espacio acondicionado, sistema de bomba para circulación de salmuera o agua fría, motor instalado fuera del espacio acondicionado impulsando a un ventilador para circular aire dentro del espacio acondicionado.
- (3) Para utilizarse cuando las pérdidas de calor del motor son disipadas dentro del espacio acondicionado y el trabajo útil se tiene fuera del espacio acondicionado; motor dentro del espacio acondicionado impulsando una bomba o ventilador fuera del espacio acondicionado.

TABLA B7 Energía transferida al enfriar el aire a las condiciones de almacenamiento
Kcal/m³

Temperatura de almacenamiento °C	Temperatura Exterior °C							
	29.4		33.2		35.0		37.8	
	Porcentaje de Humedad relativa							
	50.0	60.0	50.0	60.0	50.0	60.0	50.0	60.0
15.6	5.2	6.9	7.4	9.4	9.8	12.2	12.4	15.1
12.8	7.1	8.9	9.3	11.4	11.8	14.2	14.3	17.1
10.0	9.0	10.8	11.2	13.3	13.6	15.9	16.2	19.0
7.2	10.7	12.5	12.9	15.0	15.2	17.6	17.8	20.6
4.4	12.2	14.0	14.4	16.5	16.7	19.1	19.3	22.1
1.7	13.7	15.5	15.8	17.9	18.2	20.6	20.7	23.5
-1.1	15.8	17.9	18.2	20.6	20.7	23.6	23.6	26.7

Temperatura de almacenamiento °C	Temperatura Exterior °C							
	4.4		10.0		32.2		37.8	
	Porcentaje de Humedad relativa							
	70.0	80.0	70.0	80.0	50.0	60.0	50.0	60.0
-1.1	1.9	2.3	4.9	5.5	18.2	20.6	23.6	26.7
-3.9	3.3	3.8	6.3	6.9	19.6	21.9	24.8	27.9
-6.7	4.6	5.2	7.7	8.3	20.7	23.1	26.1	29.2
-9.4	5.9	6.4	8.9	9.5	21.9	24.2	27.1	30.3
-12.2	7.1	7.6	10.1	10.7	23.0	25.3	28.2	31.3
-15.0	8.2	8.6	11.1	11.8	23.9	26.3	29.2	32.3
-17.8	9.3	9.7	12.1	12.7	24.9	27.2	30.1	33.3
-20.6	10.2	10.7	13.1	13.8	25.8	28.1	31.0	34.2
-23.3	11.2	11.7	14.1	14.7	26.7	29.0	31.9	35.0
-26.1	12.2	12.6	15.0	15.7	27.6	29.9	32.8	35.9
-28.9	13.1	13.5	15.9	16.6	28.4	30.8	33.6	36.7