

LOS SISTEMAS DE ABSORCIÓN Y SU APLICACIÓN EN EL ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

Jorge Isaac Hernández Gutiérrez
Universidad Nacional Autónoma de México

**1 al 3 de julio de 2002
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México**

CONTENIDO

- I. FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS
 - I.1 EL CAMBIO DE FASE A PRESIÓN CONSTANTE CON INTRODUCCIÓN DE CALOR A LA PRESIÓN DE 24.97 PSIA.
 - I.2 SISTEMAS QUE EMPLEAN EL CAMBIO DE FASE A PRESIÓN CONSTANTE CON INTRODUCCIÓN DE CALOR
 - I.3 ABSORCIÓN
 - I.4 CARACTERÍSTICAS DE UNA MEZCLA BINARIA HOMOGÉNEA
 - I.5 CONCEPTO DEL SISTEMA DE DOS Y TRES TEMPERATURAS

- II. SISTEMAS DE ABSORCIÓN
 - II.1 TIPOS DE SISTEMAS DE ABSORCIÓN POR SU OPERACIÓN
 - II.2 DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA TÉRMICA
 - II.3 SISTEMAS AVANZADOS
 - II.4 SISTEMAS DE ABSORCIÓN - DIFUSIÓN

BIBLIOGRAFÍA

I. FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS

I.1 El cambio de fase a presión constante con introducción de calor

Muchas sustancias comunes, como el agua, cambian de fase con la adición de calor. Al mantenerse constante la presión se cumple que la temperatura del cambio de fase también se mantiene constante. Las Figs. I.1 a I.3 muestran el cambio de fase para el agua a diferentes presiones.

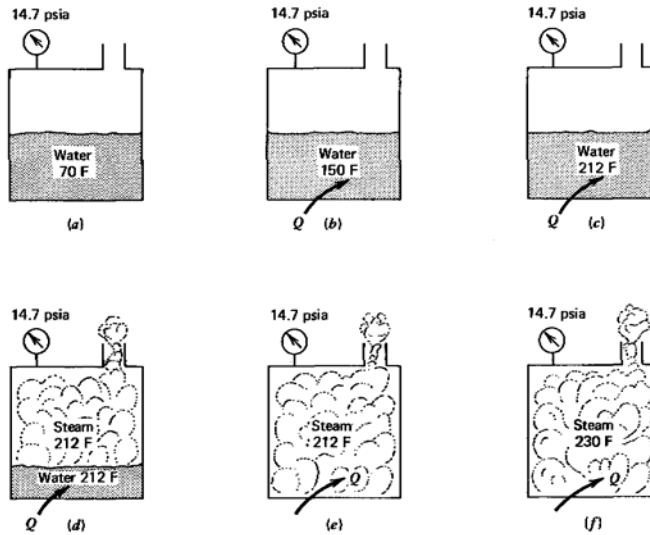


Fig. I.1 Experimento que muestra el cambio de estado del agua a la presión atmosférica (14.7 psia).

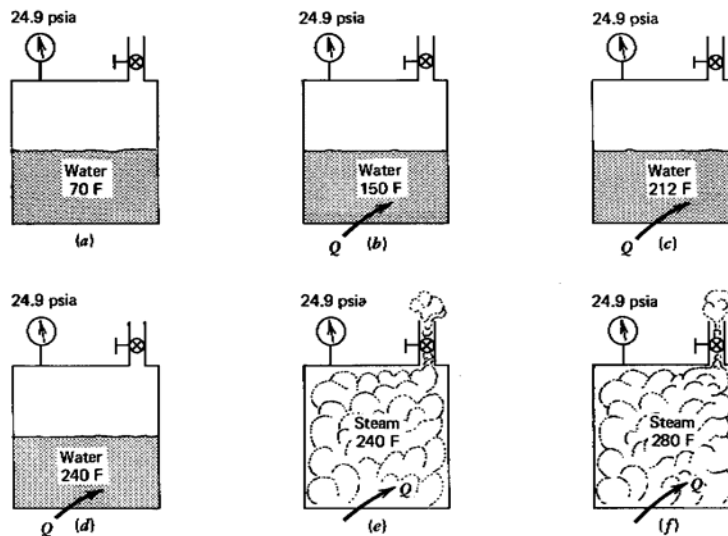


Fig. I.2 Experimento que muestra el cambio de estado del agua a la presión de 24.97 psia.

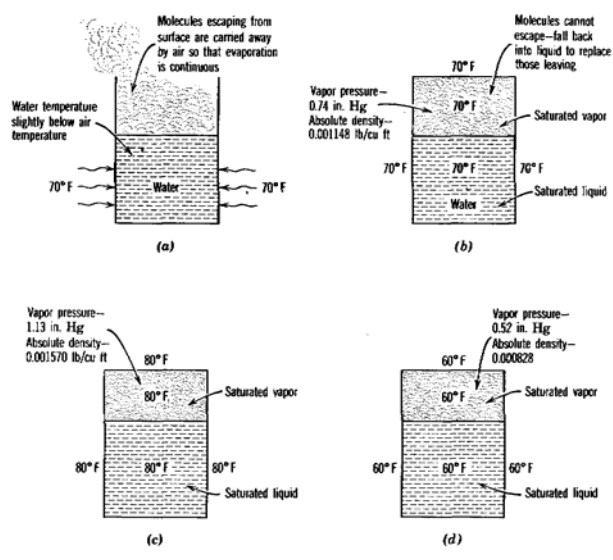


Fig. I.3 Sistemas que contienen agua en estado de saturación a diferentes presiones.

Este comportamiento lo manifiestan otras muchas sustancias como los refrigerantes y los cambios de fase se llevan a cabo a otras presiones y temperaturas como muestra la Fig. I.4 a I.6 para el R12. Cuando la presión es baja la temperatura también lo es y hay que evitar que el vapor se acumule en un recipiente cerrado, por lo que hay necesidad de extraerlo.

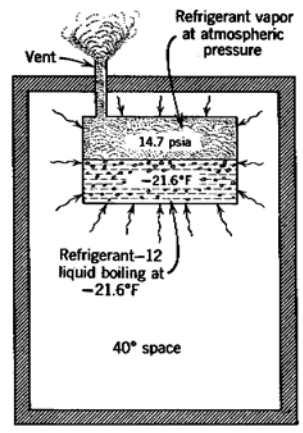


Fig. I.4 Evaporación del R12 a la presión atmosférica, en función del calor que toma del espacio a 40° F.

Cuando se registra el cambio de fase de un líquido con la adición de calor y se controla su presión se obtienen resultados como el de la Fig. I.7.

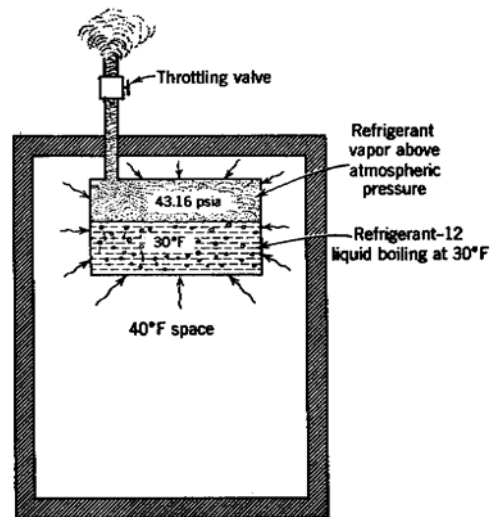


Fig. I.5 Evaporación del R12 a 43.16 psia, en función del calor que toma del espacio a 40° F.

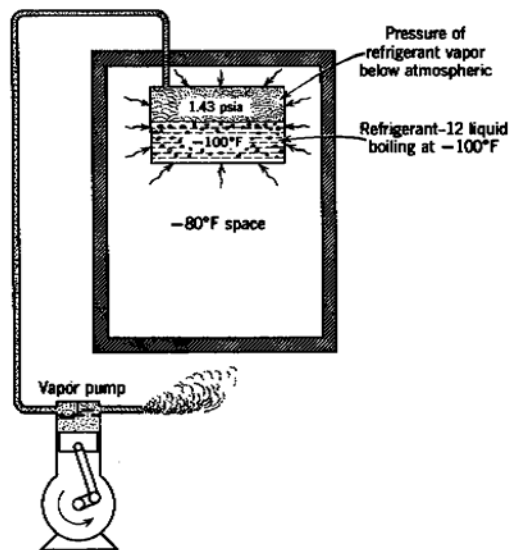


Fig. I.6 Evaporación del R12 a la presión de 1.43 psia, mediante el empleo de un compresor y en función del calor que toma del espacio a -80° F.

Desde un punto de vista termodinámico, el comportamiento anterior corresponde al de una sustancia pura y éste queda definido con una ecuación de estado determinada

en la que conocidas dos de tres variables termodinámicas la tercera automáticamente queda definida. La Fig. I.8 muestra un volumen pVT.

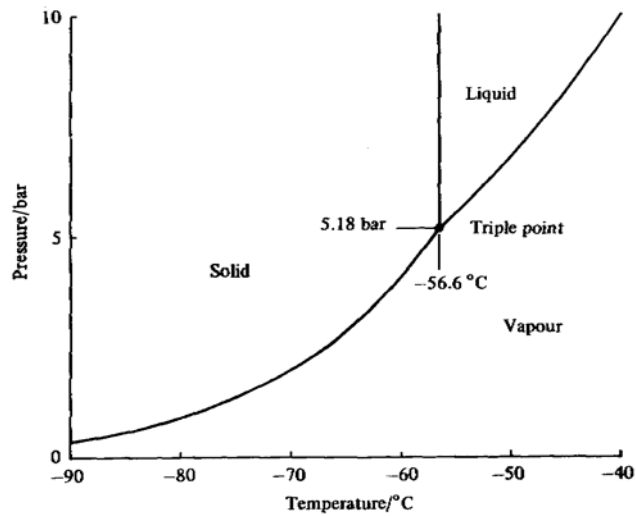


Fig. I.7 Diagrama de equilibrio para las fases del dióxido de carbono.

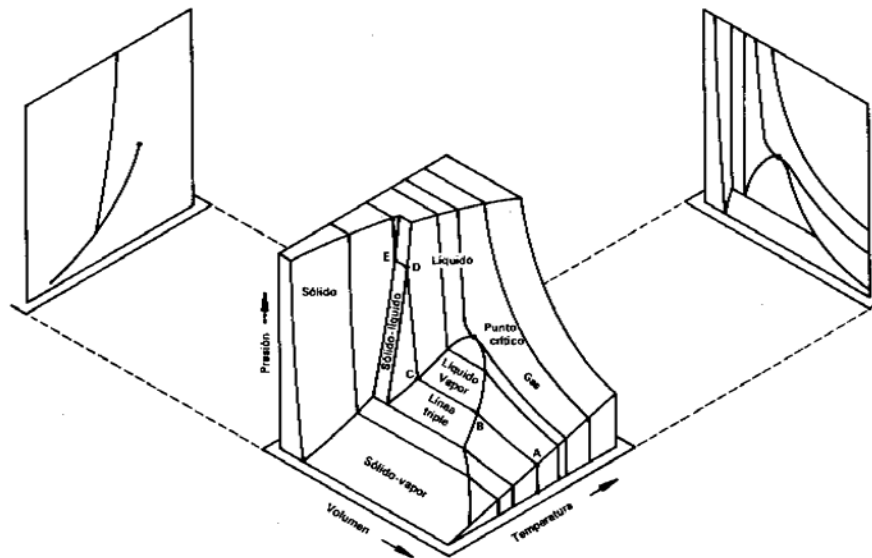


Fig. I.8 Proyecciones de la superficie pVT sobre los planos p-T y p-V.

I.2 Sistemas que emplean el cambio de fase a presión constante con introducción de calor

El saber que hay sustancias que tienen presiones y temperaturas de saturación bajas permite que se aplique dicha sustancia para extraer calor y mantener un espacio a una temperatura menor a la ambiente. Los sistemas de refrigeración que emplean esta

característica del comportamiento de las sustancias son en orden cronológico absorción, eyecto-compresión y compresión mecánica, como se muestra en la Fig. I.9.

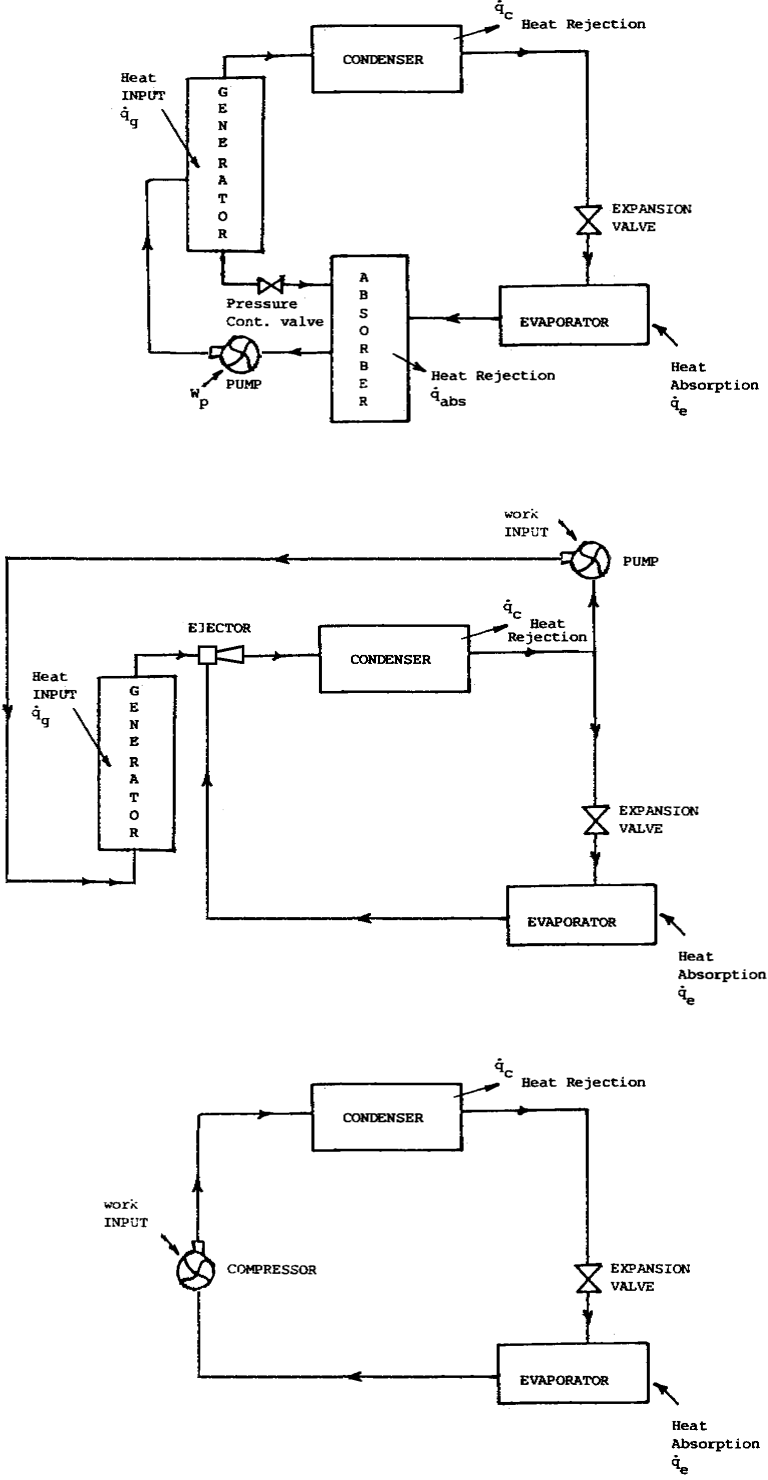


Fig. I.9 Sistemas de enfriamiento que emplean el cambio de fase a baja presión.

I.3 Absorción

El término "absorción" se refiere a los procesos físicos y químicos que ocurren al entrar en contacto gases y líquidos o gases y sólidos-, e incorporarse el gas a la otra sustancia, pudiéndose separar el gas mediante el proceso inverso y llegar a la condición inicial.

Faraday de sus experiencias en el laboratorio, conocía que el cloruro de plata tiene la capacidad especial de absorber al amoníaco gaseoso. Expuso cierta cantidad de cloruro de plata pulverizado al amoníaco gaseoso hasta que hubo absorbido todo el que podía retener. El polvo cargado de amoníaco se colocó posteriormente en un tubo de ensaye sellado con forma de V invertida. Cuando se aplicó calor al polvo, se presentó el desprendimiento de "humos" (vapores) de amoníaco. Los "humos" se enfriaron sumergiendo el otro extremo del tubo en un recipiente con agua fría. El agua sirvió como agente de remoción de calor del amoníaco gaseoso. Conforme los "humos" de amoníaco entraron en el extremo enfriado del tubo de ensaye, se formaron gotas de amoníaco líquido, según muestra la Fig. I.10.

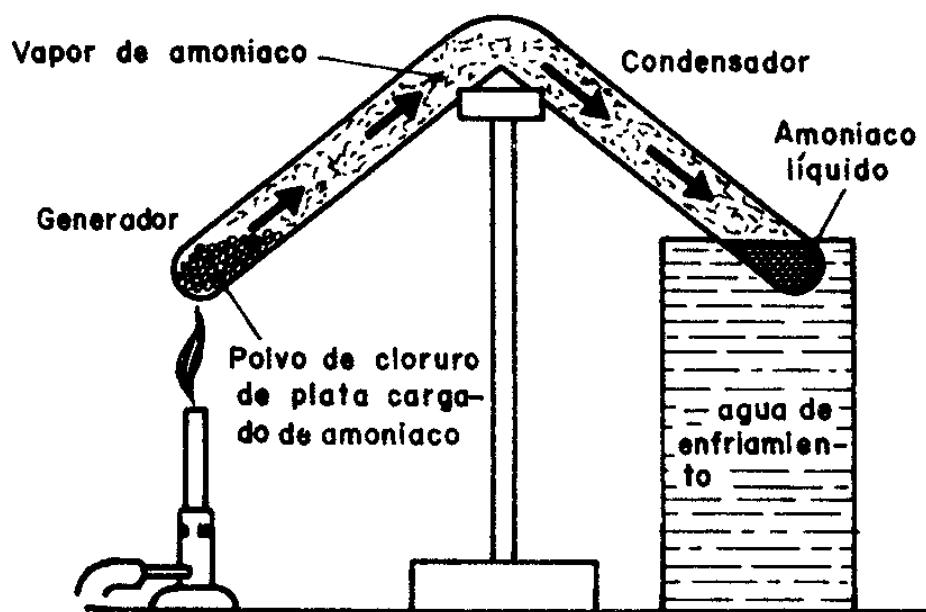


Fig. I.10 Desorción y condensación de amoníaco a alta temperatura.

Esta fue la primera vez que el amoníaco había cambiado del estado gaseoso al líquido. Las características del líquido producido comenzaron a ser estudiadas por Faraday. Una vez que eliminó la aplicación de calor y del agua de enfriamiento, sucedió algo curioso. Casi inmediatamente después, el amoníaco líquido comenzó a burbujear y hervir, regresando de nuevo al estado de vapor, el cual fue absorbido nuevamente por el polvo de cloruro de plata, como muestra la Fig. I.11.

Cuando Faraday tocó el extremo del tubo de ensaye que contenía amoníaco líquido, encontró que estaba bastante frío. Sin embargo, aún más sorprendente fue el

hecho de que se había producido la ebullición del líquido, aún sin la presencia de fuente alguna de suministro visible de calor.

Cada vez que Faraday repitió el proceso, observó el mismo cambio. Lo novedoso consistió en el hecho de que fuera posible lograr temperaturas bajas en el laboratorio cualquier número de veces, sin que se alteraran los ingredientes en el tubo de ensaye.

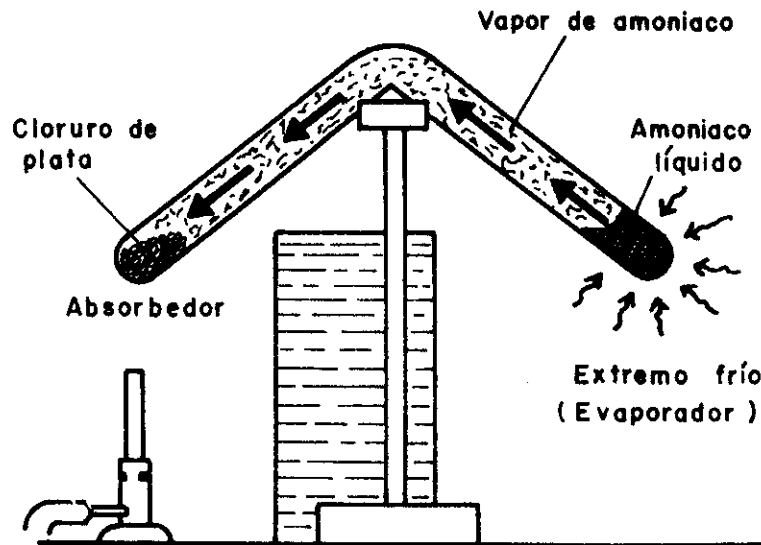


Fig. I.11 Evaporación y absorción de amoníaco a baja temperatura.

En el caso de la refrigeración, al ponerse en contacto amoníaco gaseoso con agua líquida, ésta absorbe al amoníaco formando una solución líquida de hidróxido de amonio desprendiendo una determinada cantidad de calor. Hay otra pareja líquida refrigerante-absorbente que se utiliza en equipos de aire acondicionado, y es la formada por el agua y el bromuro de litio.

Otro caso es el que se presenta cuando el absorbente es un sólido, como el cloruro de calcio que absorbe al amoníaco gaseoso y es cuando se habla de absorción seca o sólido-gas. A las combinaciones amoníaco-agua y agua-bromuro de litio se les denomina líquido-gas.

Es obvio que el absorbente debe tener una fuerte afinidad por el vapor refrigerante; los dos deben ser mutuamente solubles en el rango deseado de condiciones de operación; los dos fluidos deben ser seguros, estables y no corrosivos, tanto por separado como combinados. La volatilidad del absorbente deberá ser muy baja, de tal manera que el vapor refrigerante contenga poco o nada de absorbente al salir del generador; las presiones de trabajo deberán ser razonablemente bajas y de preferencia cercanas a la presión atmosférica para minimizar el peso del equipo y las fugas. El refrigerante deberá tener un calor latente de vaporización alto, de modo que el flujo de refrigerante requerido sea mínimo.

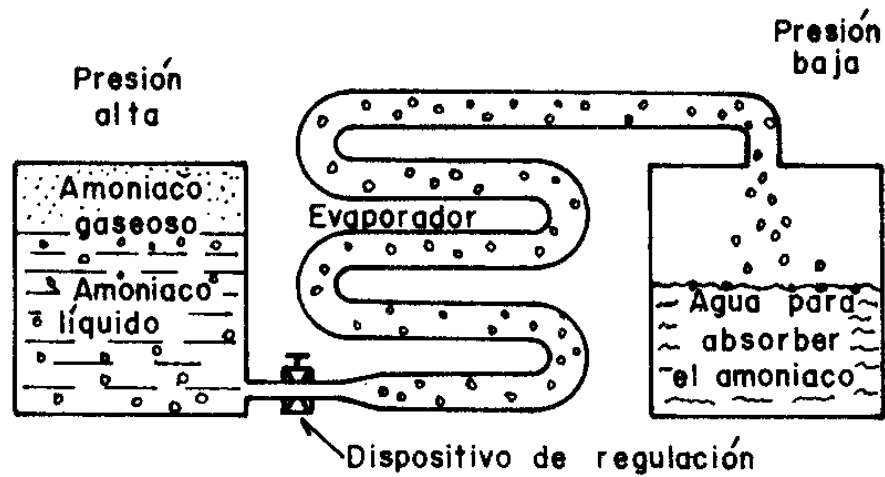


Fig. I.12 Absorción del amoniaco en una solución amoniaco-agua. Para seleccionar adecuadamente los fluidos de trabajo de un sistema de refrigeración por absorción, se tienen ciertos criterios que debe satisfacer la combinación refrigerante-absorbente, por lo menos en cierto grado.

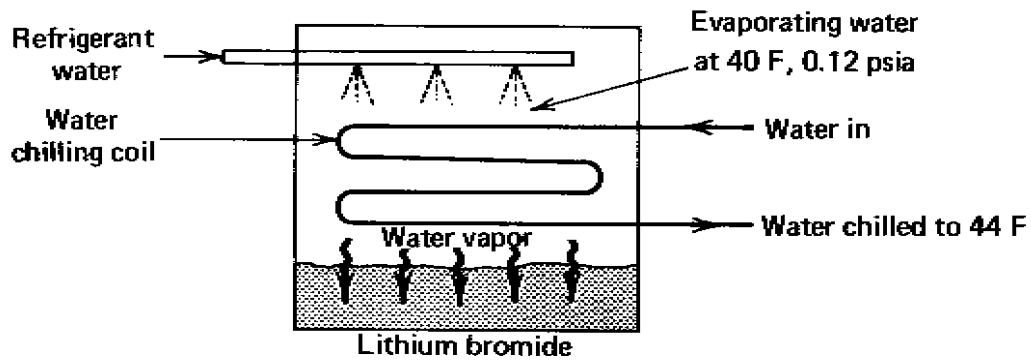


Fig. I.13 Absorción del agua en una solución de agua-bromuro de litio.

Actualmente hay dos combinaciones refrigerante-absorbente que son de uso común. La más antigua de ellas es amoniaco-agua, donde el amoniaco es el refrigerante y el agua el absorbente; la otra combinación es agua-bromuro de litio, donde el agua es el refrigerante.

La combinación amoniaco-agua es excepcionalmente buena, satisface algunos de los requisitos más importantes pero tiene algunas pequeñas desventajas. El absorbente - agua- tiene una gran afinidad por el vapor de amoníaco, y los dos son mutuamente solubles en un rango muy amplio de condiciones de operación. Ambos fluidos son muy estables y son compatibles con casi todos los tipos de acero. Una excepción notable es

el cobre y sus aleaciones, los cuales no son adecuados para usarse con las soluciones amoniaco-agua, por la alta corrosión que les produce, ya que el amoníaco las ataca en presencia del oxígeno e hidrógeno. El calor latente de vaporización del amoníaco es alto, pero es ligeramente tóxico, muy irritante, algo inflamable y explosivo, lo cual limita su empleo en aplicaciones de aire acondicionado. Sus presiones de operación son relativamente altas.

Probablemente la principal desventaja de la mezcla amoniaco-agua es el hecho de que el absorbente -agua- es relativamente volátil, de modo que el vapor refrigerante -amoníaco- al salir del generador, por lo general contiene cantidades apreciables de vapor de agua. Estas atraviesan el condensador y llegan al evaporador donde aumentan la temperatura de evaporación, disminuyendo el efecto refrigerante por tenerse una solución amoniaco-agua no vaporizaba a baja temperatura. Por esta razón la eficiencia del sistema amoniaco-agua puede mejorarse usando un rectificador cuya función es la de eliminar el vapor de agua a la salida del generador, antes de que llegue al condensador.

La combinación agua-bromuro de litio se utiliza ampliamente en aire acondicionado y en otras aplicaciones. Pero como el agua es el refrigerante, estos sistemas no son apropiados en aplicaciones donde la temperatura del evaporador sea igual o menor de 0°C , para evitar su congelación.

El bromuro de litio es una sal higroscópica y su salmuera tiene gran afinidad con el vapor de agua. Sin embargo, una desventaja de la combinación agua-bromuro de litio es que el absorbente no es del todo soluble en el agua bajo todos los valores de temperatura y presión que pueden darse en el sistema y deben tomarse precauciones especiales en el diseño y operación, para evitar la precipitación y cristalización del absorbente.

Una de las principales ventajas de la solución agua-bromuro de litio, es que el absorbente no es volátil, de tal manera que no se tiene mezcla del absorbente con el refrigerante -agua- al salir del generador y por lo tanto no es necesario un rectificador.

Debido a que el agua es el refrigerante, las presiones de operación son muy bajas, siendo menores que la atmosférica. Por ejemplo, suponiendo una temperatura en el evaporador de 4.5°C y una temperatura condensante de 38°C , las presiones en el evaporador y en el condensador son de 6.3 mm Hg y 49 mm Hg absolutas, respectivamente. Con estas pequeñas diferencias entre los lados de alta y baja presión, ordinariamente no se necesita tener válvulas reductoras de presión, debido a que la caída de presión a través de las tuberías de conexión y en las toberas atomizadoras, por lo general proporciona el diferencial de presión necesario.

I.4 Características de una mezcla binaria homogénea

En general, pueden mezclarse sustancias para formar mezclas heterogéneas u homogéneas en fases sólidas, líquidas o de vapor. Algunas mezclas son miscibles en ciertas condiciones pero en otras no lo son. La miscibilidad es afectada por la temperatura y la presión. Una mezcla es miscible a una temperatura y presión dadas, si en todo un intervalo arbitrario de valores de concentración se forma una mezcla homogénea; una no miscible es heterogénea.

El estado termodinámico de una mezcla saturada no puede determinarse sólo con la presión o temperatura, como, puede hacerse con una sustancia pura. Para el

tratamiento general de las mezclas binarias considérese la composición cuantitativa en función de la concentración "x", que es la masa de un constituyente arbitrario dividida por la masa de la mezcla; el conocimiento de cualesquier par de valores de p, T, x, posibilita establecer el estado termodinámico de la mezcla. Para estados no saturados de la mezcla se requiere conocer las tres variables.

Las mezclas binarias convenientes para los sistemas de absorción deben ser completamente solubles en las fases líquida y de vapor, en los rangos de operación de temperatura y presión. Puede haber un intervalo de valores de concentración donde pueda existir una mezcla heterogénea, en los cuales obviamente no se operará al sistema.

Ocurren dos fenómenos importantes al mezclar dos líquidos, que son el cambio de volumen y de temperatura de los constituyentes durante y al final de la mezcla.

La Fig. I.14(a) muestra un recipiente dividido que contiene x kg del líquido A y (1 - x) kg del líquido B. Cada líquido está a la misma temperatura T_1 . El volumen por kg de constituyentes es:

$$v_1 = x v_A + (1 - x) v_B$$

Supóngase que la pared divisoria se retira y que los dos líquidos se mezclan completamente. Es común observar que v_2 es diferente de v_1 . Si el experimento se repite con diferentes líquidos y concentraciones, resulta que en algunos casos habrá disminución del volumen y en otros aumentará. Hallándose que no hay una regla definida y será necesario buscar el resultado por experimentación. Otra observación importante en el experimento de la Fig. I.14 es que, en general, T_2 es distinta de T_1 . En algunos casos habrá calentamiento y en otros una disminución de la temperatura. Este efecto puede expresarse a partir del calor de disolución ΔH_x . En el experimento podría cuantificarse el calor que se debe quitar o suministrar para mantener la temperatura constante. Si la mezcla se efectúa a presión constante, ΔH_x estará relacionado estrictamente con la entalpía de la mezcla. Para los componentes originales, se tiene:

$$h_1 = x h_A + (1 - x) h_B$$

y después de la mezcla,

$$h_2 = h_1 + \Delta H_x = x h_A + (1 - x) h_B + \Delta H_x \quad (I.1)$$

La Ec. (I.1) permite el cálculo de la entalpía específica en kJ/kg de mezcla para una solución de concentración, presión y temperatura conocidas, si se conocen las entalpías de los componentes puros y el calor de disolución isotérmico.

Las relaciones presión-temperatura para una mezcla líquida binaria en ebullición o una mezcla binaria de vapor en condensación, son de especial importancia en la refrigeración por absorción. El estudio de estas relaciones se hará mediante experimentos imaginarios, restringiéndose sólo al uso de mezclas homogéneas.

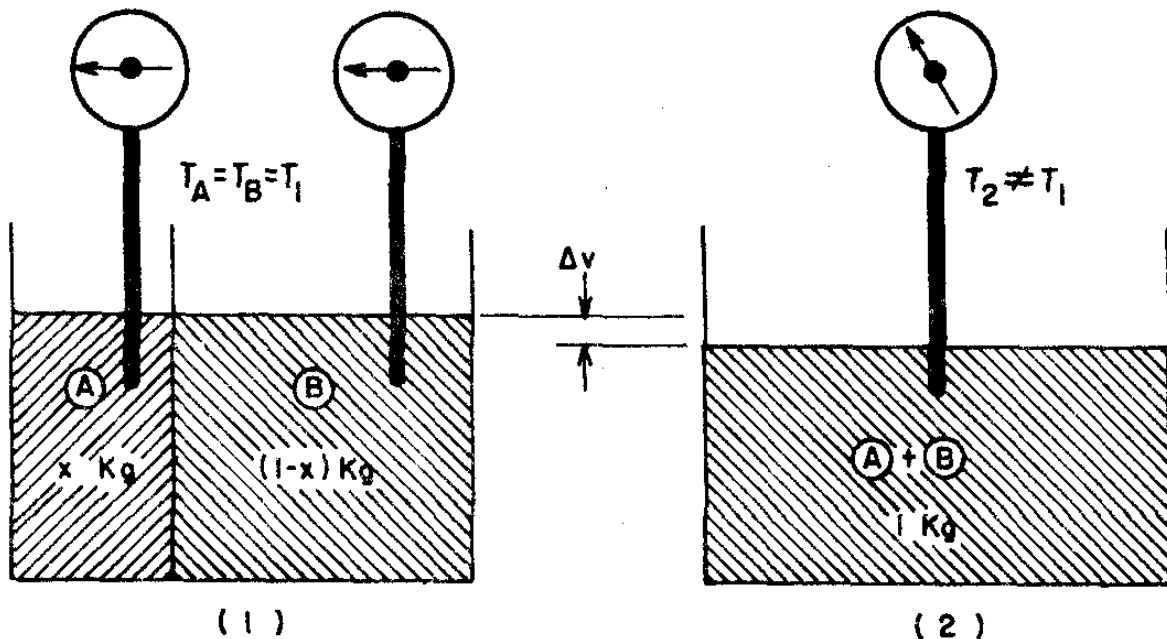


Fig. I.14 Variación del volumen y la temperatura en la mezcla de dos líquidos.

La Fig. I.15 muestra esquemáticamente el experimento y los resultados obtenidos en un diagrama T-x. Al principio se tiene una solución líquida (estado 1) la cual se calienta con lentitud, conservando la presión constante. La solución permanece completamente líquida hasta que alcanza la temperatura T_2 . Sin embargo, al suministrar más calor, el pistón se elevará sobre el líquido indicando que hay vaporización. Al detener el experimento en la condición mostrada en la Fig. I.15(b) y al analizar químicamente el líquido y el vapor, se encontrará un resultado interesante. Las concentraciones del líquido y del vapor son diferentes, y aún más, ambas son distintas de la concentración original x_1 . Se encuentra que la Concentración del líquido $x_3 < x_1$, mientras que la concentración del vapor $x_4 > x_1$. Al reiniciar el suministro de calor, el líquido va desapareciendo gradualmente y las concentraciones del líquido y del vapor van disminuyendo; cuando se alcanza el punto (5) sólo habrá vapor y se tendrá que $x_5 = x_1$. De calentarse más, el vapor se recalientará a concentración constante.

Puede repetirse el experimento con diferentes valores iniciales de concentración, pero a la misma presión, con lo que se obtendrán las líneas de equilibrio de evaporación y de condensación mostradas en la Fig. I.15(c), donde los números encerrados en círculos indican componentes puros y sus respectivas posiciones en el eje de las concentraciones. Si los experimentos se repiten a diferentes presiones se obtendrán los resultados mostrados en la Fig. I.15(d). En caso de invertir el experimento y empezar con un vapor recalientado, con eliminación de calor se tendrán los resultados mostrados en la Fig. I.15(e).

O sea que, las mezclas binarias en contraste con las sustancias puras, no tienen una sola temperatura de ebullición o condensación a presión constante. La temperatura de equilibrio o de saturación es también dependiente de la concentración. Estas relaciones deben determinarse experimentalmente.

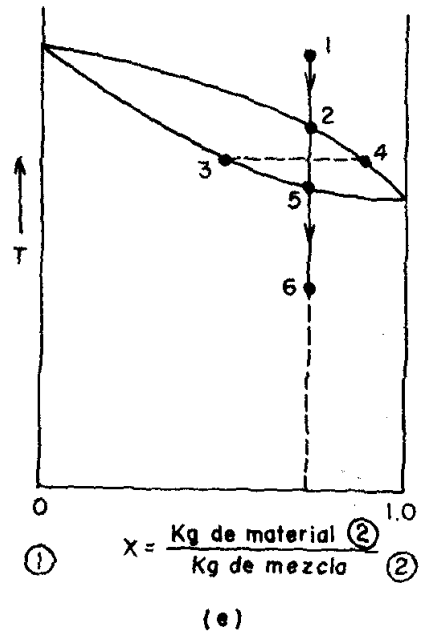
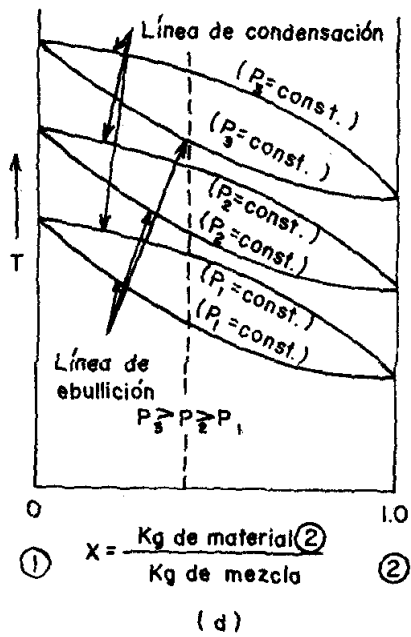
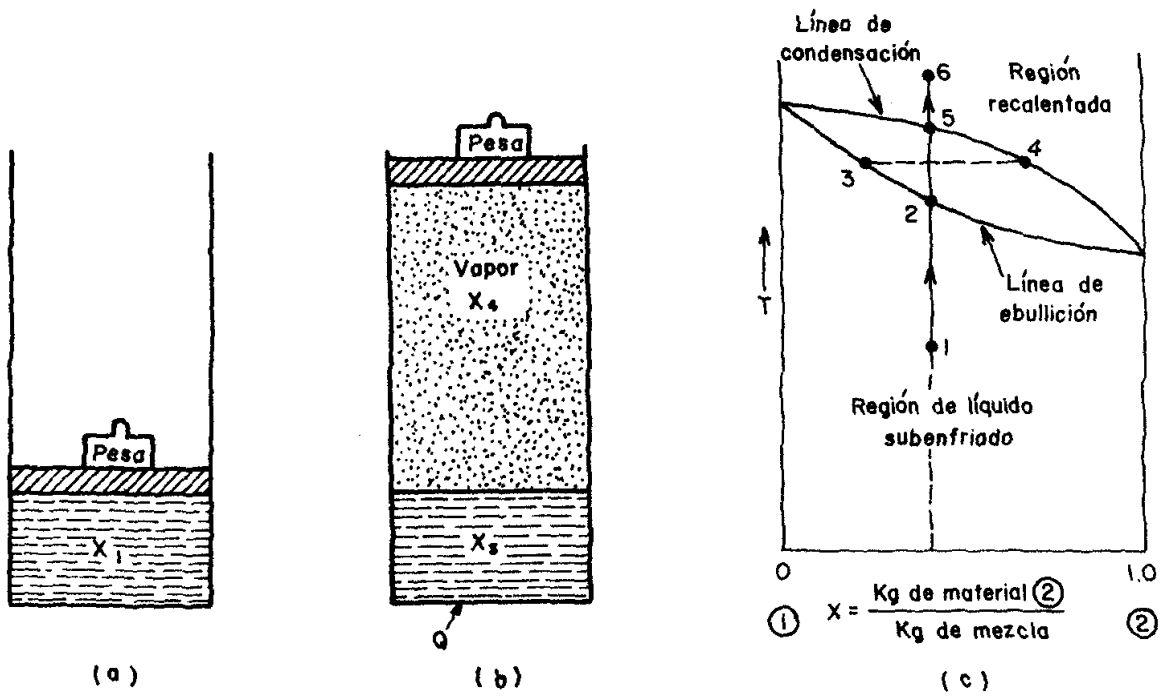


Fig. I.15 Evaporación y condensación de una mezcla binaria homogénea.

El diagrama entalpía-concentración (coordenadas h-x) es la presentación más útil de propiedades de una mezcla binaria. La Fig. I.16 muestra un diagrama esquemático h-x con las regiones de líquido y vapor saturados, para una mezcla binaria homogénea. Se presentan en las Figs. I.17 y I.18 las propiedades de las soluciones agua-bromuro de litio. En la Fig. I.17 no están representadas las propiedades del vapor de refrigerante -agua-, las cuales se obtienen de tablas.

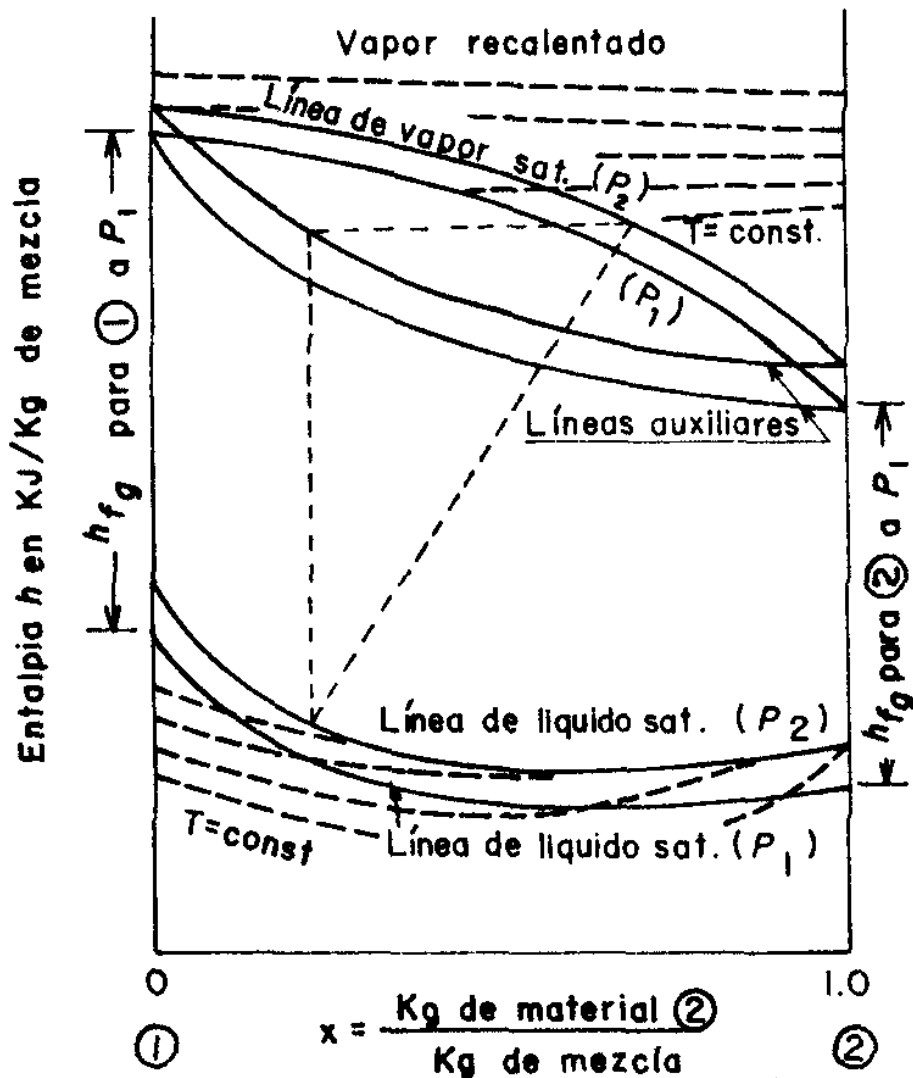


Fig. I.16 Diagrama h-x para las fases líquido y vapor de la mezcla amoníaco-agua.

Ahora se examinará la construcción de la Fig. I.16 con algún detalle. La figura se ha dibujado para soluciones amoníaco-agua saturadas o en equilibrio. La región líquida es la parte inferior del diagrama. Se ilustran líneas de líquido en equilibrio (líneas de ebullición) para varias presiones; se ilustran también líneas isotérmicas en la región líquida. Si se sabe que una solución líquida está saturada, puede localizarse el punto de

estado en la Fig. I.16, en la intersección de las líneas de temperatura y presión correspondientes. Si la solución líquida está subenfriada, puede localizarse aproximadamente su estado, si se conocen su temperatura y concentración.

No se muestran en la Fig. I.16, las líneas de temperatura en la región de vapor. Sin embargo, puede localizarse el estado de un vapor saturado que está en equilibrio con un líquido -también saturado- de estado conocido, mediante el uso de las líneas auxiliares de equilibrio. El procedimiento se ilustra con un ejemplo para las condiciones de saturación de 6.9 bar y 126.7° C de una mezcla amoniaco-agua. Se traza una línea vertical desde el punto de líquido saturado hasta la línea auxiliar de 6.9 bar. De esta intersección se traza una línea horizontal, hasta la línea de presión para vapor saturado de 6.9 bar. Esta intersección es el punto de estado del vapor. Ahora se conocen las propiedades del vapor saturado ($T = 126.7^\circ \text{C}$, $p = 6.9 \text{ bar}$, $h = 2111 \text{ kJ/kg}$, $x = 0.63 \text{ kg de amoníaco/ kg de mezcla}$). Aún más, la línea recta que une los puntos de líquido saturado con vapor saturado, es una isoterma para la región líquido-vapor, y sobre ella pueden evaluarse las propiedades y proporciones de una mezcla de ellos.

Todos los procesos que se llevan a cabo en un sistema de absorción se pueden graficar en un diagrama h-x, a excepción de los procesos en que exista el refrigerante puro.

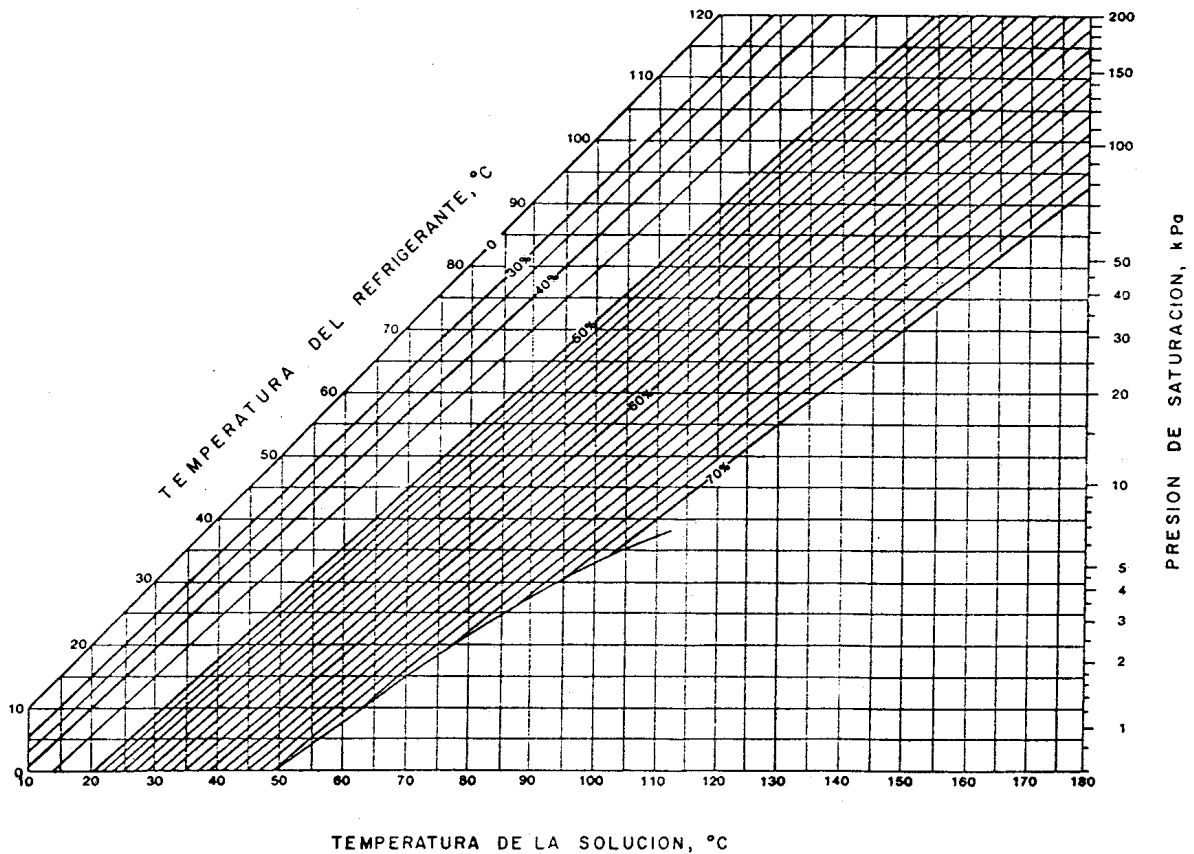


Fig. I.17 Diagrama T-p para la mezcla agua-bromuro de litio.

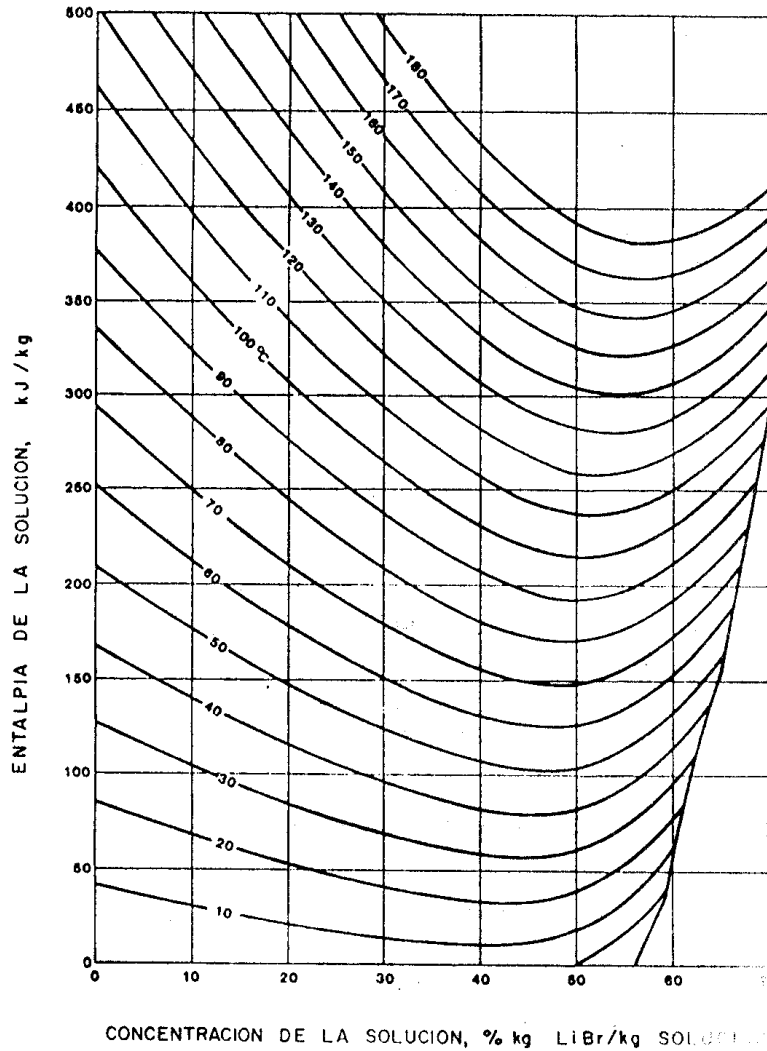


Fig. I.18 Diagrama h-x para la mezcla agua-bromuro de litio.

I.5 Concepto del sistema de dos y tres temperaturas

Las máquinas térmicas son capaces de producir trabajo mecánico y requieren un intercambio de calor a dos temperaturas. Cuando una de estas máquinas trabaja inversamente se tiene lo que comúnmente se llama refrigerador. Las Figs. I.19 e I.20 muestra a estas máquinas térmicas de dos temperaturas conceptualmente y realmente.

Cuando se acoplan estas dos máquinas térmicas y se hacen coincidir las temperaturas intermedias se tiene un sistema de tres temperaturas como se observa en la Fig. I.21. El sistema de absorción y de eyecto-compresión son de tres temperaturas y su eficiencia de Carnot es el producto de las respectivas eficiencias de Carnot para las máquinas térmicas las cuales son menores a 1 para el caso de generación de potencia y mayores a 1 para el refrigerador, por lo que la del sistema de absorción es menor a la unidad.

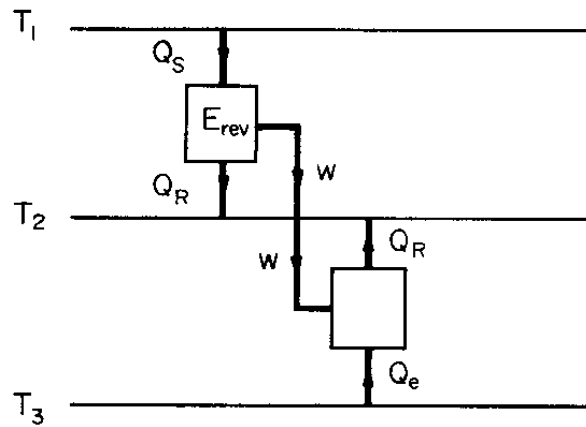


Fig. I.19 Principio del refrigerador reversible.

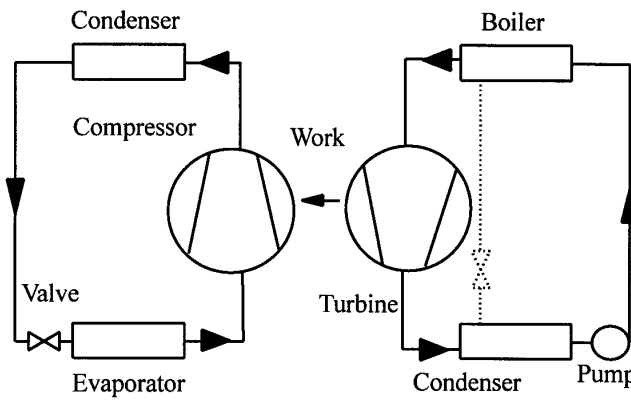


Fig. I.20 Combinación de máquina térmica -generación de potencia- y máquina térmica inversa -refrigerador-.

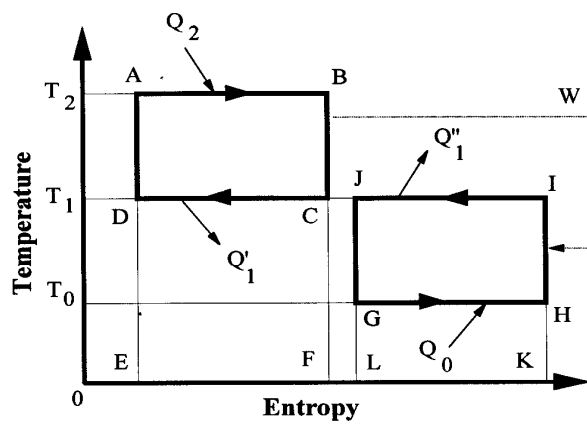


Fig. I.21 Sistema teórico de absorción formado por dos ciclos de Carnot, uno de potencia y otro de refrigeración

II. SISTEMAS DE ABSORCIÓN

II.1 Tipos de sistemas de absorción por su operación

De acuerdo al orden con que se llevan a cabo los procesos de generación y absorción en un sistema de refrigeración por absorción, se tiene un sistema intermitente o continuo. El primero corresponde a los sistemas que no realizan simultáneamente dichos procesos y el segundo cuando éstos lo son. La Fig. 1.22 muestra las componentes de los sistemas intermitente y continuo.

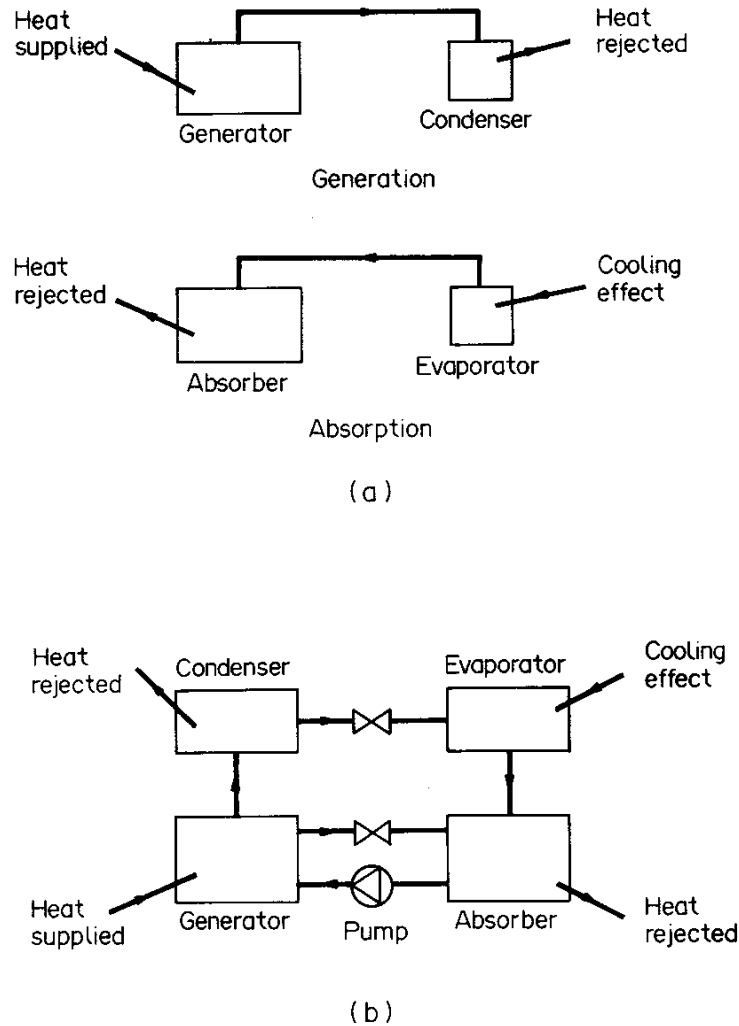


Fig. 1.22 Ciclo de absorción, (a) continuo y (b) intermitente.

El sistema de refrigeración por absorción de tipo continuo consiste de cuatro componentes básicos, además de la bomba y de las válvulas de expansión y regulación de flujo, ellos son: evaporador y absorbente, los cuales están localizados en el lado de baja presión del sistema; generador y condensador, situados en el lado de alta presión. Se emplean dos fluidos, un refrigerante y una solución absorbente.

La parte del ciclo formada por el condensador, válvula de expansión y evaporador, es idéntica a la correspondiente al ciclo de compresión, mientras que el compresor se sustituye por el conjunto absorbedor-bomba-generator-válvula de regulación de flujo. El ciclo de absorción de operación continua trabaja de la siguiente forma: el refrigerante -amoníaco- que se encuentra disuelto en el absorbente -agua- formando una solución concentrada, es separado al aplicar calor a la solución en el generador, formándose así una solución diluida; el refrigerante evaporado sale del generador y pasa por el condensador, la válvula de expansión y el evaporador, los cuales realizan las mismas funciones que en el sistema de compresión. Del evaporador sale el refrigerante en estado gaseoso y es conducido al absorbedor donde se pone en contacto con la solución diluida proveniente del generador -la cual pasó antes por la válvula de regulación- para que se lleve a cabo la absorción; de este modo se obtiene una solución concentrada que se envía de nuevo al generador a través de la bomba para completar el ciclo.

Concluyendo, el conjunto absorbedor-bomba-generator "comprime" el vapor refrigerante desde la presión del evaporador hasta la presión del condensador; absorbiéndose en primer lugar el vapor en un líquido, aumentando luego la presión del líquido con una bomba hasta alcanzar la presión del condensador, y liberándose finalmente el vapor al aplicar calor en el generador.

La temperatura de vaporización del refrigerante en el evaporador determina la presión que se tiene en el absorbedor y en general, en el lado de baja presión del sistema. A su vez la presión de vapor de la solución refrigerante-absorbente depende de su temperatura y de su concentración. A menor temperatura de la solución refrigerante-absorbente y menor porcentaje del refrigerante en la solución, se tendrá una menor presión.

A medida que el vapor refrigerante que sale del evaporador es disuelto en la solución refrigerante-absorbente, se libera el llamado "calor de absorción".

A fin de mantener al nivel requerido la temperatura y la presión de vapor de la solución absorbente, el calor liberado por la absorción deberá disiparse a los alrededores. Este calor es igual a la suma del calor latente de condensación del vapor refrigerante y del calor de dilución del absorbente.

Puesto que la cantidad absorbida de refrigerante aumenta a medida que se reduce la temperatura de la solución absorbente, se deduce que la eficiencia del absorbedor depende en gran parte del tipo de enfriamiento disponible.

Ya que el absorbedor está en el lado de baja presión del sistema y el generador en el lado de alta, la solución concentrada debe ser bombeada del absorbedor al generador, y la solución diluida regresa al absorbedor a través de una válvula reductora de presión.

II.2 Sistemas comerciales de enfriamiento y refrigeración

Las dos aplicaciones de los sistemas de absorción son para enfriamiento y refrigeración y también ofrecidas comercialmente. Para los primeros se emplea la mezcla agua-bromuro de litio, mientras que para los segundos la de amoníaco-agua. Las Figs. I.23 y I.24 muestran la composición típica de estos sistemas y la Fig. I.25 la configuración de un sistema real de agua-bromuro de litio.

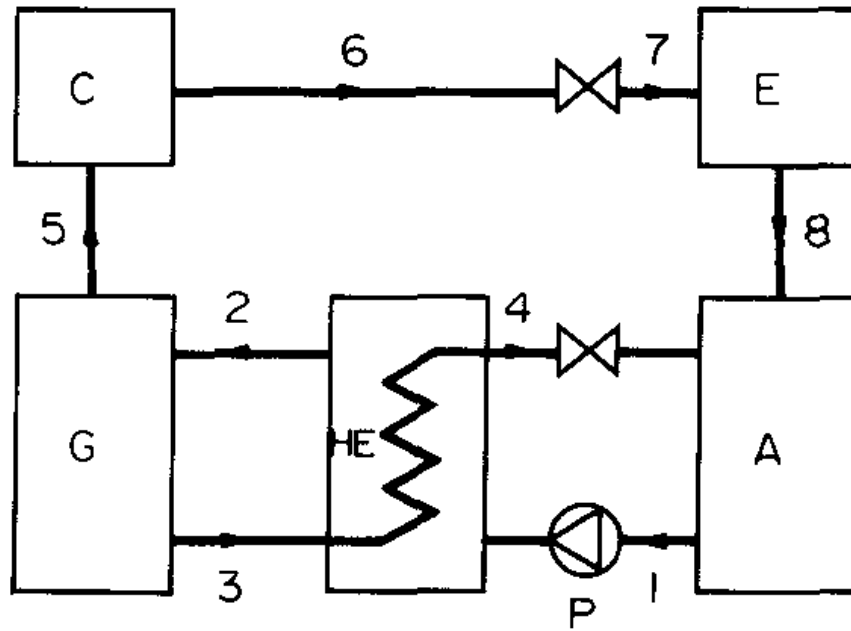


Fig. I.23 Composición de un sistema de absorción de agua-bromuro de litio.

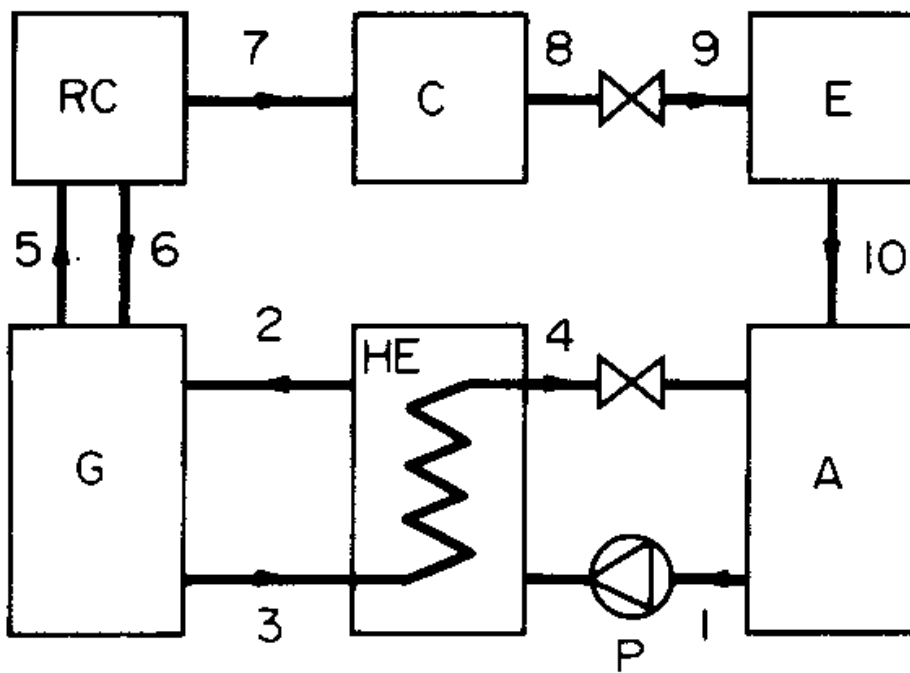


Fig. I.24 Composición de un sistema de absorción de amoníaco-agua.

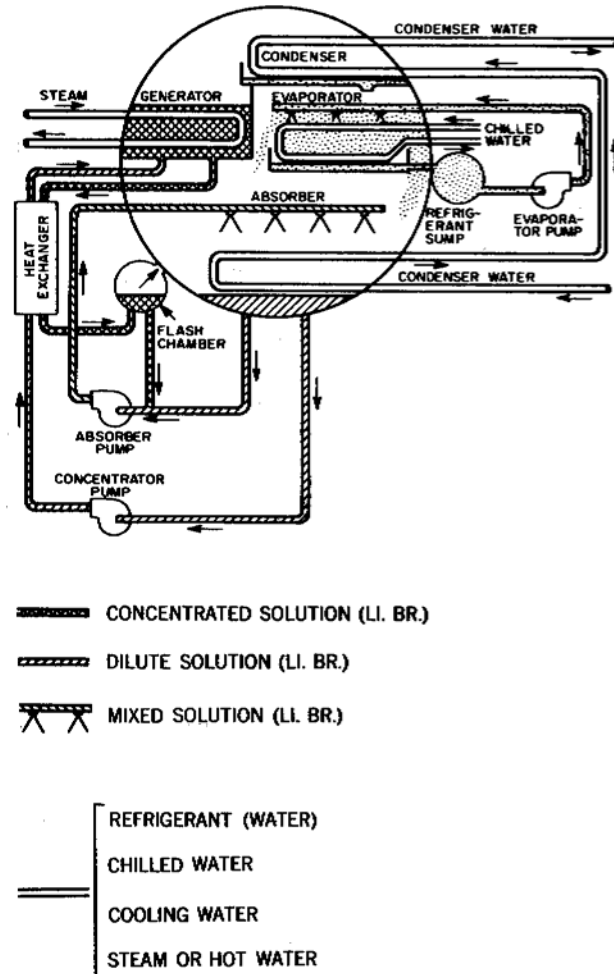


Fig. I.25 Configuración real de un sistema de absorción de agua-bromuro de litio.

II.2 Diferentes fuentes de energía térmica

El principal suministro de energía en el sistema de absorción es de origen térmico, calor, y considera tres fuentes, cuando es de gran capacidad, industrial, el sistema se emplea la energía de desecho industrial y la combustión de gas. A escala comercial y doméstica se hace uso de la energía térmica de desecho industrial y la solar.

II.3 Sistemas avanzados

Con la finalidad de mejorar la operación de los sistemas de absorción se han modificaciones empleando todas las ideas que logren dicho fin, desde la inclusión de intercambiadores hasta la inclusión de cierto número de elementos en serie o en paralelo.

Las Figs. I.26 a I.31 muestran algunos sistemas resultantes.

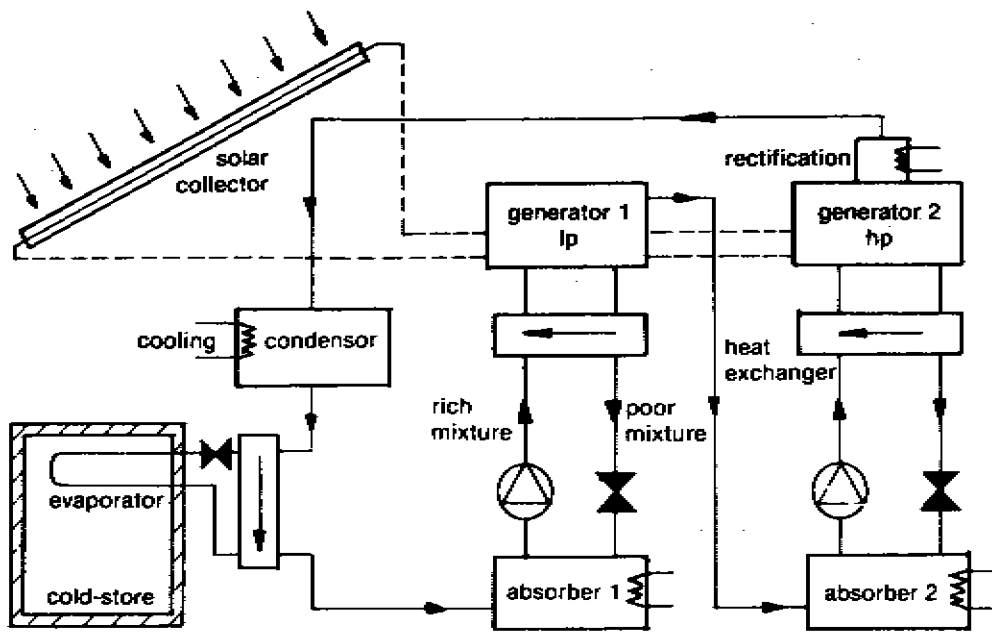


Fig. I.26 Sistema de refrigeración de dos etapas.

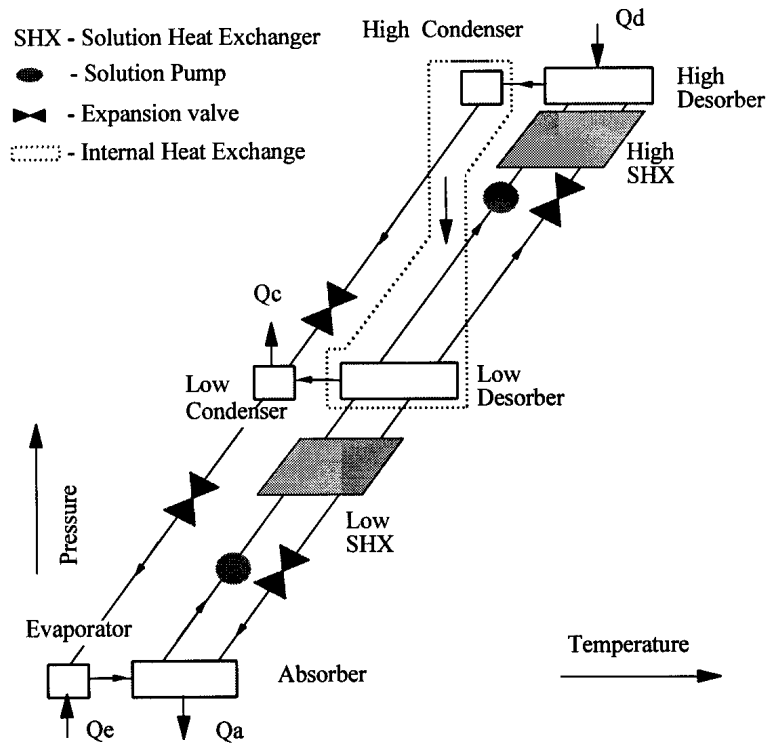


Fig. I.27 Ciclo de absorción de bromuro de litio-agua de doble efecto con flujo paralelo.

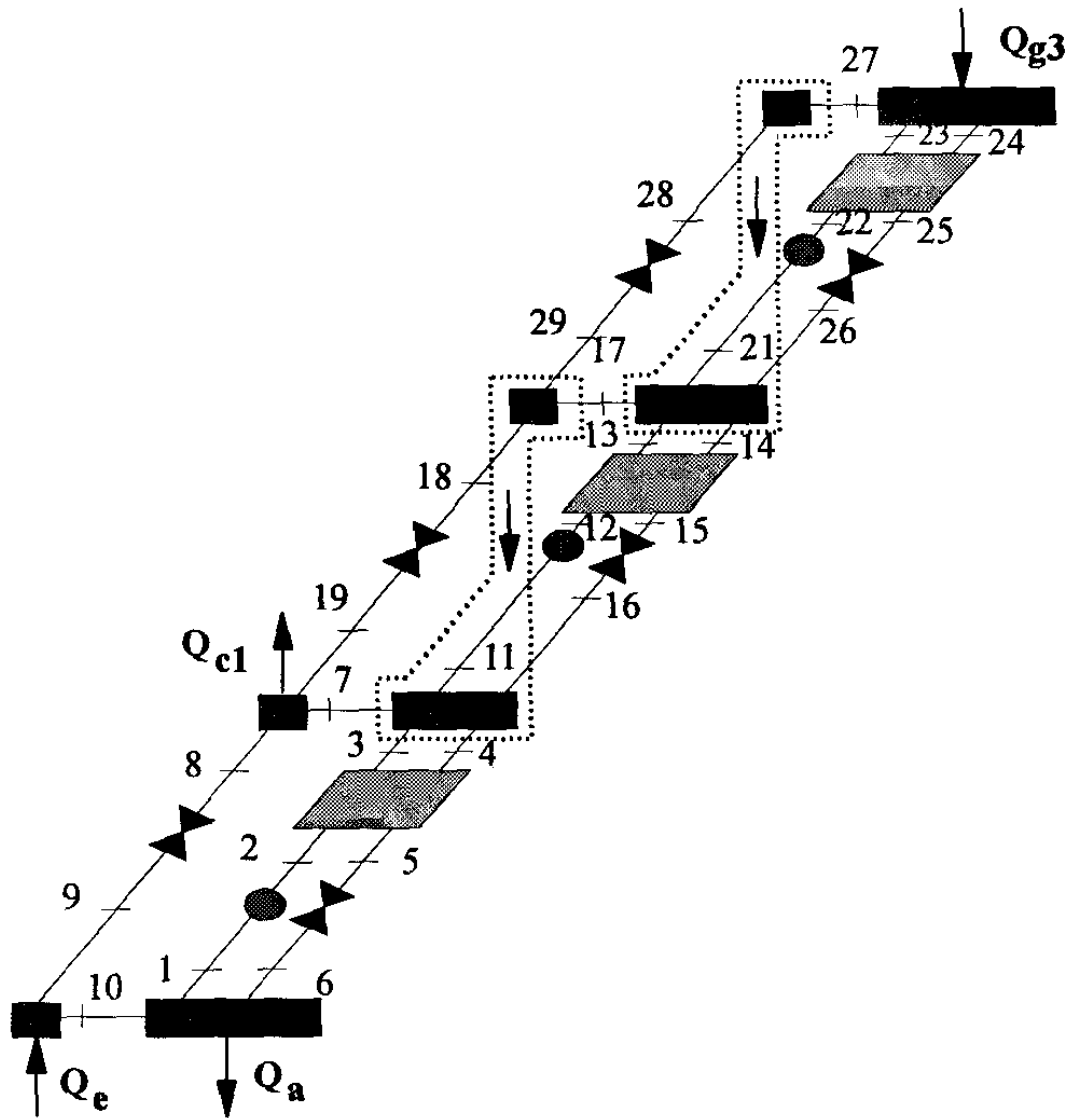


Fig. I.28 Ciclo de absorción de bromuro de litio-agua de triple efecto.

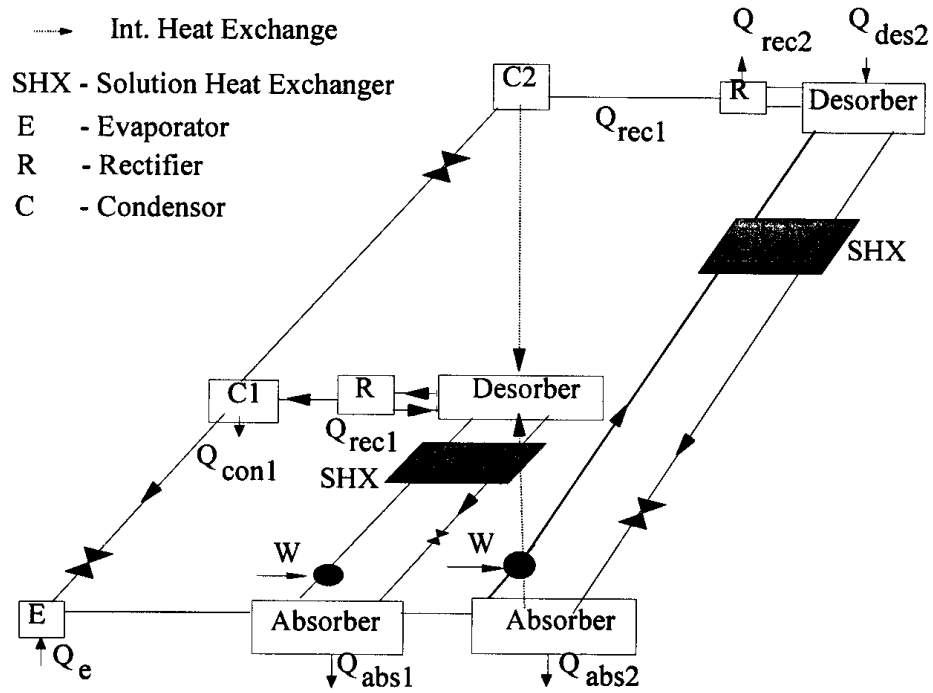


Fig. I.29 Ciclo de absorción de amoníaco-agua de dos etapas y triple efecto.

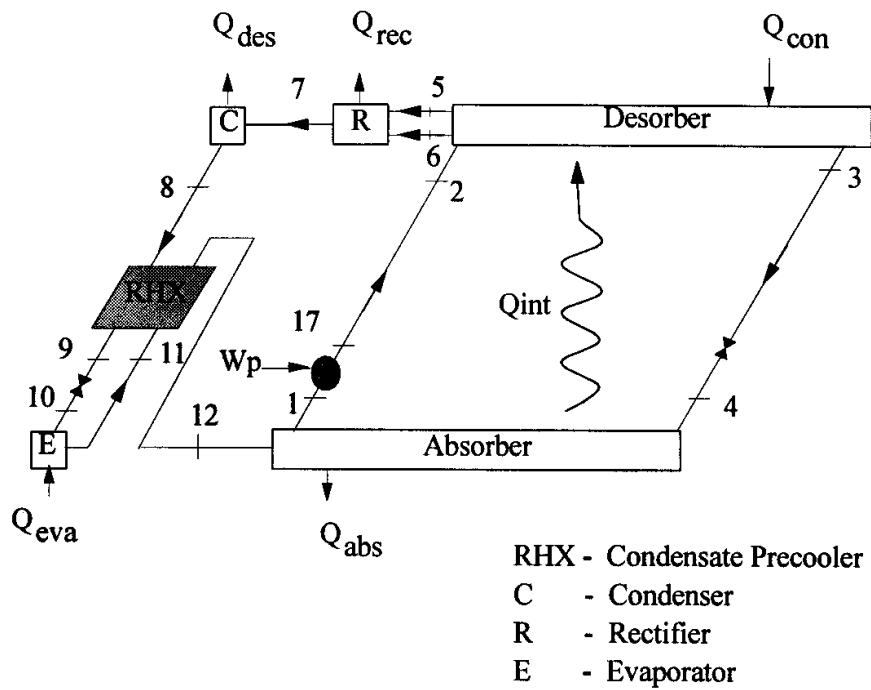


Fig. I.30 Ciclo de absorción con concepto GAX.

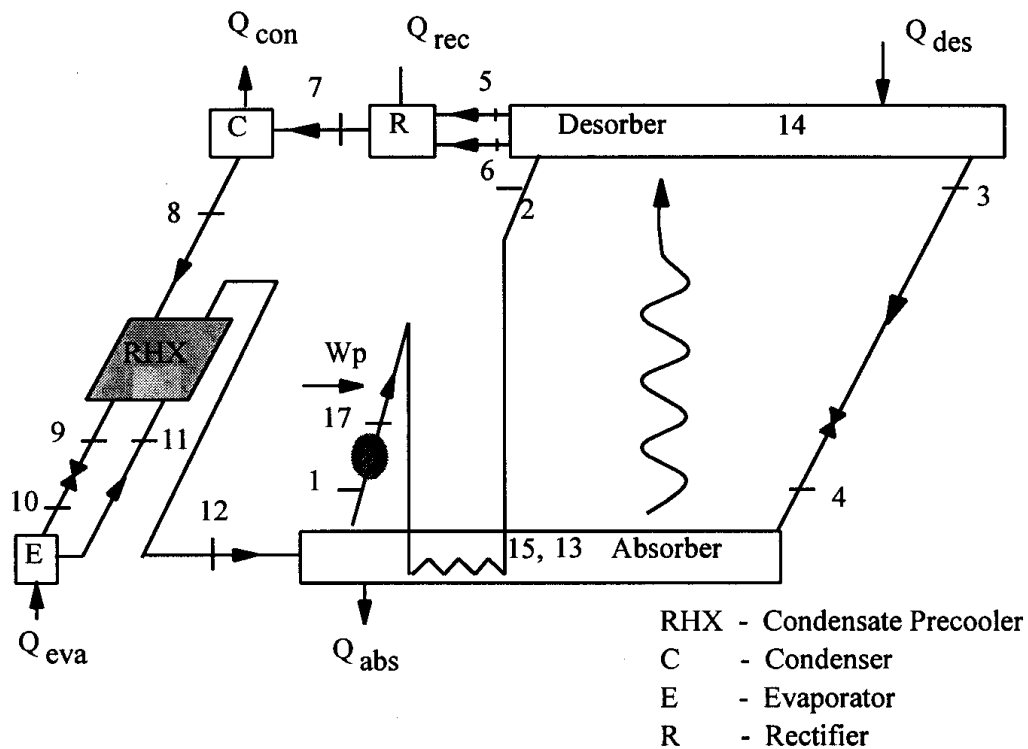


Fig. I.31 Ciclo de absorción con concepto GAX.

II.4 Sistemas de absorción - difusión

Se ha mencionado que en el sistema amoníaco-agua es necesario emplear una bomba para pasar la solución del absorbedor al generador; esto no se hace solamente para lograr el movimiento del líquido sino también porque el absorbedor se encuentra a una presión mucho más baja que el generador; por ejemplo, 2.1 bar en el absorbedor y 20.3 bar en el generador. Aún cuando la energía que necesita la bomba representa menos del 1% de la energía suministrada al generador, si solo se dispone de energía calorífica, el empleo de una bomba presenta en el mejor de los casos, serios inconvenientes.

Si al sistema de absorción se le agrega un tercer fluido, un gas inerte que no reaccione con el absorbente y el refrigerante, tal como el hidrógeno, se tendrá un balance entre las presiones de los lados de alta y baja presión. Se podrá así formar un ciclo de absorción que funcione sin la bomba de la solución y sin ninguna otra parte en movimiento. Los sistemas que utilizan amoníaco y agua tienen una aplicación muy grande como refrigeradores domésticos, sobre todo en casas móviles y vehículos de recreación, en cuyo caso el calor se suministra al generador por combustión directa de propano, por alguna resistencia eléctrica o por ambas. Las Figs. I.32 y I.33 muestran la composición de estos refrigeradores.

Aunque el refrigerante amoníaco es tóxico, las posibilidades de fuga son remotas y por otra parte, la cantidad de amoníaco en el sistema es tan pequeña que el peligro es mínimo.

El ciclo opera de acuerdo a la ley de Dalton, la cual establece que la presión total en cualquier mezcla de gases y vapores es igual a la suma de las presiones parciales ejercidas por cada uno de los gases o vapores de la mezcla. En este sistema la presión total ejercida por los gases y vapores es la misma en todas sus partes.

Las pequeñas variaciones de presión que se dan en el sistema provienen de la presencia de columnas de líquido y son usadas para lograr la circulación de los líquidos sin bomba alguna. Al añadir el gas inerte se presenta un cambio en el funcionamiento del evaporador. Dicho gas está presente sólo en el circuito que forman el evaporador y el absorbedor, quedando fuera del generador y condensador, de tal modo que cuando al evaporador entra amoníaco líquido se encuentra ante una atmósfera de gas inerte. La evaporación ocurre de la misma forma en que el agua de una alberca se evapora dentro de la atmósfera -efecto de difusión- pero en este caso la atmósfera se sustituye por hidrógeno. La unidad se carga con tanto hidrógeno como sea necesario para mantener la misma presión en todas sus partes, esto es, la suma de las presiones parciales de los 3 componentes, debe de ser igual a la presión de saturación del refrigerante que corresponda a la temperatura máxima de condensación, para la cual esta diseñada la unidad; por ejemplo, para condensar amoníaco a 50°C se requiere de 20.3 bar.

En el evaporador la presión parcial del vapor de amoníaco es menor que la presión total a causa de la presencia del hidrógeno. Como consecuencia de esto, el amoníaco líquido empieza a evaporarse dentro del gas (hidrógeno), que está casi libre de amoníaco cuando entra al evaporador y enfría el serpentín a medida que avanza. La evaporación se detiene cuando la atmósfera de hidrógeno se satura de vapores de amoníaco al igualarse las presiones parciales entre el refrigerante líquido y el gaseoso, por lo cual debe reemplazarse la mezcla de hidrógeno rica en vapor de amoníaco, por un flujo de hidrógeno lo más puro posible. En cambio, en el condensador donde no hay hidrógeno presente, la condensación se realiza a una presión y temperatura suficientemente alta para que se pueda ceder calor a la atmósfera.

La circulación automática del gas inerte que transporta al refrigerante evaporado hacia el absorbedor, se logra colocando el evaporador a mayor altura que el absorbedor. Como el peso molecular del hidrógeno es 2 y el del vapor de amoníaco es 17, la atmósfera de hidrógeno se hace más pesada al enriquecerse con vapor de amoníaco en el evaporador y desciende al absorbedor colocado por debajo, donde la solución diluida absorbe sólo al amoníaco; de esta manera la mezcla gaseosa se va haciendo más ligera hasta ser casi hidrógeno puro a la salida del absorbedor. Este último descarga el gas y la solución saturada en un tanque de separación, el gas asciende, estableciéndose por gravedad una circulación continua en el circuito gas-vapor de refrigerante; el movimiento es reforzado por la diferencia de densidades que hay entre el gas caliente que asciende y el frío que desciende.

Las concentraciones que se obtienen una vez que la solución diluida absorbió al amoníaco de la mezcla gaseosa, dependen de la temperatura a la cual pueda enfriarse el absorbedor, para lo cual es común utilizar el aire ambiente.

La circulación de la solución refrigerante-absorbente entre el absorbedor y el generador, ambos a la misma presión, se logra mediante una diferencia de altura entre ellos; la solución diluida se eleva hasta el nivel del separador empujada por las burbujas de vapor de amoníaco producidas en el generador, a través de un tubo percolador que reemplaza a la bomba usada en los sistemas grandes. Del separador, el líquido drena por gravedad a través de una trampa "U" de líquido, hacia el absorbedor enfriado por aire, mientras que el vapor de amoníaco pasa directamente al condensador también enfriado por aire, donde es condensado. Luego el amoníaco líquido drena por gravedad desde el condensador hacia el evaporador, a través de otra trampa "U" para líquido, mezclándose luego con hidrógeno y vaporizándose al tomar calor a baja temperatura del espacio refrigerado. El propósito de las dos trampas "U" de líquido es contener al hidrógeno en el evaporador y en el absorbedor, evitando así su paso hacia el generador-separador-condensador.

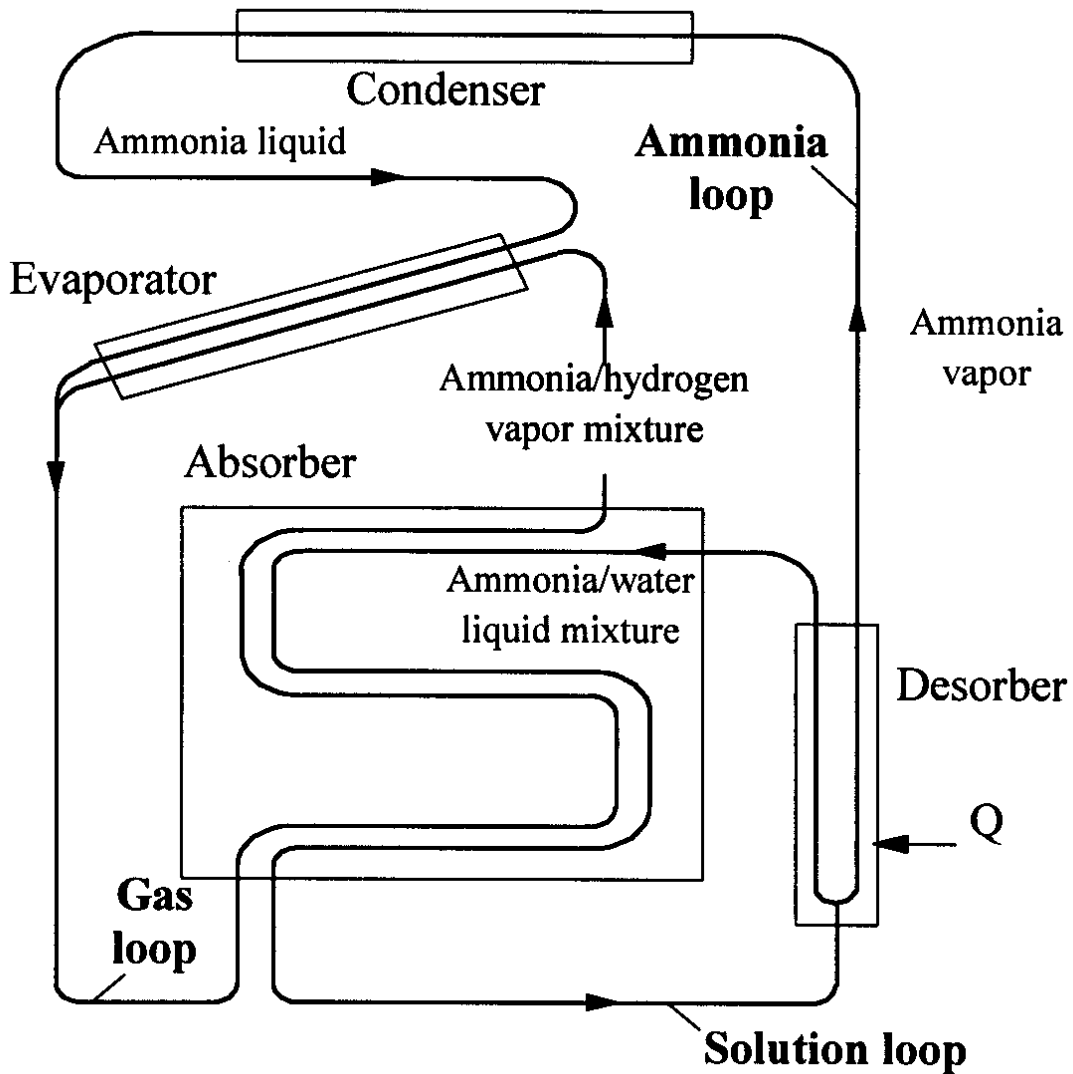


Fig. 1.32 Los tres circuitos del refrigerador de absorción--difusión.

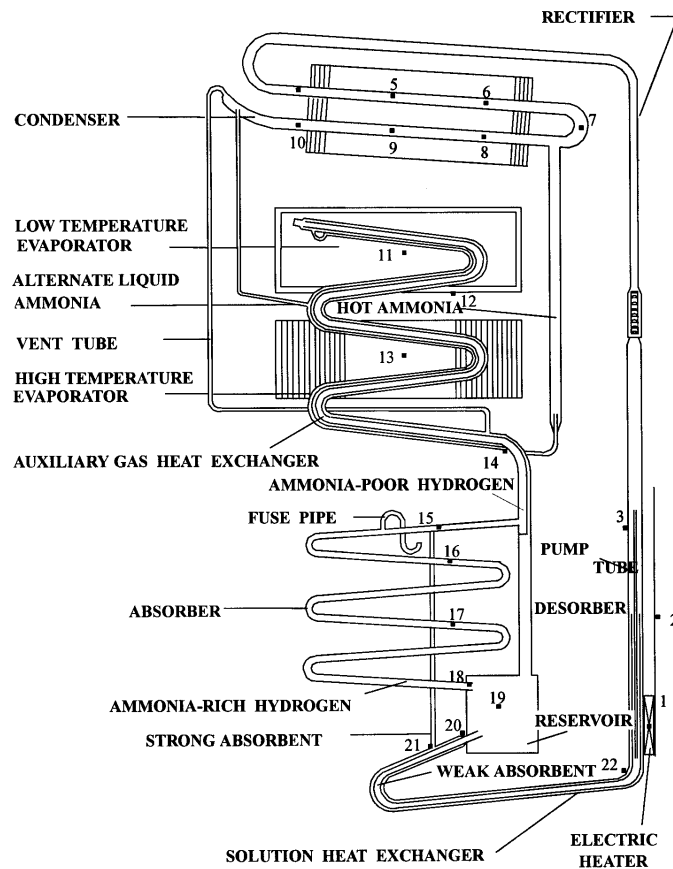


Fig. I.33 Refrigerador de absorción--difusión.

BIBLIOGRAFIA

1. Métodos de producción de frío. PUAL-UNAM, México, 1993.
2. Termodinámica técnica, José Segura Clavel, Editorial AC, Madrid, 1980.
3. Solar cooling and refrigeration, J. C. McVeigh, UNESCO, UK, 1984.
4. Solar air cooling and refrigeration, A. A. M. Sayigh and J. C. McVeigh, Pergamon Press, UK, 1992.
5. Air conditioning principles and systems: An energy approach, E. G. Pita, John Wiley and Sons, USA, 1981.
6. Heating, ventilating and air conditioning, analysis and design, F. C. McQuiston, J. D. Parker and J. D. Splitter, John Wiley and Sons, USA, 2000.
7. Principles of refrigeration, R. J. Dossat, Prentice Hall, USA, 1991.
8. Thermal environmental engineering, T. H. Kuhen, J.W. Ramsey and J. L. Threlkeld, Prentice Hall, USA, 1998.
9. Absorption, chillers and heat pumps, K. E. Herold, R. Rademacher and S. A. Klein, CRC Press, USA, 1996.