

CLIMATIZACIÓN 2007
FORO CLIMA – JORNADAS TÉCNICAS

**REFRIGERACIÓN USANDO
ENERGÍA SOLAR TÉRMICA**

*Autor: Francesc Padrós Corominas
de ABSORSISTEM, S.L.*

Introducción.

Dos preocupantes circunstancias de nuestro tiempo convergen en la necesidad de disponer de fuentes de energía alternativas a las normalmente utilizadas: la localización y agotamiento de las de origen fósil y la contaminación atmosférica como consecuencia de su uso. La primera de ellas fija un horizonte no muy lejano para agotar las reservas mundiales y es causa de violentos conflictos para lograr su control, mientras que la segunda es la causa principal del calentamiento del planeta poniendo en grave riesgo su equilibrio vital.

Frente a esta problemática, la necesidad de utilizar fuentes energéticas renovables o gratuitas y que a la vez no sean contaminantes, se ha convertido en una necesidad global frente a los intereses económicos y políticos que por desgracia siguen con frecuencia anteponiéndose a ello. No obstante, la gravedad de la situación está dando lugar a acuerdos internacionales encaminados a establecer límites e invertir este proceso. El más significativo de ellos es sin duda el firmado en 1997 en la ciudad japonesa de Kyoto en el cual se fija como objetivo el reducir las emisiones de gases responsables del efecto invernadero durante el período 2008 a 2012, en al menos un 5% respecto a 1990. A pesar de que el Protocolo de Kyoto no haya sido todavía suscrito por algunas de las principales potencias de nuestro tiempo, sí lo ha estado por la Comunidad Europea y en consecuencia ha determinado un grado de compromiso de España en el cumplimiento de sus directrices.

Entre los acuerdos suscritos por nuestro gobierno, figura que las emisiones de dióxido de carbono no deberían crecer más del 15% en el período comprendido entre 1990 y 2008, mientras que las cifras facilitadas por el secretario general para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático, D. Arturo Gonzalo Aizpiri, durante la presentación del borrador del Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión 2008-2012, prevén que las emisiones de CO₂ superarán en el 2008 el 37% las de 1990 ⁽¹⁾.

Una de las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono, es debida a la combustión de carbón y combustibles de origen fósil en las centrales térmicas de generación eléctrica. En la actualidad, la emisión específica media de CO₂ debida al parque de generación de energía eléctrica en España es de 455,6 toneladas de CO₂ por MW producido ⁽²⁾, por lo tanto, uno de los medios de abordar los dos problemas mencionados al inicio, la dependencia de combustible fósiles y la contaminación atmosférica, debe consistir en reducir el consumo eléctrico.

Por otra parte, sabemos que el incremento de la demanda eléctrica ha desplazado el máximo consumo al período estival debido al uso de los equipos frigoríficos necesarios para el acondicionamiento de aire, provocando además grandes puntas de intensidad que llegan a ser causa de graves interrupciones generales de suministro y de incendios forestales debidos a sobrecargas en las líneas de transporte. Según el IDAE, el consumo eléctrico en la refrigeración de

⁽¹⁾ La Vanguardia digital 12/07/2006

⁽²⁾ Según el CENEAM, Centro Nacional de Educación Ambiental

los edificios en España supone el 11,1% del total y el 98% de él corresponde al sector terciario ⁽³⁾.

En consecuencia, resulta evidente que uno de los sectores donde es conveniente actuar para limitar su avidez de consumo eléctrico, es el de la climatización. Hay diversas medidas a tomar para lograrlo sin reducir la demanda de confort exigida por la sociedad de nuestro tiempo. Mejorar el rendimiento de los equipos es una de ellas, pero no parece que puedan obtenerse mejores sustantivas después de los avances logrados durante las últimas décadas. En cambio, el fomento de la utilización de energías alternativas y mejor aún si estas son renovables o gratuitas, resulta una opción altamente atractiva que en el sector de la climatización puede orientarse hacia el aprovechamiento de la energía térmica obtenida de la radiación solar,

El ciclo de absorción transforma el calor en refrigeración.

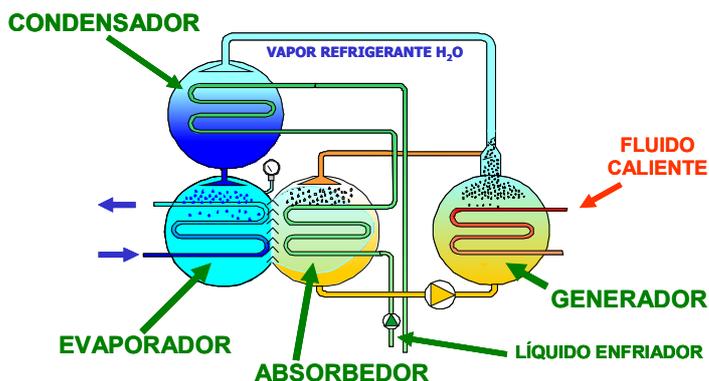
En realidad, la disponibilidad de recursos técnicos para hacer realidad esta opción existe desde hace muchos años, aunque se haya empleado mayormente para aprovechar sobrantes térmicos industriales en vez de utilizar calor captado de la radiación solar. Se trata de las plantas basadas en el ciclo frigorífico de absorción que permite utilizar la energía térmica para - al igual que en el ciclo clásico de compresión - bombear calor desde un medio a enfriar hasta un sumidero de calor. Recordemos que esta técnica fue la primera utilizada para la producción continua de hielo y la que hizo posible en 1875 transportar carne congelada desde Buenos Aires, hasta el puerto de Le Havre, a bordo del buque Paraguay, dotado de una de estas plantas fabricadas por su inventor Ferdinand Carré. Entre los distintos modelos que se fabricaron por aquel entonces, había incluso un modelo portátil que consumía aproximadamente 3 kg de carbón vegetal para obtener 1 kg de hielo. Fue asociada a esta industria de fabricación de hielo que apareció la RT (Refrigeration Ton), todavía muy utilizada en mercados como el norteamericano o el japonés.

En las máquinas por ciclo de absorción, el efecto frigorífico se obtiene, al igual que en el de compresión, mediante la evaporación de un fluido. No obstante, mientras que en el proceso de frío por compresión se realiza una compresión mecánica del vapor refrigerante aspirado del evaporador, en el ciclo de absorción el vapor es previamente absorbido por un líquido conteniendo un producto absorbente del refrigerante para ser a continuación sometido, en fase líquida, a una compresión de origen térmico.

El principio de funcionamiento de los sistemas de absorción se basa en la afinidad fisicoquímica que tienen entre ellas ciertas sustancias, por lo que se favorece el proceso de absorción química. Una de las sustancias (la más volátil) actúa como refrigerante y la otra como absorbente. Las parejas de compuestos comúnmente usados por los fabricantes de estos equipos son el agua y el amoníaco, o el bromuro de litio y el agua.

⁽³⁾ Extraído del documento "Aire, acondicionado a nuestras necesidades reales" publicado por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía Dependiente del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio).

Figura 1. Ciclo frigorífico de absorción



La representación esquemática del funcionamiento del ciclo de absorción, se ilustra en la *figura 1*. El refrigerante, al entrar en el **evaporador** que se encuentra a una presión sensiblemente inferior a la del recipiente condensador del que procede en estado líquido, hierve tomando el calor de cambio de estado del fluido que circula por el interior del haz tubular de

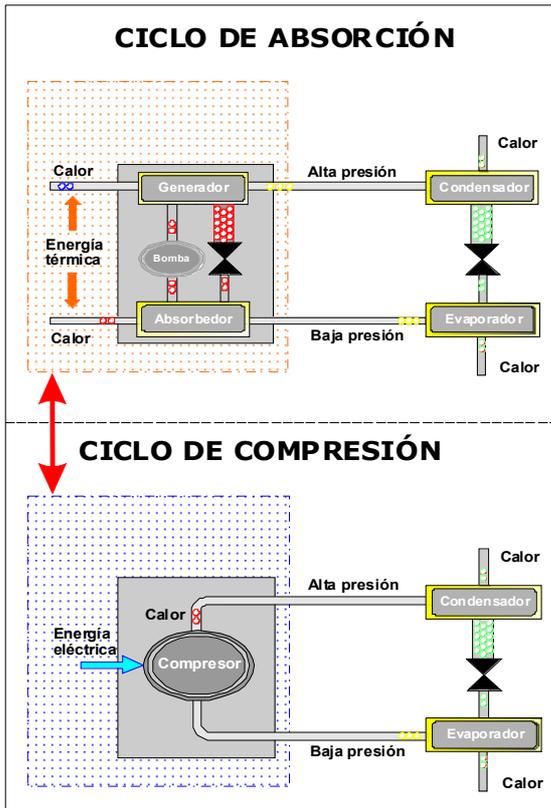
este intercambiador. El refrigerante en estado vapor es absorbido por el producto absorbente en la cámara contigua llamada **absorbedor**, con la que comparte espacio y presión. La absorción es un proceso de disolución endotérmico que requiere un medio externo de enfriamiento para mantener la temperatura de la solución y evitar que aumente la presión en este espacio común. A continuación, la masa de absorbente que ya contiene el refrigerante absorbido, se transporta, mediante bombeo que hace también aumentar la presión, hasta otro intercambiador de calor cuya función es volver a separar el refrigerante del absorbente, por destilación del primero. Este intercambiador de calor se denomina **generador** y es el que recibe en su lado primario el calor que aporta la energía necesaria para lograr el funcionamiento del ciclo, mientras que por el secundario circula la solución de refrigerante y absorbente. Este calor puede lograrse por combustión o bien recibirlo de un fluido caliente como agua o vapor de agua de cualquier procedencia, pero preferentemente residual o gratuito.

En el generador, el calor aportado hace hervir el fluido refrigerante separándolo de la solución absorbente, la cual y debido a ello, aumenta su concentración si se trata de una solución salina o su pureza si se trata de agua, de forma que crece también su capacidad de absorber refrigerante cuando de nuevo se encuentre con él en el absorbedor, que es el destino de ésta cuando sale del generador.

Mientras, el flujo de vapor refrigerante destilado en el generador, pasa por diferencia de presión a otro intercambiador de calor denominado **condensador** en el cual es enfriado por medios externos hasta su punto de rocío y lograr la condensación del agente frigorífico.

Este líquido refrigerante situado en el condensador y sometido todavía a alta presión, pasa al evaporador por diferencia de presión donde se evapora parcialmente, llevando la temperatura de la masa del líquido a la temperatura de saturación que corresponde a la presión a la que se encuentra la cámara del evaporador. De esta forma, el líquido refrigerante está en condiciones de tomar calor del fluido que circula por el interior del circuito secundario del evaporador, hasta evaporarse totalmente, cerrando así el ciclo.

Figura 2 Comparación ciclos frigoríficos de absorción y de compresión



Por similitud con el ciclo de compresión mecánica, es igualmente válido referirse a la sección que comprende desde la bomba de solución hasta el condensador como la zona de **alta presión** y desde el evaporador hasta la aspiración de la bomba como la de **baja presión**, lo que significa que las similitudes desde el punto de vista termodinámico son muchas. Ver comparación entre los dos ciclos en la figura 2.

Cabe decir además, que en la práctica se añaden intercambiadores de calor entre el flujo de solución concentrada en su camino del generador al absorbedor y el de la solución diluida que fluye del absorbedor al generador, de manera a aumentar la eficiencia del sistema.

Como se ha dicho anteriormente, las parejas de fluidos comúnmente utilizadas, son el amoníaco y el agua, o bien bromuro de litio (LiBr) y agua. En

el primero de ellos el refrigerante es el amoníaco y el agua es el absorbente, mientras que en el segundo el refrigerante es el agua siendo el LiBr el absorbente.

Para lograr que el agua actúe como refrigerante al evaporarse, es necesario mantener en el evaporador una presión absoluta de 0,76 kPa a la cual el agua hierve a 3°C. El LiBr por su parte, es una sal similar a la sal común que posee una alta afinidad con el agua en la cual se disuelve fácilmente. Esta característica hace que en el absorbedor, el vapor resultante de la evaporación de agua en el evaporador, sea absorbido por el LiBr añadiéndose a la solución concentrada que procede al generador, diluyéndola para acceder de nuevo al generador.

Asimismo, en los ciclos que utilizan soluciones LiBr/H₂O a alta temperatura a llama directa o vapor, se acostumbra a dotar al circuito de un segundo generador de baja temperatura que aprovecha el calor contenido en el refrigerante evaporado y antes de que entre en el condensador, para obtener una segunda etapa de separación de la solución concentrada con el fin de lograr una mayor eficiencia del sistema. Es el ciclo denominado de **dobles efectos** para distinguirlo del básico anteriormente explicado y que se denomina de **simple efecto**.

En esta ponencia nos referimos a equipos que utilizan

Planta enfriadora por ciclo de absorción por agua caliente de 10 kW

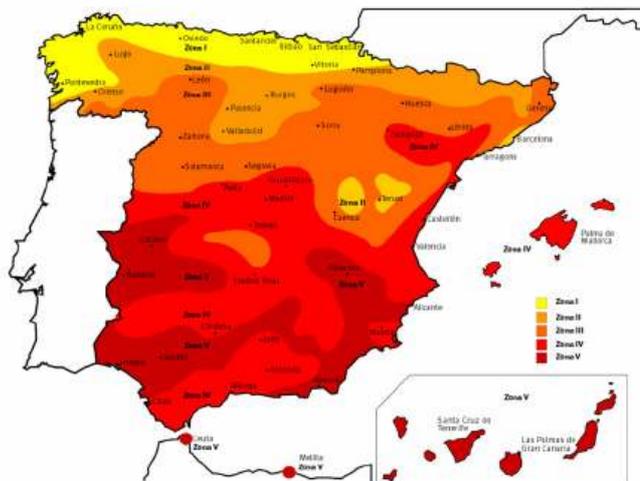


solución de LiBr y agua, en un ciclo de simple efecto, puesto que la temperatura del fluido térmico procedente de los captadores solares no permite hacer funcionar una segunda etapa de evaporación.

En este tipo de plantas, se consigue la capacidad frigorífica nominal entrando el agua caliente de generación a 88°C, pero siguen transformando la energía térmica en calor incluso con temperaturas de 68°C si bien, como es lógico, su capacidad frigorífica resulta proporcionalmente disminuida.

La radiación solar como fuente de energía gratuita.

Figura 3. Radiación solar anual en España



Zona I: $H < 3,8$
 Zona II: $3,8 \leq H < 4,2$
 Zona III: $4,2 \leq H < 4,6$
 Zona IV: $4,6 \leq H < 5,0$
 Zona V: $H \geq 5,0$
 H en kWh/m²

Disponer de energía térmica de origen solar, depende de la climatología, de la radiación que incide en cada punto de la geografía y en última instancia de la nubosidad. En la figura 3 se ilustra la radiación solar anual en España según publica el IDAE basándose en los datos facilitados por INM. Este mapa pone de manifiesto por sí mismo la disponibilidad de energía que tenemos a nuestro alcance si ponemos los medios técnicos adecuados y explica las medidas legislativas recogidas en el Código Técnico de la Edificación

aprobado el 17 de marzo de 2006 ⁽⁴⁾. En él, la voluntad de aprovechamiento de la energía solar se recoge particularmente en sus artículos 15.4 y 15.5 en los que se establece la obligatoriedad de dotar a los edificios de nueva construcción de los medios apropiados para obtener una mínima contribución solar en la preparación del agua caliente sanitaria y en la producción eléctrica.

Las obligaciones establecidas por el nuevo Código Técnico de la Edificación, cabe considerarlas conjuntamente con los distintos tipos de incentivos económicos ofrecidos por el IDAE a través de las Comunidades Autónomas. En el Anexo I se ofrece una tabla resumen de algunos de ellos.

La creciente instalación de campos de captadores térmicos solares destinados, no solo a cumplir con la contribución mínima solar para la preparación de agua caliente sanitaria, sino para obtener parte del calor necesario en invierno, sugiere su optimización usándolo en verano para atender el servicio de refrigeración. Además, ello permite disipar provechosamente el calor captado y no utilizado que de otro modo debe eliminarse en baterías exteriores ventiladas que implican un coste auxiliar para atender el funcionamiento de los motores de los ventiladores.

⁽⁴⁾ Aprobado en el Real Decreto 314/2006 publicado en el BOE de fecha 28/03/06.

Tabla 1. Radiación solar en diversas ciudades españolas

	Radiación en kW/m ²		Inclinación óptima anual en °
	Anual	Verano	
MADRID	1.877,6	809,3	34
SEVILLA	1.946,5	786,7	33
A CORUÑA	1.436,3	619,1	35
BARCELONA	1.764,8	731,9	36
BILBAO	1.509,6	660,1	35
VALENCIA	1.762,2	718,9	35

Paneles orientados a S con inclinación óptima anual

para todo el año. Ver Tabla 1. Se trata de valores representando alrededor del 42% de la radiación total anual.

Figura 4 – Eficiencia en función temperatura agua caliente



Las plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción Li/Br/agua de simple efecto alimentadas con agua caliente a baja temperatura (<100°C), tienen una eficiencia del orden del 70% respecto a la energía térmica aportada, en condiciones nominales de agua refrigerada a 7°C, agua caliente a 88°C y agua de enfriamiento a 31°C. La eficiencia varía en la medida en que cambian estas temperaturas, como puede apreciarse en la figura 4. En cambio, las variaciones en la temperatura del agua caliente repercuten directamente sobre la capacidad frigorífica puesto que aquella es realmente la que aporta energía al ciclo, mientras que la temperatura de enfriamiento, que afecta a la condensación, repercute en la eficiencia como en cualquier ciclo frigorífico. Ver figura 5.

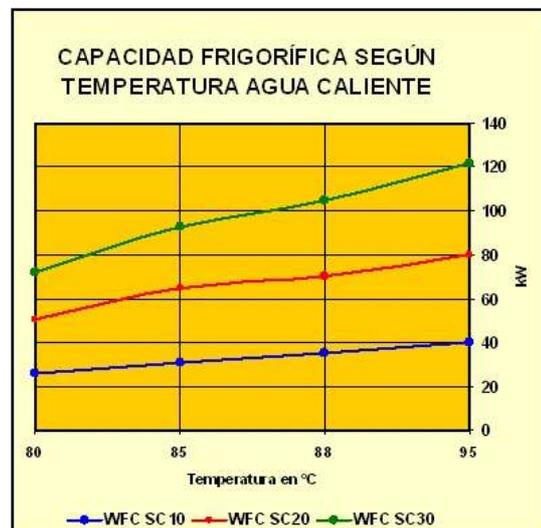
Para determinar la potencia frigorífica que se puede obtener de cada superficie de captadores solares, será necesario saber en primer lugar que cantidad de calor se logrará retener en función de la eficiencia del captador respecto a la irradiación solar incidente, según la fecha, la hora y la latitud, así como la orientación y la inclinación del captador.

Con el fin de formarse una idea, se ha confeccionado la Tabla 2 recogiendo para las 6 ciudades de referencia utilizadas en la Tabla 1, los datos correspondientes a 1 m² de captador solar plano y otro de tubos al vacío con las características que figuran en la Tabla 3

Si se hace una aproximación sobre el calor que se puede captar durante el período en que se requiere refrigerar los edificios, desde el 15 de mayo hasta el 15 de setiembre, se observa que la radiación puede ser entre 619 y 810 kW/m² de captador solar orientado al Sur y con el ángulo de inclinación más favorable

Las plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción Li/Br/agua de simple efecto alimentadas con agua caliente a baja temperatura (<100°C), tienen una eficiencia del orden del 70% respecto a la energía térmica aportada, en condiciones nominales de agua refrigerada a 7°C, agua caliente a 88°C y agua de enfriamiento a 31°C. La eficiencia varía en la medida en que cambian estas temperaturas, como puede apreciarse en la figura 4. En cambio, las variaciones en la temperatura del agua caliente repercuten directamente sobre la capacidad frigorífica puesto que aquella es realmente la que aporta energía al ciclo, mientras que la temperatura de enfriamiento, que afecta a la condensación, repercute en la eficiencia como en cualquier ciclo frigorífico. Ver figura 5.

Figura 5 – Refrigeración según temperatura del agua caliente



y aplicando para el cálculo la siguiente ecuación:

Tabla 3 – Datos cálculo captadores solares

	Unidad	Colector plano	Tubos al vacío
Rendimiento óptico η_o	%	84,0%	85,0%
Coefficiente pérdidas calor k_1	W/m ² /K	3,36	1,61
Coefficiente pérdidas calor k_2	W/m ² /K	0,013	0,008
Temp. líquido en el colector	°C	75	
Temperatura ambiente	°C	30	

Tomando de los datos reflejados en la Tabla 2 un valor medio de captación horaria desde las 10:00 hasta las 14:00 h, consideraremos 606 Wh/m² para captadores planos y 704 Wh/m² para captadores de tubos de vacío. Como sabemos que la eficiencia de las máquinas de absorción de simple efecto con agua caliente es del 70%, podemos determinar que para obtener 1 kW de refrigeración hace falta aproximadamente 2,4 m² de captadores solares planos o poco más de 2 m² ⁽⁵⁾ si son captadores formados con tubos de vacío.

De todas formas, este dato solo tiene como utilidad disponer de un valor de referencia previa para enfocar un estudio, pero no exime de la necesidad de realizar el cálculo específico para cada proyecto.

La utilización de plantas de absorción con energía solar térmica.

Por otra parte, la curva de demanda de refrigeración raramente coincide con la evolución de la radiación solar a lo largo del día. En la figura 6 se muestra el perfil de la carga frigorífica a cubrir en un restaurante y también el calor aportado por un campo de 100 m² de captadores solares térmicos. En esta figura puede verse claramente que hay una zona que cubre algo más de la mitad del día en la que el calor captado excede la demanda frigorífica, mientras que el resto es totalmente deficitario. Para gestionar el excedente térmico de determinadas horas y poder utilizarlo cuando la insolación sea insuficiente, será necesario acumular un volumen de agua caliente adecuado para poder disponer de su energía térmica en el momento oportuno. La potencia frigorífica de la que se dispondrá dependerá de la temperatura del agua almacenada en este depósito tampón en el momento de utilizarla. Ello requiere efectuar una simu-

⁽⁵⁾ Referidos a superficie de absorción.