UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Sistemas de Refrigeración Convencional y Solar

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C A

P R E S E N T A :

JIMENA CASTRO GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS:
M. EN C. CARLOS ÁLVAREZ MACÍAS
2012

Dedicatoria

A mi papá y a mi mamá, Angelitos y Chevito, por guiarme, aconsejarme y darme las herramientas para seguir mi camino. Esta tesis es suya porque sin el amor, cariño y apoyo que me han dado toda la vida este trabajo no se hubiera podido realizar, ustedes son mi más grande admiración e inspiración. A mis maniuninis, Nere y Aris, no imagino mi vida sin ustedes, no podría pedir mejores hermanos que me cuidaran y ayudaran como lo hacen cada día. Gracias por preguntarme y pedirme que les explicara cosas inspirándome a estudiar más. Los quiero con todo el corazón.

A mi amiga Ivonne, por todos estos años de increíble amistad, te adoro hermanita postiza. A César, porque hoy creo que más que bogar a ti vamos remando juntos. Al resto del “sindicato”: Lalo, por ser parte del trípode; a Nilis, por las pláticas de chicas tan necesarias entre tantos hombres; a Hibra, por ir adelantándonos el camino; y a Carlitos, por las fechas límite. Pero sobre todo porque en ustedes más que amigos encontré otra familia.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias, por formarme dentro y fuera del aula y por permitirme ser parte de esta maravillosa institución.

A todos mis profesores, que a lo largo de la carrera compartieron conmigo sus conocimientos y me ayudaron a superarme académicamente. También a mis compañeros y amigos, por compartir las alegrías, contratiempos y desvelos durante toda esta experiencia.

Al grupo de trabajo del Taller de Fluidos de la Facultad de Ciencias, por darme la oportunidad de formar parte de su proyecto y poder realizar este trabajo de tesis con ustedes.

Índice

Resumen 2

Introducción 4

Objetivo General 6

Objetivos Particulares 6

Capítulo 1. Procesos y ciclos termodinámicos 7

1.1 Ciclo Refrigerante de Carnot, CRC 7

1.2 Ciclo Saturado Simple, CSS 10

Capítulo 2. Sistemas de refrigeración 18

2.1 Sistemas Refrigerantes por Compresión de Vapor, SRCV 18

2.2 Sistemas Refrigerantes por Absorción de Vapor, SRAV 21

2.2.1 Ciclo continuo e intermitente 25

2.3 Comparación entre los SRCV y los SRAV 27

Capítulo 3. Fluidos involucrados en la refrigeración 29

3.1 Refrigerantes 29

3.1.1 Naturales 33

3.1.2 Derivados halogenados 34

3.2 Absorbentes 36

3.3 Impacto ambiental 39

Capítulo 4. Refrigeración solar 42

4.1 Aprovechamiento de la energía solar 42

4.2 Energía solar en la refrigeración 44

4.3 Sistema Refrigerante por Absorción de Vapor de Ciclo Intermitente Solar, SRAVCIS 44

Capítulo 5. Conclusiones 51

Bibliografía 52

Resumen

La refrigeración es un proceso que se ha vuelto común en nuestra vida diaria y ha ido evolucionando a lo largo de los años, tanto en la fabricación de los dispositivos que la hacen posible, como en los diversos fluidos que son utilizados como refrigerantes. Cualquier refrigerador o sistema de refrigeración, visto como sistema termodinámico, requiere de una inversión de energía (o trabajo) para su funcionamiento y en la mayoría de los casos esta energía es suministrada por medio de la electricidad. Sin embargo, actualmente es necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sean renovables, accesibles, igual de eficientes o mejores que las ya existentes y además que no dañen el ambiente.

La presente tesis hace una revisión de los conocimientos básicos del funcionamiento de los dos principales sistemas de refrigeración: el de compresión y el de absorción; así mismo explica el ciclo termodinámico que se lleva a cabo y la estructura que los hace diferentes en base a su funcionamiento y los componentes que lo hacen posible. También se analizan los fluidos de trabajo involucrados en los diferentes sistemas, así como el impacto ambiental que implican. Posteriormente, se presenta la refrigeración solar como una alternativa a los sistemas convencionales de refrigeración, haciendo referencia a un refrigerador solar que se construye en la Facultad de Ciencias en la UNAM.

En el Capítulo 1, se dan a conocer los fundamentos teóricos de la refrigeración, partiendo del Ciclo de Carnot, mismo que al trabajar en forma inversa funciona como un refrigerador. Posteriormente se estudia el Ciclo Saturado Simple como una primera aproximación a los ciclos reales de refrigeración.

En el Capítulo 2 se presentan los sistemas de refrigeración por compresión y por absorción de vapor, analizando la función que cumple cada uno de sus componentes. Finalmente, se hace una comparación entre ambos sistemas.

En el Capítulo 3 se estudian los principales fluidos de trabajo involucrados en la refrigeración: los refrigerantes y los absorbentes. El capítulo muestra las propiedades que idealmente debieran poseer dichos fluidos y el impacto ambiental

que se involucra con su uso, en particular, de su contribución a la destrucción de la capa de ozono y al calentamiento global.

En el Capítulo 4 se hace referencia al aprovechamiento de la energía solar utilizando colectores solares como fuente de energía en un sistema de refrigeración, en particular para un sistema de refrigeración solar de ciclo intermitente que funciona mediante absorción de amoniaco por agua, el cual se construye en el Taller de Fluidos del Edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias, UNAM, como parte del Macroproyecto “La Ciudad Universitaria y la Energía”.

Finalmente, en el Capítulo 5 se plantean las conclusiones a las que se llegó con este trabajo de tesis y los posibles trabajos a futuro.

Introducción

Se define 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, ya que la temperatura final del café será menor que la de los alrededores. Un refrigerador puede ser visto como un sistema que mediante sus componentes, y suministrando trabajo, es capaz de llevar a los fluidos de trabajo a través de diferentes procesos termodinámicos que logran cerrar un ciclo, todo esto con el propósito de poder extraer continuamente calor de cierto espacio haciendo posible la refrigeración. A los fluidos encargados del transporte de calor se les llama refrigerantes. Dicho lo anterior, en este trabajo se referirá indistintamente al refrigerador como sistema de refrigeración o viceversa.

Los sistemas de enfriamiento surgen primeramente a partir de la necesidad del ser humano para preservar sus alimentos por más tiempo, posteriormente por la necesidad de habitar en un espacio más agradable situado en lugares demasiado calientes. En tiempos antiguos se utilizaba hielo natural para dichos fines, mismo que se transportaba de zonas frías a zonas calientes o era guardado en bodegas (con paredes recubiertas de madera o corcho como aislantes térmicos) durante el invierno para su posterior uso en el verano. En 1803 se inventó la “caja de hielo”, considerado como el primer refrigerador doméstico, el cual funcionaba poniendo hielo en un lugar elevado de modo que por convección se pudieran refrigerar alimentos u objetos colocados debajo, este sistema fue usado por más de un siglo aún cuando tuvo el problema de poder refrigerar las cosas hasta que el hielo se agotara. Aunado a esto, la gran cantidad de recursos y tiempo utilizados para el transporte de hielo, así como la necesidad de grandes espacios para su

almacenamiento presentaban un gran problema por lo que paulatinamente surge la necesidad de producirlo.

De hecho en 1755, William Cullen produjo un poco de hielo en su laboratorio poniendo agua en contacto con un recipiente con éter, utilizó una bomba de vacío para disminuir la presión y la temperatura del éter hasta congelar el agua. Sin embargo, este proceso no es cíclico, pues cuando el éter se evapora por completo la producción de hielo termina. Es así como se comenzó a pensar en la necesidad de un sistema de refrigeración que no se agotara.

En 1805, Oliver Evans diseñó un mecanismo que, haciendo uso de un compresor (operado por un motor), permite refrigeración continua, pero fue hasta 1835 cuando se construyó y patentó por Jacob Perkins. Por otro lado en 1810, John Leslie utilizó agua y ácido sulfúrico para demostrar el principio básico de un sistema de refrigeración por absorción de vapor. A diferencia del refrigerador de Evans, que requiere energía mecánica para trabajar, el de Leslie funciona administrando calor como fuente de energía y usa una pequeña bomba para hacer circular a los fluidos. Pero los sistemas de refrigeración desarrollados hasta entonces no eran lo suficientemente pequeños, baratos y funcionales como para implementarlos para uso doméstico. Fue hasta 1911 que *General Electric* fabricó el primer refrigerador por compresión de tipo doméstico y en 1931 la compañía *Electrolux* construyó el primer refrigerador por absorción, también de tipo doméstico basado en el diseño de Platen y Munters, dos estudiantes de ingeniería cuyo sistema por absorción de vapor no hacía uso de bomba (2).

De este modo los sistemas más utilizados a nivel industrial, comercial y doméstico son, el sistema por compresión y el sistema por absorción de vapor, Básicamente, la principal diferencia entre ambos es la forma en que se suministra la energía para mantener circulando al refrigerante y lograr el ciclo termodinámico, siendo mecánica en el primero y calorífica en el segundo.

Objetivo General

A partir de las bases termodinámicas que dan origen a un sistema de refrigeración, se explica cada uno de los dos principales sistemas de refrigeración (por compresión y por absorción de vapor), así como los dos tipos de ciclos (continuo e intermitente), señalando las diferencias en los componentes y en los fluidos involucrados, de tal manera que sea posible entender un sistema de refrigeración solar por absorción de ciclo intermitente, como el que se construye en el Taller de Fluidos del Edificio Tlahuizcalpan en la Facultad de Ciencias.

Objetivos Particulares

- Explicar los ciclos termodinámicos que se llevan a cabo dentro de un sistema de refrigeración.
- Explicar y dar a conocer las principales diferencias entre los dos sistemas de refrigeración: por compresión y por absorción; en cuanto a funcionamiento y componentes.
- Dar a conocer los fluidos utilizados en los diferentes sistemas de refrigeración, mostrando sus propiedades y su impacto ambiental.
- Explicar el funcionamiento y componentes del sistema de refrigeración solar por absorción de amoniaco de ciclo intermitente, basándose en el que se está construyendo en la Facultad de Ciencias.

Capítulo 1. Procesos y ciclos termodinámicos

Para entender el funcionamiento de un sistema de refrigeración es importante saber que un refrigerador debe mantener al refrigerante circulando a través de su propio sistema, haciéndolo pasar por diferentes procesos termodinámicos tales como la evaporación, compresión, condensación y expansión, los cuales unidos forman lo que se conoce como un ciclo termodinámico.

En un sistema de refrigeración real el refrigerante realiza un ciclo termodinámico irreversible cuyo modelo más sencillo es el Ciclo Saturado Simple o Ciclo Rankine de Refrigeración. El presente capítulo tiene por objetivo explicar detalladamente este ciclo y para ello es necesario iniciar con la explicación del Ciclo Refrigerante de Carnot, el cual es el caso ideal para un sistema de refrigeración.

1.1 Ciclo Refrigerante de Carnot, CRC

Para explicar el Ciclo de Carnot es necesario el apoyo de la Figura 1, la cual muestra un diagrama de una máquina de calor que para funcionar hace uso del ciclo de Carnot. En el ciclo de Carnot, el fluido que lleva a cabo el ciclo tiene las condiciones para tomar calor, Q_1, de un reservorio a temperatura T_1 y entregar calor, Q_2, a otro reservorio a menor temperatura, T_2, además de entregar cierta cantidad de trabajo, W, a los alrededores, el cual puede ser usado como energía.

Dado que el Ciclo de Carnot es ideal, entonces es un ciclo reversible, de modo que todos los procesos involucrados son también reversibles. Como cada proceso puede verse como una sucesión de estados en equilibrio termodinámico, entonces la presión, volumen y temperatura del fluido que realiza el ciclo están determinados en todo momento (3).

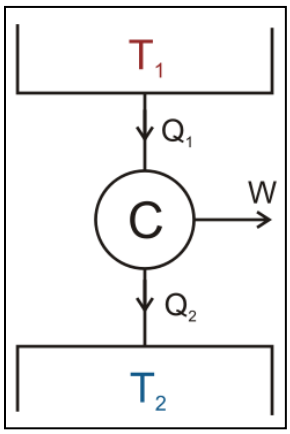

Figura 1 Máquina de Carnot, un fluido lleva a cabo un ciclo de Carnot, C, entre dos reservorios a diferentes temperaturas.

Ahora bien, como el ciclo de Carnot es reversible puede llevarse a cabo en dirección contraria a la mostrada en la Figura 1 (es decir, invirtiendo la dirección de todas las flechas) (3). En este caso el fluido toma calor, Q_2, del reservorio a temperatura T_2 y entrega calor, Q_1, al reservorio a mayor temperatura, T_1, para lo cual el entorno debe realizar trabajo, W, sobre el fluido. Al ciclo llevado a cabo de esta manera se le conoce como Ciclo Rerigerante de Carnot (**CRC**), ya que la extracción continua de calor, Q_2, del reservorio a T_2 es lo que mantiene la refrigeración, siempre y cuando el reservorio sea finito y su temperatura sea menor que la de los alrededores.

Dado que gráficamente un ciclo de Carnot puede representarse en un diagrama de Presión-Volumen (o diagrama P-V), en la Figura 2 se muestra un **CRC**, en donde las curvas del diagrama representan los diferentes procesos termodinámicos a los que el refrigerante es sometido: dos procesos isotermos (a temperatura constante) y dos adiabáticos (sin transferencia de calor) y que juntos componen al ciclo completo. Los puntos que unen las líneas son estados termodinámicos de presión, temperatura y volumen fijos.

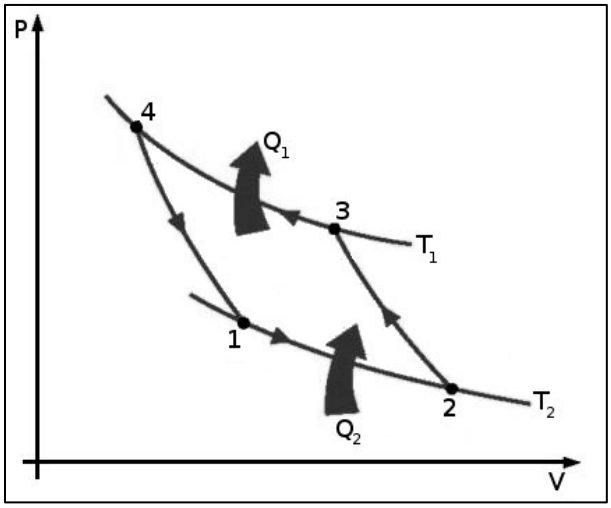

Figura 2 Ciclo Refrigerante de Carnot en un diagrama P-V. T_1 representa una isoterma de temperatura alta y T_2 una isoterma de temperatura baja. Q_1 y Q_2, el intercambio de calor entre el medio y el sistema en la isoterma correspondiente.

El análisis de la Figura 2 comienza cuando el refrigerante se encuentra en el punto 1, a una cierta temperatura T_2, a partir de este punto el refrigerante sufre una expansión a lo largo de una isoterma hasta llegar al punto 2, proceso durante el cual se extrae cierta cantidad de calor Q_2 de un reservorio. Para pasar del punto 2 al 3, estado de mayor temperatura T_1, el refrigerante sufre una compresión adiabática, es decir, disminuye su volumen sin intercambiar calor con el exterior, de modo que aumenta su presión. Posteriormente, el refrigerante sufre otra compresión, ahora a través de una isoterma de temperatura T_1, durante este proceso se cede una cantidad de calor Q_1 a un segundo reservorio hasta llegar al punto 4. Por último y para cerrar el ciclo, el refrigerante se expande adiabáticamente hasta llegar al punto 1, para poder así comenzar de nuevo. La cantidad de trabajo invertido durante el ciclo se puede calcular como el área encerrada por los dos procesos adiabáticos (curvas que van de 2 a 3 y de 4 a 1) y los dos isotérmicos (curvas que van de 1 a 2 y de 3 a 4) de la Figura 2.

1.2 Ciclo Saturado Simple, CSS

Como se mencionó anteriormente el ciclo de Carnot es ideal y por lo tanto reversible, sin embargo, lograr esta clase de procesos en la vida real resulta prácticamente imposible, ya que para que el fluido de trabajo pase sólo por puntos de equilibrio termodinámico se tendría que variar su presión, temperatura y volumen en pasos muy pequeños (infinitesimales) y en cada paso esperar un cierto tiempo para que el fluido pueda alcanzar el equilibrio. Es por eso que cuando se quieren estudiar sistemas reales, deben utilizarse ciclos irreversibles.

En un refrigerador real el refrigerante es llevado a través de un ciclo irreversible en condiciones de saturación. El estado de saturación es donde coexisten el líquido y el vapor del refrigerante y cualquier mínima adición de calor al líquido implica un cambio de fase a vapor, así mismo cualquier mínima extracción de calor del vapor implica un cambio de fase a líquido (1) (4). Por lo tanto, el Ciclo Saturado Simple (**CSS**) es utilizado para estudiar los sistemas de refrigeración debido a que es un ciclo termodinámico irreversible que se lleva a cabo en la región de saturación y que además opera sólo entre dos reservorios de temperatura. Hay que destacar que, a diferencia del **CRC** que es el mismo para cualquier fluido de trabajo, el **CSS** varía dependiendo de las propiedades del refrigerante utilizado aún cuando se opere entre las mismas temperaturas.

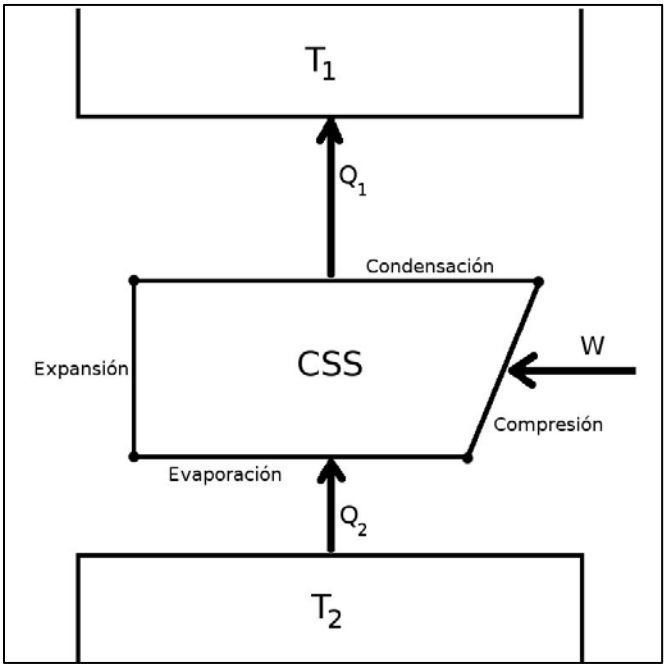

Figura 3 Refrigerador irreversible, un fluido lleva a cabo un Ciclo Saturado Simple, CSS, entre dos reservorios a diferentes temperaturas.

La Figura 3 muestra el esquema de una máquina de refrigeración irreversible equivalente a la máquina de Carnot (Figura 1) con la que de forma similar a lo que ocurre con un **CRC** se extrae calor, Q_2, de un reservorio a temperatura T_2 y entrega calor, Q_1, a un reservorio a temperatura T_1, realizando trabajo, W, sobre el fluido.

1.2.1 Diagrama presión-entalpía, P-H, del CSS

Usualmente el **CSS** se estudia en un diagrama de Presión-Entalpía (o diagrama P-H) del refrigerante en cuestión, como el de la Figura 4. Esto es debido a que es más fácil identificar tanto las zonas de coexistencia de fases como los cálculos de las transferencias de energía, como se verá más adelante.

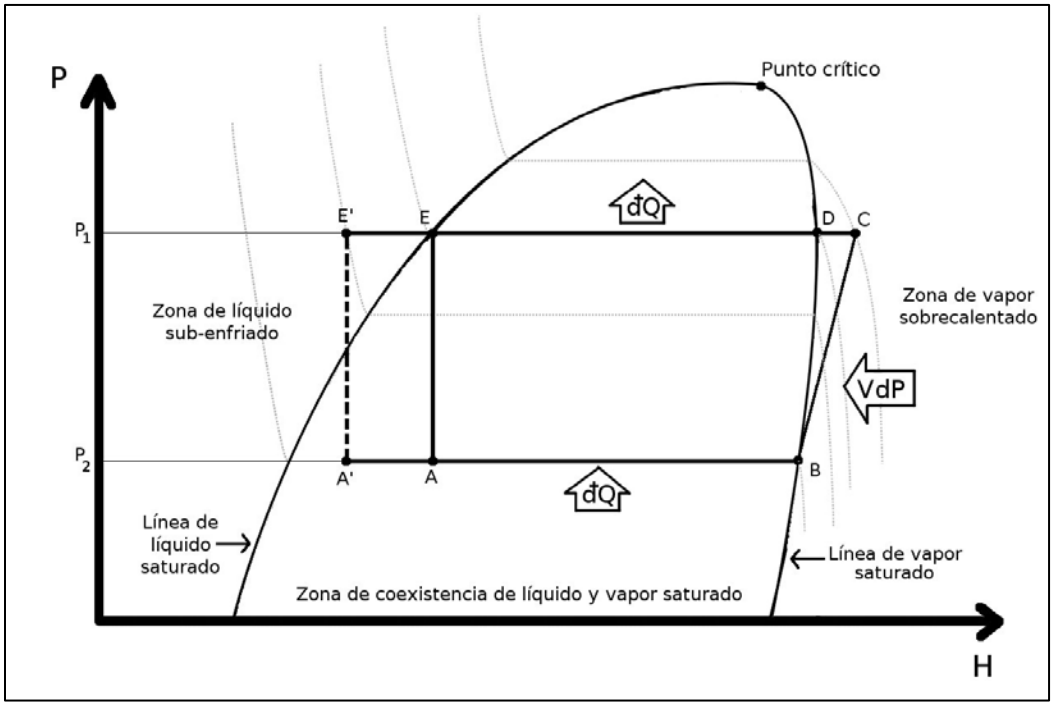

Figura 4 Ciclo Saturado Simple en un diagrama P-H. Se muestran las zonas de líquido sub-enfriado y vapor sobrecalentado, también la región de coexistencia delimitada por las líneas de saturación. Las líneas punteadas en gris representan líneas de temperatura constante, nótese que dentro de la región de coexistencia las líneas de presión constante también son líneas de temperatura constante. El punto crítico representa el fin de la zona de coexistencia, por encima de éste no es posible el cambio de fase pues ya no hay distinción entre el líquido y el vapor.

Para poder explicar el diagrama P-H del **CSS** es necesario saber que la entalpía, H, de un fluido para un estado de equilibrio termodinámico está dada por:

$$H = U + PV \qquad [1]$$

Donde U es la energía interna, P la presión y V el volumen del fluido en cuestión. Entonces un cambio de entalpía en el diagrama P-H se puede escribir como:

$$dH = dU + PdV + VdP \qquad [2]$$

Ahora bien, el **CSS** es un ciclo irreversible, esto se debe a que el proceso de expansión (E-A de la Figura 4) es un proceso irreversible. Sin embargo, los demás procesos, es decir, la evaporación, la compresión y la condensación pueden considerarse procesos reversibles. Es en estos procesos donde puede utilizarse la primera Ley de la Termodinámica para un proceso reversible:

$$dU = \cancel{d}Q - PdV$$

Siendo ~~d~~Q un intercambio de calor entre el fluido y el reservorio, entonces la ecuación 2 puede escribirse como:

$$dH = \cancel{d}Q + VdP \qquad [3]$$

De modo que la ecuación 3 sólo es válida para los procesos reversibles involucrados en el **CSS** y a partir de esta ecuación se pueden calcular las transferencias de energía ocurridas durante el ciclo.

Es importante señalar que comúnmente los diagramas P-H presentan los valores en términos de la entalpía específica, h, es decir, la entalpía por unidad de masa. Esto se debe a que para obtener los valores de entalpía, H, de un fluido es necesario conocer su volumen que, al ser una propiedad extensiva, depende de la cantidad de fluido con que se trabaje. En cambio, al hablar de entalpía específica no hay dependencia de la cantidad de fluido en los diagramas P-H, lo que permite realizar un análisis de nuestro sistema refrigerante sin importar con cuánto refrigerante se trabaje.

A continuación se explican por separado cada uno de los procesos termodinámicos que componen el **CSS** en el diagrama P-H.

I) Evaporación

De la Figura 4 el ciclo comienza cuando el refrigerante se encuentra en el punto A o A', es decir en la zona de coexistencia de líquido y vapor saturado. Es en este proceso cuando el sistema realiza la refrigeración y ocurre cuando el refrigerante pasa del punto A al punto B (o del A’ al B). Aquí es donde el refrigerante líquido se evapora por completo y esto provocaría que su temperatura disminuyera, sin embargo, como el refrigerante está en contacto termodinámico con un reservorio la temperatura del refrigerante se mantendrá constante ya que toma calor de dicho reservorio, que en condiciones no ideales éste debiera cambiar su temperatura.

Cabe señalar que la diferencia entre los puntos A y A’ radica en el porcentaje de líquido o vapor presentes en el fluido, es decir, cuando la entalpía es mayor ha ocurrido un cambio de fase donde la mayor parte del líquido se transformó en vapor. Cuando este proceso termina, el refrigerante se encuentra en estado de vapor saturado (B), de modo que para poder mantener la refrigeración, y con esto el ciclo, es necesario llevarlo con otros procesos nuevamente al estado de líquido saturado.

Ahora bien, la cantidad de calor que se extrae del reservorio es llamada “efecto refrigerante”, y puede calcularse usando la ecuación 3. Si se toma en cuenta que la transición de fase de líquido a vapor se lleva a cabo a presión constante, la ecuación 3 puede reducirse a:

$$dH = đQ$$

Que integrándola entre los límites del proceso resulta:

$$H_B - H_A = \int_A^B đQ \qquad [4]$$

Entonces de la ecuación 4 se puede ver que el efecto refrigerante, es decir, la transferencia de calor del reservorio al refrigerante (ver Figura 4), puede calcularse sólo conociendo la diferencia de entalpía entre el estado inicial A (o A’) y el estado final B, con lo cual se hace notorio el hecho de que el efecto refrigerante para el proceso A’-B es mayor que para el proceso A-B.

II) Compresión

Este proceso inicia en el punto B donde el refrigerante en fase de vapor saturado se comprime aumentando su presión y su temperatura hasta llegar al punto C, y el vapor ahora se encuentra sobrecalentado, es decir, a una temperatura mayor que la temperatura de saturación (1). Durante este proceso hay un incremento en la energía interna debido al incremento de presión, a este incremento se le conoce como “calor de compresión”. El calor de compresión se utiliza para estimar la

cantidad de trabajo necesario para lograr la compresión (ver Figura 3) y para poder calcularlo, la compresión se aproxima a un proceso reversible y adiabático (3)**,** en donde no hay transferencia de calor, $đQ = 0$, entonces la ecuación 3 se reduce a:

$$dH = VdP$$

Por lo que el calor de compresión queda definido como el producto VdP (Figura 4), que al integrar entre los límites de este proceso se obtiene:

$$H_C - H_B = \int_B^C VdP \qquad [5]$$

La ecuación 5 permite conocer la magnitud del calor de compresión calculando la diferencia de entalpía entre el punto B y el punto C, sólo utilizando el diagrama P-H (Figura 4) del fluido correspondiente.

III) Saturación y Condensación

Una vez que el refrigerante se encuentra como vapor sobrecalentado en el punto C, es necesario llevarlo hasta el punto E, para lo cual se requiere llevar a cabo dos procesos: saturación y condensación. En el primer proceso el refrigerante debe ceder calor a un reservorio como se indica en la Figura 3, hasta llegar al estado de saturación en el punto D. El segundo proceso comienza a partir del punto D, donde se lleva a cabo la condensación del refrigerante que finaliza hasta el punto E. Durante la condensación el refrigerante cede calor al reservorio cambiando su estado de vapor a líquido saturado (punto E). Si se quisiera obtener líquido sub-enfriado, es decir, a una temperatura menor a la temperatura de saturación (1), sería necesario seguir extrayendo más calor hasta llegar al punto E', fuera de la zona de coexistencia de líquido y vapor saturado. Cabe señalar que dependiendo de donde finaliza este proceso, líquido saturado o sub-enfriado, se obtendrá diferente porcentaje de líquido (o vapor) saturado para comenzar la evaporación (Figura 4).

Es importante observar de la Figura 4 que ambos procesos, considerados como uno solo (desde el punto C y hasta el punto E'), son similares al proceso de evaporación, en el sentido de que ambos se llevan a cabo a presión constante. Entonces al implementar la ecuación 3 es posible reducirla a una expresión similar a la ecuación 4. De este modo el calor cedido al reservorio correspondiente está dado por la diferencia de entalpías entre los puntos final E (o E') e inicial C.

$$H_E - H_C = \int_C^E đQ \qquad [6]$$

IV) Expansión adiabática

El último proceso del **CSS**, que permite cerrar el ciclo, comienza cuando se tiene al refrigerante en el punto E (o E'), es decir en forma líquido saturado (o sub-enfriado) y termina en el punto A (o A') dentro de la zona de coexistencia de liquido y vapor saturado. En concreto, en este proceso donde la presión se ve disminuida abruptamente, la entalpía se mantiene constante. Esto se observa en la Figura 4, en donde el estado inicial y final tienen la misma entalpía (3). El cambio en la presión provoca que parte del refrigerante se evapore; si la expansión es adiabática, entonces la energía necesaria para la evaporación se toma de la propia energía interna del líquido disminuyendo con esto también su temperatura.

Debido a que en el **CSS** el cambio del punto E al punto A (o del punto E' al punto A') es abrupto el refrigerante no está en equilibrio termodinámico durante la expansión y esto la convierte en un proceso irreversible, ya que en realidad el líquido no pasa por los puntos intermedios que conforman la línea de E a A (o de E' a A') de la Figura 4 aunque sí puede aproximarse a ella. Este proceso de expansión adiabática también es llamado "de estrangulamiento" y ocurre cuando se restringe el paso de un flujo por una pared porosa o un orificio pequeño (que puede ser una válvula casi cerrada).

El sub-enfriamiento del líquido refrigerante juega un papel importante si se quiere aumentar el efecto refrigerante, esto es debido a que, como se mencionó

anteriormente, la cantidad de refrigerante disponible para la evaporación es mayor en el punto A’ que en el punto A.

Una vez que se conocen los procesos involucrados en el **CSS** el siguiente paso es comprender cómo funciona un sistema refrigerante real que realiza este tipo de ciclo y cuáles son los componentes que permiten llevar a cabo cada uno de estos procesos.

Capítulo 2. Sistemas de refrigeración

Ahora que se conoce al **CSS**, así como los procesos termodinámicos involucrados en el mismo, es necesario conocer el sistema que le da las condiciones idóneas al refrigerante para llevar a cabo su ciclo. Un sistema de refrigeración es el mecanismo encargado de llevar al refrigerante a través de un ciclo termodinámico con el cual se lleva a cabo la refrigeración. Apoyándose en lo visto sobre el **CSS**, el presente capítulo explica los dos principales sistemas de refrigeración y muestra sus diferencias, así como los métodos para llevar a cabo los diferentes procesos.

Tanto a nivel industrial como comercial y doméstico los dos sistemas de refrigeración más utilizados son, el sistema por compresión de vapor y el sistema por absorción de vapor. Ambos sistemas son similares en cuanto a los mecanismos que llevan a cabo los procesos de condensación, evaporación, así como la expansión. Sin embargo, los sistemas difieren en el modo en que se mantiene baja la presión en el evaporador, además del cómo es suministrada la energía al sistema, siendo mecánica para los sistemas por compresión y calorífica en los sistemas por absorción.

2.1 Sistemas Refrigerantes por Compresión de Vapor, SRCV

Los Sistemas Refrigerantes por Compresión de Vapor (**SRCV**) pueden verse divididos en dos zonas; una de alta y una de baja presión. Estas zonas están determinadas por la presión de condensación y evaporación del **CSS** de la Figura 4. En la Figura 5 se muestra el esquema de un **SRCV**, de la cual la Figura 5a señala sus principales componentes. Cabe señalar que los componentes de cualquier sistema refrigerante, incluidos los **SRCV**, deben estar unidos por medio de tubería para poder trasladar al refrigerante entre ellos y así lograr los diferentes procesos. La Figura 5b muestra el mismo esquema pero ahora dividido con líneas punteadas separando las zonas de alta y baja presión.

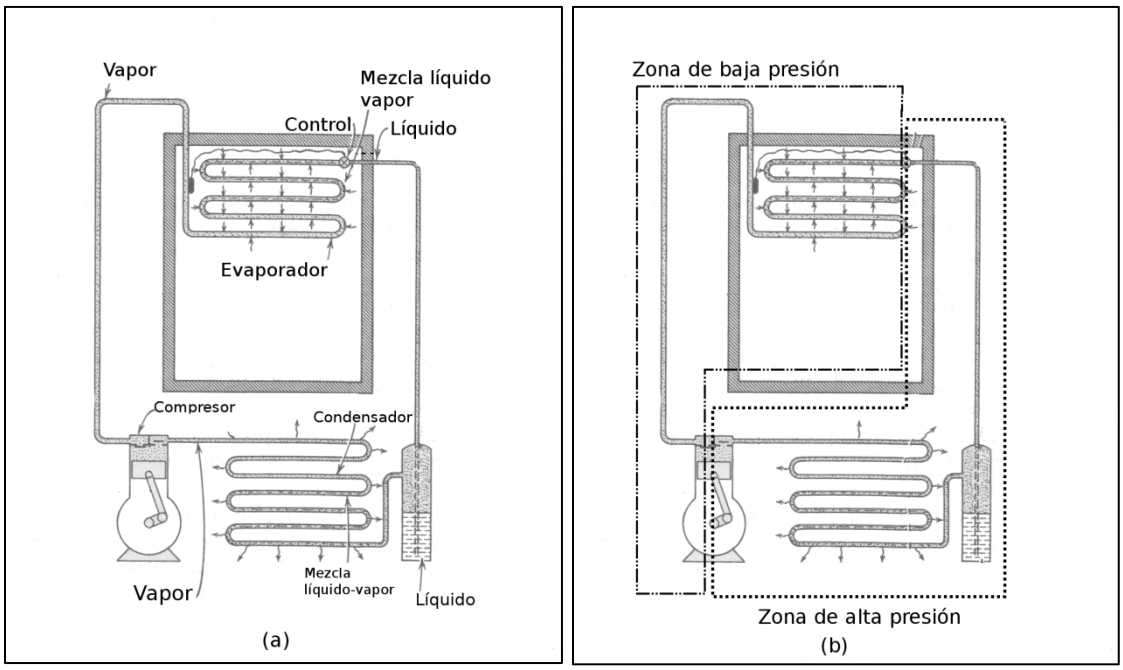

Figura 5 Esquema de un Sistema Refrigerante por Compresión de Vapor (1): (a) Mostrando las partes que lo componen y (b) Dividiendo las zonas de alta y baja presión.

La evaporación del refrigerante, como primer proceso del **CSS** (proceso A-B o A'-B de la Figura 4) llevado a cabo por el **SRCV**, comienza en la zona de baja presión y temperatura. Este proceso se lleva a cabo dentro de un depósito de refrigerante llamado evaporador, el cual está en contacto térmico con el reservorio de baja temperatura (T_2 en la Figura 3), que para un sistema refrigerante corresponde al espacio que se quiere refrigerar o a una cámara refrigerante, la cual debe ser hermética y adiabática. De este modo, mientras el refrigerante cambia de fase, de líquido a vapor saturado, está tomando calor de la cámara refrigerante a través del evaporador, haciendo que la temperatura dentro logre estar más baja que la de los alrededores, realizando así la refrigeración de la cámara. La forma del evaporador puede variar de acuerdo al diseño del refrigerador. Sin embargo, el tubo en forma de serpentín (como el de la Figura 5a) adherido a las paredes de la cámara es la forma más usada por tener una máxima área de contacto con el entorno dentro de la misma, lo que permite una mayor transferencia de calor sin ocupar mucho espacio.

Para mantener constante la presión dentro del sistema, y con esto también la temperatura, se utiliza un compresor (que generalmente es impulsado por un motor eléctrico), el cual debe succionar el vapor saturado de refrigerante proveniente del evaporador, con esto se evita que el refrigerante se vaya acumulando dentro del evaporador. Ahora bien, dependiendo de la forma y tipo de evaporador que tenga el sistema es posible obtener vapor sobrecalentado en lugar del vapor saturado requerido para el ciclo. En estos casos es necesario, mediante un buen diseño, evitar este vapor sobrecalentado a la salida del evaporador ya que esto provocaría que no se llevara a cabo el **CSS** de forma óptima (Figura 4).

La compresión, como siguiente proceso del **CSS** (proceso B-C de la Figura 4) llevado a cabo por el **SRCV**, es donde se realiza la transición de la zona de baja a la de alta presión. Para realizar este proceso, el compresor debe llevar al refrigerante del estado de vapor saturado a vapor sobrecalentado, comprimiendo el vapor succionado del evaporador. Es precisamente a la salida del compresor donde comienza la zona de alta presión señalada en la Figura 5b. De esta manera el compresor es el dispositivo que se encarga de generar la diferencia de presiones que permite el flujo del refrigerante dentro del sistema.

La saturación y la condensación, como siguiente proceso del **CSS** (proceso C-D-E, o C-D-E’ si existe sub-enfriamiento, de la Figura 4), se encuentra en la zona de alta presión y temperatura. Este proceso se lleva a cabo dentro de un depósito de refrigerante llamado condensador, el cual está en contacto térmico con el reservorio de alta temperatura (T_1 en la Figura 3), que para un sistema refrigerante corresponde a un depósito de agua o aire en enfriamiento forzado (por ejemplo con un ventilador para disipar el calor), que es llamado medio condensante. En este caso para realizar el cambio de fase de vapor a líquido saturado es necesario primero llevar al vapor sobrecalentado al estado de saturación para posteriormente condensarlo. Así, durante su paso por el condensador, el refrigerante va cediendo calor al medio condensante, para que a la salida de éste se tenga refrigerante líquido saturado (o sub-enfriado). El condensador es un dispositivo que regularmente es a base de tubo en forma de espiral dentro de un

contenedor con un líquido con alto calor específico (que puede ser agua) o en forma de serpentín con aletas colocado frente a un ventilador. Generalmente se utiliza un contenedor a la salida del condensador para acumular el refrigerante en fase líquida y con esto poderse dar una idea de la cantidad de refrigerante involucrado en la refrigeración.

El proceso que finaliza el **CSS** es la expansión adiabática (proceso E-A, o E'-A' si existe sub-enfriamiento, de la Figura 4), que al igual que la compresión es también una transición entre ambas zonas de presión y temperatura de la Figura 5b. El dispositivo utilizado en la frontera entre ambas zonas es la válvula de expansión, la cual por estrangulamiento hace que la presión disminuya, y con esto también la temperatura, expandiendo al refrigerante a la salida de ésta. En algunos sistemas se utilizan tubos capilares como válvula de expansión fija. Éstos se conectan directamente entre el tanque contenedor y el evaporador, de modo que cuando el refrigerante pasa del tubo capilar al tubo de mayor diámetro disminuyendo su presión de la de condensación a la presión de evaporación.

2.2 Sistemas Refrigerantes por Absorción de Vapor, SRAV

En los Sistemas Refrigerantes por Absorción de Vapor (**SRAV**), al igual que en los **SRCV**, el sistema también puede verse dividido en dos zonas, una de alta y otra de baja presión. Es importante recordar que la principal diferencia entre ambos sistemas radica en la forma en que se mantiene baja la presión en el evaporador, en esta clase de sistemas no se cuenta con un compresor que lleve a cabo el proceso correspondiente del **CSS**, en cambio, se sustituye dicho componente con otros que llevan a cabo dos procesos diferentes que se abordarán más adelante.

En la Figura 6, se muestra el esquema de un **SRAV**, dividido en sus dos zonas y en la propia figura se señalan los principales componentes.

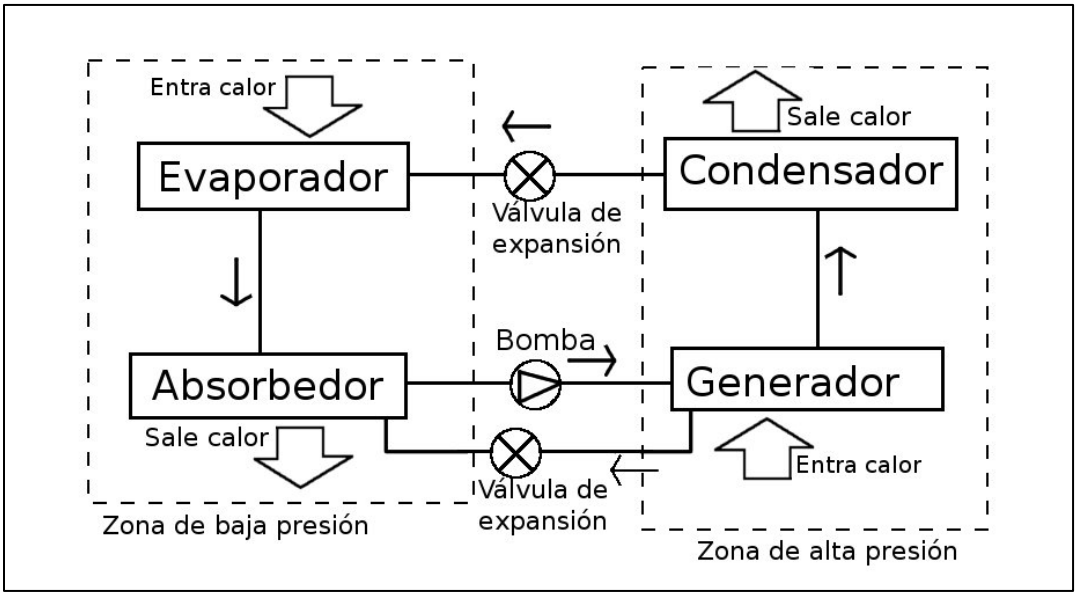

Figura 6 Esquema de un sistema por absorción de vapor. Se muestran las zonas de alta y baja presión.

La evaporación, como primer proceso del **CSS** (proceso A-B, o A'-B, de la Figura 4), comienza en la zona de baja presión mostrada en la Figura 6. Del mismo modo que un **SRCV**, el **SRAV** también cuenta con un evaporador en donde el refrigerante entra en forma de líquido saturado y sale como vapor saturado, tomando calor de la cámara refrigerante para realizar el cambio de fase.

Para llevar a cabo el proceso de saturación y condensación del **CSS** (proceso C-D-E, o C-D-E', de la Figura 4) el **SRAV** también cuenta con un condensador en contacto térmico con el medio condensante. De esta manera, al ceder calor al medio condensante se lleva al refrigerante del estado de vapor sobrecalentado al de saturación y posteriormente se condensa hasta obtener líquido saturado (o sub-enfriado) a la salida del condensador.

En el proceso de expansión adiabática (proceso E-A, o E'-A', de la Figura 4), al igual que en el caso del **SRCV**, hay una válvula de expansión entre el condensador y el evaporador (Figura 6), de modo que se pueda dar el cambio de la zona de alta a la de baja presión, mediante el efecto de estrangulamiento.

Como se mencionó, la compresión como el último de los procesos para cerrar el **CSS** (proceso B-C de la Figura 4) no se lleva a cabo en un **SRCV**, en su lugar se realizan dos procesos, uno de absorción y uno de separación. Lo cual lleva a la necesidad de utilizar más componentes en lugar de sólo el compresor y requiere, además del fluido refrigerante, uno absorbente para su funcionamiento. La Figura 7 muestra la diferencia entre ambos sistemas basada en el cambio del compresor, componente del **SRCV**, por el generador y el absorbedor, componentes usados en el **SRAV**.

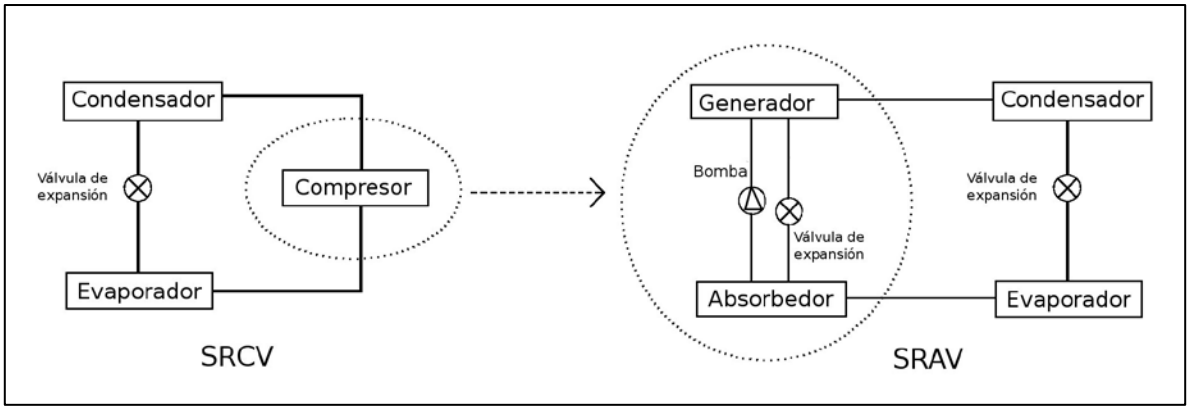

Figura 7 Esquema de un SRAV (derecha) en el cual el absorbedor y el generador sustituyen al compresor del SRCV (izquierda).

En un **SRAV** inicialmente se lleva a cabo la absorción del refrigerante que evita que éste se acumule dentro del evaporador, esto genera una mezcla homogénea dentro del absorbedor. Posteriormente se debe llevar a cabo la separación del refrigerante y el absorbente con el propósito de reutilizar el primero extrayéndolo del generador para iniciar un nuevo ciclo.

Para poder hacer referencia a la proporción del refrigerante o el absorbente en la mezcla se recurre al factor de calidad (x). El factor de calidad de una mezcla compuesta por dos fluidos A y B, respecto a uno de ellos (por ejemplo el fluido A) está dada por:

$$x_A = \frac{M_A}{M_A + M_B} \quad [7]$$

Donde M_A y M_B son las masas de los fluidos A y B, respectivamente. Es fácil ver que la ecuación 7 se refiere a la fracción de masa del fluido A con respecto a la masa total de la mezcla, por lo que del mismo modo se puede definir también la calidad de la mezcla respecto al fluido B. Sin embargo, para los propósitos del presente trabajo, cuando se hable de la calidad de la mezcla se referirá a la calidad respecto al refrigerante en la mezcla refrigerante-absorbente.

El absorbedor es un recipiente que debe contener una mezcla de muy baja calidad y se encuentra en la zona de baja presión y temperatura de la Figura 6, enseguida del evaporador. Como la presión de vapor de la mezcla es menor que la del refrigerante, éste puede fluir del evaporador hacia el absorbedor, provocando un efecto de succión (1) (5), proceso que se explicará en el siguiente capítulo. La absorción provoca que se vaya aumentando la calidad de la mezcla dentro del absorbedor con lo que aumenta su presión de vapor, disminuyendo su capacidad de succión. Además, al ir aumentando la calidad de la mezcla se tiene como consecuencia una reducción del efecto refrigerante, ya que la cantidad de calor extraído de la cámara refrigerante es cada vez menor. Hay que mencionar también que el proceso de absorción del refrigerante es un proceso exotérmico por lo que se requiere de una remoción de calor para poder mantener el proceso en forma continua.

El generador es un recipiente en donde se va acumulando la mezcla de alta calidad que se va extrayendo del absorbedor. Usualmente la separación del refrigerante de la mezcla se hace calentando el generador, típicamente mediante la transferencia del calor de combustión en una caldera, por lo que el refrigerante y el absorbente deben tener diferentes temperaturas de ebullición para lograr una separación eficiente. Con el suministro de calor a volumen fijo se aumenta la temperatura y con esto la presión de la mezcla, dando origen a la zona de alta presión de la Figura 6. Dado que el generador se encuentra a mayor presión que el absorbedor, pues el primero se encuentra en la zona de alta presión mientras

que el segundo está en la zona de baja presión, comúnmente es necesario el uso de una bomba para mantener el flujo de solución hacia el generador (Figura 6).

Una vez realizada la separación en el generador, a la salida se extrae refrigerante en forma de vapor sobrecalentado, dejando atrás al absorbente o a una mezcla de muy baja calidad. Como la separación del refrigerante y el absorbente hace que disminuya la calidad de la mezcla que permanece en el generador, entonces es necesario regresarla al absorbedor (para lo cual puede utilizarse una válvula de expansión). Por lo tanto, el aumento en la calidad de la mezcla que ocurre en el absorbedor se compensa con la disminución en la calidad que ocurre en el generador, ya que en todo momento la mezcla de baja calidad se lleva al absorbedor y la de alta calidad al generador, de modo que el sistema se retroalimenta manteniendo siempre constante el efecto refrigerante.

Idealmente se quisiera extraer únicamente vapor refrigerante del generador para dirigirlo hacia el condensador y seguir con el **CSS**, sin embargo, en la práctica, durante la separación puede ocurrir que algo del absorbente también se evapore junto con el refrigerante, más aún si el absorbente está en fase líquida. Para evitarlo se puede colocar un rectificador o columna de rectificación, con lo que se busca aumentar la calidad de la mezcla obtenida a la salida del generador, o incluso lograr que llegue refrigerante puro al condensador (6). Otra forma de lograr esto es con un separador, que es un recipiente intermedio entre el generador y el condensador cuyo propósito es alcanzar a condensar gran parte del absorbente evaporado y regresarlo en forma líquida al generador antes de que pase al condensador (6).

2.2.1 Ciclo continuo e intermitente

A diferencia de los **SRCV**, en los **SRAV** el ciclo que lleva a cabo el refrigerante puede ocurrir de dos formas: continua o intermitente, y la diferencia básicamente consiste en que un solo componente puede hacer la labor del generador y el absorbedor por lo cual se le llamará generador/absorbedor. Los sistemas descritos

en la sección anterior llevan a cabo el ciclo de forma continua lo que significa que la presencia del absorbedor y el generador, de manera separada, permite que la absorción y la separación del refrigerante ocurran simultáneamente. Esto ayuda a compensar en todo momento los cambios en la calidad de la mezcla entre ambos componentes, logrando así mantener constante y continua la refrigeración.

La Figura 8 muestra un esquema básico de un **SRAV** de ciclo intermitente el cual no requiere de una bomba que mantenga el flujo del absorbedor al generador como la del ciclo continuo (Figura 6). En este tipo de sistemas el refrigerante no se encuentra distribuido en los componentes, sino que pasa de uno a otro conforme se lleva a cabo cada proceso del ciclo de refrigeración.

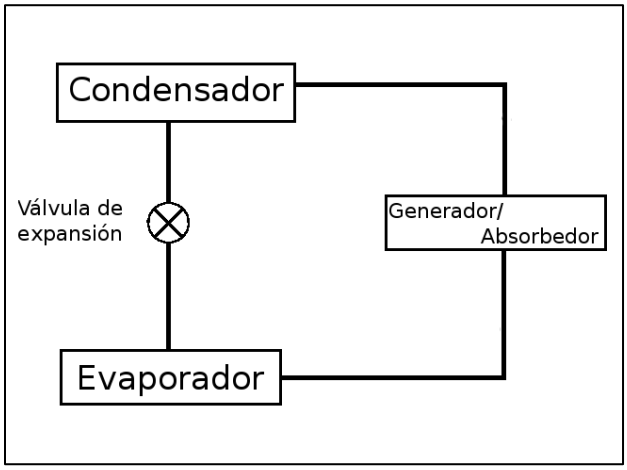

Figura 8 Esquema de un SRAV de ciclo intermitente, el cual cuenta con un componente que cumple con las funciones del generador y del absorbedor.

Inicialmente, cuando en el generador/absorbedor se tiene una mezcla de alta calidad éste funciona como generador. Al suministrar calor a la mezcla el refrigerante se separa dejando una mezcla de baja calidad en dicho generador. Simultáneamente, se lleva a cabo la condensación del refrigerante que una vez líquido se almacena en un tanque conectado al evaporador por medio de una válvula. Al abrirse dicha válvula se permite el paso del refrigerante al evaporador, durante la evaporación el refrigerante es absorbido por la mezcla de baja calidad que quedó en el generador/absorbedor cambiando con esto su función a la del

absorbedor. Al terminar la absorción del refrigerante, en el generador/absorbedor se queda una mezcla de alta calidad con la que se puede comenzar otra vez el ciclo.

Una desventaja de los sistemas de refrigeración de ciclo intermitente es que suelen ser de mayores dimensiones que los de ciclo continuo ya que en algún momento ciertos componentes deben tener la capacidad de almacenar todo el refrigerante, lo que los vuelve poco prácticos si no se cuenta con el espacio adecuado. Otra desventaja es que debido a que la refrigeración ocurre mientras el refrigerante se evapora hay que esperar a que se lleve a cabo el resto del ciclo para refrigerar nuevamente. Por otro lado, dado que la separación del refrigerante no se lleva a cabo al mismo tiempo que la absorción no se logran compensar los cambios en la calidad de la mezcla dentro del absorbedor, sin embargo, si las temperaturas de separación y absorción son las mismas en cada ciclo es posible tener siempre el mismo efecto refrigerante.

2.3 Comparación entre los SRCV y los SRAV

Una forma de hacer una comparación entre los diferentes sistemas de refrigeración es midiendo su eficiencia o rendimiento, para esto se define el Coeficiente de Rendimiento (*Coefficient of Performance*, **COP**) como la razón de la capacidad de enfriamiento que tiene el sistema, o el efecto refrigerante, entre la cantidad de energía que se debe invertir para lograrlo, esto es (1):

$$COP = \frac{Efecto\ refrigerante}{Energía\ invertida} \quad [8]$$

El **COP** de un sistema refrigerante cambia principalmente con sus temperaturas de evaporación y condensación. Con la temperatura de condensación fija, el **COP** aumenta con un incremento en la temperatura de evaporación, en cambio, con la temperatura de evaporación fija, el **COP** disminuye con el aumento de la temperatura de condensación (1). Existen otros factores que pueden afectar el

COP de un sistema refrigerante como las posibles caídas de presión dentro y las pérdidas o entradas de calor que pueden presentarse en cualquiera de los procesos involucrados.

Por otro lado, las propiedades físicas y químicas del fluido refrigerante utilizado también son un factor importante que puede afectar el **COP** del sistema, ya que a una temperatura y presión de trabajo fijas el **COP** que se logra puede variar de un refrigerante a otro.

La Tabla 1 muestra las principales características de los **SRCV** y los **SRAV**.

SRCV	SRAV
Sólo necesita refrigerante como único fluido de trabajo.	Requiere refrigerante y absorbente como fluidos de trabajo.
Operan administrando trabajo.	Operan administrando calor.
COP ≥ 3	**COP** ≤1.4
Se debe evitar líquido a la salida del evaporador, puede dañar el compresor.	No hay daños si no se logra evaporar todo el líquido.
El vapor sobrecalentado a la salida del evaporador disminuye el **COP** considerablemente.	El **COP** no se ve afectado por el vapor sobrecalentado.
El sistema requiere que el motor del compresor tenga mantenimiento constante.	El sistema requiere poco mantenimiento, dado que no tiene motor.
Económicos cuando hay electricidad a bajo costo disponible.	Económicos cuando hay calor residual disponible.

Tabla 1 Comparación entre las principales características de los SRCV y los SRAV (1) (7).

Capítulo 3. Fluidos involucrados en la refrigeración

Dado que el refrigerante es la sustancia encargada del transporte de calor dentro de un sistema refrigerante y que, para los sistemas por absorción de vapor además es necesaria una sustancia absorbente para mantener el flujo dentro del sistema, en este capítulo se describirán algunas de las propiedades que se buscan en estos fluidos de trabajo.

3.1 Refrigerantes

Al momento de escoger un refrigerante se debe buscar que éste se adecúe al tipo de sistema de refrigeración, es decir, buscar que sus propiedades físicas y químicas sean las óptimas para su buen uso, además se debe tener en cuenta su toxicidad, seguridad e impacto ambiental, así como buscar que en condiciones atmosféricas el refrigerante se encuentre en un estado cercano a la saturación, ya que de este modo es más fácil llevarlo a los estados termodinámicos del **CSS** con el uso de una menor energía.

A continuación se presentan algunas de las propiedades que se podrían buscar en un refrigerante para lograr mejores rendimientos (**COP** más alto) y con ello un ahorro económico.

- ***Presiones de trabajo:*** idealmente se requiere que las presiones de trabajo del refrigerante estén por encima de la atmosférica para evitar entradas de humedad al sistema e incluso facilitar la detección de fugas.
- ***Calor latente de vaporización a presión constante:*** para minimizar la cantidad de refrigerante dentro del sistema y con esto reducir costos, el calor latente de vaporización debe ser lo más alto posible, de este modo se logra extraer más calor de la cámara refrigerante por unidad de masa, lo que permite usar menos fluido y aun así lograr el efecto refrigerante deseado.
- ***Calor específico en fase líquida a presión constante:*** para facilitar el sub-enfriamiento del refrigerante, a la salida del condensador, es conveniente que

su calor específico en fase líquida a presión constante sea bajo, de este modo es posible extraerle menor cantidad de calor y aun así lograr el sub-enfriamiento requerido (llegar al estado E' de la Figura 4).

- ***Calor específico en fase gaseosa:*** Para evitar obtener vapor sobrecalentado a la salida del evaporador, el calor específico del refrigerante en fase gaseosa debe ser alto, de modo que requiera mayor cantidad de calor para elevar su temperatura. En este caso, el calor en exceso es absorbido por el propio refrigerante sin que éste pase a la fase de vapor sobrecalentado.
- ***Conductividad térmica:*** para lograr buenas transferencias de calor entre el refrigerante y la cámara refrigerante o el medio condensante, se busca que la conductividad térmica del refrigerante sea alta en ambas fases, líquido y vapor. Aunque la conductividad térmica de los materiales utilizados tanto en el evaporador como en el condensador afectan más dichas transferencias de calor.
- ***Viscosidad:*** En un sistema refrigerante la fuerza de fricción generada por la viscosidad del fluido puede provocar caídas de presión, afectando con esto su rendimiento. Esta es la razón por la cual se busca que la viscosidad del refrigerante sea lo más baja posible en ambas fases.
- ***Punto crítico:*** el punto crítico está determinado por la temperatura y presión mínimas a partir de las cuales ya no es posible la distinción entre líquido y vapor. En un sistema de refrigeración se busca que el punto crítico del fluido refrigerante sea lo más elevado posible para que siempre se pueda trabajar dentro de la zona de coexistencia de líquido y vapor.
- ***Temperatura de fusión:*** para evitar que el refrigerante se solidifique dentro del evaporador y pueda llegar a dañar el sistema, se busca que su temperatura de fusión sea lo más baja posible. Esta propiedad, junto con un punto crítico elevado, proporcionan un rango más amplio de temperaturas y presiones de trabajo.
- ***Estabilidad química:*** se busca que el refrigerante a utilizar sea estable químicamente para evitar reacciones indeseadas, ya que tanto los cambios de

fase como los de temperatura y de presión pueden provocar reacciones dentro del sistema, cuyo producto puede llegar a dañarlo.

Además de las propiedades mencionadas anteriormente, es importante considerar el nivel de toxicidad y seguridad del fluido refrigerante.

La toxicidad de una sustancia es el nivel de daño que puede llegar a provocar al ser humano, generalmente depende de su grado de concentración en el aire y del tiempo de exposición a la misma. Al momento de elegir un fluido para su uso como refrigerante se busca que no sea tóxico, especialmente si el sistema está colocado en un lugar concurrido, por ejemplo en casas o tiendas. Sin embargo, es posible utilizar ciertos refrigerantes poco tóxicos si el sistema se coloca en un lugar abierto, o amplio de modo que se reduce su concentración y por tanto sus efectos dañinos. Por otro lado, la seguridad de un refrigerante se relaciona principalmente con su explosividad, su inflamabilidad y la fácil detección de fugas, esta última se vuelve difícil para aquellos refrigerantes que son inodoros e incoloros.

Para regular el uso de los fluidos refrigerantes el Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI, por sus siglas en inglés) y la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) han establecido criterios de clasificación para los refrigerantes teniendo en cuenta su grado de toxicidad y de seguridad (8) (9), dicha clasificación se muestra en la Tabla 2.

	Baja toxicidad	Alta toxicidad
Altamente inflamable	A3	B3
Poco inflamable	A2	B2
No inflamable	A1	B1

Tabla 2 Clasificación de seguridad ANSI/ASHRAE (8). El nivel de toxicidad aumenta de A a B y el nivel de inflamabilidad va de 1 a 3.

En la actualidad existen muchos fluidos que se utilizan como refrigerantes, esta gran variedad surgió de la búsqueda de compuestos que cumplieran con las propiedades descritas anteriormente. Algunos refrigerantes son fluidos que se encuentran naturalmente (como el agua o el dióxido de carbono), aunque la gran mayoría son compuestos artificiales o mezclas de éstos.

Para poder hacer referencia a los distintos refrigerantes se creó una nomenclatura que permite distinguir numéricamente a los fluidos refrigerantes en base a su composición química (8). La Figura 9 muestra la estructura que se utiliza para designar dicha nomenclatura.

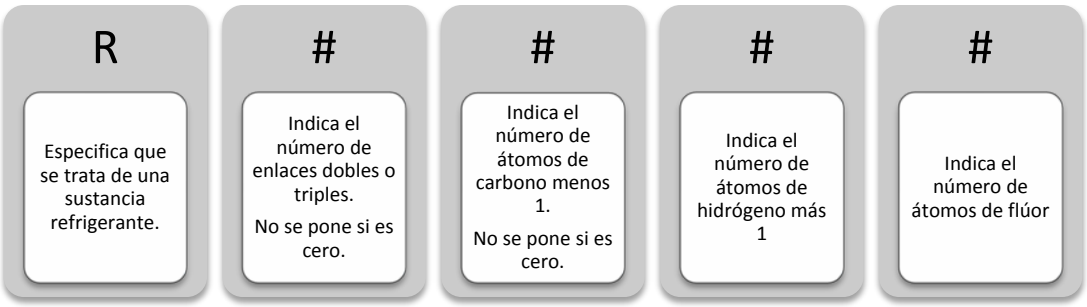

Figura 9 Nomenclatura para designar compuestos refrigerantes (8).

Cabe señalar que esta nomenclatura se generó pensando en los derivados halogenados los cuales son los refrigerantes más utilizados. Por ejemplo, utilizando la Figura 9 al tetrafluoruro de carbono (CF_4) le correspondería R0014, sin embargo se conoce sólo como R14. Esto es debido a que es un refrigerante que no contiene enlaces dobles o triples, contiene un átomo de carbono, no contiene átomos de hidrógeno y contiene cuatro átomos de flúor. En algunos casos, a esta nomenclatura se le agregan letras minúsculas para especificar que se trata de un mismo compuesto pero diferente simetría molecular, por ejemplo para el tetrafluoretano (CH_2FCF_3) existen R134, R134a, R134b, etc, en donde la principal diferencia entre ellos es la forma en la que se distribuyen sus átomos. Sin embargo, para otros fluidos también usados como refrigerantes no se utiliza la nomenclatura de la Figura 9, en el caso de los compuestos orgánicos que contengan más de cuatro átomos de carbono se designan con los números 600,

como es el caso del butano ($CH_3CH_2CH_2CH_3$) designado como R600. En cambio, los compuestos inorgánicos se denominan anteponiendo un 7 al peso molecular del fluido en cuestión, por ejemplo el amoniaco (NH_3) se denomina como R717 (8).

A continuación se muestran los diferentes refrigerantes utilizados típicamente, divididos en dos grandes grupos: naturales y derivados halogenados (10).

3.1.1 Naturales

Como su nombre lo dice, esta clase de fluidos refrigerantes son aquellas que pueden ser encontradas en la naturaleza y por supuesto que estos fluidos fueron usados como refrigerantes mucho antes de la existencia de los derivados halogenados. Sin embargo, el incremento en la producción de estos últimos provocó que los refrigerantes naturales se usaran cada vez menos, a pesar de ser más económicos. A continuación se describen de forma general algunas de las características de los refrigerantes naturales más utilizados, los cuales son el agua, los hidrocarburos, el dióxido de carbono y el amoniaco (10).

El agua (H_2O o R718) fue utilizada como primer refrigerante en forma de hielo y actualmente se utiliza en fase líquida en los **SRAV**, principalmente en sistemas de aire acondicionado ya que no requieren temperaturas menores a los 0°C que es cuando el agua comienza a solidificarse dejando de ser funcional. Debido a que el agua no es tóxica ni inflamable está clasificada por la ANSI/ASHRAE como un fluido de alta seguridad (ver Tabla 2, A1).

Los hidrocarburos más utilizados como refrigerantes son el metano (CH_4 o R50), etano (CH_3CH_3 o R170), propano ($CH_3CH_2CH_3$ o R290), butano ($CH_3CH_2CH_2CH_3$ o R600), isobutano ($CH(CH_3)_3$ o R600a) y etileno ($CH_2=CH_2$ o R1150). La mayor desventaja de estos refrigerantes naturales es que son altamente inflamables, explosivos y ligeramente tóxicos. Por esta razón la ANSI/ASHRAE los clasifica en el grupo de baja seguridad y se recomienda que los sistemas de refrigeración que

utilizan hidrocarburos deban cuidarse y atenderse por personal capacitado para tratar con los problemas que puedan suscitarse.

El dióxido de carbono (CO_2 o R744) es clasificado por la ANSI/ASHRAE como de alta seguridad (ver Tabla 2, A1) ya que no es tóxico ni inflamable. Este tipo de refrigerante natural suele utilizarse en gran medida en sistemas de aire acondicionado para lugares públicos donde la seguridad es muy importante. También es utilizado para aplicaciones en sistemas de bajas temperaturas ya que su temperatura de fusión es muy baja respecto a otros refrigerantes naturales.

Por su parte, el amoniaco (NH_3 o R717) es clasificado por la ANSI/ASHRAE como refrigerante de seguridad media (ver Tabla 2, B2) debido a que es tóxico e inflamable en ciertas concentraciones. Sin embargo, la detección de fugas en sistemas es más fácil que con otros refrigerantes ya que es un fluido de olor picante e irritante, por lo que suele utilizarse en sistemas donde la instalación permite minimizar los riesgos. Su elevado punto crítico y su baja temperatura de fusión permiten que se pueda implementar en un amplio rango de temperaturas.

3.1.2 Derivados halogenados

Los refrigerantes del grupo de los derivados halogenados se obtienen al tomar hidrocarburos, como el metano (CH_4), el etano (C_2H_6), etc., y sustituirle a la molécula algunos o todos los enlaces carbono-hidrógeno (C-H) por enlaces de carbono con átomos del grupo de los halógenos (principalmente flúor y/o cloro) por lo que se les conoce como compuestos parcial o totalmente halogenados, respectivamente (1).

Los refrigerantes del grupo de los derivados halogenados pueden subdividirse en grupos dependiendo su composición. Por ejemplo: los fluorocarbonos (FC) son totalmente halogenados ya que se sustituyeron en la molécula todos los enlaces C-H por enlaces C-F y los hidrofluorocarbonos (HFC) son parcialmente halogenados ya que tienen al menos un enlace C-H en su molécula. Lo mismo

sucede con los clorofluorocarbonos (CFC), en donde la molécula totalmente halogenada contiene enlaces tanto C-Cl como C-F y no contiene enlaces C-H, mientras que los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) son parcialmente halogenados ya que tienen al menos un enlace C-H en su molécula. En la Tabla 3 se muestran algunos de los refrigerantes del grupo de los derivados halogenados y su clasificación.

Clasificación	Tipo de molécula	Tipo de refrigerante
FC	Tetrafluoruro de carbono (CF_4) Octofluoropropano (C_3F_8)	R14 R218
HFC	Trifluormetano (CHF_3) Pentafluoretano (CHF_2CF_3)	R23 R125
CFC	Triclorofluormetano (CCl_3F) Clorotrifluormetano ($CClF_3$)	R11 R13
HCFC	Diclorofluormetano ($CHCl_2F$) Clorodifluormetano ($CHClF_2$)	R21 R22

Tabla 3 Ejemplos de refrigerantes del grupo de los derivados halogenados y su clasificación (1) (8).

Ya que la composición de los derivados halogenados puede ser muy variada, sus propiedades físicas y químicas cambian mucho de refrigerante a refrigerante por lo que la elección depende de su uso. Por ejemplo, la presencia de enlaces C-Cl en la molécula aumenta la temperatura de ebullición, los enlaces C-H incrementan la inflamabilidad y los enlaces C-F disminuyen la toxicidad (11). Cabe señalar, que también es posible utilizar como refrigerante una mezcla de este tipo de fluidos buscando optimizar su uso como un nuevo refrigerante explotando las propiedades de cada fluido que compone la mezcla (8) (12).

La mayoría de los derivados halogenados están clasificados en los grupos de alta seguridad por la ANSI/ASHRAE (ver Tabla 2). Una desventaja de esta clase de refrigerantes, en especial de los totalmente halogenados, es su largo tiempo de vida en la atmósfera (11) lo que ocasiona un impacto ambiental, contribuyendo en

gran medida a la destrucción de la capa de ozono y al calentamiento global, lo cual se discutirá con detalle más adelante.

3.2 Absorbentes

La absorción es un proceso mediante el cual un disolvente en fase sólida o líquida tiende a retener las moléculas de un soluto en fase líquida o gaseosa, dando como resultado una tercer sustancia formada por la mezcla de ambas. Para el caso de un **SRAV**, el soluto es el fluido refrigerante y regularmente se encuentra en fase gaseosa, mientras que el disolvente es el fluido absorbente y éste puede encontrarse en fase líquida o sólida. Además, como se menciona en la sección 2.2, el absorbente es el fluido encargado de mantener la diferencia de presiones dentro del sistema y con esto el flujo del refrigerante, lo cual se logra debido a que la mezcla refrigerante-absorbente tiene una presión de vapor menor que la del refrigerante puro.

La diferencia entre la presión de vapor del refrigerante y de la mezcla refrigerante-absorbente puede explicarse utilizando la ley de Raoult y la ley de Dalton para la mezcla de dos gases A y B (5) (13). La ley de Raoult establece que la presión de vapor ejercida por cada fluido en fase líquida (P_A y P_B) a temperatura constante está dada por:

$$P_A = X_A P_A^0 \qquad [9]$$

$$P_B = X_B P_B^0$$

Donde X_A y X_B, son las calidades molares de los fluidos A y B* en la mezcla y P_A^0 y P_B^0 son las presiones de saturación de las soluciones a esa temperatura.

Por otro lado, la ley de Dalton establece que la presión de vapor total en fase gaseosa está dada por la suma de las presiones de vapor ejercidas por cada gas:

* La calidad molar se define de forma similar a la calidad de la ecuación 7, con la diferencia de que para la calidad molar se utiliza el número de moles de cada sustancia y no su masa.

$$P_T = P_A + P_B \quad [10]$$

Si suponemos que el fluido B no es volátil, es decir, no se evapora, entonces haciendo uso de las ecuaciones 9 y 10 se tiene que:

$$P_T = P_A = X_A P_A^0 \quad [11]$$

Tomando en cuenta que la suma de ambas calidades molares es uno ($X_A+X_B=1$), la ecuación 11 puede reescribirse del siguiente modo:

$$\Delta P = P_A^0 - P_A = X_B P_A^0 \quad [12]$$

Ahora bien, si en un **SRAV** el fluido A es el refrigerante y el fluido B es el absorbente, entonces la ecuación 12 establece que la presión de vapor del refrigerante es mayor que la presión de vapor de la mezcla, lo que permite el flujo del refrigerante dentro del sistema (o el efecto de succión) y con esto el proceso de absorción.

Ahora bien, 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), calor de disolución negativo, ni endotérmico (tome calor del medio), calor de disolución positivo. Cuando el calor de disolución es negativo la presión de vapor es menor que la establecida por la ley de Raoult; en cambio, si es positivo la presión de vapor es mayor (5) (13). En un **SRAV** se busca que el calor de disolución sea negativo ya que con esto se incrementa la absorción del refrigerante por el absorbente (13).

Cabe señalar que para los **SRAV** al elegir el absorbente adecuado es necesario conocer las propiedades y el nivel de seguridad y toxicidad del refrigerante, o viceversa. La Tabla 4 muestra algunas combinaciones de refrigerantes con su absorbente, de los cuales los pares agua-bromuro de litio y amoniaco-agua son los más utilizados para estos sistemas (13) (14).

Refrigerante	Absorbente
Agua	Bromuro de Litio
	Nitrato de Litio
	Cloruro de Litio
	Cloruro de Calcio
Amoniaco	Agua
	Bromuro de Litio
	Nitrato de Litio
	Cloruro de Sodio
	Tiocianato de sodio
	Tiocianato de litio
	Cloruro de Bario
	Cloruro de Calcio con Sulfuro de Calcio (20%)
	Cloruro de Estroncio
Aminas	Tiocianato de Sodio
	Tiocianato de Litio
	Nitrato de Litio
	Cloruro de Calcio

Tabla 4 Combinaciones de refrigerante-absorbente (2) (13) (14) (15) (16)

Un factor importante a considerar al momento de elegir un par refrigerante-absorbente es la diferencia entre los puntos de ebullición de ambos fluidos, ya que se busca que la temperatura de ebullición del absorbente sea considerablemente más alta que la del refrigerante. Esto ayuda a evitar que el absorbente se evapore durante el proceso de separación en el generador, obteniendo a la salida refrigerante lo más puro posible.

También es importante considerar el nivel de seguridad de los absorbentes, por ejemplo el bromuro de litio, los cloruros, los nitratos y los tiocianatos son sales inorgánicas cuyo nivel de seguridad generalmente es alto, pues no suelen ser inflamables ni explosivas, aunque la mayoría son tóxicas sobre todo si llegan a ingerirse. Cabe señalar que el agua como absorbente es considerada de máxima seguridad ya que no es tóxica ni inflamable como se mencionó anteriormente.

3.3 Impacto ambiental

Debido al daño al medio ambiente que podrían ocasionar los fluidos involucrados en la refrigeración, no sólo basta con que sus propiedades físicas y químicas se adecuen al funcionamiento de los sistemas sino también hay que considerar los índices de impacto ambiental establecidos internacionalmente. Dado que la mayoría de los fluidos refrigerantes y absorbentes son producidos artificialmente suelen ser agentes de contaminación, ya que la naturaleza no es capaz de asimilarlas y reutilizarlas. El uso de estos fluidos tiene serias repercusiones ambientales, en lo que se refiere a contaminación atmosférica, de suelos y agua. Sin embargo, la mayor aportación al impacto ambiental radica en su potencial de destrucción de la capa de ozono y en su contribución al calentamiento global, mismas que se detallaran a continuación.

El ozono (O_3) es una molécula cuya formación y destrucción, con oxígeno atómico (O), oxígeno molecular (O_2) y otras sustancias, se da de forma natural en la estratósfera gracias a la radiación ultravioleta (UV) proveniente del Sol, haciendo que sólo una parte de esta radiación llegue a la Tierra, por lo cual la capa de ozono funciona como filtro de UV (17). Una disminución de la capa de ozono provoca que una mayor cantidad de rayos UV alcance la superficie de la Tierra aumentando los casos de quemaduras, cáncer de piel, daños en el sistema inmunológico y al ritmo de crecimiento de las plantas (18).

La destrucción del ozono puede acelerarse por la presencia de ciertas sustancias catalizadoras, por ejemplo los iones de cloro que se desprenden de los CFC y HCFC que logran llegar a la estratosfera provocan una disminución en la capa de ozono. Con base en lo anterior se definió el Potencial de Agotamiento de Ozono (*Ozone Depletion Potencial*, **ODP**) el cual es un índice que proporciona una magnitud de la cantidad de ozono que se destruye por la presencia de cierta sustancia en la atmósfera. Para este índice se tomó como referencia al R11 (triclorofluormetano) asignándole un **ODP** de 1 (10). Debido al incremento en la demanda de refrigeración aumentó la producción de CFC y HCFC, y con ello su presencia en la atmósfera. Para frenar la disminución de la capa de ozono se creó

en 1987 el Protocolo de Montreal en el que se establece una lista de los fluidos que mayormente contribuyen a su destrucción. Con este protocolo la producción de dichos fluidos queda prohibida o controlada y se establecen medidas para eliminar su uso de forma paulatina (18).

Por otra parte, el calentamiento global es generado por un incremento en el efecto invernadero de la Tierra. Debido a que la atmósfera terrestre es transparente a la mayoría de la radiación proveniente del sol, la cual puede llegar hasta la superficie de la Tierra donde parte de ésta se absorbe y posteriormente se emite en el infrarrojo (IR). Aunado a esto, existen algunos gases en la atmósfera, como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano, etc (llamados gases invernadero), que no son completamente transparentes al IR. Dado lo anterior, la radiación queda atrapada entre la superficie de la Tierra y la atmósfera, lo que se conoce como el efecto invernadero y es la razón por la cual la temperatura de la Tierra se mantiene en promedio. Sin embargo, el desarrollo industrial ha ocasionado el aumento de gases invernadero provocando un incremento en la temperatura promedio de la Tierra, lo que se conoce como calentamiento global. El calentamiento global causa cambios climáticos que pueden derivar en la extinción de especies animales, aumento del nivel del mar, entre otras cosas.

Para tener una medida de la aportación que tienen las sustancias al calentamiento global se definió el Potencial de Calentamiento Global (*Global Warming Potencial*, **GWP**) el cual es un índice que toma en cuenta la permanencia en la atmósfera de cierta sustancia durante un determinado periodo de tiempo (que puede ser de 20, 100 o 500 años) y el efecto invernadero que esto provoca. Este índice establece como referencia al CO_2, que es el principal gas invernadero debido a su abundancia, y se le asigna un **GWP** de 1 (10). Para controlar las emisiones de gases invernadero se creó en 1997 el Protocolo de Kyoto mediante el cual los países que lo firman se comprometen a establecer medidas para disminuir sus emisiones (19).

La Tabla 5 muestra los valores del **ODP** y el **GWP** de los principales fluidos utilizados en la refrigeración. La mayoría de estos fluidos son más utilizados como

refrigerantes, sin embargo, el bromuro de litio es utilizado como absorbente, mientras que el agua (R718) puede utilizarse como refrigerante o absorbente.

Fluido de trabajo	ODP	GWP
R11	1	4600
R22	0.055	1700
R134a	0	1300
R404 A	0	3260
R407 C	0	1520
R290	0	3
R507	0	3300
R744	0	1
R717	0	0
R718	0	0
Bromuro de Litio	0	0

Tabla 5 Índices ODP y GWP de los principales fluidos utilizados en la refrigeración (8) (10) (20) (21). El GWP es para un tiempo de 100 años.

Como puede verse en la Tabla 5, a pesar de que casi todos los fluidos tienen un **ODP** nulo o muy bajo, el **GWP** de los refrigerantes puede llegar a ser muy alto. Cabe destacar que los fluidos más utilizados en los **SRAV** que son el amoniaco, el agua y el bromuro de litio tienen un **ODP** y un **GWP** nulo, lo que es de gran importancia para elegirlos como refrigerantes y/o absorbentes.

Ahora bien, ya que se conoce el funcionamiento de los sistemas de refrigeración y cuáles son las repercusiones al ambiente que tienen los fluidos de trabajo involucrados, es posible plantear una alternativa a la refrigeración convencional, que puede ser la refrigeración solar, misma que se aborda en el siguiente capítulo.

Capítulo 4. Refrigeración solar

Como se vio en el capítulo 2, para mantener funcionando un refrigerador es necesario invertir energía en el sistema, dicha energía puede ser suministrada en forma mecánica, en el caso de los **SRCV**, o en forma de calor, para los **SRAV**. Dado que los principales problemas con el uso de los refrigerantes más comunes radica en sus altos índices **ODP** y **GWP** (ver Tabla 5), se pueden buscar alternativas para modificar los sistemas de refrigeración convencionales de tal forma que puedan operar con refrigerantes no dañinos para el ambiente o que puedan aprovechar la energía solar, o ambas. En este trabajo de tesis se propone a la refrigeración solar como una alternativa que aprovecha una energía renovable y utiliza fluidos de bajo impacto ambiental. En particular, la propuesta se apoya del diseño de un sistema de refrigeración de ciclo intermitente solar a base de amoniaco y agua que se construye en la Facultad de Ciencias, UNAM.

4.1 Aprovechamiento de la energía solar

El aprovechamiento de la energía del Sol forma parte de las llamadas energías renovables, mismo que se separa en dos grandes ramas que son la fotovoltaica y la térmica. Las celdas fotovoltaicas transforman la energía solar en energía eléctrica mientras que los colectores transforman la energía solar en energía térmica y en comparación con las celdas fotovoltaicas, tienen un bajo costo de producción y facilidad de montaje. Sin embargo, esta sección sólo abordará las propiedades de los colectores solares.

Esencialmente un colector solar se encarga de transferir la energía del Sol a una región, calentado metales o fluidos, usualmente aire o agua. Existen dos principales tipos de colectores solares, colectores planos y de concentración. Los colectores planos aprovechan la radiación directa y difusa, no requieren sistemas de seguimiento del Sol y debido a que no tienen partes en movimiento su mantenimiento es mínimo. Este tipo de colector no logra alcanzar temperaturas muy altas debido a que tienen muchas pérdidas de calor por conducción,

convección y radiación, además de las ocasionadas por la reflexión de su cubierta. Este tipo de colectores generalmente son usados para construir calentadores de agua domésticos, aires acondicionados o para calentar habitaciones (22) (23).

Los colectores de concentración, como su nombre lo dice, concentran la radiación solar en un punto o región mediante dispositivos ópticos como espejos o lentes. La geometría de estos colectores permite reducir pérdidas por radiación y por conducción, por lo que pueden llegar a alcanzar temperaturas más altas que las alcanzadas por los colectores planos (22) (23).

Un parámetro que ayuda a determinar la máxima temperatura alcanzada por un colector solar de concentración es el factor de concentración, o simplemente la concentración, la cual se define como:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \qquad [13]$$

Donde A_a es el área transversal expuesta a la radiación solar, llamada área de apertura y A_r es el área donde se concentra la radiación solar, llamada área del receptor, de modo que con un factor de concentración grande se alcanzan temperaturas más altas (22).

Los colectores de concentración pueden clasificarse en dos grupos, de enfoque y de no enfoque. Los colectores de enfoque aprovechan las propiedades focales de espejos o lentes para redirigir la radiación solar hacia un punto o región determinada, como es el caso de los espejos parabólicos (ya sea cilíndricos o de revolución) o las lentes de Fresnel. Estos colectores cuentan con un factor de concentración grande por lo que pueden alcanzar altas temperaturas, sin embargo, necesitan seguir constantemente al Sol aprovechando sólo la radiación directa. Por su parte, los colectores de no enfoque utilizan un conjunto de espejos dispuestos de forma tal que pueden concentrar en una misma región la radiación que incide desde distintos ángulos, cuyo límite es llamado ángulo de aceptación o ventana de admisión (22). Con esto se evita la necesidad de orientar los colectores de forma continua ya que se aprovecha la radiación tanto directa como

difusa. Sin embargo, estos colectores tienen un bajo factor de concentración, por lo que no logran alcanzar temperaturas tan altas como los colectores de enfoque.

4.2 Energía solar en la refrigeración

Para utilizar la energía solar en la refrigeración hay diferentes factores a considerar. Por ejemplo, debido a que en los **SRCV** generalmente se utilizan motores eléctricos, una alternativa es utilizar un motor térmico cuya fuente de calor sea suministrada por un colector solar. Por su parte, debido a que los **SRAV** no utilizan motor pueden aprovechar de forma más directa la energía térmica obtenida de los colectores solares utilizándola para separar el refrigerante del absorbente. Otro factor es que, como se mencionó en la sección 2.2, un **SRAV** de ciclo continuo necesita una bomba para mantener el flujo dentro del sistema, la cual requiere de una fuente de energía exclusiva si el sistema es alimentado con energía solar. Sin embargo, los **SRAV** de ciclo intermitente no utilizan dicha bomba, por lo que en estos casos el colector solar sólo debe encargarse de mantener la temperatura adecuada para que funcione el sistema. También se debe considerar que a pesar de que los **SRAV** de ciclo continuo, así como los **SRCV**, podrían refrigerar durante todo el día, existe el problema de que durante las noches carecen de la energía solar que les permite funcionar. En cambio, los **SRAV** de ciclo intermitente también pueden operar durante las noches si a lo largo del día se lleva a cabo la parte del ciclo que utiliza la energía solar, es decir, durante la separación.

4.3 Sistema Refrigerante por Absorción de Vapor de Ciclo Intermitente Solar, SRAVCIS

Esta sección está dedicada a mostrar de manera general los avances en la construcción y montaje de un **SRAV** de Ciclo Intermitente Solar (**SRAVCIS**) a base

de amoniaco-agua, el cual se desarrolla en la Facultad de Ciencias de la UNAM como parte del Macroproyecto “La Ciudad Universitaria y la Energía”.

Para poder explicar la función de cada uno de los componentes que permiten llevar a cabo los procesos involucrados en el ciclo de refrigeración del **SRAVCIS** se hace referencia a la Figura 8 de la sección 2.2.1. Cabe señalar que en las siguientes figuras que muestran cada uno de los componentes se colocaron flechas indicando el sentido del flujo de los fluidos dentro del sistema.

Las condiciones iniciales para el diseño del **SRAVCIS** se muestran en la Tabla 6, las cantidades de amoniaco y agua dentro del sistema se calcularon suponiendo que dentro del generador se tiene inicialmente una mezcla líquida de calidad x_i^L=0.6, de la cual se separará en una mezcla líquida de calidad x_f^L=0.18 y una mezcla gaseosa de calidad x_f^V=0.71, que trae consigo los 7 kg de amoniaco que serán utilizados para lograr la refrigeración.

Cantidad de amoniaco dentro del sistema	7.466 Kg
Cantidad de agua dentro del sistema	4.978 Kg
Etapa de separación	4 hrs, durante el día
Etapa de absorción	8 hrs, durante la noche
Zona de baja presión	2.3 atm
Zona de alta presión	15 atm
Temperatura de evaporación	-15°C
Temperatura de separación	150°C
Temperatura de condensación	40.5°C

Tabla 6 Condiciones iniciales para el diseño del SRAVCIS.

Si se comienza el ciclo con el proceso de separación, el componente que proporciona la energía es el colector solar, dicha energía debe estar dirigida al generador/absorbedor. Las dimensiones del colector solar se determinan de acuerdo a la cantidad de calor necesario para separar una cierta cantidad de amoniaco de la mezcla de amoniaco-agua, la irradiancia y el factor de concentración. En base a estos parámetros se construyó, para el **SRAVCIS**, el

concentrador solar de no enfoque mostrado en la Figura 10, que tiene un área de apertura de 1.99 m^2 y una ventana de admisión de π/13.26 (24).

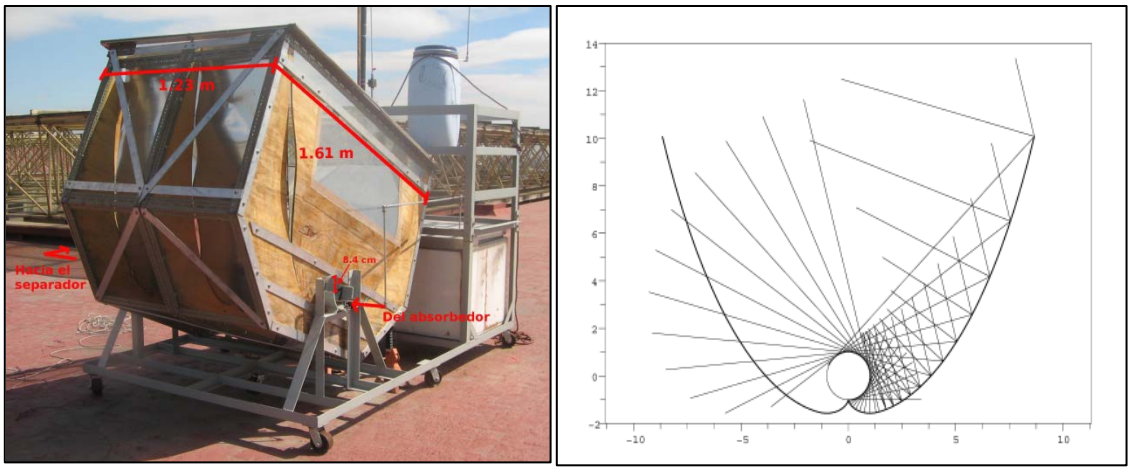

Figura 10 A la izquierda, fotografía del concentrador solar construido para el SRAVCIS. A la derecha, la curva que sigue su espejo mostrando un trazado que simula rayos solares (25).

El receptor de la energía solar en el concentrador es el recipiente que funcionará como generador/absorbedor y el cual deberá tener la capacidad de contener toda la mezcla amoniaco-agua que habrá en el sistema. La Figura 11 muestra la fotografía y el esquema de este generador/absorbedor, que cuenta con un área de recepción de 0.65 m^2.

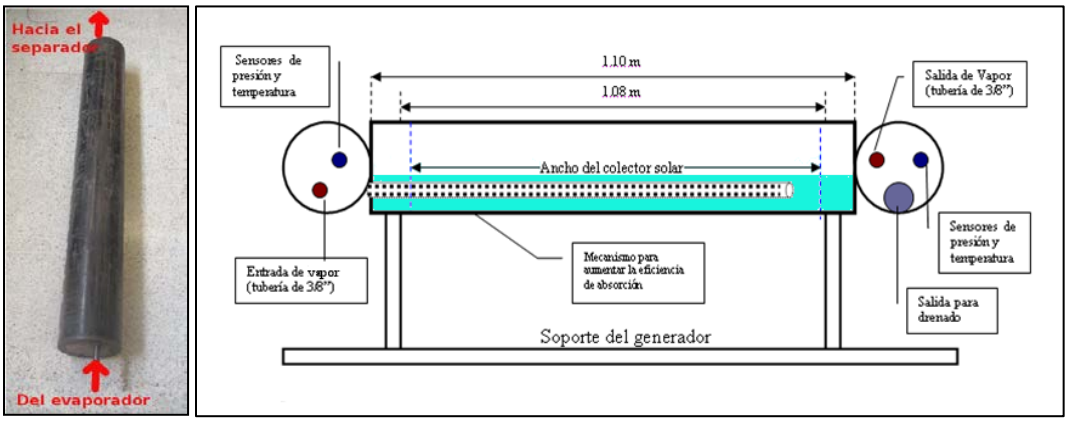

Figura 11 A la izquierda, fotografía del generador/absorbedor del SRAVCIS. A la derecha, esquema de su interior que muestra las entradas y salidas de vapor así como los orificios para los sensores de presión y temperatura (24).

Del esquema del generador/absorbedor, la región punteada representa un tubo interior con orificios sumergido en la mezcla, el cual es un mecanismo que ayuda a aumentar la eficiencia de la absorción.

Para obtener una mejor separación de la mezcla amoniaco-agua se añade un separador cuya función es condensar el agua en sus paredes y por gravedad regresarla al generador. La Figura 12 muestra el separador que se construyó para el **SRAVCIS**, cabe destacar que aún se deben realizar pruebas para observar si la separación está llevándose a cabo y de ser necesario modificarlo para que cumpla adecuadamente con su función.

Figura 12 Separador del SRAVCIS, se coloca verticalmente para que el agua condensada regrese al generador.

Una vez lograda la separación del amoniaco, el siguiente proceso del ciclo de refrigeración es el de saturación y condensación. Este proceso se lleva a cabo en el condensador, cuyas dimensiones se determinan de acuerdo a la cantidad de calor que debe ceder el amoniaco al medio condensante (agua), así como también a la forma en que se lleva a cabo la transferencia de calor y al tipo de material utilizado. Tomando en cuenta estos parámetros se construyó un condensador de aluminio, de 4.43m de longitud, en forma espiral sumergido en agua utilizada como medio condensante, este componente del **SRAVCIS** se muestra en la Figura 13.

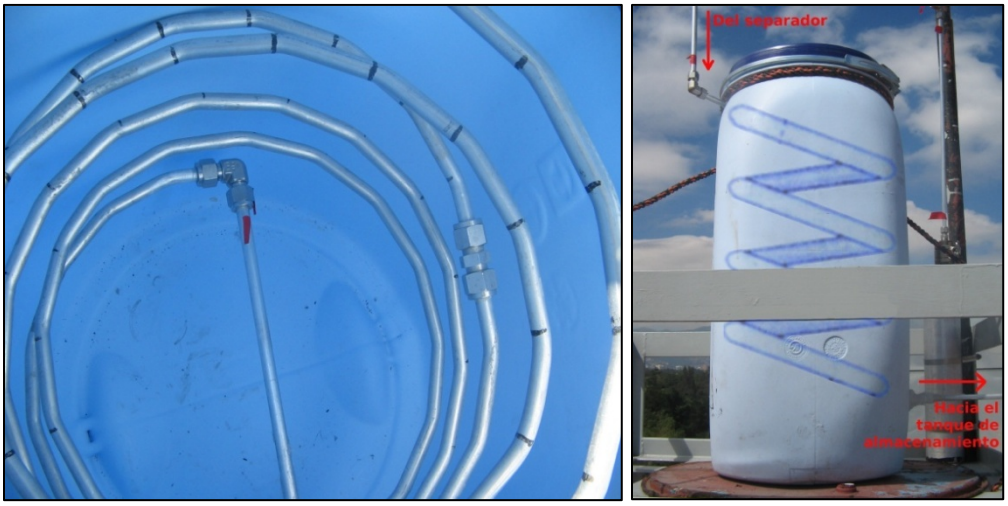

Figura 13 Interior y exterior del condensador construido para el SRAVCIS.

Conforme el amoniaco se va condensando es necesario almacenarlo, para lo cual se requiere de un recipiente o tanque con la suficiente capacidad para contenerlo, la Figura 14 muestra el tanque de almacenamiento construido para el **SRAVCIS**. Se coloca una mirilla de nivel que permite ver la cantidad de amoniaco condensado. Para el proceso de expansión adiabática, el **SRAVCIS** cuenta con una válvula que regulará el flujo entre la zona de alta y de baja presión, dicha válvula de expansión también se muestra en la Figura 14.

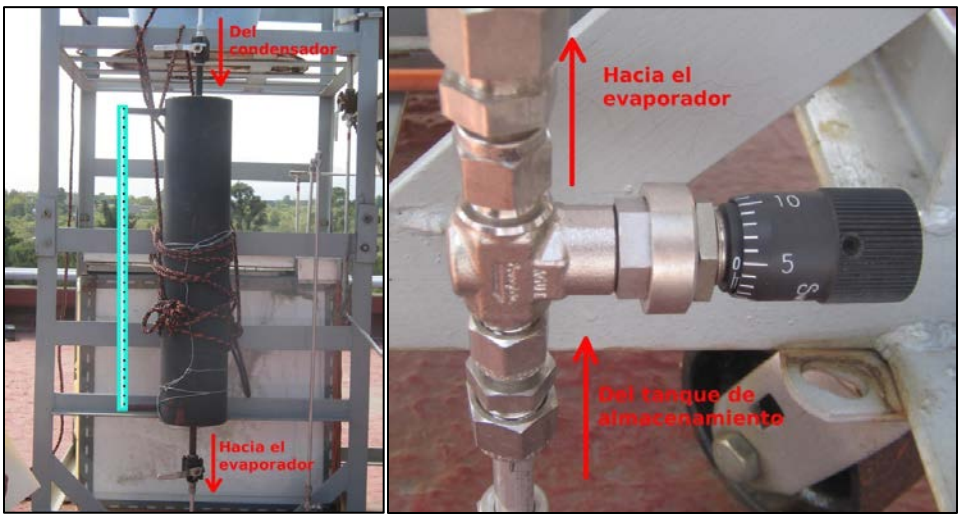

Figura 14 A la izquierda, tanque contenedor construido para el SRAVCIS. A la derecha, válvula de expansión.

En el último proceso el amoniaco debe evaporarse al mismo tiempo que es absorbido por la mezcla en el generador/absorbedor. Dicho proceso se realiza en el evaporador cuyas dimensiones se determinan similarmente a como se hace con el condensador, es decir, debe considerarse la cantidad de calor que el amoniaco toma de la cámara refrigerante, la forma en que se lleva a cabo la transferencia de calor y el tipo de material utilizado. El evaporador construido para el **SRAVCIS** se muestra en la Figura 15, es una cámara cúbica de 0.5 m de lado y la tubería de aluminio tiene una longitud de 25.17 m. En este tipo de evaporador las paredes son construidas del mismo material que la tubería y contribuyen a la transferencia de calor, razón por la cual se conoce como de pared fría.

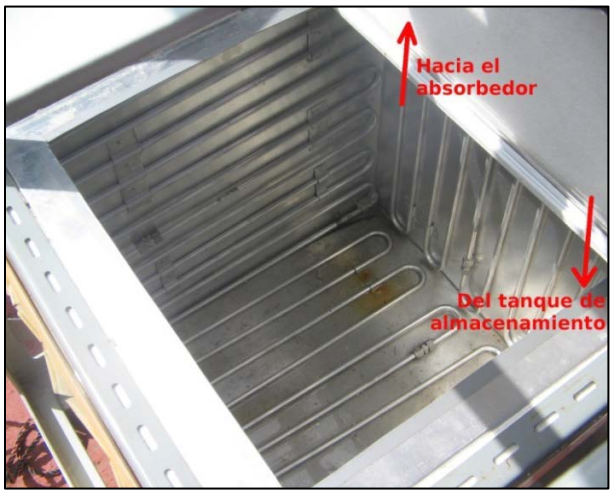

Figura 15 Evaporador construido para el SRAVCIS.

Finalmente, al ensamblar cada uno de los componentes, de modo que los procesos formen el ciclo de refrigeración, se obtiene la Figura 16 en la que se muestran los avances en el montaje de los componentes del **SRAVCIS** en comparación con el esquema del diseño del mismo.

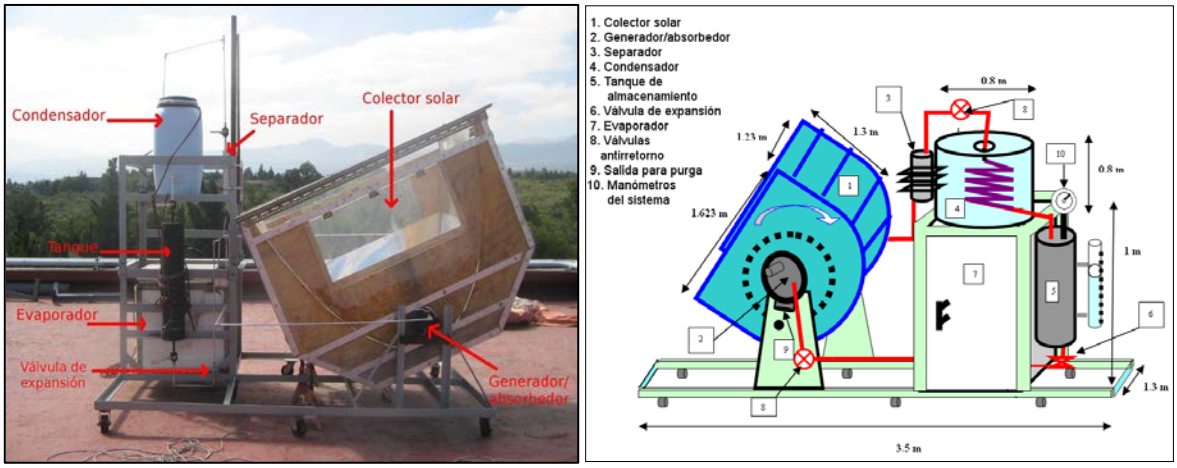

Figura 16 A la izquierda, fotografía del avance en el montaje del SRAVCIS. A la derecha, esquema de su diseño completo.

Hay que notar de la Figura 16, que los componentes principales ya se encuentran montados en el sistema y conectados entre sí. Sin embargo, cabe señalar que aun no se han instalado todos los componentes que se muestran en el esquema de la Figura 16. Como ejemplo de esto están las válvulas antirretorno cuya función es la de evitar flujos indeseados entre ciertos componentes y los manómetros que servirán para monitorear el funcionamiento del **SRAVCIS**.

También es importante mencionar que aun no se han realizado pruebas para observar el correcto funcionamiento de los componentes, corroborar que las conexiones soportan las presiones de trabajo y detectar la presencia de fugas, si es que las hay.

Capítulo 5. Conclusiones

El presente trabajo de tesis presenta los conceptos e ideas necesarios para el entendimiento del funcionamiento de los sistemas de refrigeración más utilizados, que son los sistemas refrigerantes por compresión de vapor y los sistemas refrigerantes por absorción de vapor.

Se realizó un acercamiento al estudio de los sistemas de refrigeración partiendo de los ciclos termodinámicos que lo hacen posible, esto permite poner diversos temas de física, en particular de termodinámica, 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.

Además, se mostró un panorama general de las propiedades físicas y químicas que se deben considerar al momento de elegir un fluido refrigerante y que repercuten en el diseño y construcción de los sistemas de refrigeración. Esto sin olvidar el impacto ambiental provocado por el uso de estos fluidos, lo que nos lleva a buscar alternativas para modificar los sistemas convencionales de forma tal que puedan operar sin dañar el ambiente.

Se presentó a la refrigeración solar como una alternativa que utiliza energía limpia y que puede implementarse haciendo uso de fluidos de bajo impacto ambiental. También se dio a conocer, de forma general, el sistema de refrigeración de ciclo intermitente a base de amoniaco y agua que se construye en la Facultad de Ciencias, UNAM, mostrando los avances en la construcción de sus componentes.

Cabe destacar, que el presente trabajo ejemplifica que para poder entender la refrigeración convencional, así como la refrigeración solar, se requiere tener un conocimiento básico en física y química. Dicho esto, este trabajo proporciona material que puede ayudar a complementar varios cursos sobre refrigeración, termodinámica y energías renovables.

Bibliografía

1. **Dossat, Roy J.** *Principles of refrigeration.* Tercera Edición. Estados Unidos : Prentice Hall, Inc., 1991.

2. **Instituto Hindú de Tecnología de Kharagpur. Departamento de Ingeniería Mecánica.** Refrigeration and Air Conditioning. *Lesson 1: History of Refrigeration.* [Online] http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/pdf/RAC%20%20Lecture%201.pdf.

3. **Sears, Francis W.** *An introduction to thermodynamics, the kinetic theory of gases, and statistical mechanics.* Segunda edición. Cambrige : Addison-Wesley, 1953.

4. **Sears, Francis W. and Salinger, Gerhard L.** *Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística.* Barcelona : Reverté, S. A., 1978.

5. **Chang, Raymond.** *Química.* Séptima Edición. México, D.F. : McGraw Hill, 2002.

6. **Instituto Hindú de Tecnología de Kharagpur. Departamento de Ingeniería Mecánica.** Refrigeration and Air Conditioning. *Lesson 26: Refrigerants.* [Online] http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/pdf/R&AC%20Lecture%2026.pdf.

7. **Instituto Hindú de Tecnología de Kharagpur. Departamento de Ingeniría Mecánica.** Refrigeration and Air Conditioning. *Lesson 17: Vapour Absorption Refrigeration Systems Based on Ammonia-Water Pair.* [Online] http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/pdf/RAC%20Lecture%2017.pdf.

8. **Navarro Esbrí, Joaquín, Cabello López, Ramón and Torrella Alcaraz, Enrique.** *Fluidos Refrigerantes. Tablas y diagramas.* España : A. Madrid Vicente Ediciones, 2003.

9. **Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.** [Online] http://www.ashrae.org.

10. **Lamúa, Manuel and Cuesta, Francisco J.** *El amoniaco como refrigerante.* Primera Edición. España : AMV Ediciones, 2000.

11. *CFCs: Quest for alternatives.* **McLinden, Mark O. and Didion, David A.** 29, Diciembre 1987, ASHRAE Journal.

12. **Rodríguez Rodríguez, Ernesto.** *Los refrigerantes en las instalaciones frigoríficas.* Primera Edición. España : International Thomson Editores Spain Parainfo, S. A., 2005.

13. **Instituto Hindú de Tecnología de Khragpur. Departamento de Ingeniería Mecánica.** Refrigeration an Air Conditioning. *Lesson 14: Vapour Absorption Refrigeration Systems.* [Online] http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/pdf/RAC%20Lecture%2014.pdf.

14. **Martínez Ortega, José Francisco.** *Optimización de un sistema de refrigeración solar para la producción de hielo.* Centro de Investigación en Energía, UNAM : Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería, 2007.

15. **Rivera, C and Rivera, W.** *Modeling of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with ammonia-lithium nitrate mixture.* Solar energy materials and solar cells. Vols. 76, Núm. 3, 2003.

16. **Rivera Blanco, Carlos Octavio.** *Simulación, diseño y evaluación de un refrigerador solar intermitente usando un CPC como generador-absorbedor.* Centro de Investigación en Energía, UNAM : Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería, Energía solar fototérmica, 2006.

17. **Baird, Colin.** *Química ambiental.* Barcelona : Reverté, 2001.

18. **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.** Secretaría de Ozono. [Online] http://www.pnuma.org/.

19. **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.** [Online] http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php.

20. **Kilicarslan, Ali; Norbert, Müller.** *A comparative study of water as a refrigerant with some current refrigerants.* s.l. : International Journal or Energy Research, 2005. pp. 947-959. Vol. 29. 11.

21. **Cano Marcos, José María.** *Refrigeración por absorción. Interés energético e impacto ambiental.* [Online] http://www.cientificosaficionados.com/energia%20solar/aire%20acondicionado.pdf.

22. **Duffie, John and Beckman, William.** *Solar engineering of thermal processes.* Segunda Edición. Estados Unidos : Wiley-Interscience, 1991.

23. **Manrique, José A.** *ENERGÍA SOLAR-Fundamentos y aplicaciones fototérmicas.* Primera Edición. México : HARLA S. A. de C. V., 1984.

24. **Álvarez, Carlos, Hernández, Sergio and Ruíz, Gerardo.** *Construcción de un refrigerador solar.* [Online] http://refrigeracion.files.wordpress.com/2010/01/seminarios-tlahuizcalpan1.ppt.

25. **Villamil Sapién, Pamela.** *Procesos de transferencia de calor en un concentrador solar.* Facultad de Ciencias, UNAM : Tesis para obtener el título de Físico, 2011.