

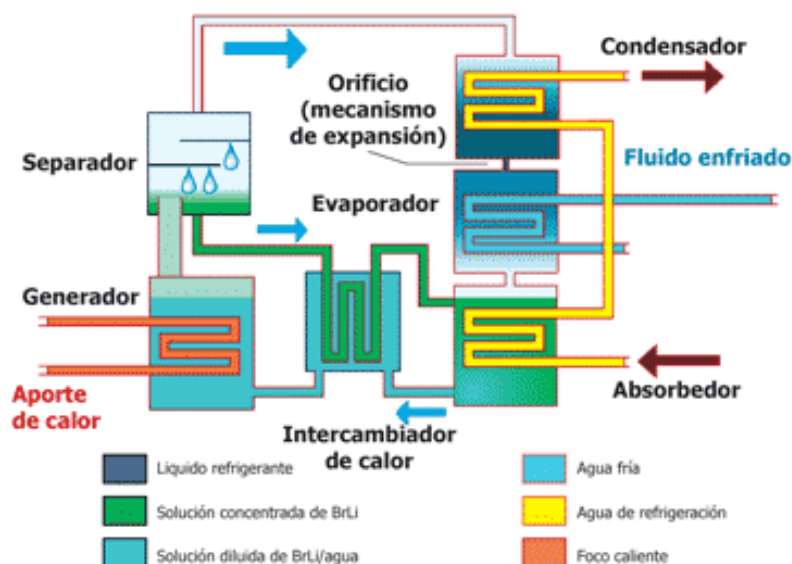
# **CAPITULO 3**

## **3. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN**

### **3.1. Descripción del sistema de refrigeración por absorción**

En su diseño más simple, la máquina de absorción consta de un evaporador, un condensador, un absorbedor, un generador y una bomba de solución. En un enfriador por ciclo de compresión, el frío se produce en el evaporador, donde el refrigerante o el fluido de trabajo se vaporiza y el calor se transfiere al condensador, donde el refrigerante se condensa la energía que eleva el calor de baja a alta temperatura se suministra como energía mecánica al compresor.

En un enfriador por ciclo de absorción, la compresión del vapor de refrigerante es efectuada por el absorbedor, la bomba de solución y el generador combinados, en lugar de un compresor de vapor mecánico. El vapor generado en el evaporador se absorbe en un absorbente líquido que hay en el absorbedor. El absorbente que ha absorbido refrigerante, absorbente gastado o débil, es bombeado al generador donde el refrigerante se libera en forma de vapor, el cual se debe condensar en el condensador. El absorbente regenerado o fuerte se recircula después al absorbedor para absorber de nuevo el vapor de refrigerante. El calor se suministra al generador a una temperatura relativamente alta y se rechaza desde el absorbedor a un nivel relativamente bajo, de forma análoga a un motor de calor.



**Fig. 3.1 Sistema de refrigeración por absorción simple**

El refrigerante y el absorbente en un ciclo de absorción forman lo que se denomina un par de trabajo. A lo largo de los años se han propuesto muchos pares, pero sólo dos de ellos se han utilizado extensamente: amoníaco junto con agua como absorbente y agua junto con una solución de bromuro de litio en agua como absorbente. El par agua amoníaco se encuentra sobre todo en aplicaciones de refrigeración, con bajas temperaturas de evaporación, inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$ . El par agua-bromuro de litio se emplea extensamente en aplicaciones de refrigeración por aire, donde no es necesario enfriar por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ . Los niveles de presión en la máquina de agua-amoníaco son normalmente superiores a la presión atmosférica, mientras que las máquinas de agua-bromuro de litio funcionan generalmente en vacío parcial.

Los flujos de calor en el ciclo básico son los siguientes:

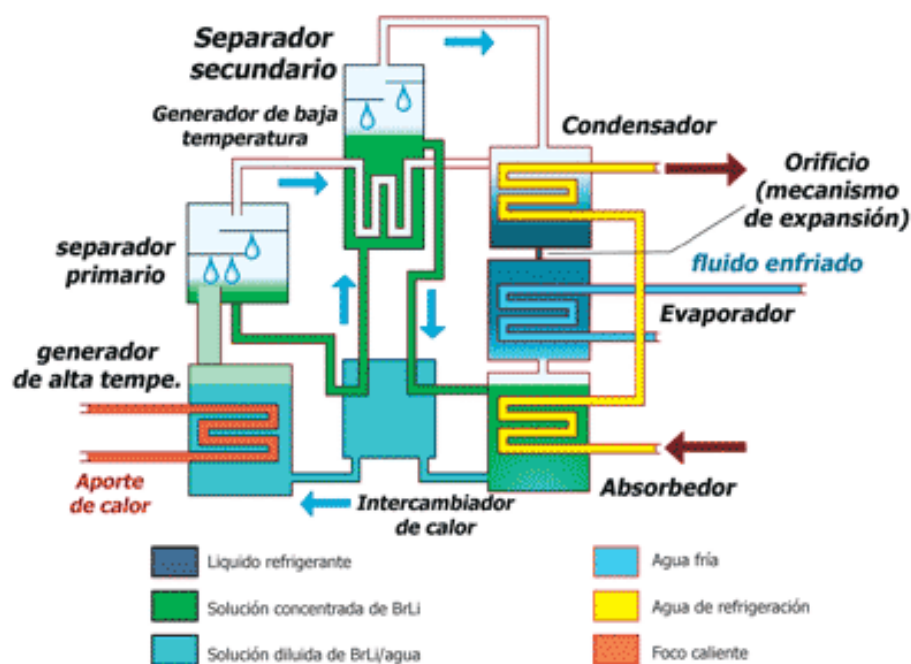
- ⊙ El calor se suministra, y el enfriamiento se produce, a un nivel bajo de temperatura;
- ⊙ El calor se rechaza al condensador a un nivel intermedio de temperatura;
- ⊙ El calor se rechaza desde el absorbedor, también a un nivel intermedio; y,
- ⊙ El calor se suministra al generador a un nivel alto de temperatura.

En cuanto a los sistemas de refrigeración por absorción que utilizan bromuro de litio como absorbente y agua como refrigerante, la fuente de calor (energía calorífica descargada del sistema de cogeneración, en principio) debe estar a una temperatura mínima de 60-80 °C, o hasta 150°C si se considera un sistema de doble efecto. Para los sistemas que usan amoníaco como refrigerante, se necesita una fuente de calor de 100-120°C (sistema de simple efecto).

El ciclo básico se puede modificar de varias formas. Una consiste en aprovechar todas las oportunidades posibles de recuperar el calor dentro del ciclo para mejorar la economía térmica. Por ejemplo, es habitual hacer un intercambio de calor entre el flujo de solución débil que sale del absorbedor y el absorbente regenerado o solución fuerte que es retornado al absorbedor.

Cuando todas las oportunidades de recuperación de calor que se puedan usar razonablemente hayan sido incorporadas al diseño de una máquina, se obtiene un coeficiente de enfriamiento de aproximadamente 0.7 para el sistema de agua-bromuro de litio y aproximadamente 0.6 para el sistema de agua amoníaco. Se pueden obtener otras mejoras si se utiliza de una manera más eficiente el calor de alta temperatura disponible para alimentar el generador.

Los denominados sistemas de doble efecto incorporan dos bloques del generador absorbedor que están situados en etapas, con el fin de utilizar el calor suministrado más o menos dos veces. El calor se suministra a aprox. 170°C al primer generador y el calor disipado por el correspondiente condensador se emplea para accionar el segundo generador a un nivel más bajo, aprox. 100 °C de una máquina de simple efecto.



**Fig. 3.2 Máquina de refrigeración por absorción de doble efecto**

El coeficiente de rendimiento de este sistema con agua bromuro de litio como par de trabajo puede ser aprox. 1.2, que es considerablemente mejor que el 0.7 del sistema de simple efecto.

No es el doble que el de un sistema de simple efecto debido al intercambio de calor imperfecto entre los flujos de solución, en cierta medida, y porque el calor de la vaporización del refrigerante es necesariamente mayor cuando se evapora de una solución que cuando se evapora de un líquido puro.

### **Máquinas de bromuro de litio**

La mayoría de los equipos de absorción basados en el par de trabajo agua bromuro de litio están diseñados para aplicaciones de climatización. Por motivos históricos, las capacidades se dan en RT USA (Toneladas de Refrigeración), una tonelada USA de hielo por hora, en la literatura de los fabricantes. Una RT corresponde a una producción de frío de aprox. 3.5 Kw.

### **Máquinas de simple efecto**

La mayoría de los fabricantes ofrecen máquinas de simple efecto en el rango de aprox. 100 RT a aprox. 1500 RT, es decir, 350 KW a aprox. 5.2 MW. Estas se pueden alimentar con vapor a 135-205 KPa (1-2 bares manométricos, 2-3 bares absolutos), que corresponde a una temperatura de vapor de 110 a 120 °C. Alternativamente pueden ser alimentadas con agua caliente a 115-150°C y una presión máxima de 9 bares.

El coeficiente de rendimiento se sitúa en el rango de 0.6 a 0.7. El consumo de vapor de una máquina de simple efecto es aprox. 2.3 kg/h por KW. El flujo de agua caliente requerido está en el rango de 30 a 72 kg/h por KW dependiendo de la caída de temperatura permitida.

### **Máquinas de doble efecto**

Las máquinas de doble efecto están aproximadamente en el mismo rango de capacidades que las de simple efecto. La capacidad de refrigeración más baja ofrecida por algunos fabricantes es ligeramente mayor: 200 RT para una empresa y 350 RT para otra (700 y 1200 kWt respectivamente). El vapor parece ser el medio preferido para alimentar estas máquinas.

El vapor debería estar a 9-10 bares manométricos, 10-11 bares, o 1100 a 1200 kPa, que corresponde a unas temperaturas en el rango de 175 a 185 °C.

De acuerdo con la información recibida, también es posible alimentar una máquina de doble efecto con agua caliente, cuya temperatura deberá estar en el rango de 155 a 205 °C. El rendimiento en uno u otro caso es de 0.9 a 1.2. El consumo de vapor de la máquina de doble efecto es aprox. 1.4 kg/h por kWt.

## **Rendimiento**

La eficiencia térmica se mide en términos de salida de frío y entrada de calor - el coeficiente de funcionamiento (COP). Los enfriadores de simple efecto tienen un COP térmico típico de alrededor de 0.7; los refrigeradores de doble efecto tienen un COP térmico de aproximadamente 1.1. Esto significa que se necesita una torre de refrigeración más pequeña que para un enfriador de simple efecto (aprox. 40%).

La complejidad de los refrigeradores de doble efecto incrementa su coste respecto de los de simple efecto. Los enfriadores de absorción de doble efecto oscilan de aprox. 400 a 1.000 toneladas de capacidad.

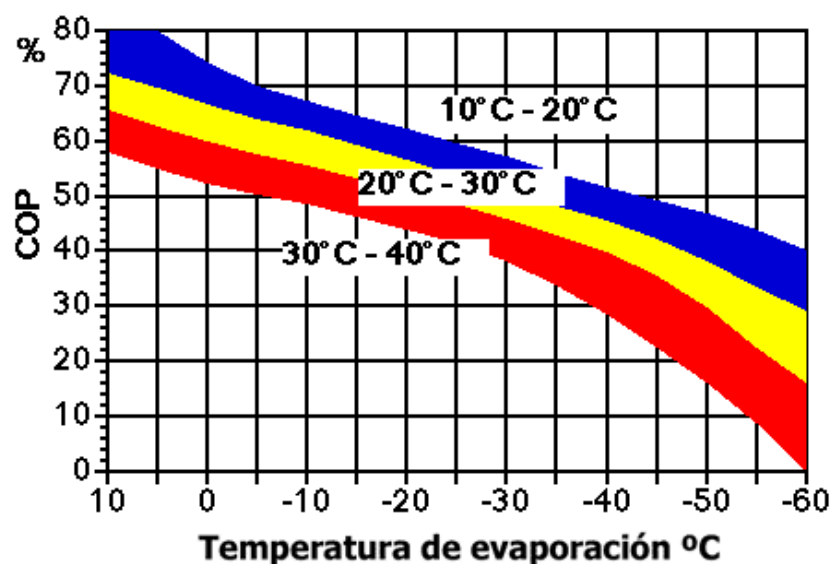
Todas las máquinas de ciclo de absorción comercialmente disponibles disipan el calor a través del circuito de torre de refrigeración.

En la mayoría de los casos, las temperaturas en el circuito de la torre de refrigeración son de 32/37 °C. Las unidades de agua caliente a baja temperatura de Sanyo y Yazaki requieren una temperatura más baja: 30/35 °C.



## Máquinas de agua-amoniaco

Las máquinas de agua-amoniaco están diseñadas principalmente para aplicaciones de refrigeración industriales, por ejemplo, alimentos congelados o refrigeración de procesos, con unas temperaturas de evaporador de hasta  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Este tipo de máquinas se emplean preferiblemente cuando se trabaja con temperaturas cercanas o inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$ , ya que las unidades de agua-bromuro de litio no pueden funcionar en este rango de temperaturas. La temperatura a la cual se debe suministrar el vapor para alimentar una unidad depende del refrigerante disponible y de la temperatura de refrigeración a conseguir.



*Fig. 3.3 Coeficiente de performant*

## **Rendimiento**

El diagrama de arriba ofrece una indicación de la eficiencia, rendimiento (COP), de un proceso NH<sub>3</sub>-absorción de simple etapa, dependiendo de la evaporación y de la temperatura del agua de refrigeración. Las líneas de color se refieren a los rangos de temperatura del agua de refrigeración. Si se desea considerar un ciclo de agua amoníaco en lugar del ciclo de simple efecto de agua bromuro de litio de arriba, es razonable esperar que el rendimiento, la demanda de calor y los requisitos de temperatura sean básicamente los mismos que para un ciclo de agua bromuro de litio.

El sistema de refrigeración por absorción fue desarrollado por Sir John Leslie, quien utilizó el ácido sulfúrico como absorbente y el agua como refrigerante. Más tarde, en 1859, Ferdinand Carre inventa la primera máquina de absorción, la cual trabaja con el par amoníaco-agua.

Los ciclos de absorción funcionan con un par de refrigerantes químicos. Son sistemas de dos componentes, donde una de las sustancias es disuelta en la otra y el enfriamiento se produce secando una de las dos sustancias de la solución por medio de la aplicación de calor y luego reabsorbiéndola hacia la solución.

Los dos pares de refrigerantes más usados son el amoníaco-agua y la combinación de agua y bromuro de litio. Los equipos que utilizan el ciclo de absorción han tenido un uso generalizado por varias décadas en la preservación de alimentos, procesos industriales y almacenamiento frío. Pueden operar a temperaturas más bajas que el punto de congelación del agua, sobre todo los de amoníaco-agua y sobre el punto de congelación del agua los de agua-bromuro de litio.

A pesar de que el amoníaco no es un elemento que afecta la capa de ozono, sí es cierto que tiene consecuencias directas sobre la salud del ser humano, y que pérdidas de este compuesto en el sistema pueden afectar al hombre mediante el contacto directo con él, o por la contaminación de los alimentos presentes en la cámara frigorífica. También se menciona la contaminación por ruido que pueden producir los elementos móviles de dicha instalación, lo cual ocurre durante un funcionamiento inadecuado de esos elementos. Es por ello que esta tecnología requiere de un control estricto en su explotación, y una alta calificación del personal técnico encargado de su correcto funcionamiento

Actualmente la tecnología de los ciclos de refrigeración por absorción esta desarrollándose rápidamente y constituye una

alternativa real a los ciclos de refrigeración por compresión, debido a las ventajas que presenta por lo que respecta a ahorro de energía primaria, y respeto por el medio ambiente.

La aplicación de los ciclos de refrigeración por absorción para (ARC) el ahorro de energía requiere un análisis del tipo de consumo de cada instalación. En los casos en que los procesos industriales presentan una demanda de frío, y al mismo tiempo existe una fuente de energía residual, es decir, un excedente de calor de bajo nivel térmico, se presenta una situación idónea para la aplicación de un sistema de refrigeración por absorción, el cual aprovechando el excedente de calor suministrara la demanda de frío de la planta.

Esto supone:

- © un ahorro económico importante al poder prescindir del consumo de energía primaria de un sistema de refrigeración por compresión mecánica.
- © aprovechar una fuente de calor residual.
- © sustituir una tecnología, por otra más respetuosa con el medio ambiente. En refrigeración por compresión se están haciendo esfuerzos muy importantes para eliminar los refrigerantes

perjudiciales para la capa de ozono, pero este ciclo de refrigeración siempre comportara un consumo de energía eléctrica que lleva asociada una carga ambiental. Por ejemplo, en el caso de electricidad proveniente de centrales térmicas, hará falta considerar la contaminación asociada a los gases de combustión.

En cada planta industrial, se ha de realizar un estudio de viabilidad de la aplicación de un ciclo de absorción, que consiste en calcular el ahorro económico conseguido teniendo en cuenta el coste de operación del sistema y de la inversión a realizar. Para llevar a cabo esta tarea es necesario utilizar un tipo de ciclo de refrigeración adecuado a la planta en concreto, y por tanto es preciso un conocimiento de como se genera, distribuye y consume la energía en la planta a estudiar. El conjunto de elementos: calderas, colectores, intercambiadores, turbinas, etc. que generan, distribuyen y consumen energía en forma de vapor, constituyen la red de vapor de la instalación industrial. La red de vapor más la red eléctrica constituyen el sistema de energía de la instalación industrial.

Los tipos de ciclos por absorción que se consideran son:

<b>TIPOS DE CICLOS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN</b>	
Refrigerante/Absorbente	Tipo de ciclo
Agua/Bromuro de Litio	Simple efecto Doble efecto (Isoflow) Doble efecto (Paraflow)
Amoniaco/Agua	Simple efecto, Simple etapa Simple efecto, Doble etapa

### **3.2. Consideraciones de Operación**

Uno de los rasgos característicos de la maquinaria frigorífica de absorción ha sido siempre su hermeticidad y dificultad de comprensión para los operadores.

Por principio, la necesidad de confinar sustancias de cierto riesgo como el Amoniaco, y de mantener depresiones relativas muy altas en su interior, para conseguir la evaporación de refrigerantes, tales como el agua, a temperaturas lo suficientemente bajas para hacerlas utilizables en procesos de refrigeración; recordemos que para que el agua se evapore a 5°C se requiere una presión absoluta de 870 Pa; condicionan un diseño mecánico muy robusto y hermético, que dificulta en buena medida la interpretación desde el exterior de lo que esta sucediendo en el interior de la máquina, durante su funcionamiento.

Por otra parte, los técnicos frigoristas que se encuentran por primera vez delante de una planta enfriadora por ciclo de absorción, por muy expertos que sean en el servicio de maquinaria de compresión mecánica de vapor, tardan bastante tiempo en comprender que la mayoría de los criterios de servicio y las “reglas del arte” válidas en la refrigeración “convencional”, no son de aplicación inmediata a las máquinas de absorción.

El comportamiento de los fluidos interiores de la máquina de absorción, refrigerante y absorbente, durante el proceso de funcionamiento del ciclo está directamente condicionado por la evolución energética de los fluidos exteriores a la máquina; agua a enfriar en el evaporador, agua de la torre de recuperación, y agua caliente o vapor aportado al concentrador.

El equilibrio energético entre todos los intercambiadores de calor de la máquina es el que condiciona la estabilidad del ciclo.

A diferencia de cómo se comporta un ciclo de compresión mecánica en el que el trabajo del compresor es determinante, en un ciclo de absorción el equilibrio se consigue a partir de efectos puramente termodinámicos.

Esto también hace más compleja la comprensión del comportamiento de la máquina para los operadores, ya que esta se adapta en cada instante a las condiciones cambiantes de los circuitos exteriores, buscando el equilibrio, como un ser vivo se adapta a las condiciones del medio que le rodea.

Los americanos llaman a la máquina de absorción “the living machine”. Además, la gran inercia térmica de las máquinas de absorción para adaptarse a las variaciones externas, debido fundamentalmente a su volumen y a las cantidades importantes de absorbente y refrigerante que contienen, son también inconvenientes para la buena comprensión de su respuesta en unas determinadas condiciones de estado.

Desde el punto de vista de su Operación y mantenimiento, las máquinas de absorción requieren intervenciones específicas que no son de aplicación en otro tipo de circuitos frigoríficos. Por ejemplo: Es preciso efectuar mediciones periódicas del estado de pureza del agua y de las soluciones salinas, mediante la extracción de muestras y análisis de las mismas; el conocimiento de los niveles de concentración en las soluciones es imprescindible para determinar si el rendimiento instantáneo de un determinado equipo es o no correcto; la medición del nivel de vacío interior en una máquina es



fundamental para comprender si la producción frigorífica se está llevando a cabo correctamente, etc. En el servicio de las máquinas de absorción se utilizan útiles e instrumentos tales como bombas de trasiego, densímetros, vacuómetros y aditivos químicos que se aplican en otros equipos de refrigeración. Sin embargo no se utilizan manómetros frigoríficos que son de uso común en los circuitos de compresión mecánica

### **3.3. Interés Energético (C.O.P.)**

En todo proceso de definición de las posibles soluciones a un determinado problema de aprovechamiento energético, los considerados que más fuertemente influyen en la decisión de los proyectistas y de las propiedades son de índole económica, fundamentalmente, aunque hoy en día las consideraciones de impacto ambiental tienen también una importancia prioritaria.

Las relaciones entre el coste de la inversión inicial requerida y el beneficio esperado y entre los costes y resultados de explotación previstos, en resumidas cuentas el “cash flow” del proyecto, son determinantes en la elección de la solución idónea.

A partir de estas premisas, es preciso analizar en detalle todas las posibles soluciones teniendo en consideración no solo el coste de

los equipos a instalar, sino también el coste de las energías a consumir, con una proyección de futuro sobre la evolución que, previsiblemente, puedan experimentar estos últimos durante el periodo que se establezca como plazo de amortización de la instalación a realizar. Este criterio, normalmente, reduce de forma drástica el abanico de posibles opciones. El coste inicial de una planta frigorífica de absorción resulta, en la mayoría de los casos, superior al de un equipo de compresión mecánica de la misma capacidad. La razón para esta diferencia está en la muy superior cantidad de materiales metálicos que son necesarios para la fabricación de los intercambiadores de calor, en equipos que se basan en procesos termodinámicos sin prácticamente aportación del equivalente térmico del trabajo mecánico.

Sin embargo, cuando se analizan los costes de explotación a partir del valor de las energías consumibles, la balanza puede desplazarse a favor de los equipos de absorción, si se dan las condiciones de partida necesarias.

### **C.O.P.**

El concepto de C.O.P. (Coefficient of Performance) en refrigeración, es sinónimo de Eficiencia Energética en el evaporador. C.O.P. se

define “oficialmente” como: “La cantidad de refrigeración obtenida de una máquina dividida entre la cantidad de energía que se requiere aportar para conseguir esta refrigeración (ASHRAE 1993)”<sup>7</sup>. En este cómputo no se incluyen los consumos auxiliares de energía eléctrica necesarios para el funcionamiento de bombas y ventiladores.

Los C.O.P.s esperables de los ciclos de absorción son también muy bajos comparados con los de los ciclos de compresión mecánica. En máquinas de absorción de una etapa, con Bromuro de Litio, no se superan C.O.P.s de 0,7, en máquinas de doble etapa se alcanzan valores que pueden ser hasta 1,5 veces a los esperables en una etapa, es decir de hasta 1,2, esto significa que las máquinas de doble etapa aprovechan mejor la energía que las de etapa simple. En ciclos de baja temperatura Amoniaco/ Agua se consiguen valores de C.O.P. de 0,5 y pueden alcanzarse máximos de 0,8.

Por el contrario en equipos de compresión mecánica de gran cantidad, con compresores centrífugos y de tornillo, se consiguen en la actualidad rendimientos frigoríficos entre 4,5 y 5,5 kW/kW (C.O.P.s en el evaporador de 4,5 a 5,5). A igualdad de costes de las energías consumibles, estas diferencias tan espectaculares habrían convertido a las máquinas de absorción, hace mucho tiempo, en piezas de museo o “curiosidades tecnológicas”.

¿Cuál puede ser, entonces, la razón para que los ciclos de absorción sigan teniendo actualmente una aplicación práctica?. La respuesta es bastante sencilla: El coste de producir el trabajo mecánico necesario para obtener un kW de refrigeración por ciclo de compresión mecánica de vapor es, normalmente, superior al coste necesario para recuperar la cantidad de calor a aplicar para obtener el mismo kW en un ciclo de absorción. El coste de la energía básica es el único factor que determina la posible competitividad de los sistemas de absorción frente a los de compresión mecánica.

Por ejemplo: Si comparamos un sistema de refrigeración por compresión con un C.O.P. esperable de 5,5, y un sistema de absorción de doble etapa con un C.O.P. de 1, en una aplicación en la que se dispone de una fuente de calor recuperable cuyo coste por kW recuperado es de 1 unidad mientras que el coste de la energía eléctrica necesaria para hacer funcionar las máquinas de compresión es de 6 unidades, será evidente el interés de utilizar el sistema de absorción, simplemente a partir de los costes de las energías, sin tener en consideración otras posibles ventajas. Este es un análisis demasiado simplificado, ya que no se han tenido en consideración los costes energéticos que implica el funcionamiento de las torres de recuperación, las bombas de agua de torre, ni las bombas de agua fría. Un estudio más completo nos llevaría a la

conclusión de que, teniendo en cuenta todos los consumos de todo tipo de energías en una aplicación dada, el coste de la energía eléctrica debería ser de 8 a 9 veces superior al de la energía térmica recuperada por hacer que la opción por absorción fuera competitiva con la de compresión mecánica.

Lo que es evidente es que siempre que exista la posibilidad de utilizar energías térmicas desechables, gratuitas, o de muy bajo coste, procedentes de energías renovables, o efluentes de procesos industriales o de sistemas de cogeneración, la aplicación de sistemas de absorción para la producción frigorífica será competitiva e interesante

También es preciso citar que aún existen lugares en los que la disponibilidad de energía eléctrica para grandes potencias no está garantizada, o bien implica un coste muy elevado, y sin embargo existen combustibles fósiles accesibles, gas natural por ejemplo, a un precio aceptable.

Esta es otra posibilidad de aplicación de los sistemas de absorción, utilizando en estos casos máquinas con combustión directa que consumen un combustible líquido o gaseoso directamente para la producción de calor y frío de forma simultánea o alternativa, con

C.O.P. que pueden alcanzar valores de 1,5. Así mismo puede resultar interesante la aplicación de sistemas «híbridos», que se basan en la instalación de máquinas de absorción en serie, o en paralelo, con máquinas de compresión mecánica sobre el mismo circuito de agua enfriada.

En estos sistemas, las máquinas de compresión se utilizan para hacer frente a las cargas térmicas básicas, o en horas valle, mientras que las máquinas de absorción se utilizan exclusivamente en horas punta o para combatir las demandas punta. Esto permite dimensionar las máquinas que consumen energía mas cara para condiciones de menor carga, lo que repercute favorablemente en los costes de explotación de la instalación.

### **3.4. Impacto Ambiental de un Sistema de Absorción**

Por último, pero no por menos importante, vamos a comentar las peculiaridades de los equipos de refrigeración por absorción en lo relativo a la incidencia de su utilización sobre el medio ambiente.

Me centraré en el comentario de los ciclos Agua-Bromuro de Litio, cuya influencia medioambiental considero menos conocida, ya que los ciclos Amoniaco-Agua están más condicionados en su efecto medioambiental por la presencia del Amoniaco como refrigerante, y

su divulgación ha sido más amplia por esta razón, al ser este agente frigorífico plenamente ecológico, sobre todo en lo relativo a su ODP (Potencial de Destrucción de Ozono) y GWP (Efecto Invernadero).

Los aspectos de impacto indirecto, en función de la contaminación originada en la producción de energía eléctrica, y de Tel (Impacto Ambiental Global), son prácticamente comunes a ambos tipos de ciclos y están en relación directa con los COPs de cada máquina, para cada aplicación concreta, por lo que serán válidas para el ciclo Amoniaco-Agua las consideraciones que se harán sobre los ciclos Agua-Bromuro de Litio.

### **3.5. Absorción vs Compresión Mecánica**

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

Los expertos en esta materia, han coincidido en que el factor que determina con mayor exactitud la incidencia sobre el medio ambiente de una máquina o proceso, es el que se ha dado en denominar TEI

(Total Environmental Impact) que engloba todos los parámetros de influencia:

- ODP (Potencial de destrucción de Ozono).
- GWP (Potencial de calentamiento global-Efecto Invernadero)
- Consumo de los equipos (COP).
- Vida atmosférica.
- Carga de los equipos (Refrigerante).
- Emisiones de los equipos.

De todos estos parámetros el de mayor importancia, cuando nos referimos a la maquinaria frigorífica, resulta ser el consumo de los equipos, englobando tanto los consumos directos de energía de cada máquina como los de energías primarias y fósiles necesarios para la producción de la energía eléctrica que después se va a consumir en ella, e incluyendo las misiones de gases invernadero (CO<sub>2</sub>, fundamentalmente) que van aparejadas con la producción de esta energía.

La Agencia Internacional del Medio Ambiente ha determinado que el 98% del TEI de una planta frigorífica se debe a la emisión de gases invernadero que se originan en la producción de la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.



Solo el 2% restante se debe a las emisiones originadas por la propia máquina. Si consideramos ahora que el consumo eléctrico de una planta de absorción es, por término medio, un 7% del correspondiente a un equipo de compresión mecánica, y que la energía térmica que consume, salvo en las aplicaciones de combustión directa, procede como efluente de un proceso, es decir que su impacto medioambiental se debe a otras necesidades ajenas a las de la producción frigorífica, concluiremos que el TEI de una planta de absorción es tan solo el 7,15% respecto al equipo de compresión mecánica equivalente.

Este valor se reduce hasta el 7% si tenemos en cuenta que un equipo de absorción no origina emisiones propias, ya que su interior, por principio, se encuentra en depresión frente a la atmósfera, y que aun en el supuesto de que por una avería se produjera algún vertido o emisión al exterior de sus fluidos interiores, esto no tendría ningún efecto contaminante para el medio, dadas las características de estas sustancias.

En equipos que funcionan con combustión directa, el efecto de las emisiones propias se acentúa, no por lo que se refiere a las emisiones indirectas que se originan en la producción de energía eléctrica que supondrían un porcentaje equivalente al comentado

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

### **3.6. Descripción del Funcionamiento del Acondicionador de Aire por Absorción usando Energía Solar**

El diseño del equipo acondicionador de aire esta basado en el principio de funcionamiento de refrigeración de Servel-Electrolux, en el cual no se utiliza bomba y se hace circular el fluido igualando las presiones inyectando un gas ideal al sistema, para el diseño a realizar helio. El ciclo es como se muestra en la figura 3.5.

El trabajo de la bomba de retorno es dar energía cinética al agua para que llegue hasta el colector. El reemplazo de la bomba de retorno tendría que ser por un fluido térmicamente conocido como

aproximación a gas ideal, considerando que debe cumplir con propiedades como:

- ✓ Ser incompresible
- ✓ Coeficientes caloríficos constantes (importante por variaciones de temperatura altas)
- ✓ Constante universal de gases constante
- ✓ Debe ser de muy baja densidad.

El gas seleccionado es el Helio debido a sus buenas propiedades y no es explosivo como el hidrógeno.

Con el ingreso de este gas mantenemos la presión del sistema constante debido a que como se sabe por la ley de Dalton la presión total es igual a la suma de cada una de las presiones parciales.

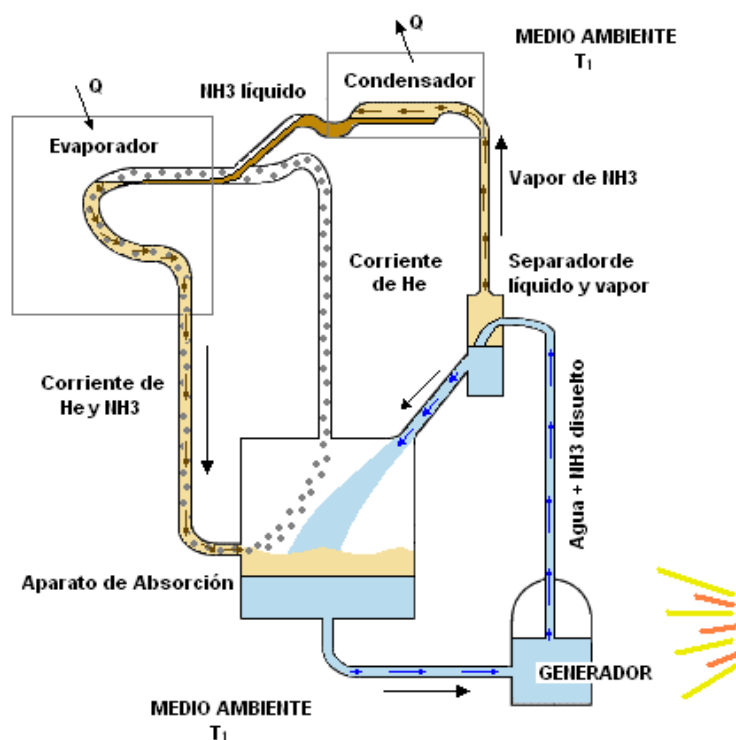
$$P_{Total} = P_1 + P_2 + \dots$$

Para el caso del acondicionador será la presión del amoníaco más la presión con la que aporte el helio.

El funcionamiento del acondicionador es el siguiente:

El vapor de baja presión que procede del evaporador, en vez de ser comprimido por un compresor mecánico, es absorbido por una

solución diluida de amoníaco y agua en el absorbedor. El helio gaseoso se encuentra presente en el sistema para aumentar la velocidad de evaporación del amoníaco y para proporcionar el balance de presión necesario en el sistema. El calor aplicado desde la radiación solar en el generador origina que el vapor de amoníaco se desprenda de la solución.



**Fig.3.4 Ciclo de refrigeración por absorción. Agua-amoníaco-helio**

El vapor de amoníaco con agua caliente se mueve hacia arriba hasta el separador en el cual el gas amoníaco sube hacia el condensador con la presión necesaria gracias a la ayuda del helio, y el agua caliente cae y regresa al absorbedor.

En el condensador el sistema elimina calor con la ayuda de aletas y se licua. Luego al descender hacia el evaporador baja su presión y entra al evaporador amoniaco liquido a baja presión. En este dispositivo el amoniaco hierve absorbiendo calor del ambiente. El amoniaco en forma de vapor pero a baja presión regresa al absorbedor en el cual se encuentra con el agua en baja concentración y se vuelve a mezclar con ella y se repite el ciclo.

### **3.7. Tipos de Mezclas usadas en sistemas de refrigeración por Absorción**

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

Las tres sustancias tienen un comportamiento muy favorable con el medio ambiente, como se resume en la tabla siguiente, si bien se

precisan precauciones especiales para la manipulación y mantenimiento de los equipos que trabajan con Amoniaco, dada la peligrosidad de esta sustancia para el ser humano, sobre la que no es preciso abundar ya que es sobradamente conocida. Por lo que respecta al agua, solo cabe señalar la necesidad de controlar su pureza cuando se emplea como refrigerante, más por lo que puede afectar al rendimiento de los equipos que por sus efectos sobre las personas y el medio ambiente para los que es completamente inocua.

<b>REFRIGERANTES Y ABSORVENTES</b>			
	<b>R-717 AMONIACO</b>	<b>R-718 AGUA</b>	<b>BrLi SAL DILUIDA</b>
<b>Estabilidad química</b>	Media	Alta	Alta
<b>Toxicidad</b>	Ata	Nulo	Baja
<b>Disponibilidad</b>	Baja	Alta	Alta
<b>Efectos contaminantes</b>	Baja	Nulos	Nulos
<b>ODP</b>	0	0	0
<b>GWP</b>	0	0	0
<b>TEWI</b>	Bajo	Nulo	Bajo
<b>Calor lat. Vaporización.</b>	1.25 MJ/MKg	2.5 MJ/MKg	N/A
<b>Costo</b>	Medio	Bajo	Medio

**Tabla 1: Tipos de refrigerantes y absorbentes**

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

### **3.7. Justificación de la mezcla seleccionada.**

Con el fin de optimizar la selección de la mezcla que se utilizará para el diseño del acondicionador, se debe tomar en cuenta los siguientes factores con los cuales debe cumplir:

- © Propiedad térmicas y de transmisión de calor, que juegan un papel fundamental en la concepción, y rendimiento del equipo.
- © Propiedades físicas, químicas, medioambientales y fisiológicas, que determinan la elección de los materiales y las medidas que permiten garantizar la seguridad de los equipos y de las personas.

- © Condiciones de operación, es decir la temperatura que se requiere en el evaporador, así como también el servicio que se va a prestar ya sea para refrigeración o enfriamiento de productos, o climatización de ambientes.
- © Disponibilidad y costo de las sustancias y materiales que serán utilizados.

Tomando en cuenta todos estos factores, la mezcla seleccionada es la de amoníaco con agua, fundamentalmente por las excelentes propiedades térmicas y de transmisión de calor que posee el amoníaco como refrigerante, la gran afinidad que tiene el absorbente agua con el vapor amoníaco, además de ser ambos elementos mutuamente solubles en un rango muy amplio de condiciones de operación y no presentar el problema de cristalización.

La mezcla amoníaco/agua ha tenido excelentes resultados en equipos de absorción domésticos e industriales donde la temperatura requerida es cercana o menor a  $0^{\circ}\text{C}$ , para el acondicionador de aire solar se pretende obtener una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , para lo cual la combinación puede ser muy bien utilizada.

La disponibilidad y el bajo costo del agua y del amoníaco en comparación con otras mezclas, es un factor de mucha importancia,



ya que se pretende que la construcción del equipo sea lo más económica posible.

Una de las desventajas de utilizar este tipo de mezcla es por la toxicidad del amoniaco, pero como el equipo será colocado en la parte externa de la habitación no se tendrá mayor problemas, por otro lado, el amoniaco es de fácil detección lo que permite corregir cualquier falla o detener el funcionamiento del equipo para evitar fugas mayores que contaminen el ambiente o que atenten contra la seguridad de las personas.

El amoniaco no es compatible con los componentes cuprosos, esto se debe considerar para seleccionar el material de las tuberías a utilizar.