



<http://www.energuia.com>

Refrigeración por absorción. Interés energético e impacto ambiental

Por José María CANO MARCOS

Ingeniero Industrial.

Miembro del Comité Científico de ATECYR

Las primeras aplicaciones industriales de los principios termodinámicos de la absorción de un vapor por un líquido, con el fin de conseguir la refrigeración de otro líquido, datan de los primeros años 30.

La comercialización a mayor escala de plantas frigoríficas de absorción con ciclo Amoniaco-Agua comienzan en los 40 y la puesta en el mercado de las primeras plantas con ciclo agua-Bromuro de Litio tiene lugar a principio de los 50.

Los ciclos de absorción se basan físicamente en la capacidad que tienen algunas sustancias, tales como el agua y algunas sales como el Bromuro de Litio, para absorber, en fase líquida, vapores de otras sustancias tales como el Amoniaco y el agua, respectivamente.

FUNDAMENTOS FISICOS

A partir de este principio es posible concebir una máquina en la que se produce una evaporación con la consiguiente absorción de calor, que permite el enfriamiento de un fluido secundario en el intercambiador de calor que actúa como evaporador, para acto seguido recuperar el vapor producido disolviendo una solución sali-

na o incorporándolo a una masa líquida. El resto de componentes e intercambiadores de calor que configuran una planta frigorífica de Absorción, se utilizan para transportar el vapor absorbido y regenerar el líquido correspondiente para que la evaporación se produzca de una manera continua.

En los ciclos de absorción hablamos siempre de agente absorbente, designando así a la sustancia que absorbe los vapores, y de agente refrigerante, o agente frigorífico, a la sustancia que se evapora y da lugar a una producción frigorífica aprovechable. Serían absorbentes el agua y la solución de Bromuro de Litio, y refrigerantes el Amoniaco y el agua destilada, en los ciclos de absorción Agua-Amoniaco y Bromuro de Litio-Agua, respectivamente.

Para conseguir una mejor comprensión del funcionamiento de un ciclo de absorción, haremos una comparación entre este y un ciclo de

*De las jornadas técnicas "Climatización 2001"

refrigeración por compresión mecánica, de uso más extendido y, por tanto más conocido a todos los niveles técnicos.

En un ciclo de compresión mecánica, los vapores del agente frigorígeno (como debe ser denominado) que se producen en el evaporador de la máquina dando lugar a la producción frigorífica, son aspirados por un compresor que ejerce las funciones de transportar el fluido y de elevar su nivel de entalpía. El vapor comprimido a alta presión y con un elevado nivel térmico se entrega a un intercambiador de calor, el condensador, para que ceda su energía a otro fluido, que no es utilizable para la producción frigorífica, y cambie de estado, pasando a ser líquido a alta presión y temperatura, y por lo tanto tampoco utilizable para la producción frigorífica. Este líquido relativamente caliente se fuerza a pasar a través de un dispositivo en el que deja parte de la energía que contiene, por fricción mecánica fundamentalmente, y a partir del cual entra en una zona del circuito frigorífico en la que la

presión se mantiene sensiblemente más baja, debido a que el compresor está aspirando de ella, que la presión de saturación que correspondería en el equilibrio a la temperatura a la que se encuentra el agente frigorígeno en estado líquido. Este desequilibrio entre las presiones y temperaturas de saturación y las reales a las que el refrigerante se encuentra, origina la evaporación parcial del líquido, que toma el calor latente de cambio de estado de la masa del propio líquido, enfriándola hasta la temperatura de saturación que corresponde a la presión a la que se encuentra, punto en el que la evaporación se interrumpe. El refrigerante en estado líquido a baja temperatura entra en el evaporador, donde se evaporará, cerrando así el ciclo frigorífico.

En la máquina de absorción se produce un proceso similar: El refrigerante, agua o amoníaco, se evapora en el evaporador tomando el calor de cambio de estado del fluido que circula por el interior del haz tubular de este intercambiador. Los vapores producidos se absor-

ben por el absorbente, agua o solución de bromuro de litio, en un proceso de disolución endotérmico que requiere de refrigeración externa para que la solución se mantenga en condiciones de temperatura correctas y no aumente la presión en la cámara en la que se produce la absorción y que se denomina Absorbedor. En este circuito de refrigeración externa se utilizan normalmente torres de refrigeración de agua de tipo abierto o cerrado. El agua enfriada en la torre se hace circular a través del interior del haz tubular de otro intercambiador que se encuentra situado en el interior de la cámara del absorbedor y sobre el que se rocía el absorbente para facilitar el proceso de la absorción. La masa de absorbente conteniendo el refrigerante absorbido se transporta, mediante bombeo, hasta otro intercambiador de calor cuya función es separar el refrigerante del absorbente, por destilación del primero. Este intercambiador de calor se denomina Concentrador o Generador y es de tipo inundado. Por su haz tubular se hace circular el fluido caliente, normalmente agua o vapor de agua, que constituye la fuente principal de energía para el funcionamiento del ciclo de absorción, y que procede como efluente de cualquier tipo de proceso en el que se genere calor residual.

En el concentrador se produce la ebullición del refrigerante, que se separa del absorbente y que como consecuencia aumenta su concentración, en el caso de solución salina, o su pureza cuando se trata de agua, para que pueda ser utilizado de nuevo en el proceso

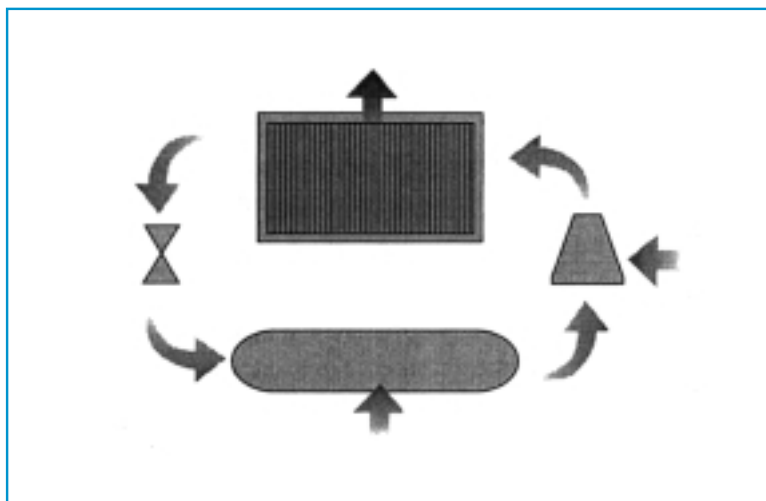


Figura 1.

de absorción. El FLUJO de absorbente vuelve al absorbedor siguiendo un camino mas o menos diferente según cada tipo de máquina, mientras que el flujo de vapores del refrigerante destilado en el concentrador pasa, por simple diferencia de presión, a otro intercambiador de calor por el interior de cuyo haz tubular circula agua procedente también de la torre de refrigeración, y que se denomina condensador porque alrededor de su haz tubular se produce la condensación de los vapores del agente frigorífico para volver al estado líquido.

El líquido obtenido en el condensador se canaliza hacia la cámara de evaporador, por gravedad y por diferencia de presión, ya que esta se encuentra a una presión inferior a la de la cámara del condensador. Cuando el líquido llega a la cámara del evaporador sufre un fenómeno idéntico al comentado en la descripción hecha del ciclo de compresión mecánica, y se eva-

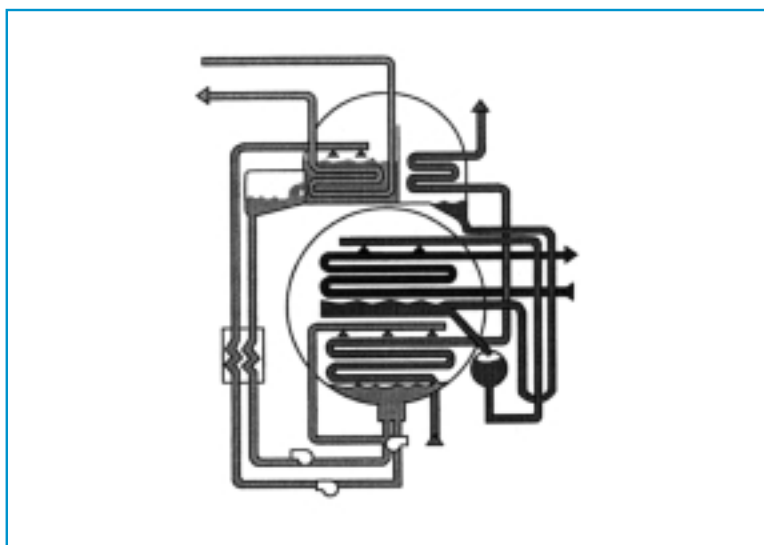


Figura 3

pora parcialmente, llevando la temperatura de la masa del líquido a la temperatura de saturación que corresponde a la presión en la que la cámara del evaporador se encuentra. De esta forma, el líquido frío está en condiciones de tomar calor del fluido que circula por el interior del haz tubular del evaporador, hasta evaporarse, cerrando así su ciclo¹.

Si comparamos ambos ciclos, comprenderemos que en el de absorción los intercambiadores de calor del Absorbedor y del Condensador, junto con la bomba o bombas que hacen la función de transporte del absorbente, equivalen a su trabajo al compresor del ciclo de compresión mecánica. Mientras que en el evaporador, condensador y dispositivo de expansión de las máquinas de absorción se desarrollan procesos similares, por no decir idénticos, a los que tienen lugar en sus homónimos del ciclo de compresión mecánica. Sería válido referirse al Concentrador y Condensador de la máquina de absorción como Sector de Alta Presión, y al Absorbedor y Evaporador como Sector de Baja Presión, siguiendo la similitud con el ciclo de compresión mecánica.

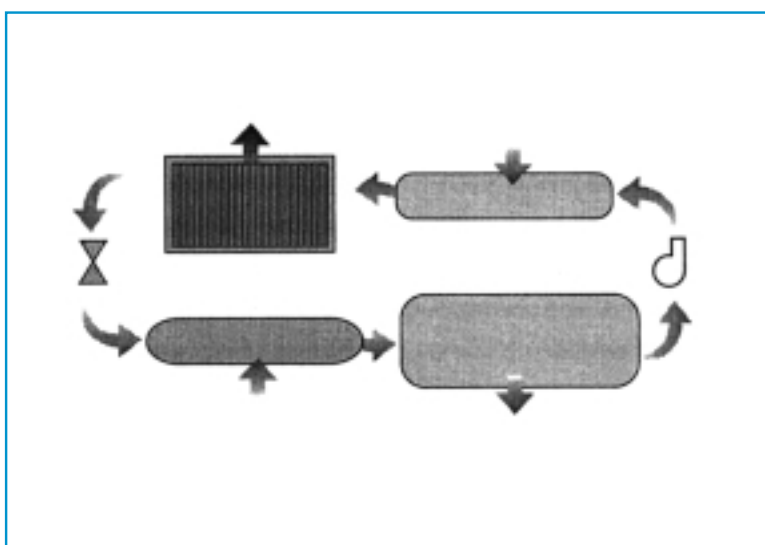


Figura 2.

AMBITO REGLAMENTARIO

Nuestra Reglamentación no hace referencias muy explícitas a las aplicaciones de plantas fri-

¹ Absorption refrigeration. Air-Conditioning Clinic, The Trane Company, 1985.

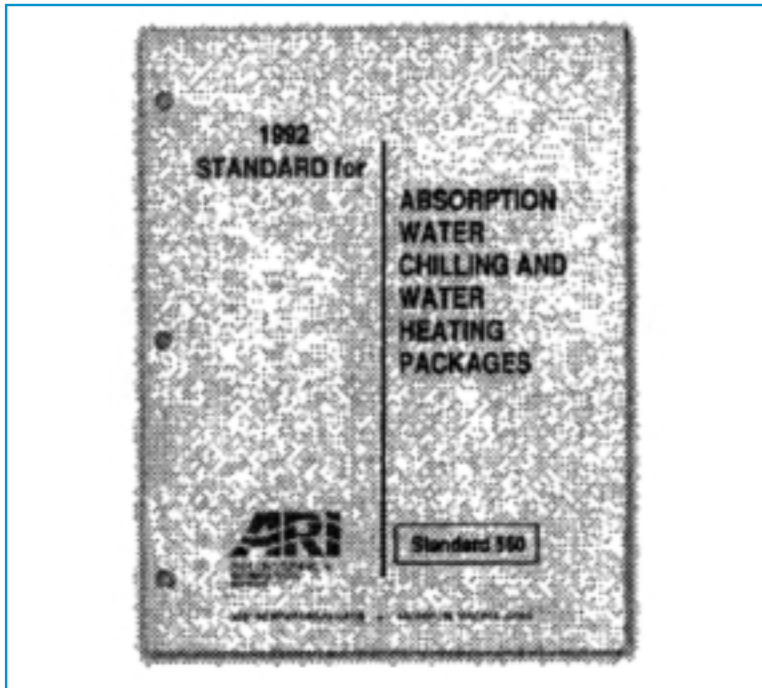


Figura 4.

goríficas y sistemas de Absorción.

El anterior Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua Caliente Sanitaria⁽²⁾, en su IT.IC, 11.4.3., establecía una relación simple de los componentes que debían incorporar las plantas de absorción, así como de los controles mínimos que deberían estar disponibles en cada equipo.

La IT.IC. 04.2.3., en su apartado d), se refería específicamente a los sistemas de absorción, autorizando su utilización exclusivamente cuando se dispusiera de una fuente de energía térmica gratuita o residual de carácter permanente o bien cuando no existiera posi-

bilidad de utilización de energía eléctrica, o en casos excepcionales expresamente autorizados. En todos los casos, las exigencias de rendimiento mínimo para instalaciones con equipos accionados térmicamente, según la tabla 4.5 de esta norma, eran del 48%, para equipos de concentrador calentado directamente por la combustión de combustibles líquidos o gaseosos, o del 68% para equipos con concentrador de calentamiento indirecto por vapor o agua caliente. Valores bastante altos, sobre todo en este último caso.

Por su parte el actual R.I.T.E.³, es aún menos explícito, aunque preconiza las instalaciones de cogeneración, y todos aquellos sistemas que utilizan energías

térmicas residuales, solo hace mención directa de los equipos de absorción en la ITE 04.11.3 e), en cuanto a la documentación exigible.

Tratándose de un reglamento específico para instalaciones destinadas al confort humano en la edificación, es lógico que el R.I.T.E. no se ocupe de las instalaciones de refrigeración por absorción con mayor detalle, dado que estas son de mayor interés en aplicaciones industriales y de proceso.

Tampoco hay actualmente ninguna Norma UNE específica para equipos de absorción, y los reglamentos de Recipientes a Presión y de Seguridad de Plantas e Instalaciones Frigoríficas, solo se refieren a estos con carácter general.

La normativa fuera de España es también bastante escasa, solo la norma ARI 560/1992 (Absorption water chilling and water heating packages)⁴, establece criterios de diseño y de aplicación para equipos de refrigeración por ciclos de absorción, así como para la realización de ensayos de prestaciones térmicas, esta norma es prácticamente la única específica de aplicación general para estos equipos.

En conclusión, no se puede decir que la reglamentación aplicable a la maquinaria frigorífica de absorción y a su utilización sea extensa, lo cual no es beneficioso, en absoluto, ya que la falta de definición en muchos aspectos dificulta, o cuando menos limita, la especificación de este tipo de sistemas salvo en aplicaciones en las que su efectividad económica es evidente.

² Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y A.C.S., Real decreto 1618/1980.

³ Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios RITE, Real Decreto 1751/1998.

⁴ ARI Standard 560-1992, Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 1992.

**CONSIDERACIONES
SOBRE OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO**

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

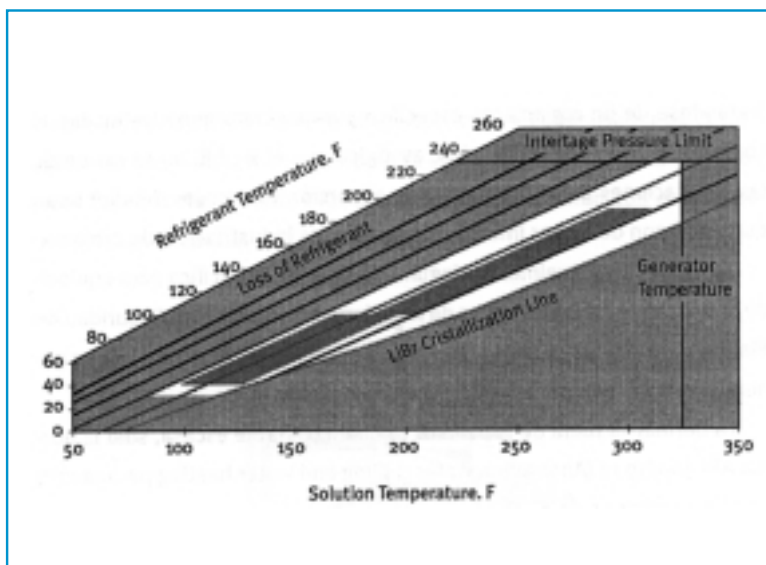


Figura 5. Ábaco de Equilibrio para Soluciones Agua-BrLi.

fundamental para comprender si la producción frigorífica sé esta llevando a cabo correctamente, etc. En el servicio de las máquina 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 mecánica⁵.

CRITERIOS ACTUALES DE DISEÑO

Cuando las primeras plantas de absorción aparecieron en el mercado la tecnología electrónica estaba en sus albores, para su control y regulación se utilizaron dispositivos neumáticos de forma generalizada. Con estos controles, aún ejerciendo correctamente su función, la hermeticidad de la máquina se hacía mayor, si cabe, para los operadores, y era laboriosa y complicada la interpretación del comportamiento de una máquina en unas condiciones de estado determinadas.

Hoy en día estas dificultades de acceso e interpretación se han eliminado prácticamente, y es mucho más sencillo e inmediato analizar el comportamiento de un equipo en unas condiciones dadas. Este gran avance se debe, fundamentalmente al desarrollo y perfeccionamiento de las aplicaciones de la microelectrónica al control y gestión de la maquinaria en general, que tam-

bién se ha hecho patente en las máquinas frigoríficas en los últimos años.

La aplicación de dispositivos de control basados en microprocesadores, permite la utilización de todo tipo de sensores de temperatura, presión y concentración, y la utilización de lógicas de control que: por una parte ponen al alcance de los operadores, de manera inmediata, una información importantísima e imprescindible para el manejo de la máquina, cuya obtención era como mínimo, muy laboriosa con los controles utilizados anteriormente; y por otra facilitan un funcionamiento más estable y seguro de las máquinas.

En materia de seguridad y estabilidad de funcionamiento, los nuevos criterios que se aplican al diseño y la disponibilidad de tecnologías más potentes, han aportado grandes mejoras. Así por ejemplo, se ha conseguido que los procesos de entrada en carga, puesta en régimen y parada de las máquinas, se desarrollen de manera equilibrada y sin riesgo de que se produzcan fenómenos perturbadores. La “temible” cristalización, causa de la mayoría de las incidencias y paradas de equipos de absorción con ciclos Bromuro de Litio/Agua en el pasado, es hoy en día, un fenómeno perfectamente controlable, y puede prevenirse sin demasiada dificultad mediante controladores de nivel y de concentración y válvulas automáticas. La presencia de incondensables en el interior de la máquina, indeseable por el efecto

negativo que ejerce sobre la producción frigorífica, es hoy fácilmente combatible mediante el empleo de sistemas automáticos de purga de elevadísima eficiencia.

Finalmente, la adaptación de la producción a la demanda energética en cada aplicación se efectúa en las máquinas de última generación con gran efectividad, mediante procesadores de acción P.I.D. Y convertidores de frecuencia para el accionamiento de los motores de las bombas, con los que se consiguen mejoras sustanciales de la eficiencia de los ciclos y de los coeficientes de operación (C.O.P.) de los equipos.

Desde el punto de vista de resistencia mecánica también se han conseguido mejoras importantes. La utilización de aceros aleados de alta resistencia en la fabricación de las envolventes permite una construcción más ligera, y el empleo de tubos de materiales inoxidables o de alta resistencia a la corrosión, como el cuproniquel, en la fabricación de los haces tubulares de los intercambiadores de calor, facilita mejores rendimientos en la transmisión de calor al tiempo que alarga la vida útil de las máquinas.

El conjunto de mejoras accesibles, gracias a la utilización de nuevas tecnologías, junto con las ventajas que los ciclos de absorción ofrecen en lo relativo al aprovechamiento de energías residuales y su baja influencia en el deterioro del Medio Ambiente, en comparación con otros sistemas de refrigeración como más adelante comentaremos, hacen

⁵ ABS-04 Operation Manual, The Trane Company 1994.

que la Refrigeración por Absorción sea hoy considerada como opción interesante para la solución de problemas de refrigeración en procesos industriales y de climatización, para los que solo unos años atrás era descartada.

INTERES ENERGÉTICO

En todo proceso de definición de las posibles soluciones a un determinado problema de aprovechamiento energético, los considerandos 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 necesarias⁶.

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)”⁷. 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 Amoníaco/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

⁶ Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration using recovered heat, ASHRAE, 1995.

⁷ ASHRAE Fundamentals Handbook, SI Edition, 1997.

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 coge-

neración, la aplicación de sistemas de absorción para la producción frigorífica será competitiva e interesante (*Application Guide for absorption cooling/refrigeration using recovered heat ASHRAE, 1995*)

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.s 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.

REDUCCIÓN DE CONSUMOS PRIMARIOS

De todo lo comentado hasta ahora puede extraerse otra conclusión importante; Teniendo en cuenta que los sistemas de absorción son tanto más interesantes, económicamente hablando, cuanto más barata es la energía térmica disponible para el accionamiento de las máquinas, está claro que este tipo de equipos son especialmente útiles para recuperar calor de deshecho, y esta particularidad permite enfocar el problema de aprovechamiento energético desde otro punto de vista.

Los sistemas de absorción no solo hacen posible la utilización de energías térmicas que serían evacuadas a la atmósfera de no utilizarse estos sistemas para su recuperación y aprovechamiento, sino que además, al mismo tiempo, evitan el consumo de energías más caras, fósiles o eléctricas, para su utilización en la producción frigorífica. Es decir, de alguna manera, dan lugar a un doble ahorro de energía; uno por la recuperación de energías desechables y otro por la reducción de consumos primarios en la producción de energía eléctrica.

EXPERIENCIAS EN EL DISEÑO DE INSTALACIONES

El cálculo de cualquier instalación de plantas frigoríficas de absorción debe efectuarse, como en cualquier otro tipo de instalación, con el rigor necesario para que se consigan las prestaciones esperadas una vez la instalación se encuentre en servicio. El elevado coste

inicial de los equipos condiciona muchas veces a los proyectistas en el sentido de intentar ajustar por defecto la capacidad útil de las plantas de absorción, para así reducir su tamaño y su coste. La determinación de la potencia a instalar en absorción debe realizarse siempre a partir de los valores de demanda máxima a los que los equipos se van a ver sometidos en las condiciones de diseño.

No hay que olvidar que el rendimiento de la máquina de absorción va a efectuarse directamente por la calidad y la cantidad de energía aportada a su concentrador, así como por la variación de los niveles energéticos de los fluidos circulantes por su evaporador y absorbedor-condensador, como ya hemos comentado. Esto quiere decir que el proyectista debe poner un especial cuidado en verificar que se cumple la ecuación de equilibrio del sistema en cualquier condición, pero sobre todo en la de carga máxima.

En toda máquina de absorción se debe cumplir la siguiente ecuación de equilibrio térmico:

$$H_g + H_c = H_a + H_e$$

En la que:

H_g : Calor aportado al concentrador.

H_e : Calor aportado al evaporador.

H_a : Calor cedido en el absorbedor.

H_c : Calor cedido en el condensador.

Si los caudales de agua, o vapor, en circulación por los distintos intercambiadores, difieren de los de proyectos en las condiciones reales de una instalación dada, o bien las temperaturas de los fluidos son distintas de las definidas, el ciclo frigorífico de la máquina se autoequilibrará, en la medida de sus posibilidades, modificando los saltos térmicos y las condiciones de trabajo del equipo, para tratar de conseguir que se igualen los términos de la ecuación anterior. Esto, lógicamente llevará a la máquina a funcionar en unas condiciones que se parecerán poco a aquellas para las que fue proyectada. Y que será muy difícil corregir, por no decir imposible, una vez la instalación en servicio.

Por ello permítasenos insistir en la importancia que tiene que el diseñador de la instalación se asegure muy bien "a priori" de que las condiciones de cálculo van a ser realmente alcanzables, cuando la instalación se ejecute. Deberá verificar principalmente los

siguientes factores para las condiciones de diseño a plena carga:

- Caudal real de energía disponible a aportar al concentrador; gasto de vapor a la presión de diseño, o caudal de agua caliente a la temperatura máxima alcanzable para el dimensionamiento de la planta enfriadora.
- Caudal de agua nominal en el evaporador y temperaturas de entrada y salida de agua.
- Caudal de agua nominal a través del absorbedor y condensador y temperaturas máxima y mínima alcanzables en la torre de recuperación.
- Capacidad real de disipación de calor en la torre de recuperación, en las condiciones nominales de diseño, para los caudales y temperaturas anteriores.

A partir de estos parámetros verificará que la ecuación de equilibrio se cumple.

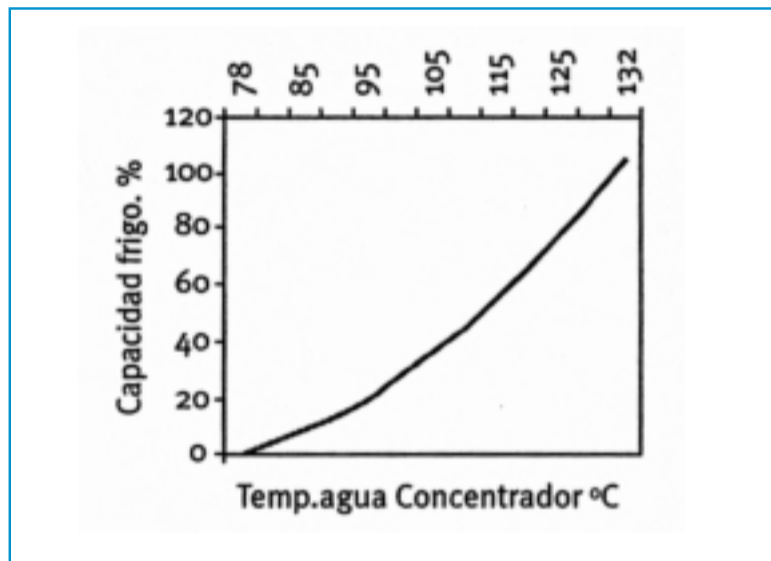


Figura 6. Relación entre Capacidad Frigorífica y Energía aportada.

Para enfatizar la importancia de estas comprobaciones, comentaré un error de cálculo que ha dejado de ser anecdótico para hacerse típico, dada la frecuencia con que se produce: En el diseño de sistemas de cogeneración se da la tendencia de tratar de escatimar en el diseño de la planta o plantas de absorción que van a encargarse de aprovechar el calor de refrigeración de los grupos. Es evidente que, cuanto mayor sea el nivel térmico de la energía aportada al concentrador de la máquina, mayor es el rendimiento de esta para una capacidad de producción frigorífica de diseño determinada y, consecuentemente, son menores su tamaño y su coste.

Por su parte, los grupos eléctricos, sobre todo si son accionados por motores de ciclo Otto o Diesel, tienen mejores rendimientos cuando sus temperaturas de trabajo se mantienen en valores inferiores a los máximos admisibles a régimen. La tendencia es a dimensionar las plantas de absorción para valores de entrada de agua caliente al concentrador coincidentes con las temperaturas límite de trabajo de los motores. En el funcionamiento real de la instalación, estos valores límite no pueden mantenerse durante periodos de tiempo prolongados, ya que repercuten negativamente en el rendimiento de los motores e incluso originan paradas de estos por seguridad de alta temperatura.

El resultado es que el agua caliente llega al concentrador, en condiciones estables de plena carga, a temperaturas que son inferiores hasta en

10°C al valor de diseño para el que la planta fue calculada. Y en estas condiciones el rendimiento de una planta de absorción definida cae de forma exponencial.

Por ejemplo; una enfriadora de simple efecto para una capacidad nominal de 2000 kW trabajando con agua en el concentrador a 130°C (condición nominal de diseño de la máquina), dará una producción de aproximadamente 1.200 kW con agua a 115°C, y no llegará a producir 800 kW con agua entrando al concentrador a 95°C. Consecuentemente se afectarán las condiciones de trabajo del evaporador, absorbedor y condensador, las temperaturas de agua en la torre disminuirán y la torre quedará sobredimensionada, y en el evaporador no será posible alcanzar las temperaturas de agua fría de diseño. La máquina trabajará con niveles de concentración muy bajos, y sin embargo estará sometida a riesgo de cristalización como consecuencia de trabajar con bajas temperaturas del agua de torre a la entrada del absorbedor.

Cuando exista la duda razonable de que en una instalación puedan darse situaciones como la comentada, es preferible dividir la potencia requerida entre dos e instalar dos plantas de absorción para el 50% de la demanda, cada una, aunque esto evidentemente, supone una inversión inicial mayor.

IMPACTO AMBIENTAL

Por último, pero no por me-

nos 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 Amoniac-Agua están más condicionados en su efecto medioambiental por la presencia del Amoniac 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 Amoniac-Agua las consideraciones que se harán sobre los ciclos Agua-Bromuro de Litio.

ABSORCIÓN VERSUS 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 utiliza-

ción 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 emisiones de gases invernadero (CO₂, 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 funcio-

namiento. 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 frigo-

rífica, 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.

REFRIGERANTES

En lo que a agentes frigoríficos se refiere, la balanza se inclina favorablemente a favor de la utilización de ciclos de absorción frente a los de compresión mecánica para la producción 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

REFRIGERANTES Y ABSORBENTES

	R-717 Amoniac	R-718 Agua	BrLi Sal Diluida
Estabilidad química	Media	Alta	Alta
Toxicidad	Alta	Nula	Baja
Disponibilidad	Alta	Alta	Alta
Efectos contaminantes	Bajos	Nulos	Nulos
ODP	o	o	o
GWP	o	o	o
TEWI	Bajo	Nulo	Bajo
Calor lat. vaporización.....	1,25 MJ/kg	2,5 MJ/kg	N/A
Coste	Medio	Bajo	Medio

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.

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 mas prevenciones.

APROVECHAMIENTOS ALTERNATIVOS

Por último no queremos dejar de comentar las posibilidades de los equipos de absorción para ser utilizados para la refrigeración y climatización en aplicaciones en las que se dispone de fuentes alternativas de energía. Energías no convencionales como la Geotérmica, la Biomasa y la Solar Térmica pueden ser empleadas como fuente de aporte energético a los concentradores de plantas

de absorción de simple efecto, para valores de temperatura de agua comprendidos entre 80 y 130°C, bien es verdad que con COPs bastante bajos, alrededor de 0,5, pero con la ventaja que supone la independencia de fuentes convencionales de energía y, sobre todo, el ahorro de combustibles fósiles y la reducción del impacto ambiental que su uso lleva aparejado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Absorption refrigeration. Air Conditioning Clinic, n° 2803-11-677, The Trane Company. La Crosse (Wisconsin) 1985.

(2) Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua Caliente Sanitaria (R.D. 1618/1980, de 4 de julio), y sus Instrucciones Técnicas complementarias (ITIC) (Orden de la Presidencia del Gobierno de 16 de julio de 1981).

(3) Reglamento de Instala-

ciones Térmicas en los Edificios (RITE), y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) (R.D. 1751/1998, de 31 de julio) (B.O.E., n° 186, de 5 de agosto de 1998).

(4) ARI (Air-Conditioning and Refrigeration Institute), Standard 560, Absorption water chiling and water heating packagesl, Arlington (Virginia), 1992.

(5) ABS-04 Operation Manual, The Trane Company, La Crosse (Wisconsin) 1994.

(6) Chad B. Dorgan, Steven P. Leight, Charles E.Dorgan, Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration Using Recovered Heat, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.), Atlanta (Georgia), 1995.

(7) ASHRAE Fundamentals Handbook, SI Edition, ASHRAE (American Society of heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc), Atlanta (Georgia), 1997. ■