

La refrigeración en la enseñanza de la física



Jimena Castro Gutiérrez, Sergio Hernández Zapata, Carlos Álvarez Macías
*Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Universidad 3000,
Circuito exterior S/N, C.P. 0451, Ciudad Universitaria, México D.F.*

E-mail: menacg@gmail.com

(Recibido el 5 de Enero de 2010; aceptado el 19 de Octubre de 2010)

Resumen

Habitualmente los cursos de termodinámica abordan el tema de la refrigeración de manera teórica utilizando el ciclo inverso de Carnot, esto deja al estudiante con una idea muy abstracta y poco tangible. En el presente trabajo se realiza un análisis de los sistemas reales de refrigeración, lo cual permite que, al estudiar cada componente, se refuercen y analicen diversos temas no sólo de termodinámica sino también de química, dinámica de fluidos e impacto ambiental. El análisis da a conocer las diferencias en diseño para sistemas por compresión y por absorción que llevan al refrigerante a través del ciclo termodinámico respectivo. También, se hace un estudio de las propiedades físicas y químicas que caracterizan a una sustancia como refrigerante y/o absorbente. Por otro lado, se aborda un tema de gran importancia como son las consecuencias ambientales que surgen con los refrigerantes utilizados actualmente, tales como la disminución de la capa de ozono y el aumento del efecto invernadero, lo que nos lleva a buscar sistemas que no dañen el ambiente al suministrarles energía o al emitir sustancias contaminantes como resultado de su funcionamiento.

Palabras clave: Refrigeración solar, Impacto ambiental, Absorción.

Abstract

In the traditional teaching of thermodynamic the subject of refrigeration is usually studied at a theoretical level, basing most of the discussion on the reverse Carnot cycle. This leaves the student with a very abstract and intangible idea. In this paper we analyze real refrigeration systems. The study of each component allows us to reinforce several subjects, not only of thermodynamics but also of chemistry, fluid dynamics and environmental impact. This analysis shows the differences in design for compression and absorption systems that carries the refrigerant through the corresponding thermodynamic cycle. Besides, we study the physical and chemical properties that characterize a substance as a refrigerant and/or absorbent. On the other hand, we deal with an issue of major importance which is the environmental consequences of currently used refrigerants, such as the ozone layer depletion or the increase in global warming. This leads us to search for systems that do not harm the environment when supplying energy to them or when emitting pollutants as a result of its operation.

Keywords: Solar Refrigeration, Environmental impact, Absorption.

PACS: 07.20.Mc, 88.05.Sv, 88.05.Np, 92.60.Sz

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El hielo natural fue usado para enfriar desde tiempos antiguos, transportándose de zonas frías a zonas calientes o se guardaba el hielo en el invierno para usarse en verano. En 1755, William Cullen produjo un poco de hielo en el laboratorio evaporando éter por medio de vacío, este proceso no es cíclico pues cuando el éter se evapora por completo la refrigeración termina. En 1803, se inventó la “caja de hielo”, primer refrigerador doméstico que funciona poniendo hielo en un lugar elevado generando convección, fue usado por más de un siglo. En 1805, Oliver Evans describió un mecanismo que haciendo uso de un compresor (operado por un motor) permite refrigeración continua, fue construido y patentado por Jacob Perkins, en 1835; por otro lado, en 1810, John Leslie demostró el principio básico de un sistema de refrigeración por absorción de vapor que

alimenta al mecanismo con calor y utiliza una pequeña bomba para mantener el flujo dentro del sistema. En 1922, dos estudiantes suizos, Platen y Munters diseñaron un sistema por absorción sin bomba. En 1911, *General Electric* fabricó el primer refrigerador mecánico doméstico y, en 1931, la compañía *Electrolux* construyó el primer refrigerador por absorción doméstico basado en el sistema de Platen y Munters [1].

La refrigeración es un proceso que se ha vuelto común en nuestra vida diaria, ha evolucionado a lo largo de los años, tanto en su comprensión como en la fabricación de los dispositivos que la hacen posible y las diversas sustancias que son utilizadas como refrigerantes.

Definimos refrigeración como el proceso de mantener un producto o espacio a una temperatura menor a la de sus alrededores [1, 2]. Este concepto no debe confundirse con el enfriamiento, el cual implica una disminución en la

temperatura, no necesariamente menor a la de los alrededores. Por ejemplo, cuando se deja que una taza de café disminuya su temperatura estamos enfriando pues la mínima temperatura disponible es la del ambiente en ese momento; por otro lado, si agregamos hielo tenemos un proceso de refrigeración pues la temperatura final es menor que la de los alrededores.

El presente trabajo aborda el tema de la refrigeración partiendo, en la Sección II, de los ciclos termodinámicos que la hacen posible, después analizamos los sistemas que llevan al refrigerante a través de dichos ciclos, en particular los sistemas por compresión y por absorción de vapor (que son los más usados a nivel industrial, comercial y doméstico) haciendo una comparación entre ambos. En la Sección III, estudiamos las propiedades termodinámicas y químicas de los refrigerantes y absorbentes, sustancias necesarias para llevar a cabo la refrigeración. En la Sección IV, vemos cuál es el impacto ambiental que tienen las sustancias involucradas en la refrigeración convencional y de este modo, en la Sección V, estudiamos las formas de implementar la energía solar en los sistemas de refrigeración. Por último, en la Sección VI, presentamos nuestras conclusiones.

II. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN CONVENCIONAL

La refrigeración involucra procesos como son la evaporación y la condensación, mismos que se describen a continuación. Desde un punto de vista de física estadística.

Evaporación y condensación: las partículas en un líquido tienen velocidades diferentes, en algún momento puede pasar que algunas partículas adquieran una energía cinética mayor que la energía de atracción molecular, pudiendo con esto escapar del líquido; a la inversa, partículas de vapor con baja energía se integran al líquido. Si escapan más partículas de las que se integran ocurre evaporación, en cambio, si se integran más de las que escapan ocurre condensación.

Enfriamiento por evaporación: durante la evaporación, al ser las partículas con mayor velocidad las que escapan del líquido lo dejan, en promedio, con menos energía cinética, por lo que disminuye su temperatura.

En un refrigerador real el refrigerante es llevado a través de un ciclo que, a diferencia del ciclo de Carnot, no es reversible ni de eficiencia máxima. Este ciclo se lleva a cabo en la región de saturación, donde coexisten el líquido y el vapor del refrigerante (sustancia encargada del transporte de calor en un refrigerador y se utiliza para absorber calor del espacio o cuerpo a refrigerar).

Usualmente estos ciclos son estudiados en un diagrama de presión-entalpía del refrigerante en cuestión, ya que tienen la ventaja de facilitar el cálculo de la cantidad de calor extraído y cedido en los procesos a presión constante, que equivale a la diferencia de entalpía entre el estado final e inicial.

De la Figura 1, donde se muestra un ciclo de refrigeración típico, el ciclo comienza cuando todo el

refrigerante está en su forma líquida, a alta presión y temperatura. En estas condiciones puede estar en el punto A', donde el líquido está saturado; o en el punto A, donde el líquido está subenfriado. Al disminuir su presión y temperatura abruptamente se evapora parte del refrigerante (es lo que sucede cuando abrimos una olla express que aun está muy caliente: la presión y la temperatura dentro de ésta son muy altas, al abrir disminuimos la presión hasta la atmosférica drásticamente, evaporándose parte del agua dentro de la olla; como no hay intercambio de calor con los alrededores, la energía necesaria para la evaporación se toma de la energía interna del líquido, disminuyendo con esto la temperatura del mismo), punto B o B'; la diferencia entre estos puntos radica en la cantidad de refrigerante líquido que se tiene: entre más cerca se está de la línea de líquido saturado mayor es el porcentaje de líquido presente. Al pasar del punto B (o B') al punto C, el refrigerante se evapora por completo extrayendo calor del espacio a refrigerar (se produce un enfriamiento por evaporación del refrigerante; es la razón por la que, por ejemplo, una taza de café se enfría. Entonces, ¿por qué el refrigerante se mantiene a temperatura constante? Esto se debe a que se mantiene en contacto con el espacio a refrigerar robándole calor y compensando así su enfriamiento por evaporación). Llamaremos *efecto refrigerante* a la cantidad de calor que se extrae de dicho espacio; aquí hay que notar que el efecto refrigerante para el proceso B-C es mayor que para el proceso B'-C, ya que en el segundo tenemos menos refrigerante disponible para la evaporación, razón por la cual el subenfriamiento al inicio del ciclo se vuelve importante. Una vez que tenemos vapor saturado se lleva a cabo una compresión, es decir, aumentamos su presión y temperatura hasta alcanzar el punto D. A partir de este punto, el refrigerante cede calor a un *medio condensante* para saturarse, llegar al punto E, y posteriormente condensarse por completo, regresando al punto A o A' (por ejemplo, cuando se forman gotas de agua en una bebida es porque el vapor de agua, presente en el aire circundante, cede calor a la bebida condensándose en la superficie del recipiente que la contiene).

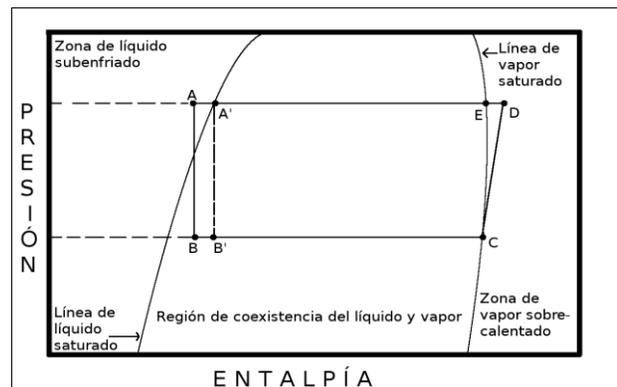


FIGURA 1. Diagrama de presión-entalpía. Se muestran las zonas de líquido y vapor, también la región de coexistencia delimitada por las líneas de saturación; dentro de la región de coexistencia, las líneas de presión constante también son líneas de temperatura constante.

Podemos hacer un balance entre la capacidad de refrigeración que tiene el ciclo (efecto refrigerante) y la cantidad de trabajo que debemos invertir para lograrlo (trabajo realizado durante la compresión), así definimos el Coeficiente de Rendimiento (Coefficient of Performance, COP) como [2]:

$$COP = \frac{\text{EfectoRefrigerante}}{\text{Trabajodecompresión}} \quad (1)$$

Cuando queremos diseñar un sistema de refrigeración se busca que el COP sea lo más alto posible, esto ayuda a aumentar la eficiencia del mismo.

Un sistema de refrigeración es un mecanismo que hace posible la refrigeración llevando una sustancia a través de un ciclo termodinámico como el descrito anteriormente; durante el cual se extrae calor del espacio que se quiere refrigerar, administrando cierta cantidad de energía al sistema. Los sistemas más usuales son el sistema por compresión y el sistema por absorción de vapor. La principal diferencia entre ambos, son los mecanismos utilizados para llevar al refrigerante a través del ciclo respectivo y la forma de administrarles energía, siendo en el primero mecánica y en el segundo calorífica.

A continuación se describen los sistemas de refrigeración por compresión y por absorción de vapor.

A. Refrigeración por compresión

Un sistema de refrigeración por compresión puede dividirse en dos partes, una de alta presión y otra de baja presión. En la zona de baja presión y baja temperatura (zona de líneas, Figura 2) se lleva a cabo la evaporación del refrigerante dentro de un depósito llamado *evaporador*, el cual está en contacto con el espacio a refrigerar o *cámara refrigerante*. Durante este proceso se roba calor de la cámara refrigerante, manteniendo su temperatura más baja que la de los alrededores. Para mantener la presión constante en el evaporador se utiliza un *compresor* (impulsado por un motor), su función es succionar el refrigerante sacándolo del evaporador.

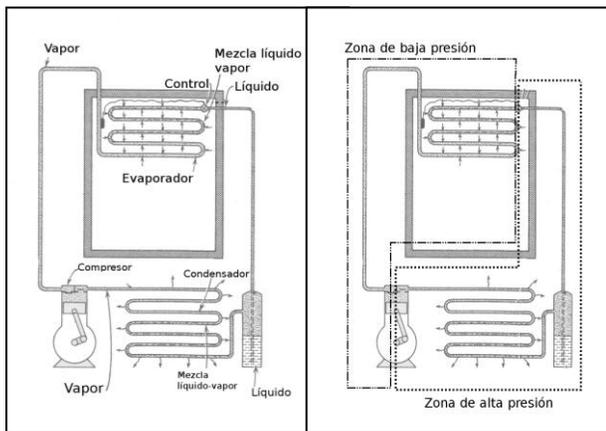


FIGURA 2. A la izquierda se muestra un dibujo esquemático de un sistema refrigerante por compresión de vapor (imagen tomada

La zona de alta presión (zona de puntos, Figura 2) comienza a la salida del compresor, el cual aumenta la presión y temperatura del vapor hasta sobrecalentarlo. Después, se hace pasar al refrigerante por un *condensador*, en contacto con el *medio condensante* (usualmente se usa agua o aire) al que cede calor, a la salida del condensador se tiene refrigerante líquido. El refrigerante se almacena en un *contenedor* o *tanque* conectado al evaporador mediante una *válvula de expansión* que, al abrirse, disminuye rápidamente la presión y la temperatura del refrigerante cerrando el ciclo.

B. Refrigeración por absorción

La absorción es el proceso mediante el cual un gas (soluto) se disuelve en un líquido (absorbente o disolvente), dando como resultado una mezcla líquida de ambas sustancias; por ejemplo, cuando el aire se integra al agua. El proceso inverso es posible, generalmente aplicando calor a la mezcla; por ejemplo, cuando hervimos agua, el aire atrapado en ésta sale en forma de burbujas (junto con el vapor de agua producido por la ebullición).

Del estudio de la dinámica de fluidos, sabemos que cuando existe una diferencia de presiones en una región se genera un flujo, que va de la zona de mayor presión a la de menor presión. Entonces, si tenemos un gas en contacto con un líquido y la presión de vapor del gas es mayor que la presión de vapor del disolvente, el gas fluirá hacia el líquido y será absorbido. Este principio se utiliza, en los sistemas por absorción de vapor, para sustituir al compresor en la labor de mantener baja la presión en el evaporador.

En este sistema son necesarias dos sustancias para su funcionamiento, el refrigerante y el absorbente; al igual que el caso por compresión, el sistema está dividido en dos zonas: una de alta y otra de baja presión.

La zona de baja presión (zona de puntos, Figura 3) consta

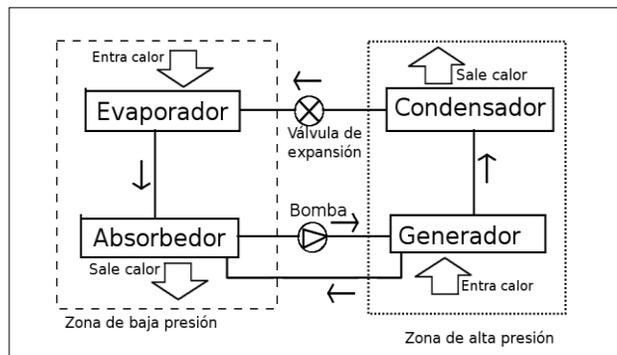


FIGURA 3. Dibujo esquemático de un sistema por absorción de vapor, se muestran las zonas de alta y baja presión y temperatura.

del *evaporador*, donde el refrigerante pasa de ser líquido a ser vapor, tomando calor de la *cámara refrigerante*. El *absorbedor* contiene una mezcla débil en refrigerante (mayor porcentaje de absorbente), aquí el refrigerante, proveniente del evaporador, es absorbido. El vapor del refrigerante fluye hacia el absorbedor, debido a que la presión de vapor de la mezcla es menor que la presión de

vapor del refrigerante en el evaporador [2, 5]. Como ya se mencionó, este efecto de “succión”, provocado por la mezcla refrigerante-absorbente, es lo que mantiene baja la presión y la temperatura en el evaporador, estas condiciones dependen de las propiedades químicas del absorbente y de la mezcla de éste con el refrigerante.

El proceso de absorción hace que la mezcla se vuelva cada vez más rica en refrigerante, lo que aumenta la presión de vapor en el absorbedor y existe una tendencia a disminuir el efecto refrigerante. Para compensar lo anterior, se hace pasar la mezcla hacia el *generador*, haciendo uso de una bomba, ya que el generador está a una presión mayor que el absorbedor y el refrigerante no fluye naturalmente; aquí comienza la zona de alta presión (zona de puntos, Figura 3). La función del generador es separar el refrigerante del absorbente calentando la mezcla (usualmente se hace quemando gas, aquí es donde se suministra energía al sistema) y mantener alta la presión en el condensador. Al hacer esto se obtiene vapor de refrigerante puro y una mezcla débil de refrigerante, la mezcla se regresa al absorbedor para mantener constante el efecto refrigerante, mientras que el refrigerante se dirige al *condensador*. En éste, se cede calor al *medio condensante* para obtener refrigerante líquido, que es almacenado en un *tanque conectado* al evaporador por medio de una *válvula de expansión*, encargada de bajar la presión y la temperatura del refrigerante, volviendo al inicio del ciclo.

C. Comparación entre ambos sistemas de refrigeración

Los sistemas descritos anteriormente son de ciclo continuo, donde la absorción y la generación son simultáneas. Más adelante se discutirá el sistema por absorción de vapor de ciclo intermitente.

Pueden observarse similitudes entre ambos sistemas: la presencia del evaporador, el condensador, el tanque de almacenamiento e incluso la válvula de expansión. Sin embargo, en los sistemas por compresión de vapor (SCV), el compresor mantiene baja la presión en el evaporador y alta la presión en el condensador; en cambio, en los sistemas por absorción de vapor (SAV), el absorbedor mantiene baja la presión en el evaporador y el generador mantiene alta la presión en el condensador.

Por otro lado, debido a la gran variedad de refrigerantes disponibles para los SCV se pueden diseñar refrigeradores con una amplia gama de temperaturas de trabajo. Para el caso de los SAV, no existen tantas opciones y el rango de temperaturas que se pueden alcanzar con estos refrigeradores no es muy grande. La Tabla I muestra una comparación entre las características de ambos sistemas.

III. SUSTANCIAS INVOLUCRADAS EN LA REFRIGERACIÓN

Como ya se mencionó anteriormente, para lograr la refrigeración se requiere de una sustancia que transporte calor llamada refrigerante, en el caso de los sistemas por absorción de vapor, además del refrigerante, es necesario un

absorbente. Esta sección está dedicada a describir las propiedades de dichas sustancias.

TABLA I. Comparación entre los sistemas refrigerantes por compresión de vapor (SCV) y los sistemas por absorción de vapor (SAV) [4].

SCV	SAV
Se alimentan con trabajo	Se alimentan con calor
COP alto (~3), pero sensible a las temperaturas del evaporador	COP bajo (~1.4), poco sensible a las temperaturas del evaporador
El COP se reduce en las zonas de recarga	COP no se ve afectado con las recargas
Se debe evitar tener líquido a la salida del evaporador ya que puede dañar el compresor	No hay problema si no se evapora todo el líquido
COP sensible al sobrecalentamiento en el evaporador	El sobrecalentamiento del evaporador no es importante
El motor del compresor requiere mantenimiento constante	Requieren poco mantenimiento
Económicos cuando hay electricidad disponible	Económicos cuando hay calor residual.

A. Refrigerantes

Existe una gran variedad de refrigerantes, sus características y propiedades físicas y químicas son muy diversas. En la Tabla II se presentan las propiedades que idealmente debe tener un refrigerante; sin embargo, es muy difícil encontrar una sustancia que cumpla con todas. Así que, al momento de escoger un refrigerante, se debe buscar que se adecúe al tipo de refrigerador que se pretende construir así como la aplicación que se le dará al mismo. Además se debe tener en cuenta su toxicidad, seguridad e impacto ambiental (temas que se tratarán posteriormente).

B Absorbentes

Como mencionamos antes, la mezcla soluto-absorbente (disolución) tiene una presión de vapor menor que la del soluto puro; además, su punto de ebullición es más elevado y el punto de congelación es más bajo. Estas propiedades dependen sólo de la calidad de la mezcla, es decir, de la cantidad de soluto presente en la disolución [5].

Usando la ley de Raoult, podemos deducir que la presión de vapor de una disolución es menor que la presión de vapor del disolvente puro, además entre menos soluto haya en la mezcla menor es la presión de vapor [5]. Para que se cumpla la ley de Raoult es necesario que el calor de disolución sea nulo, es decir, que el proceso por el cual se lleva a cabo la absorción no sea ni exotérmico (libere calor al medio) ni endotérmico (robe calor del medio), de otro modo se producen desviaciones a dicha ley. Cuando el proceso de absorción es exotérmico, la desviación es negativa; si el proceso es endotérmico, la desviación es positiva [5]. Una

desviación negativa de la ley de Raoult favorece la solubilidad [3].

TABLA II. Propiedades de los refrigerantes [2, 11].

<i>Presión dentro del sistema</i>	Debe estar por encima de la atmosférica (incluso en la zona de baja presión). Evita entrada de humedad y facilita detección de fugas.
<i>Calor latente de vaporización</i>	Alto para disminuir el flujo de masa dentro del sistema.
<i>Calor específico</i>	Del líquido, bajo para lograr subenfriamiento. Del vapor, alto para evitar sobrecalentamiento.
<i>Conductividad térmica</i>	Alta en ambas fases, para lograr buenas transferencias de calor.
<i>Viscosidad</i>	La viscosidad genera una fuerza de fricción contraria a la dirección del flujo, lo cual provoca caídas de presión dentro del sistema. Por lo que la viscosidad debe ser baja en ambas fases.
<i>Presión del punto crítico</i>	Elevada, esto permite trabajar siempre en la zona de coexistencia del líquido y el vapor
<i>Temperatura de fusión</i>	Lo más baja posible, para evitar la congelación en el evaporador.
<i>Miscibilidad</i>	Es la capacidad de mezclarse con otras sustancias, en cualquier proporción, formando una solución homogénea ¹ . Una buena miscibilidad, evita tener que agregar un separador para obtener refrigerante puro a la salida del compresor.
<i>Estabilidad y compatibilidad química</i>	Evita reacciones indeseadas, que pueden generar sustancias corrosivas dañinas para el equipo.
<i>Toxicidad</i>	La toxicidad es el nivel de daño que puede provocar una sustancia al ser humano, ya sea pura o al mezclarse con el aire. Se busca que el refrigerante no sea tóxico.
<i>Seguridad</i>	Se refiere a qué tan explosiva puede ser una sustancia pura o mezclada con el aire. Se busca que el refrigerante sea lo más seguro posible.
<i>ODP*</i>	Da una medida del daño provocado a la capa de ozono por la sustancia. Debe ser lo más bajo posible.
<i>GWP**</i>	Mide la contribución que tienen los refrigerantes al calentamiento global. Debe ser lo más bajo posible.
<i>TEWI***</i>	Toma en consideración el efecto invernadero directo e indirecto relacionado con el consumo de energía.

¹ En refrigeración, generalmente se usa para referirse a la mezcla del refrigerante con el aceite lubricante del compresor [2].

*Potencial de agotamiento de ozono, ODP por sus siglas en inglés.

**Potencial de calentamiento global, GWP por sus siglas en inglés.

***Índice Equivalente Total de Calentamiento, TEWI por sus siglas en inglés.

Dado lo anterior, podemos decir que una mezcla débil (poco soluto, baja calidad) absorbe mejor que una mezcla fuerte (mucho soluto, alta calidad).

La solubilidad de un gas también depende de la presión, la ley de Henry establece que, a temperatura constante, la solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión del gas sobre la disolución [5].

Cuando se quiere diseñar un sistema de refrigeración por absorción se debe tener en cuenta todo lo anterior para escoger las sustancias que funcionen mejor como refrigerante y como absorbente. También es preferible que los puntos de ebullición del absorbente y el refrigerante sean muy diferentes, ya que en la separación de las sustancias esta diferencia es imprescindible; esto ayuda a que a la salida del generador se tenga refrigerante lo más puro posible.

La Tabla III muestra algunos ejemplos de refrigerantes con su respectivo absorbente. Los sistemas más usados son: agua-bromuro de litio, para sistemas de aire acondicionado, ya que no se necesitan temperaturas muy bajas; y amoniaco-agua, usados cuando se necesita refrigerar a más bajas temperaturas (debajo de los 0 °C).

TABLA III. Pares refrigerante-absorbente usados con mayor frecuencia [1, 3, 6].

Refrigerante	Absorbente
Agua	Bromuro de litio
Amoniaco	Agua
Agua	Ácido sulfúrico
Amoniaco	Nitrato de litio

IV. IMPACTO AMBIENTAL

Dado que la mayoría de los refrigerantes son sustancias producidas artificialmente suelen ser agentes de contaminación. Alrededor de los años 20 comenzó la fabricación de los fluorocarbonos (FC's), que se obtienen al tomar hidrocarburos como el metano (CH₄) o el etano (C₂H₆) y sustituir alguno o todos los átomos de hidrógeno por átomos del grupo de los halógenos (flúor, cloro y/o bromo), por lo que también se les llama compuestos parcial o totalmente halogenados [2].

El desarrollo de los FC's trajo consigo mejoras en la eficiencia de los sistemas de refrigeración e implementó su uso en la mayoría de los refrigeradores, lamentablemente se descubrió que su liberación al ambiente provoca daños a la capa de ozono y contribuye al efecto invernadero, razón por la cual tuvieron que implementarse normas que regularan e incluso prohibieran su uso.

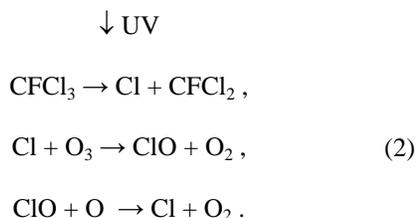
En esta sección revisaremos dos de las consecuencias ambientales más importantes provocadas por el uso de los refrigerantes: la destrucción de la capa de ozono, que está relacionada con las propiedades químicas de las sustancias; y la contribución al calentamiento global, como consecuencia de las propiedades físicas de las sustancias.

A. Destrucción de la capa de ozono

La capa de ozono actúa como un filtro de la radiación ultravioleta (UV) proveniente del sol, haciendo que sólo una parte de ésta llegue a la Tierra. En los años 70, el trabajo de Sherwood Rowland, Mario Molina y Paul J. Crutzen (Premios Nobel de química de 1995) evidencia las repercusiones en el ambiente y la salud humana como consecuencia de la disminución de la capa de ozono, provocada por la emisión a la atmósfera de clorofluorocarbonos e hidroclofluorocarbonos (CFC's y HCFC's, sustancias usadas comúnmente como refrigerantes) [7].

Por otro lado, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crea, en 1985, el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono con el fin de estudiar e investigar las sustancias que repercuten de manera dañina en ésta, firmado por 195 países. Posteriormente, en 1987, se firma por 195 países (incluido México) el Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (propuesto también por el PNUMA). En este protocolo se establece una lista de las sustancias cuya producción queda prohibida, las sustancias controladas y las medidas tomadas para eliminar su uso de forma paulatina; dicha lista ha sido corregida y aumentada en las enmiendas hechas al protocolo desde entonces [8].

Los refrigerantes que contienen cloro, o bromo, en su composición son muy estables y no se reincorporan a la atmósfera de forma natural, por lo que logran llegar a la estratosfera (donde se encuentra la capa de ozono). Ahí, la radiación ultravioleta proveniente del sol desprende iones de cloro (o bromo) que reaccionan con el ozono, produciendo moléculas de oxígeno. Por ejemplo, las reacciones de descomposición del refrigerante R11 (CFCl₃) en la estratosfera se muestran a continuación:



Podemos observar que, en el resultado final, se produce como residuo otro ion de cloro, por lo que el proceso se retroalimenta y continúa por mucho tiempo, disminuyendo considerablemente la cantidad de ozono presente en la estratosfera [9].

Con base en lo anterior se definió el Potencial de Agotamiento de Ozono (*Ozone Depletion Potencial*, ODP), que da una medida de la cantidad de ozono que se destruye por la emisión de un refrigerante a la atmósfera. Se toma como referencia al R11 asignándole un ODP de 1 [10]. El ODP de algunos refrigerantes se muestra en la Tabla IV.

B. Calentamiento global

La radiación solar, en su mayoría radiación visible, llega hasta la superficie de la Tierra debido a que la atmósfera es transparente a ésta. La Tierra absorbe esta radiación y la emite en el infrarrojo; los gases en la atmósfera no son completamente transparentes a la radiación infrarroja y absorben un porcentaje de ésta, generando un calentamiento natural. El fenómeno descrito anteriormente es el llamado *efecto invernadero*, de no ser por éste la temperatura de la Tierra sería demasiado baja y no permitiría la vida como la conocemos.

Debido al desarrollo industrial, la emisión desmesurada de gases invernadero (CO₂, N₂O, CH₄, fluorocarbonos, vapor de agua, etcétera), que se acumulan en las capas superiores de la atmósfera, provocan un efecto invernadero adicional que incrementa la temperatura promedio de la Tierra; esto provoca cambios climáticos, extinción de especies animales, aumento del nivel del mar, entre otras cosas.

En 1994, se creó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el fin de tomar medidas para reducir el calentamiento global. A ésta se unieron 192 países y, en 1997, se firma el Protocolo de Kyoto. Los países que lo ratificaron se comprometen a disminuir sus emisiones de gases invernadero [11].

En cuanto a los refrigerantes, la emisión de hidrofluorocarbonos (HFCs) y de fluorocarbonos (FCs) se incrementó, debido a que son los que se usaron para sustituir los CFCs y HCFCs según lo establecido en el Protocolo de Montreal. Al darse cuenta de que también contribuían al efecto invernadero se hicieron enmiendas que regulan el uso de estas sustancias.

Para medir el efecto que tienen los refrigerantes en el calentamiento global se definió el Potencial de Calentamiento Global (*Global Warming Potencial*, GWP) tomando como referencia al CO₂; se mide qué cantidad de éste se reintegra a la atmósfera de forma natural, en un periodo de 100 años y se le asigna un GWP de 1 [10]. El GWP de algunos refrigerantes se muestra en la Tabla IV.

Existe un índice más, referente al efecto invernadero, que es el Índice Equivalente Total de Calentamiento (*Total Equivalent Warming Index*, TEWI) que toma en consideración el efecto invernadero directo debido a las emisiones a la atmósfera y el efecto invernadero indirecto relacionado con las emisiones de dióxido de carbono producidas en las centrales que generan la electricidad que mantiene funcionando al sistema (consumo de energía) [10, 12]. Este índice no es fijo, es diferente cada año para cada país, calcularlo es complicado y requiere tomar datos de consumo de energía de los sistemas instalados, de las plantas de producción de energía, de las cantidades de refrigerante producidas, etc.

V. REFRIGERACIÓN SOLAR

Como se dijo anteriormente, para mantener funcionando un refrigerador es necesario invertir energía en el sistema, dicha energía puede ser suministrada en forma mecánica o de calor, ya sea para los sistemas por compresión de vapor

como para los sistemas por absorción de vapor. Dado que el uso de los sistemas de refrigeración y los refrigerantes más comunes contribuyen en gran parte al calentamiento global y a la destrucción de la capa de ozono (los refrigerantes más usados suelen tener un ODP y/o un GWP muy altos), se pueden buscar alternativas para modificar los sistemas convencionales de forma tal que puedan operar utilizando energía solar y refrigerantes no dañinos para el ambiente.

Las modificaciones no son exclusivas de la energía solar, pues también pueden implementarse cuando existe calor residual.

TABLA IV. Se muestra el ODP y el GWP de algunos refrigerantes. Los datos fueron tomados de [10], para más datos se puede consultar [8] y [11].

Refrigerante	ODP	GWP
R11	1	3800
R22	0.055	1500
R134a	0	1300
R404 A	0	3260
R407 C	0	1520
R290	0	3
R507	0	3300
R744 (CO ₂)	0	1
R717 (NH ₃)	0	0

Notemos que el ODP y el GWP del amoníaco es nulo, por lo que se vuelve un factor de peso para escogerlo como refrigerante.

A. Sistemas por compresión de vapor

En los sistemas por compresión la inversión de trabajo o de energía se realiza en el compresor. Los motores que mantienen funcionando a éste último generalmente son eléctricos, por lo que es necesario mantenerlos conectados a la instalación eléctrica en todo momento.

Utilizando paneles fotovoltaicos, la energía solar es aprovechada al convertirla en electricidad, misma que puede utilizarse para alimentar no sólo un refrigerador sino también diversos aparatos eléctricos presentes en el hogar.

Otro modo de aprovechar la energía solar, es implementar un motor térmico en lugar del motor eléctrico utilizado convencionalmente para operar el compresor del refrigerador. La fuente de calor necesaria para el funcionamiento de este motor puede obtenerse usando un colector solar.

Aunque podamos implementar la energía solar en estos sistemas, siguen teniendo la desventaja de usar refrigerantes dañinos para el ambiente.

B. Sistemas por absorción de vapor

Los sistemas por absorción de vapor operan suministrando calor al sistema (en particular en el generador), se puede

usar un colector solar para concentrar la radiación en el generador. Sin embargo, escoger qué tipo de colector utilizar se vuelve un poco complicado, ya que las temperaturas necesarias para que el generador funcione pueden llegar a ser muy altas dependiendo del par refrigerante-absorbente que se tenga, cosa que no cualquier colector solar puede lograr; además, las condiciones climáticas y la orientación limitan la capacidad del colector.

Para los sistemas por absorción de vapor existen dos tipos: de ciclo intermitente y de ciclo continuo.

Los sistemas por absorción más comunes trabajan con amoníaco o agua como refrigerantes, por lo que no son dañinos para el ambiente.

B.1 Ciclo intermitente

En un refrigerador de ciclo intermitente la absorción y la generación no se realizan al mismo tiempo, ocurren de forma alternada. Se puede dividir este ciclo en dos partes: la de generación y la de absorción.

En la etapa de generación se tiene, inicialmente, una mezcla rica en refrigerante dentro del generador, al que se le suministra calor (haciendo uso de un colector solar) lo que produce la separación del refrigerante del absorbente. Una vez separado, el refrigerante se hace pasar por el condensador, a la salida de éste se tiene el refrigerante en estado líquido (de preferencia subenfriado) y se almacena en un tanque, este proceso continúa hasta separar todo el refrigerante disponible (o la cantidad necesaria para lograr el efecto refrigerante deseado). En este caso, una solución débil en refrigerante permanece en el generador. A toda esta fase corresponde la zona de alta presión.

La segunda parte del ciclo comienza a partir de la válvula de expansión, que permite la salida del refrigerante al evaporador (aquí comienza la zona de baja presión). El evaporador está conectado al generador, que ahora hace la función del absorbente, debido a que contiene una solución débil en refrigerante. La evaporación se sigue llevando a cabo enfriando la cámara refrigerante, mientras que en el absorbente la solución aumenta su calidad (cantidad de refrigerante en la mezcla). El proceso se lleva a cabo hasta evaporar todo el refrigerante y finalmente se regresa a la condición inicial, donde en el absorbente/generador se tiene una solución fuerte en refrigerante.

Una desventaja de este tipo de sistema, es que el efecto refrigerante no es siempre el mismo. En el refrigerador de ciclo intermitente, la concentración de refrigerante en el absorbente aumenta conforme se va absorbiendo en el líquido, por lo que después de un tiempo la capacidad de “succión” del absorbente disminuye y con esto el efecto refrigerante (COP o eficiencia). Además, al tener que transportar todo el refrigerante del generador al tanque contenedor y viceversa hace que los sistemas por absorción de ciclo intermitente tengan grandes dimensiones, haciéndolos poco prácticos si no se cuenta con el espacio adecuado.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes en Bogotá, Colombia se desarrolló un sistema de refrigeración solar de ciclo intermitente a base de amoníaco y agua, usando un colector plano [13]. En México,

investigadores del Centro de Investigación en Energía de la UNAM en Temixco, Morelos (CIE), del Instituto de Tecnología de Tijuana, Baja California y de la Universidad Autónoma de Campeche han trabajado en el diseño, construcción y análisis de las propiedades termodinámicas de un refrigerador solar de ciclo intermitente a base de amoníaco y agua [14, 15]. En el CIE, se modeló un sistema de refrigeración solar de ciclo intermitente a base de amoníaco y nitrato de litio, usando un concentrador parabólico compuesto [6].

En la Facultad de Ciencias, UNAM, se está trabajando en la construcción de un refrigerador solar de ciclo intermitente a base de amoníaco y agua, la Figura 4 muestra el montaje final del mismo (algunos cálculos termodinámicos sobre la mezcla amoníaco-agua para este refrigerador se pueden consultar en [16]).

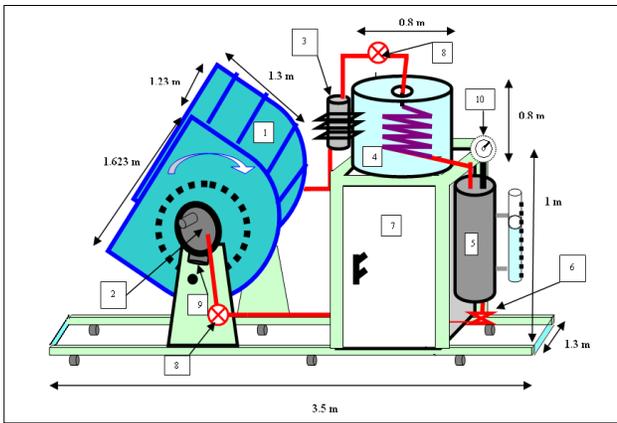


FIGURA 4. Sistema compuesto por: 1) Colector solar; 2) Absorbedor/generador; 3) Separador; 4) Condensador espiral en tanque de agua; 5) Tanque de amoníaco condensado con mirilla de nivel; 6) Válvula de expansión; 7) Evaporador; 8) Válvulas antirretorno; 9) Salida para purga; 10) Manómetros [16].

B.2 Ciclo continuo

En la sección II.B, se describe un sistema por absorción de vapor de ciclo continuo que funciona introduciendo calor al sistema en el generador; sin embargo, es necesaria una bomba para pasar la mezcla refrigerante-absorbente del absorbedor al generador, misma que debe alimentarse con energía eléctrica.

Aunque la bomba es pequeña, requiere consideraciones especiales si queremos que el sistema sea alimentado exclusivamente con energía solar. Otro modo de implementar un sistema por absorción de vapor de ciclo continuo, sin necesidad de una bomba, es utilizando hidrógeno, amoníaco y agua².

En la Figura 5 se muestra un esquema de un sistema por absorción de vapor sin bomba. En estos sistemas, la presión total es la misma en todo momento, las zonas de baja y alta presión se refieren a la presión parcial del amoníaco. En este caso el ciclo comienza con una solución fuerte en amoníaco

en el generador, al suministrar calor se genera vapor de amoníaco que asciende por medio de una bomba de burbujas llevando consigo una solución débil en amoníaco, posteriormente se separa el agua, que se dirige nuevamente al absorbedor, y el amoníaco, que se dirige al condensador donde se obtiene amoníaco líquido (en esta zona la presión parcial de amoníaco es igual a la presión total del sistema). Cuando el amoníaco pasa al evaporador disminuye su presión parcial, debido a la presencia del hidrógeno, comenzando la evaporación y con esto se logra el efecto refrigerante. La mezcla de hidrógeno y amoníaco se encuentra a baja temperatura, por lo que desciende hacia el absorbedor, donde sólo el amoníaco es absorbido por el agua (el hidrógeno no se mezcla con el agua), como la absorción es exotérmica el hidrógeno se calienta regresando al evaporador. El flujo dentro del sistema se mantiene por efectos de flotación y gravedad [4].

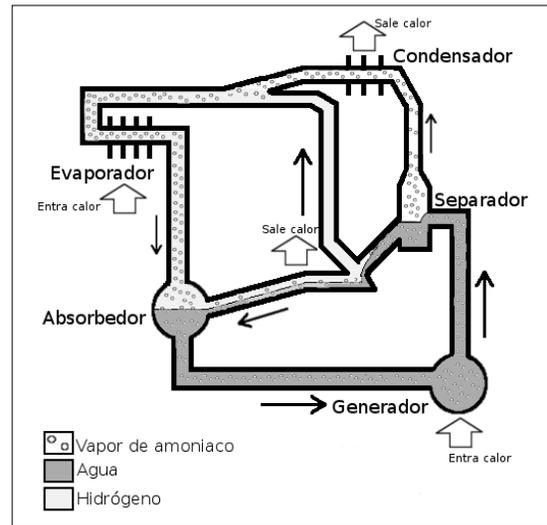


FIGURA 8. Sistema de refrigeración por absorción de vapor de ciclo continuo.

VI. CONCLUSIONES

El estudio de los sistemas reales de refrigeración permite poner diversos temas de termodinámica, dinámica de fluidos, química e impacto ambiental, en un contexto diferente al generalmente visto, ya que se toman conceptos aparentemente aislados y se muestra que pueden servir para un fin común, en este caso la refrigeración.

Vimos que para mantener funcionando un refrigerador es necesario invertir energía en el sistema ya sea en forma mecánica para los sistemas por compresión de vapor o en forma de calor para los sistemas por absorción de vapor.

Además, al estudiar las sustancias involucradas en la refrigeración y sus propiedades físicas y químicas vemos que es importante considerar los daños que podemos provocar al ambiente por el uso de esta tecnología; lo que nos lleva a buscar alternativas para modificar los sistemas convencionales de forma tal que puedan operar utilizando energía solar y refrigerantes no dañinos para el ambiente.

² Aunque los sistemas a base de amoníaco, agua e hidrógeno, desarrollados por Planten y Munters, son los más comunes, también se han desarrollado sistemas sin bomba para el par agua-bromuro de litio [4].

El presente trabajo muestra que para el estudio de la refrigeración convencional y solar se requiere un conocimiento multidisciplinario, que enriquece la formación académica del alumno.

A futuro, se pretende profundizar en los temas que involucran dinámica de fluidos (las caídas de presión debidas a la viscosidad y el flujo debido a las diferencias de presión) y en la química involucrada en el proceso de absorción (incluso a nivel molecular).

REFERENCIAS

- [1] Instituto Hindú de Tecnología de Kharagpur, Departamento de Ingeniería Mecánica, *Refrigeration and Air Conditioning. Lesson 1: History of Refrigeration*. Descargado de <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/New_index1.html>. Fecha de visita: 18-Marzo-2009.
- [2] Dossat, R. J., *Principles of refrigeration*, (PrenticeHall, Inc. 3ª Edición. Estados Unidos de América, 1991).
- [3] Instituto Hindú de Tecnología de Kharagpur, Departamento de Ingeniería Mecánica, *Refrigeration and Air Conditioning. Lesson 14: Vapour Absorption Refrigeration Systems*. Descargado de <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/New_index1.html>. Fecha de visita: 18-Marzo-2009.
- [4] Instituto Hindú de Tecnología de Kharagpur, Departamento de Ingeniería Mecánica, *Refrigeration and Air Conditioning. Lesson 17: Vapour Absorption Refrigerations Systems Based on Ammonia-Water Pair*. Descargado de <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/New_index1.html>. Fecha de visita: 5-Mayo-2009.
- [5] Chang, R., *Química*, (McGraw Hill Interamericana. 7ª Edición, México, D.F., 2002).
- [6] Rivera, C. O. y Rivera, W., *Modeling of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with ammonia-lithium nitrate mixture*, *Solar energy materials and solar cells* **76**, 417-427 (2003).
- [7] The National Academies, *La pérdida de ozono: sustancias químicas responsables*:

<http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscove ry/env_00754505.html>.

Fecha de visita: 16-Junio-2009.

[8] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Secretaría de Ozono.

<<http://ozone.unep.org/spanish/>>.

Fecha de visita: 1-Junio-2009.

[9] Rodríguez, E., *Los refrigerantes en las instalaciones frigoríficas*, (International Thomson Editores Spain Parainfo, S. A. 1ª Edición. España, 2005).

[10] Lamúa, M. y Cuesta, F., *El amoniaco como refrigerante*, (AMV Ediciones. 1ª Edición, Madrid, 2000).

[11] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

<http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php>.

Fecha de visita: 1-Junio-2009.

[12] Instituto Hindú de Tecnología de Kharagpur, Departamento de Ingeniería Mecánica, *Refrigeration and Air Conditioning. Lesson 26: Refrigerants*. Descargado de <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/New_index1.html>.

Fecha de visita: 18-Marzo-2009.

[13] Beltrán, R. G., *Refrigerador Solar- Ciclo de Absorción Intermitente*, Ponencia presentada en el Seminario Internacional sobre aire acondicionado y refrigeración solar, 2002).

[14] Arias, H. D., Soto, W., Castillo, O y Best-Brown, R., *Thermodynamic design of a solar refrigerator to preserve sea products*. Descargado de www.cientificosaficionados.com/energia%20solar/termodinamica.pdf.

Fecha de visita: 14-Mayo-2009.

[15] Chan, J., Best-Brown, R, García, O. y Sánchez, R., *Evaluación experimental de un evaporador compacto para amoniaco para un sistema de refrigeración solar*. Descargado de

www.riraas.net/documentacion/CD_02/JorgeChan.pdf.

Fecha de visita: 28-Abril-2009.

[16] Alvarez, C., Hernández, S., y Ruíz, G., *Construcción de un refrigerador solar*. Descargado de

<http://refrigeracion.files.wordpress.com/2010/01/seminarios-tlahuizcalpan1.ppt>.

Fecha de visita: 28-Enero-2010.