

REFRIGERACIÓN SOLAR EN LA EDIFICACIÓN: PRESENTE Y FUTURO

Marcelo Izquierdo Millán

Departamento de Edificación y Habitabilidad, Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja (CSIC), Serrano Galvache, N° 4, 28033 Madrid.

Unidad Asociada de Ingeniería Térmica y de Fluidos CSIC-UC3M, Avenida de la
Universidad, N° 30, 28911 Leganés, Madrid.



RESUMEN

En este trabajo se hace una introducción al estado del arte de la producción de frío por absorción con la disolución bromuro de litio-agua utilizando como fuente de calor la energía solar. Con el objetivo de evaluar las posibilidades de la energía solar para cubrir las necesidades energéticas de las viviendas y edificios, se presenta el consumo de energía en dicho sector y después se particulariza para la climatización veraniega.

Al objeto de valorar las posibilidades de la energía solar se especifica el rango de temperaturas de trabajo de la máquina frigorífica de absorción de bromuro de litio. Se describe la tecnología solar disponible, especificando el tipo de colector solar apropiado a cada caso: plano (hasta 90°C) para máquinas de simple efecto, cuando la temperatura de condensación es menor de 38°C y de vacío o concentradores de baja concentración para máquinas de simple efecto condensando a temperaturas superiores a 38°C y temperaturas de hasta 115°C. A continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos durante el verano de 2003 con la instalación de energía solar de la Universidad Carlos III de Madrid, desarrollada por el Instituto C.C. Eduardo Torroja, la Universidad Carlos III de Madrid y Viessmann y que ha sido subvencionada por el Ministerio de Industria y Energía (Programa ATYCA) y la Consejería de Medioambiente de la Comunidad de Madrid.

Los sistemas de absorción, alimentados por energía solar, tienen un impacto ambiental muy reducido: no destruyen el ozono estratosférico; no generan potencial de efecto invernadero directo y minimizan el potencial de efecto invernadero indirecto.

1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del aumento del nivel de vida en los países industrializados asistimos a una constante expansión del mercado del frío; tanto para usos comerciales como industriales, domésticos o de confort. Las instalaciones frigoríficas son sistemas complejos que transforman las fuentes de energía comerciales con el objetivo de producir temperaturas inferiores a la del ambiente. Esta conversión no es directa. La energía comercial se transforma en energía mecánica y posteriormente en energía fluido-mecánica que es transportada por el refrigerante. Este, fluye a través de los componentes del ciclo, experimentando cambios de estado e intercambiando calor con el medio ambiente interior y exterior. El refrigerante es el agente que transporta la energía. Debido a su naturaleza química, sus emisiones, no deseadas, son las responsables de la destrucción del ozono estratosférico y del aumento del efecto invernadero a nivel planetario.

Los refrigerantes más utilizados, además de los CFCs, que tienen prohibida su comercialización desde Enero de 1996, son los HCFCs como el R22 (prohibido en algunas aplicaciones) y R123, los HFCs R304a, R404A, R 407C y R410A. También se utilizan refrigerantes inorgánicos como el amoníaco R717 y el agua R718. Existen varios ciclos frigoríficos pero los más utilizados son los de compresión mecánica y los de absorción.

Los refrigerantes utilizados por el ciclo de compresión mecánica trabajan a presiones superiores a la atmosférica. Por esta razón, en gran parte acaban fugándose y son transportados hasta la estratosfera donde la radiación ultravioleta rompe los enlaces de cloro, dando lugar a la conocida reacción de destrucción de la molécula de ozono. Además, son opacos a la radiación infrarroja emitida por la Tierra, impiden la transmisión de esta energía al espacio exterior, incrementando el efecto invernadero y provocando un aumento de la temperatura de la superficie de nuestro planeta. En virtud del Protocolo de Montreal y la Reglamentación Europea los refrigerantes CFC11 y CFC12 se están sustituyendo por el HCFC123 y el HFC134a, respectivamente. Ha comenzado la sustitución del HCFC22, aunque debido a la extensa gama de aplicaciones de este refrigerante no se ha encontrado un único sustituto. Se está trabajando con los HFCs R404A, 407C y 410A.

Los ciclos de absorción utilizan las disoluciones agua-amoniaco ($\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_3$) y bromuro de litio-agua ($\text{BrLi}-\text{H}_2\text{O}$), ASHRAE, (1994). En el primer caso el agua es el absorbente y el amoníaco el refrigerante. En el segundo, el bromuro de litio es el absorbente y el agua el refrigerante. La fuente de energía es el calor, que puede proceder de quemar combustibles fósiles Guillen Marco, (1988), de fuentes residuales, Izquierdo, (1995) y de fuentes renovables Izquierdo et al, (1994, 1997). El amoníaco y el agua son refrigerantes que no destruyen el ozono estratosférico ni contribuyen al efecto invernadero directo. Pueden sustituir a todos los refrigerantes orgánicos en el rango de temperaturas -50°C a $+50^\circ\text{C}$: el agua a temperatura mayor que cero y el amoníaco desde -60°C .

Los sistemas de bromuro de litio pueden ser de simple efecto o de doble efecto. Los primeros utilizan fuentes de calor entre 80°C y 115°C , mientras que las fuentes de calor utilizados por los segundos necesitan temperaturas del orden de 160°C . En este trabajo sólo nos ocuparemos de los primeros. Las fuentes de energía comerciales utilizadas son principalmente la electricidad, los combustibles líquidos y los combustibles gaseosos. El consumo de estas energías es el origen de las emisiones de dióxido de carbono que contribuyen al incremento del efecto invernadero. Por esta razón presentamos el consumo de energía en España del sector de la vivienda. El calor residual de los gases de escape de los motores alternativos o de las turbinas de gas son fuentes de calor de interés desde los puntos de vista energético,

económico y medioambiental.

Las energías renovables pueden accionar los sistemas frigoríficos, reduciendo las emisiones de CO₂ y contribuyendo a la reducción del efecto invernadero indirecto. El calor obtenido de la conversión térmica de la energía solar se utiliza desde hace tiempo para accionar los ciclos de absorción. Las temperaturas de trabajo de los ciclos de absorción mencionados se pueden alcanzar mediante la conversión térmica de la energía solar. Las temperaturas inferiores a 100 °C con colectores planos y las superiores mediante colectores de vacío y de concentración. El desarrollo de colectores planos de tecnología avanzada, capaces de alcanzar temperaturas de 180° C tiene interés para aumentar la eficiencia energética de las máquinas de absorción.

2. CONSUMO DE ENERGÍA EN LAS VIVIENDAS ESPAÑOLAS

Los 42,7 millones de españoles consumen en sus hogares distintas formas de energía: Electricidad; Gas Natural; Gases Licuados del Petróleo; Gasóleo; Carbón; Leña, etc.. Este consumo energético tiene consecuencias económicas, ambientales y sociales. El consumo de electricidad en el hogar se reparte entre los electrodomésticos, la calefacción, el agua caliente sanitaria (ACS), la cocina, el aire acondicionado e incluso en la producción de calor con bomba de calor. El Gas Natural se utiliza para cocinar los alimentos, para producir calor con destino a calefacción y agua caliente sanitaria, e incluso en las secadoras. Los Gases Licuados del Petróleo se utilizan fundamentalmente en la cocina, para el agua caliente sanitaria y algo en calefacción. El Gasóleo C se utiliza para calefacción sobre todo en comunidades. El carbón y la leña se utilizan en la cocina y en calefacción. El uso del carbón, en España, tanto en la cocina como para calefacción, esta en retroceso y lo mismo sucede con la leña que sólo se utiliza en los núcleos rurales. La evolución del consumo energético, tanto en forma de energía eléctrica como de combustibles fósiles, se puede apreciar en la tabla 1, IDAE (1999). El consumo medio de electricidad por hogar ha pasado de 1.928,3 kWh/año en 1980 a 3.242,5 kWh/año en 1998. El consumo medio diario es 8,9 kWh. El consumo de usos térmicos ha pasado de 0,37 tep/año (4.282 kWh/año) en 1980 a 0,43 tep/año (4.977 kWh/año) en 1998.

Según la monografía “ El consumo de energía de las familias españolas”, publicado por el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE), del MINER, elaborada con datos referidos al año 1995 del propio IDAE en colaboración con el Instituto Nacional de Estadística (INE), la “estructura del consumo de energía en la vivienda” se puede explicar mediante el gráfico representado en la figura 1.

TABLA 1. CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS HOGARES ESPAÑOLES (fuente IDAE)

kWh/hogar	1980	1985	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Usos eléctricos	1.928,3	2.137,5	2.660,7	2.819,2	2.841,0	2.881,2	2.880,2	3.048,6	3.167,6	3.159,5	3.242,5
tep/hogar	1980	1985	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Usos térmicos	0,37	0,37	0,35	0,37	0,38	0,38	0,42	0,40	0,42	0,42	0,43
TOTAL	0,54	0,55	0,58	0,61	0,63	0,63	0,67	0,66	0,70	0,69	0,71

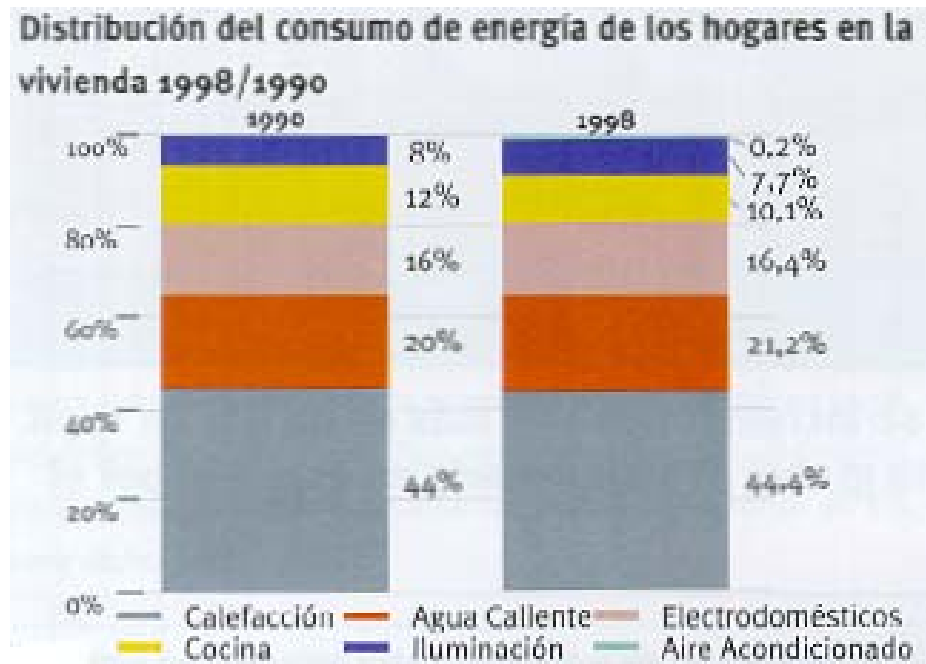


Figura 1. Distribución del consumo de energía en los hogares.

Podemos observar que la calefacción y el ACS contribuyen con el 44% y el 20%, suponiendo entre ambas el 64% del consumo total. La cocina consume el 11%, mientras que la iluminación y los electrodomésticos participan con el 25%. Es importante destacar que si bien la calefacción, el ACS y la cocina pueden funcionar con distintas formas de energía: electricidad, Gas Natural, Gasóleo, Carbón o Leña; en cambio la iluminación y los electrodomésticos utilizan la electricidad. Por lo tanto, podemos decir que en torno al 25% del consumo energético del hogar es eléctrico.

Según el Instituto Nacional de Estadística a finales del año 2001 había en España aproximadamente $13,2 \cdot 10^6$ hogares. El consumo medio de electricidad es de 3.600 kWh/hogar y año, que supone el 25% del total consumido en España (208.580 kWh en 2001). El consumo medio de combustibles fue de 5.000 kWh/hogar y año.

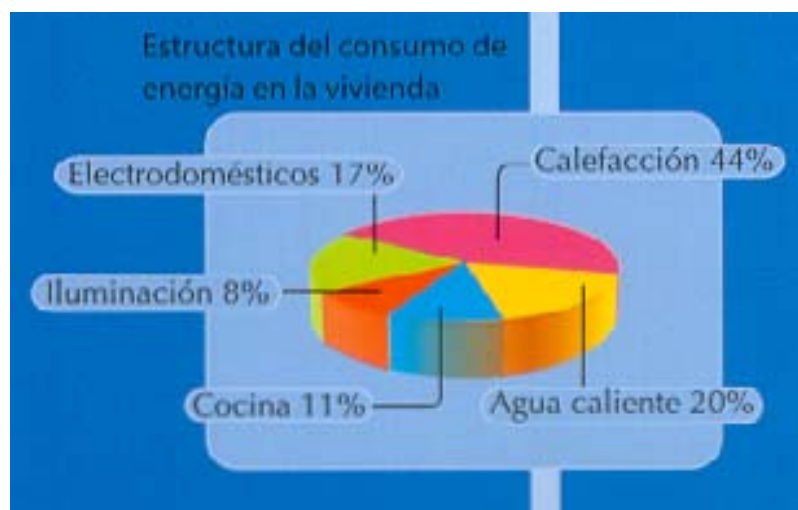


Figura 2. Estructura del consumo de energía en el hogar

consumo eléctrico en refrigeración

Según la figura 1, el consumo de electricidad accionando máquinas frigoríficas para aire acondicionado en 1990 era inapreciable. En el año 1998, este consumo eléctrico ya suponía el 0,2%. Una consecuencia de la mejora de la capacidad adquisitiva y del incremento del nivel de vida experimentado por la sociedad española es la demanda del consumo de aire acondicionado en el sector residencial. Entre 1988 y 1997, el consumo de aire acondicionado paso del 2% hasta el 8% de los hogares españoles. El consumo de electricidad por este concepto aumentó desde $32 \cdot 10^6$ kWh en 1988 hasta $120 \cdot 10^6$ kWh en 1997. Según El Instalador (2002) en Julio de 2001 el 21,8% de los hogares españoles tenían instalado un aparato de aire acondicionado.

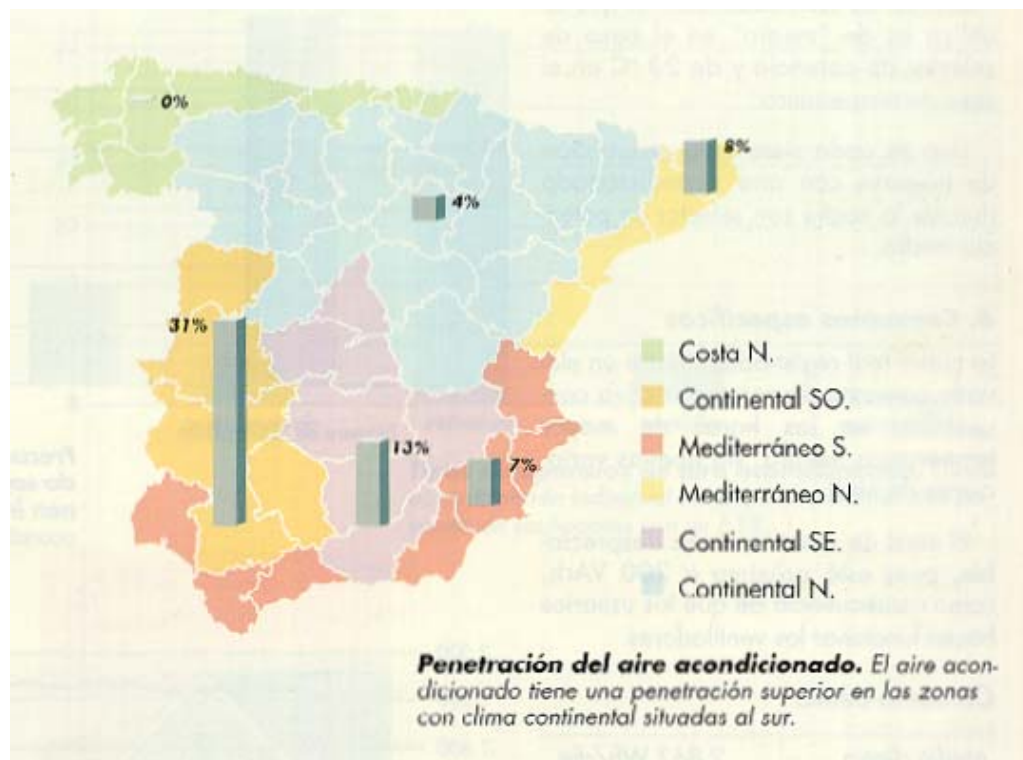


Figura 3. Distribución del consumo de aire acondicionado por regiones

Extrapolando el consumo eléctrico, es posible que este consumo esté en $360 \cdot 10^6$ kWh. La tendencia del mercado en el próximo futuro es hacia un incremento de los aparatos pequeños de uso doméstico y residencial. El parque español de equipos instalados en el sector residencial se reparte en un 68% de equipos de evaporador mural, simples o múltiples; 26% de conductos sobre todo en chalets y 6% de enfriadoras utilizadas en edificios de comunidades con sistema centralizado.

En la figura 3 tenemos la situación del mercado español hasta 1997. En porcentaje tenemos el índice de penetración de esta tecnología. También podemos observar que el mercado peninsular se distribuye por la zona de Levante, Andalucía, Extremadura, Castilla la Mancha, Madrid y en la sub - meseta Norte. El mercado en la zona norte es prácticamente inexistente. En la figura 4 puede verse, según el proyecto INDEL, la distribución del consumo que hacen los hogares.

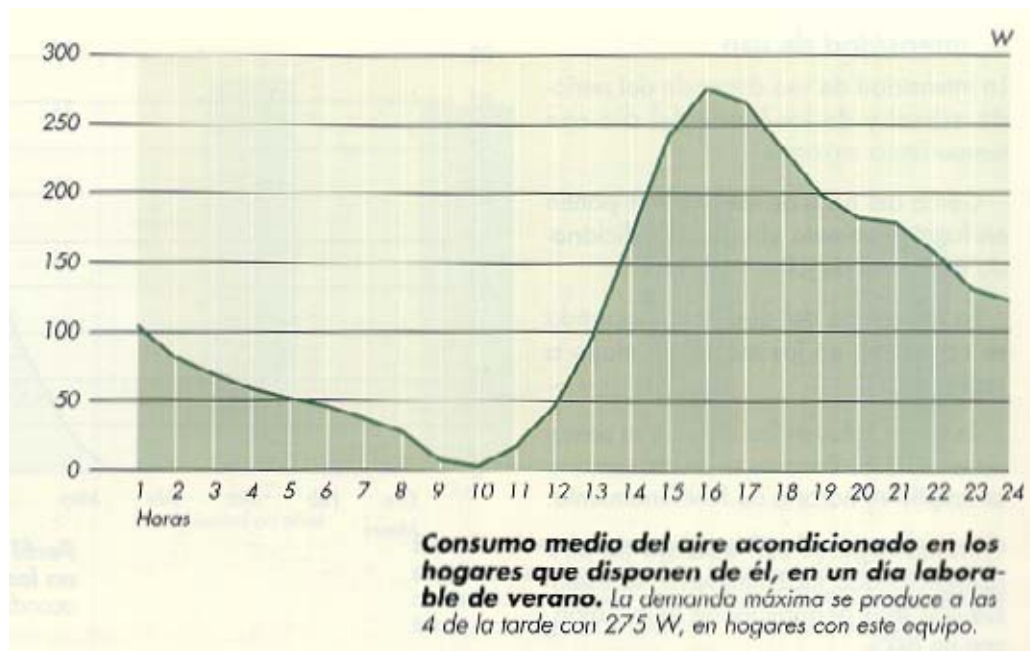


Figura 4. Distribución del consumo en un día laborable.

3. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y COSTE DE LA ENERGÍA DEL SISTEMA BROMURO DE LITIO – AGUA

En este sistema el absorbente es el bromuro de litio y el refrigerante el agua. Por esta razón la temperatura de evaporación no puede ser menor que 0 °C. Su aplicación más extendida es la producción de frío para climatización y su principal inconveniente que no pueden utilizarse en refrigeración. Otra aplicación de futuro es como bomba de calor, produciendo calor para climatización y procesos térmicos a temperaturas medias. Existen máquinas de simple efecto (SE) y de doble efecto (DE). Las primeras son las más conocidas, mientras que las segundas, que han sido desarrolladas entre 1970 y 1990, se están introduciendo actualmente en el mercado del aire acondicionado.

Máquina de simple efecto

En la figura 5 tenemos un esquema simplificado mostrando los componentes principales: el generador, el condensador, el evaporador, el absorbedor, el recuperador de calor, la válvula de expansión, la válvula de estrangulación y la bomba de la disolución. El funcionamiento es similar al del par agua – amoníaco, excepto en que no es necesario intercalar una torre de rectificación entre el generador y el condensador, ya que en la ebullición de la disolución sólo se separa vapor de agua. Por esta razón la máquina es más sencilla de construir y la eficiencia energética es superior. Pueden ser accionadas directa o indirectamente. Las máquinas de calentamiento directo queman un gas combustible en el generador. Las de calentamiento indirecto pueden utilizar calor residual o el calor procedente de energías renovables. La temperatura de la fuente de calor depende de la temperatura de condensación, variando entre 80 °C y 115 °C. La energía solar es una fuente de energía apropiada para accionar estas máquinas. Las máquinas de simple efecto producen el frío con una eficiencia energética entre 0,5 y 0,7. En la tabla 3 tenemos el Coeficiente de Eficiencia Energética medio y la relación entre la energía primaria quemada y el frío producido. Por cada kWh de calor consumido por las máquinas de simple efecto se producen alrededor de 0,6 kWh de frío.

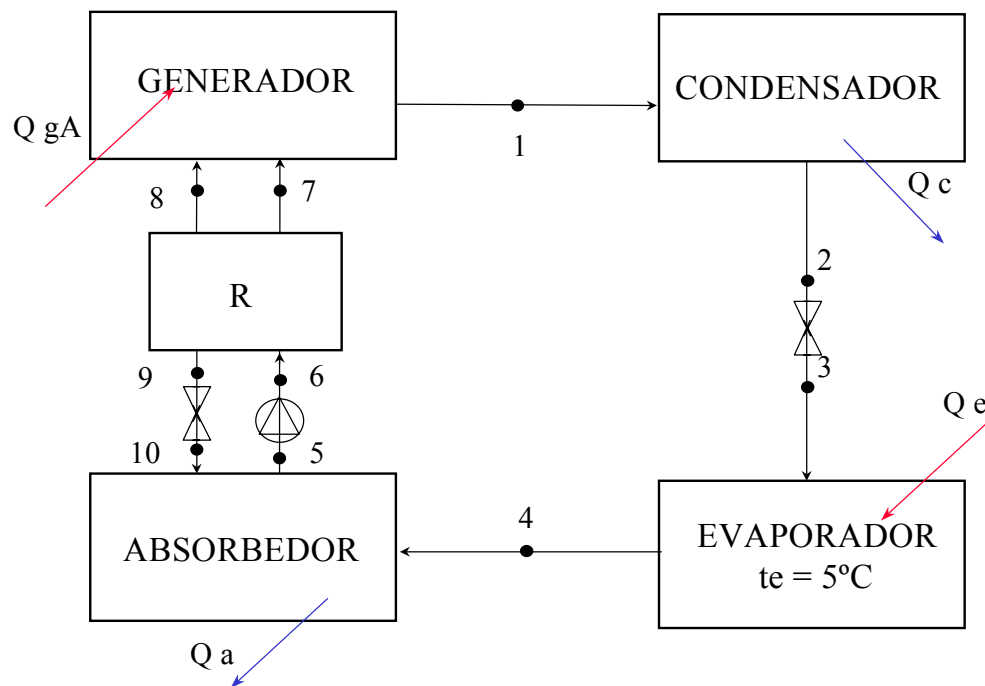


Figura 5. Máquina de absorción de bromuro de litio de simple efecto.

En la figura 6 se puede ver la disposición real de cada componente. El generador (1) es un intercambiador de calor vertical de carcasa y tubo, que contiene la disolución diluida preparada para iniciar la ebullición. Ésta se produce mediante el calor que el fluido exterior (heat medium) transfiere a la disolución. Este calor se puede generar mediante una caldera, mediante la recuperación de calor residual, o mediante la conversión térmica de la energía solar. El evaporador (4) y el absorbedor se disponen en la parte superior rodeando al generador. Ambos componentes son intercambiadores de calor de película. Por el interior del evaporador circula el agua fría (chilled water), mientras que por el exterior, y formando una película fina, desciende el refrigerante (agua), que ha sido pulverizado antes de ser alimentado a la cabecera del evaporador. El refrigerante evaporado llena el recipiente (cilíndrico) que contiene al evaporador y al absorbedor, formando una nube de vapor. Por el interior del absorbedor (5) circula el agua de la torre de refrigeración (cooling water), mientras que por el exterior desciende la disolución concentrada, formando una película delgada sobre la superficie. Mientras desciende absorbe el vapor de agua generado en el evaporador. El condensador se encuentra en la parte superior del mismo cilindro pero separado del evaporador y del absorbedor. La ebullición de la disolución diluida se produce a lo largo del generador, estallando en burbujas en la zona más alta, donde se separa la disolución concentrada del vapor de refrigerante a alta presión y temperatura. El vapor caliente se pone en contacto con la superficie exterior del condensador (3), que se encuentra fría como consecuencia de la circulación del agua procedente de la torre de refrigeración (cooling water), que continuamente se está bombeando entre la torre de refrigeración y el conjunto absorbedor – condensador. El recuperador de calor (6) transfiere calor desde la disolución caliente y concentrada hasta la disolución fría y diluida, calentándola y, por consiguiente, ahorrando calor al fluido exterior del generador (heat medium).

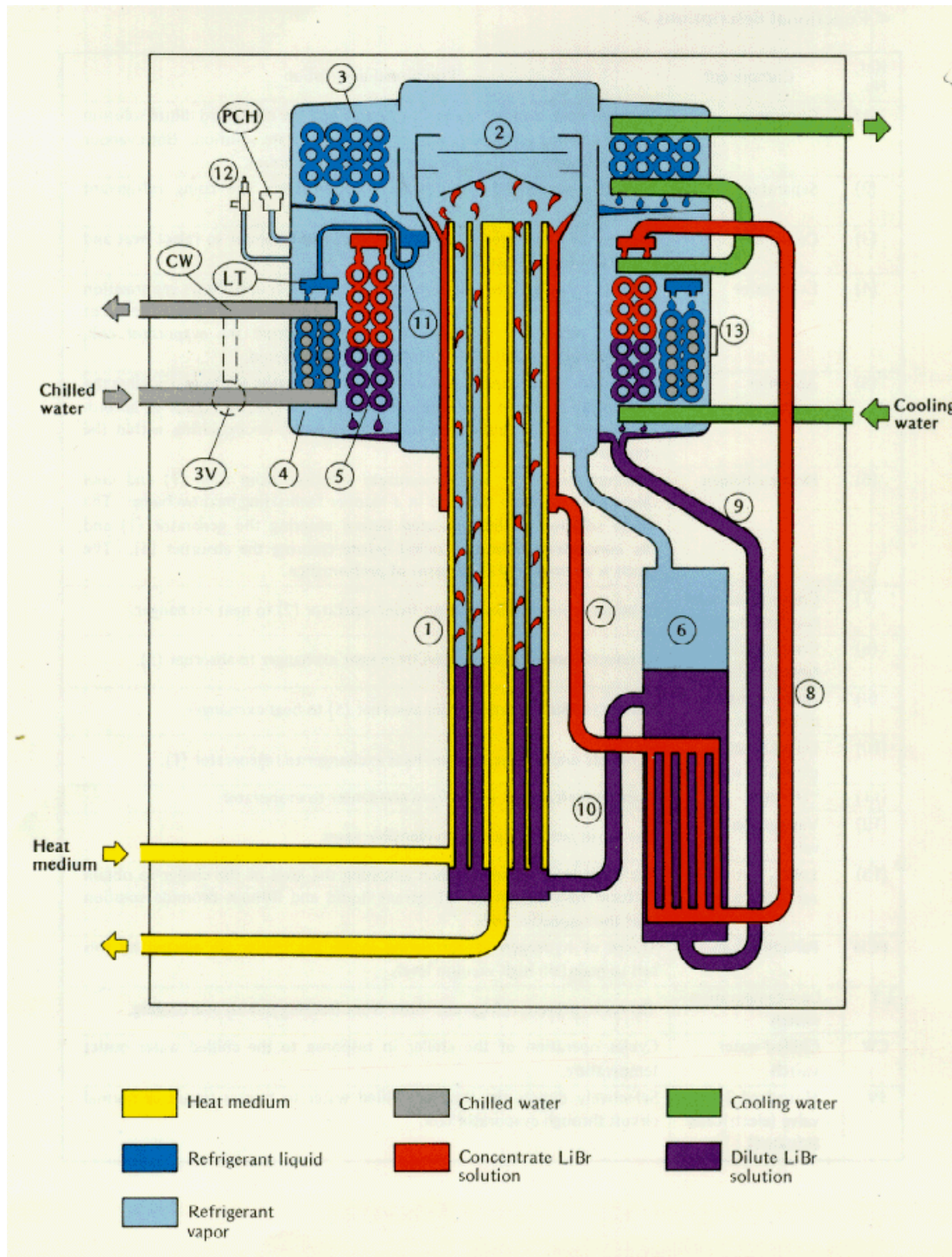


Figura 6. Detalles de la máquina de bromuro de litio de simple efecto

TABLA 2: COSTE DE LA ENERGÍA DE LOS SISTEMAS DE ABSORCIÓN BrLi-H₂O

SISTEMA	RELACIÓN ENERGÍA PRIMARIA A FRÍO (REPF)	€/kWh de gas natural	€/kWh de frío
Simple Efecto	0,55	0,05409	0,09835

Es importante resaltar que no existen en el mercado máquinas de bromuro de litio condensadas por aire en ninguna de sus modalidades, ya sean de simple o doble efecto. Esta carencia se está intentando

resolver con un esfuerzo importante en investigación. Están en marcha programas para desarrollar máquinas condensadas por aire de simple y doble efecto.

4. TEMPERATURAS DE TRABAJO DE LAS MÁQUINAS DE ABSORCIÓN

De todos es conocida la posibilidad de utilizar la conversión térmica de la energía solar para producir calor. La calefacción, el agua caliente sanitaria, el secado de productos agrícolas y las aplicaciones industriales son ejemplos bien conocidos. Una aplicación más atractiva y con un valor termodinámico superior es la utilización de la energía solar para producir frío. Esta aplicación supone un salto tecnológico cualitativo. Como los ciclos de absorción funcionan con calor y la radiación solar se puede capturar y transformar en calor, cualquier ciclo de absorción puede ser accionado por energía solar, a condición de que se cumplan los dos siguientes requisitos:

- Que la temperatura del calor obtenido de la radiación solar sea suficiente para accionar el ciclo.
- Que la máquina sea diseñada para calentamiento indirecto.

El primer problema a resolver es determinar la temperatura de ebullición de la disolución en el generador, y el segundo, especificar el tipo de captador – convertidor de la radiación solar capaz de alcanzar dicha temperatura.

La temperatura de ebullición de la disolución en el generador depende de las temperaturas de evaporación y de condensación. Su cálculo en una operación continua necesita resolver el ciclo, lo que a su vez nos permitirá determinar la distribución de temperaturas y el flujo de calor en cada uno de los componentes. Como existe una variedad de sistemas que dependen de la disolución utilizada, de la aplicación (refrigeración o climatización), del tipo de máquina (efecto simple o múltiples), calentamiento directo o indirecto, sistema de condensación por agua o por aire, etc., el cálculo en general se sale de los objetivos de este trabajo. Pero como uno de los objetivos de la ponencia es exponer la utilidad y el potencial de la energía solar para una aplicación tan atractiva como la producción de frío, a continuación exponemos el método que se utiliza, aplicado a un caso particular, como es la producción de frío para aire acondicionado, sin entrar en la explicación de los ciclos de absorción. Al lector interesado se le recomienda consultar la bibliografía que se adjunta, Herold et al (1996); Izquierdo et al (1994, 1997) donde encontrará la información necesaria para una introducción a la tecnología frigorífica de absorción accionada por calor solar.

Anteriormente hemos comentado los rangos de temperatura necesarios para producir frío en diferentes aplicaciones. Para aire acondicionado con máquina de alimentación indirecta condensada por aire, recordemos que la temperatura de la fuente de calor puede variar entre 80 °C y 115 °C. Para determinar la temperatura de la fuente es necesario primero determinar la temperatura de ebullición de la disolución. Ésta se obtiene a partir del diagrama de Duhring de las disoluciones. En nuestro caso será el diagrama (p,t,x), presión, temperatura, concentración, de las disoluciones acuosas de bromuro de litio. En dicho diagrama se representan el ciclo de la disolución y el ciclo del refrigerante. En la figura 7 tenemos representado un ciclo definido por una temperatura de evaporación de 5° C y una temperatura de condensación – absorción de 38 °C. En abscisas tenemos la temperatura de la disolución, en ordenadas la presión de vapor de la disolución. La concentración es un parámetro que varía entre el 0%, o sea refrigerante puro (agua), y el 70%. La temperatura de evaporación determina la presión de evaporación – absorción, denominada presión de baja, mientras que la temperatura de condensación fija la presión de ebullición - condensación, denominada presión de alta. En este caso dichas isobaras adquieren un valor de 0,6 y 7 kPa, respectivamente.

Una vez establecidos los límites de presión, determinamos el punto 5 (figura 7), salida del absorbedor, por la intersección de la isobara de evaporación con la temperatura de la disolución en el absorbedor (38 °C en abscisas). Así obtenemos la concentración de la disolución diluida (56,5%). Siguiendo la línea de trabajo de la bomba, que eleva la disolución diluida, obtenemos la temperatura inicial de ebullición (75 °C) en la intersección con la isobara de alta. Si aumentamos la temperatura de la disolución, la disolución hierve a presión constante, separando vapor de refrigerante y aumentando su concentración, hasta una concentración final que suele variar entre un 2% y un 6% superior a la concentración de la disolución diluida. La ebullición termina a la temperatura de 82 °C, punto 8 de la figura 7. La disolución hierve a temperatura variable, comenzando a la temperatura de 75 °C y terminando cuando la temperatura es 82 °C. A continuación la disolución concentrada retorna hasta el absorbedor, siguiendo la línea de concentración constante, entrando en el absorbedor en la intersección de la isobara de disolución concentrada con la isobara de baja. En ese punto absorbe el vapor procedente del evaporador, diluyéndose de nuevo y quedando preparada para otro ciclo. Este es el ciclo descrito por la disolución.

El ciclo descrito por el refrigerante se inicia en el punto donde comienza la ebullición. El vapor separado en la ebullición, punto 1, se transfiere al condensador, transformándose en agua líquida, isobara de concentración 0%, punto 2, a continuación reduce su presión y temperatura en la válvula de expansión y pasa al evaporador, punto 3, donde hierve a baja presión, transformándose en vapor, punto 4, que es absorbido por la disolución en el absorbedor, dejando la disolución preparada para un nuevo ciclo.

La temperatura de la fuente de calor debe ser superior a la temperatura final de ebullición (t_8). Sin entrar en detalles, basta con saber que es necesario sumar entre 8°C y 12°C a la temperatura final de ebullición para obtener la temperatura de salida de los colectores solares. El campo de colectores trabaja con una temperatura de entrada igual a la temperatura final de ebullición de la disolución más un número de °C que suele variar entre 5 °C y 10 °C. En este caso, por ejemplo 82 °C + 5 °C = 87 °C. La temperatura de salida de colectores podría ser 92 °C.

Llegados a este punto surge el problema de especificar el captador – convertidor de la energía solar. Sabemos que los colectores planos de calidad pueden trabajar con buen rendimiento hasta temperaturas de 90 °C y que a partir de estas temperaturas es mejor recurrir a otros colectores como los de tubos de vacío o de concentración (baja o media).

En el ejemplo estudiado vemos que para una temperatura de condensación – absorción algo inferior a 40 °C, es necesario producir el calor a temperaturas del orden de 90 °C. Estamos en el límite de la temperatura de trabajo de los colectores planos de calidad, con una curva de normalización definida por unos parámetros de pérdidas: $F_R U_L \leq 5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ y $F_R (\tau\alpha)_n = 0,8$. Los colectores planos que no cumplen esta especificación no son útiles para accionar máquinas de absorción de bromuro de litio de simple efecto en aplicaciones de aire acondicionado. La temperatura de condensación de los sistemas frigoríficos que operan en el Centro y Sur de España pueden alcanzar los 38°C.

Cuando la aplicación es de refrigeración o cuando la máquina es de doble efecto, hemos dicho que la temperaturas de la fuente de calor puede variar entre 140 °C y 180 °C. En estos casos el calor se puede producir con colectores de concentración media. Es importante mencionar aquí los colectores planos de nueva generación, que en estos momentos se está desarrollando. Los colectores planos de vacío que pueden trabajar hasta una temperatura de 160 °C, constituyen una nueva generación de captadores – convertidores muy prometedora que en el futuro, además de otras aplicaciones, permitirá desarrollar la tecnología de absorción de alto rendimiento alimentada por energía solar, Hollands et al (1993) y Folkerts (1995), Izquierdo et al (2002).

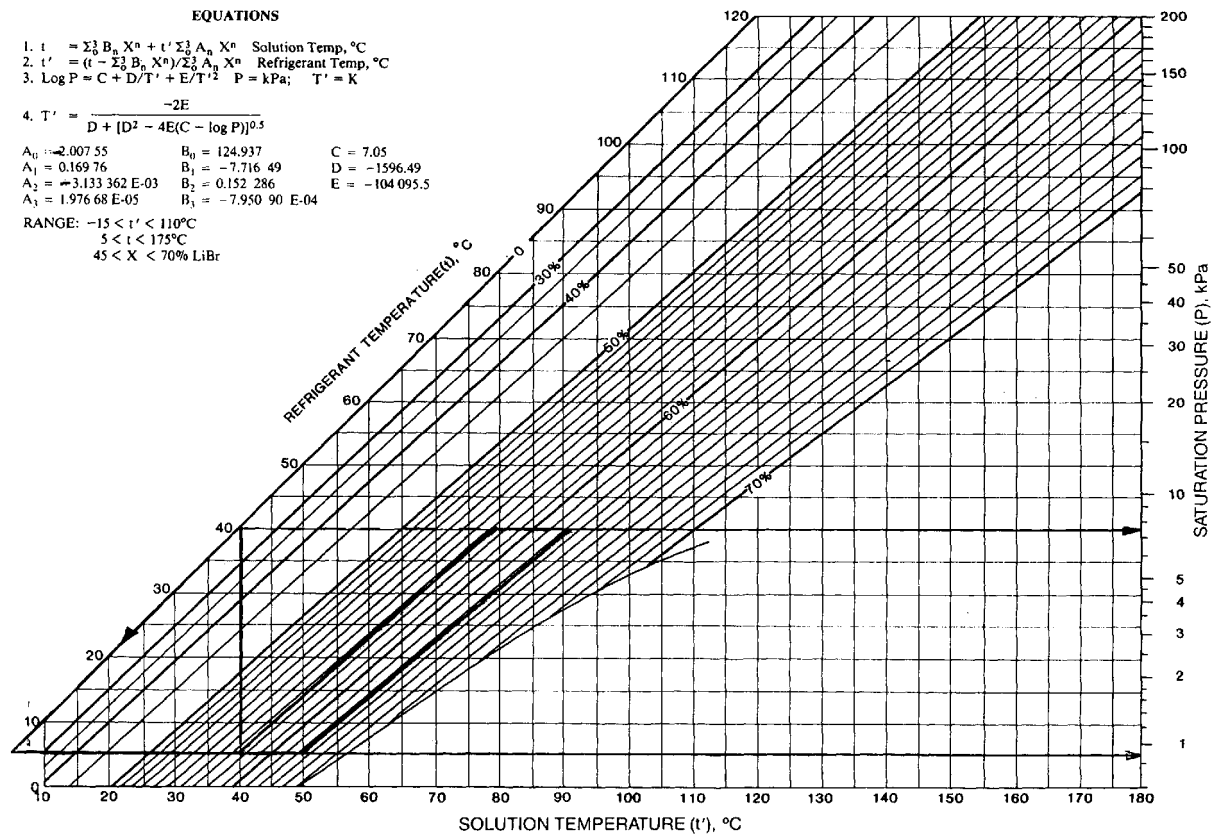


Figura 7. Temperaturas de un ciclo de aire acondicionado

Temperatura de absorción-condensación

Hemos visto que la temperatura de ebullición depende de las temperaturas de condensación y de absorción. En un sistema condensado por agua, el calor de absorción y de condensación se eliminan en la torre de enfriamiento. La temperatura mínima del agua que se puede obtener en una torre de enfriamiento, supuesta ideal, es igual a la temperatura de bulbo húmedo del lugar. La temperatura de bulbo húmedo se puede obtener del diagrama sicrométrico en función de la temperatura de bulbo seco y de la humedad relativa.

Ejemplo 1

En las figuras 8 y 9 tenemos la distribución de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa medidas por la estación meteorológica del IETcc el día 15/07/1995 en su laboratorio de La Poveda, Arganda del Rey, Madrid. La temperatura exterior de bulbo seco a las 17 horas 10 minutos del día es 34°C y la humedad relativa exterior a la misma hora es del 25%.

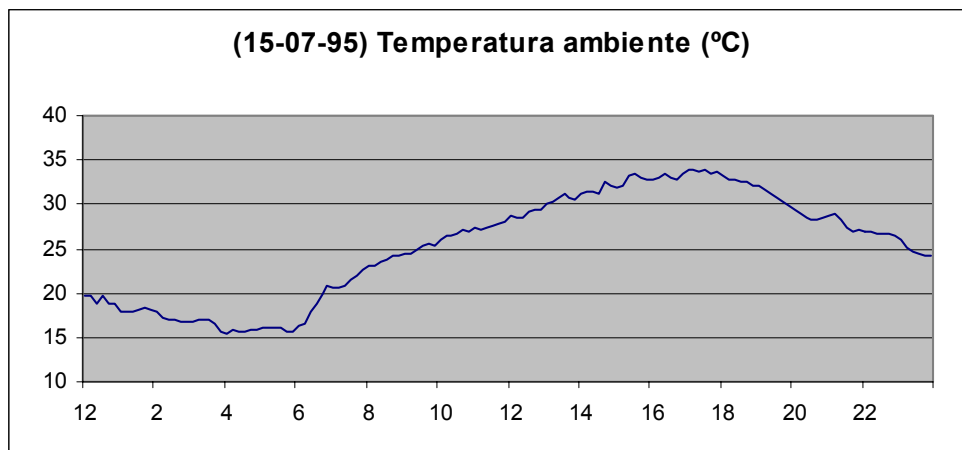


Figura 8. Temperatura de bulbo seco.

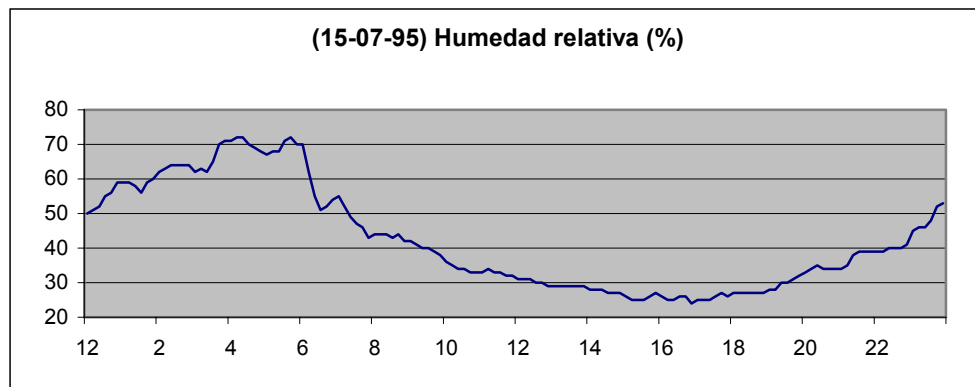


Figura 9. Humedad relativa.

La temperatura exterior de bulbo húmedo es 19°C. Por tanto, ésta es la temperatura mínima que se puede alcanzar en una torre de enfriamiento emplazada en el lugar donde han sido medidas las coordenadas meteorológicas. Este resultado sería el obtenido si la torre se comportase como una torre ideal. Sin embargo, la torre, que es un intercambiador de calor y de masa, no tiene un comportamiento ideal, como cualquier producto industrial su comportamiento real le impide alcanzar el límite de la temperatura de bulbo húmedo, enfriando el agua hasta una temperatura superior. Se denomina acercamiento de la torre a la diferencia entre la temperatura real del agua en la cubeta de la torre y la temperatura de bulbo húmedo. Esta diferencia depende de las condiciones meteorológicas del lugar y de las dimensiones (volumen, altura, etc.) de la torre y puede variar entre 3°C y 7°C. Como regla general en aquellos lugares que son secos, el acercamiento alcanza valores inferiores a los alcanzados en los lugares húmedos. Cuando la atmósfera está saturada (humedad relativa 100%), la temperatura de bulbo seco es igual a la temperatura de bulbo húmedo.

El sistema de absorción-condensación es un circuito casi cerrado en el que se hace circular un caudal de agua entre la torre de enfriamiento y el condensador-absorbedor. El agua se calienta en el absorbedor y en el condensador y se enfría en la torre.

El cálculo exacto de la temperatura de absorción-condensación se puede obtener aplicando las leyes y principios de la transferencia de calor y de masa, pero su cálculo exacto se sale de los límites de este trabajo. Sin embargo podemos obtener un valor lo suficientemente preciso operando de la siguiente forma:

Admitiendo un acercamiento de Δt_c °C; un incremento de temperatura del agua de la torre al circular por el condensador y por el absorbedor de Δt_{c-a} °C y una diferencia de temperaturas entre el agua de torre y el fluido que condensa (refrigerante) en la salida del absorbedor-condensador de Δt °C y teniendo en cuenta que en el capítulo 5 fue establecida la hipótesis de que la temperatura de absorción es igual a la temperatura de condensación, y sabiendo que la condensación es un proceso físico a temperatura y presión constante, podemos obtener la temperatura de absorción-condensación mediante la ecuación:

$$t_c = t_{bh} + \Delta t_c + \Delta t_{a-c} + \Delta t$$

Esta ecuación está representada gráficamente en la figura 10.

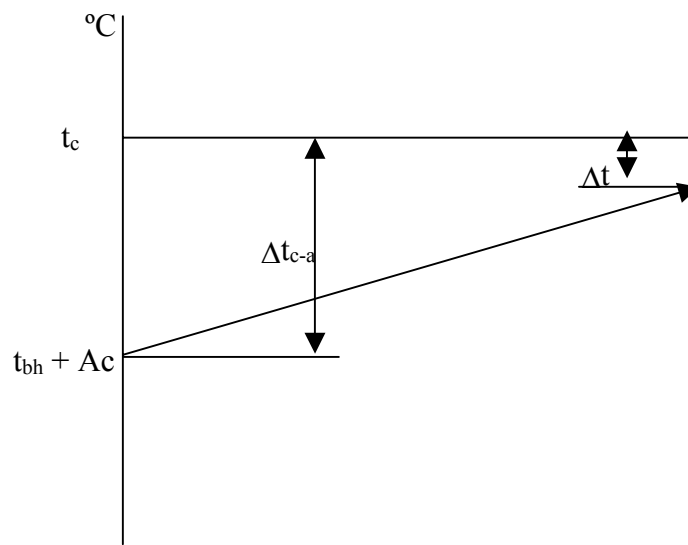


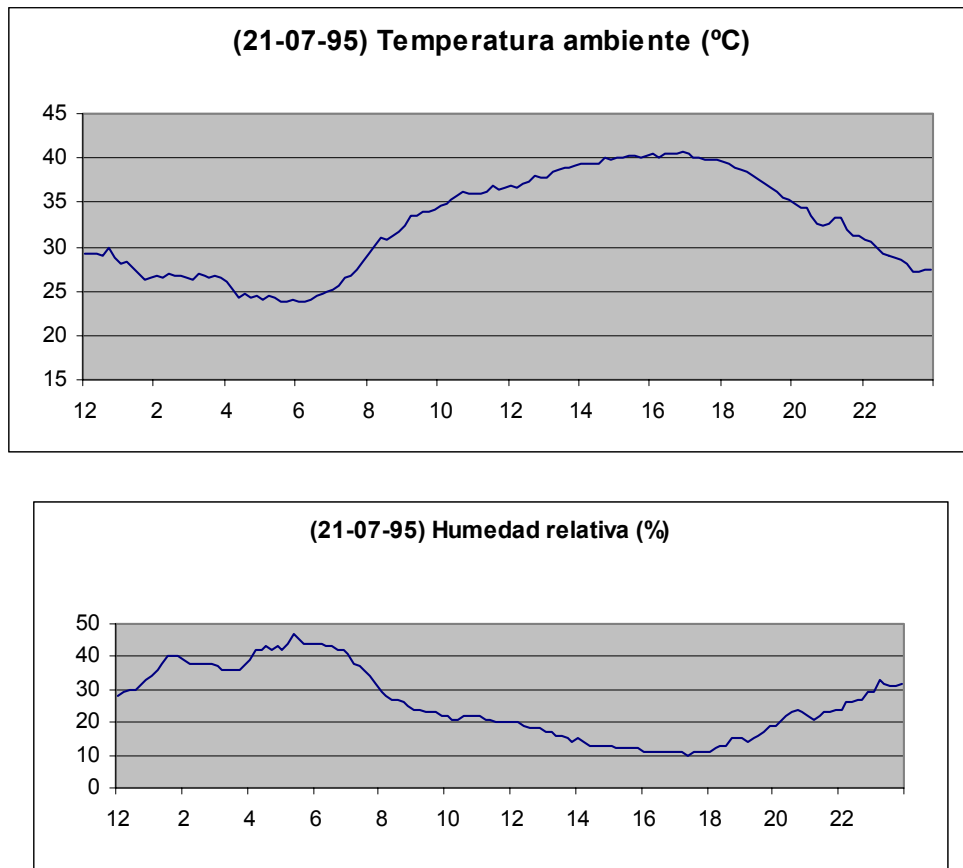
Figura 10. Temperatura de condensación.

El incremento de temperatura que experimenta el fluido exterior al circular por el absorbedor y el condensador se puede obtener en función del calor de absorción-condensación, de la ecuación 13.2,

$$Q_{c-a} = m_{fec-a} \cdot C_p \Delta t_{a-c}$$

Ejemplo 2

Determinar la temperatura de absorción-condensación cuando la temperatura de bulbo húmedo es de 19°C, el acercamiento 6°C, el salto térmico a través del condensador absorbedor es de 9°C y la diferencia de temperaturas entre el fluido exterior (agua condensante) y el refrigerante (agua separada de la disolución de bromuro de litio) es 5°C.



Solución : $t_c = 19 + 6 + 9 + 5 = 39^\circ\text{C}$

En este caso el fluido exterior entra a la torre a la temperatura de $19 + 6 + 9 = 34^\circ\text{C}$ y se enfría hasta la temperatura de $t_{bh} + A_c = 25^\circ\text{C}$, siendo por tanto ésta la temperatura de entrada al absorbedor y al condensador.

Cuando la planta funciona a carga parcial, la temperatura de absorción-condensación puede ser inferior ya que se reducen tanto el incremento de temperatura en el absorbedor-condensador como el incremento final de temperaturas entre los fluidos.

Cuando la humedad relativa es mayor las condiciones de funcionamiento de la torre son diferentes a las obtenidas en el ejemplo 13.2.

Ejemplo 3

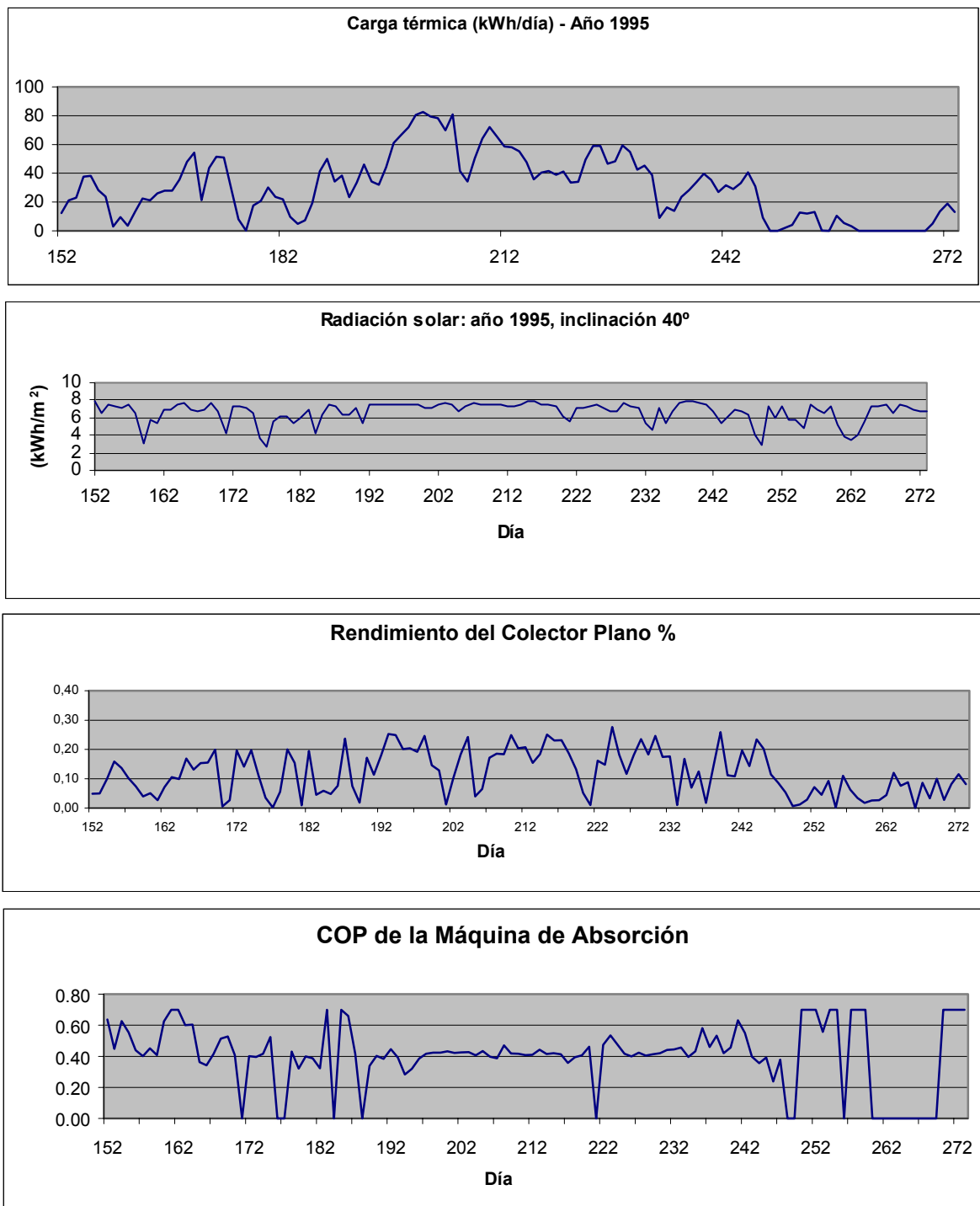
Supongamos un lugar donde la temperatura exterior de bulbo seco es 34°C y la humedad relativa el 60%.

En este caso la temperatura exterior de bulbo húmedo es 27°C . Si se mantiene los mismos incrementos de temperatura, la temperatura de condensación se puede elevar hasta 47°C , que podemos considerar elevada. En estos casos la temperatura de condensación se disminuye hasta unos 40°C a base de reducir el acercamiento, el incremento de temperatura en el condensador-absorbedor y el incremento de temperatura entre los fluidos. Para disminuir el acercamiento es necesario aumentar el tamaño de la torre y la potencia del ventilador, lo que incrementa su precio. Para reducir los incrementos de temperatura es necesario aumentar el caudal del agua que circula

por la torre y por el condensador, lo que supone aumentar la potencia del motor de la bomba y con ella el consumo de energía eléctrica.

5.VARIABLES AMBIENTALES Y DE PROCESO

En las figuras 8, presentamos los resultados del programa PRECISOL obtenidos para una instalación de climatización durante el verano de 1995 de una vivienda de 80 m² situado en el Sureste de Madrid utilizando un área útil de 34,4 m² con colector solar Blue Panel. La inclinación de 40° se obtuvo como óptima porque dicha instalación tiene también previsto su uso como sistema de calefacción y no se contemplaba la posibilidad de variar la inclinación al cambiar la estacionalidad.



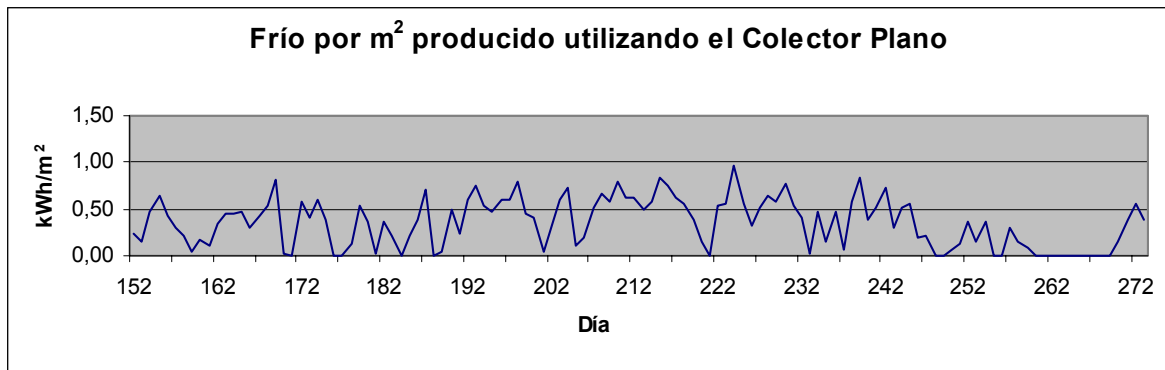


Figura 8. Parámetros de una instalación de frío por absorción para climatización.

La figura 9 representa los valores de la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento durante un día de Junio. En el caso de la radiación solar se representa para cuatro casos: plano horizontal y tres planos inclinados; 55°, 40° y 30°. Se incluye este último caso por ser la inclinación óptima de las instalaciones que trabajan durante el verano. Se puede observar que con inclinación de 30° y 40° la energía solar interceptada es ligeramente menor que la energía solar interceptada por el plano horizontal. Al aumentar la inclinación hasta 55° la energía solar interceptada experimenta una fuerte reducción.

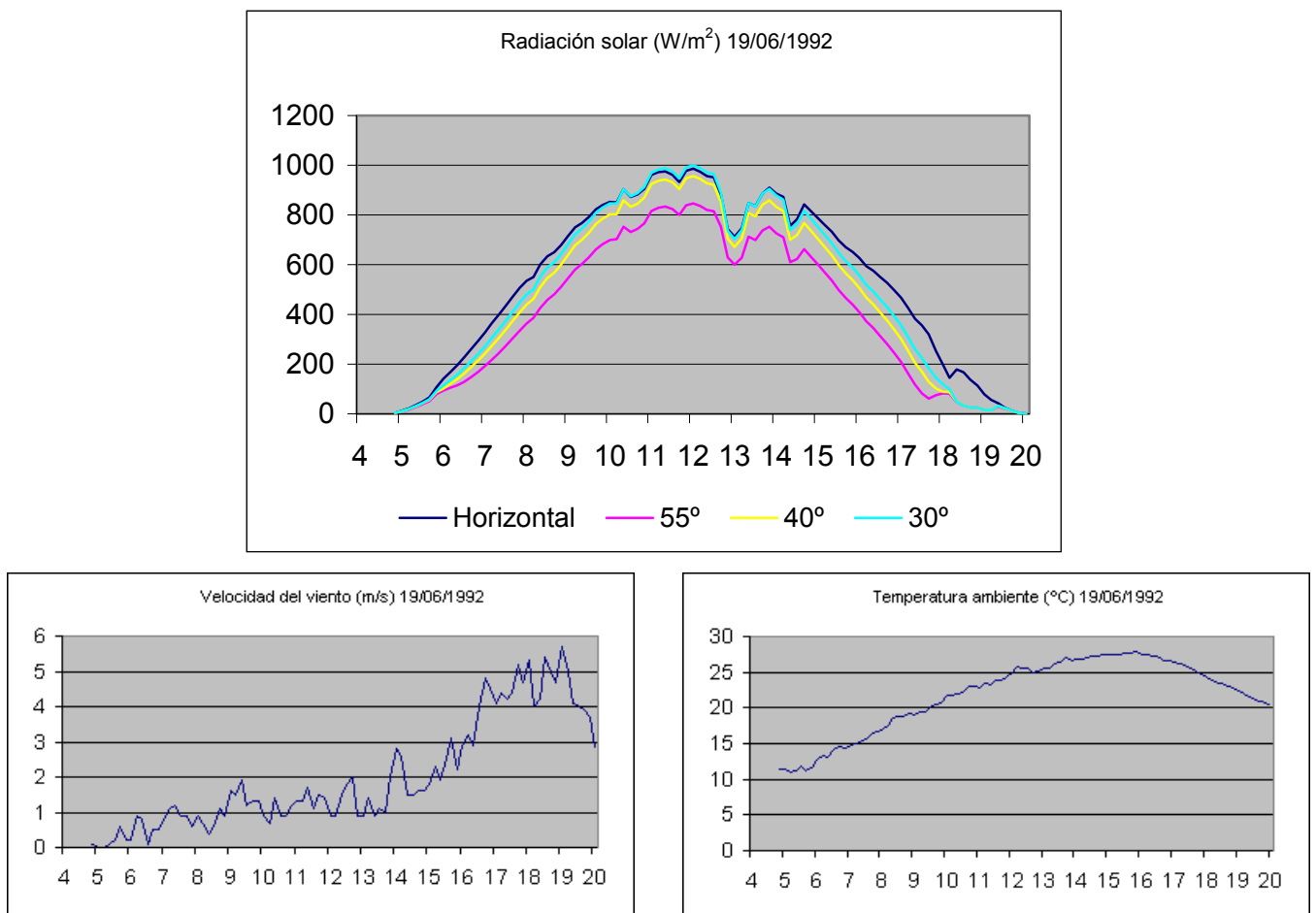


Figura 9. Radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente exterior, 19/6/1992.

En ambos días la velocidad del viento es apreciable y el lector puede comprobar su variabilidad. La temperatura ambiente exterior refleja las estaciones correspondientes. Estas dos últimas variables se representan sólo durante las horas de sol.

6. CONVERTIDORES TÉRMICOS

La energía consumida por las máquinas de absorción se puede generar mediante la conversión térmica de la energía solar. Con un colector plano como el representado en la figura 10 se pueden conseguir temperaturas comprendidas entre 75°C y 90°C. El aire acondicionado también se puede generar utilizando el convertidor de tubos de vacío representado en la figura 11:



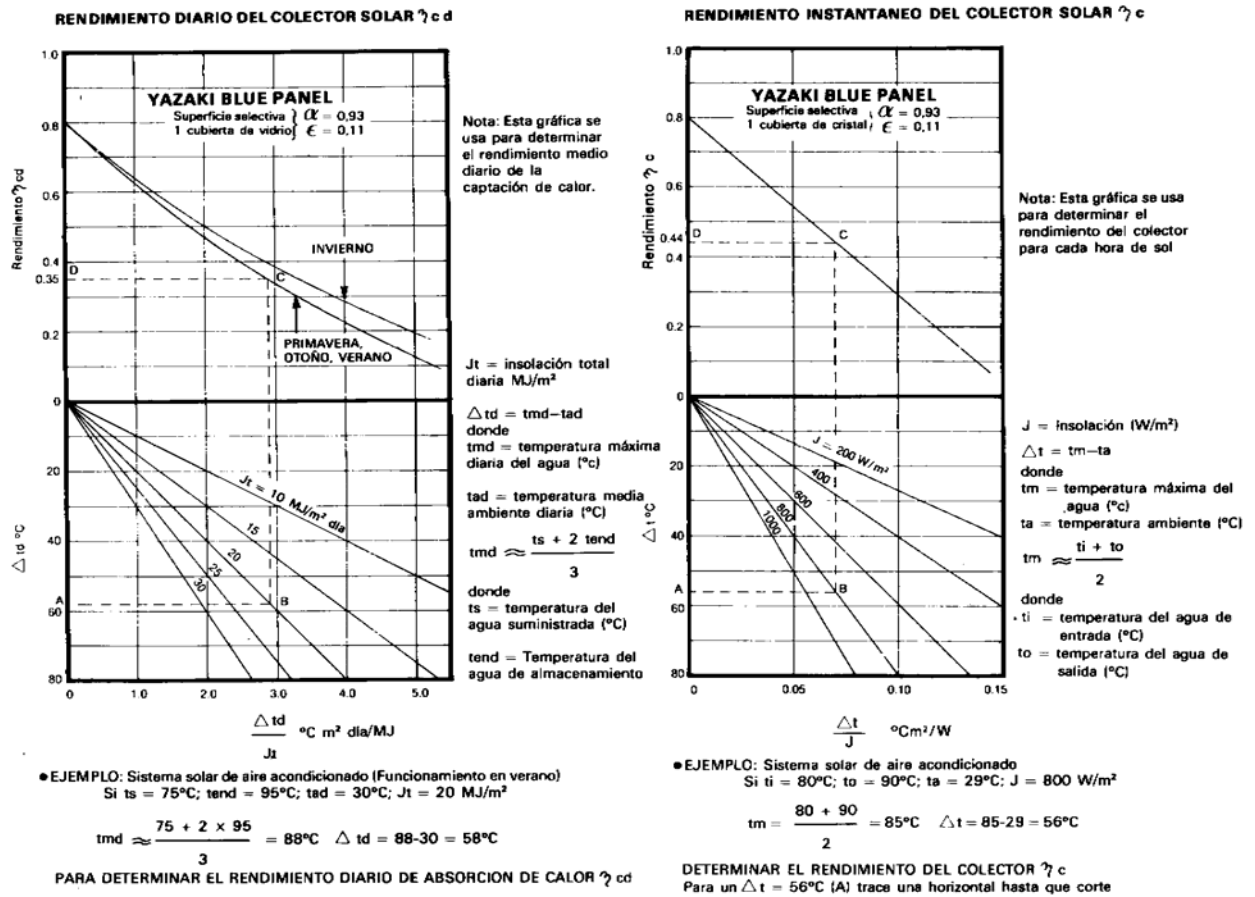
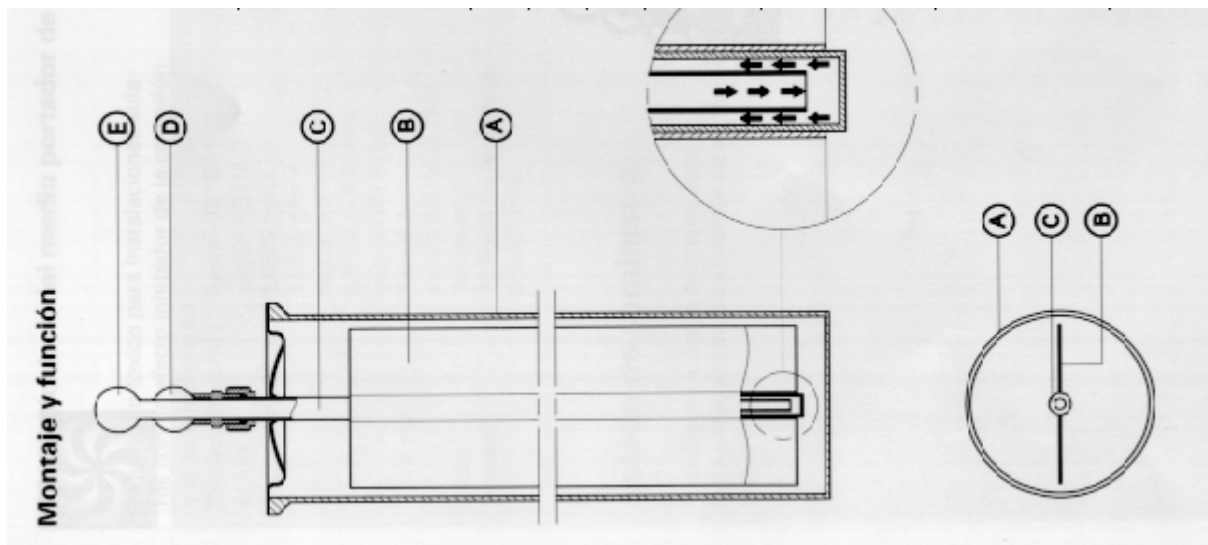


Figura 10. Colector plano utilizado para producir frío por absorción (70°C-90°C)



TubuSol

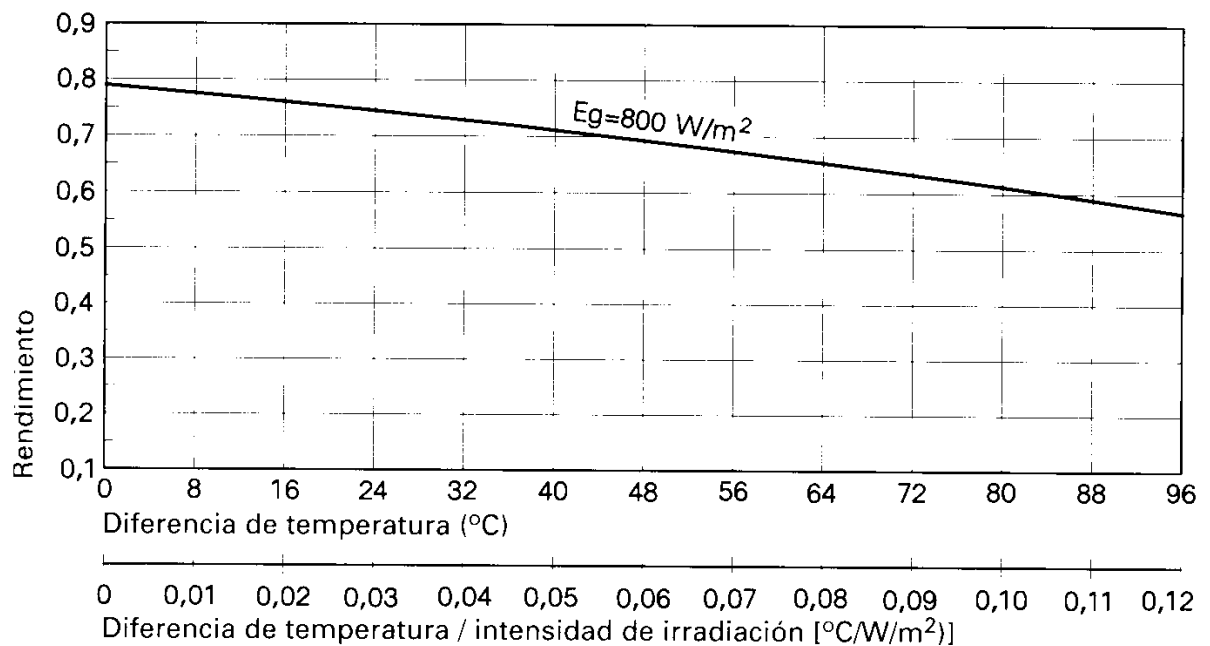


Figura 11. Colector de tubos de vacío utilizado para producir frío por absorción y calor para procesos (70°C-120°C)

7. RADIACIÓN SOLAR, CALOR ÚTIL Y RENDIMIENTO DEL CONVERTIDOR

En la figura 12 tenemos la radiación solar sobre el plano inclinado 40° un día de verano y la energía solar captada por un colector plano de las siguientes características: ($F_R U_{co} = 5 \text{ W/m}^2\text{°C}$; $F_R(\tau\alpha)_n = 0.8$)

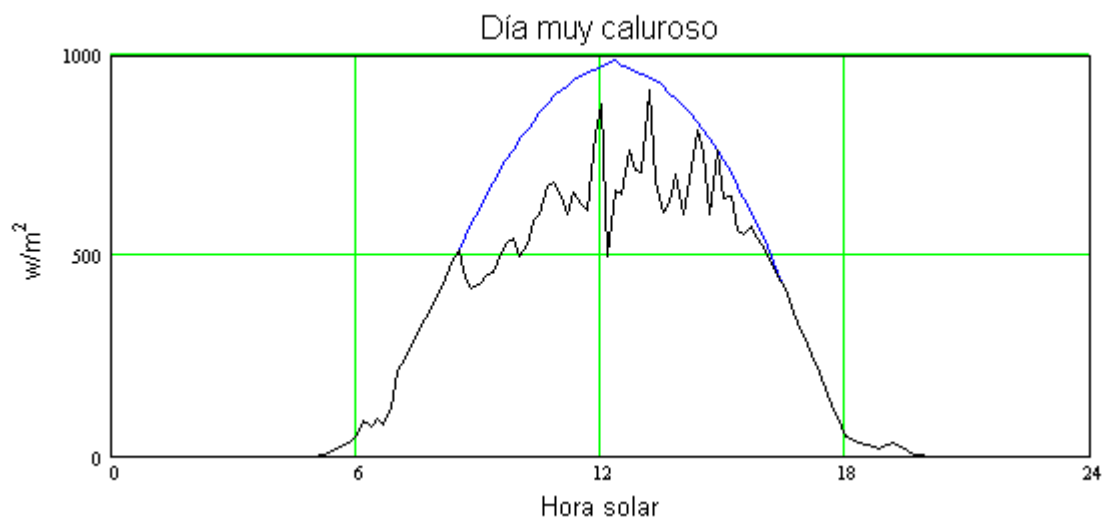


Figura 12. Radiación solar interceptada y umbral mínimo (23/07/1995).

Temperatura máxima y mínima diaria entre las 9 y 21 horas: 40,2°C y 27,3 °C. Energía solar interceptada: 7,42 kWh/m². Calor útil obtenido 1,48 kWh/m²día. Umbral mínimo de energía solar (calor perdido por todos los conceptos): 5,94 kWh/m². Rendimiento de la conversión, 19,9%.

En la figura 13 tenemos, para el mismo día, los resultados para un colector de tubos de vacío con la siguiente curva de normalización ($F_R U_{co} = 1.75 \text{ W/m}^2\text{°C} - 0.008 \text{ W/m}^2\text{°C}^2$; $F_R (\tau\alpha)_n = 0.84$).

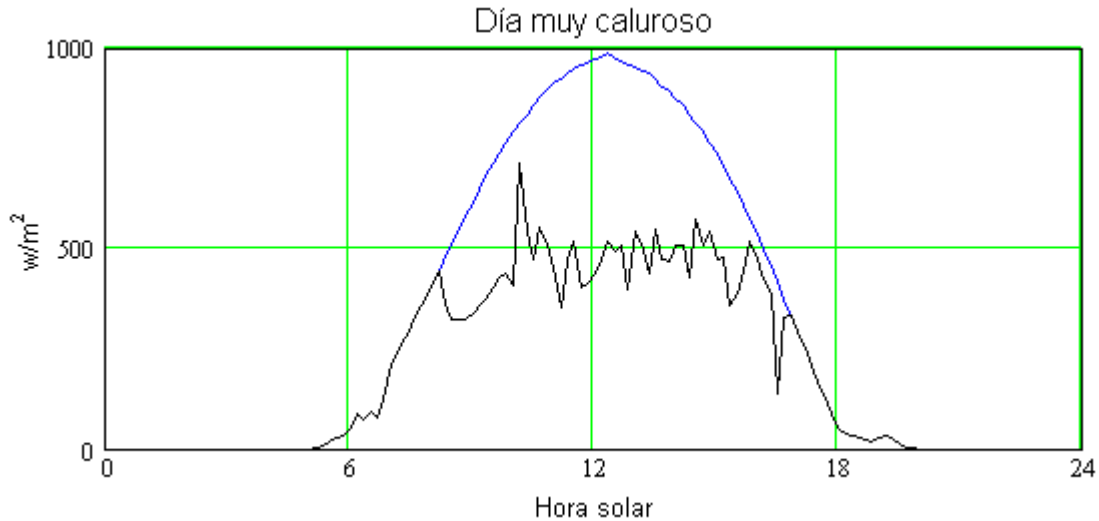


Figura 13. Radiación solar interceptada y umbral mínimo (23/07/1995).

Calor útil obtenido: $2,80 \text{ kWh/m}^2\text{día}$. Umbral mínimo de energía solar (calor perdido por todos los conceptos): $4,62 \text{ kWh/m}^2$. Rendimiento de la conversión: 37,7%. El precio del metro cuadrado del colector de tubos de vacío es tres veces mayor que el precio de la unidad de área del colector plano.

En la tabla 3 tenemos los resultados obtenidos del programa PRECISOL para una instalación de aire acondicionado en Arganda del Rey, con el colector plano especificado. Estos resultados han sido comprobados experimentalmente.

TABLA 3. INSTALACIÓN DE AIRE ACONDICIONADO POR ABSORCIÓN DE BrLi ARGANDA
(34,4 m²)

Temporada	Radiación solar (kWh/m ²)	Rendimiento solar (%)	Carga térmica (kWh/día)	Días sin carga térmica	Fracción solar (%)
1992	6.46	19.7	28.8 (34.1)	19	50.6
1993	6.32	17.7	29.3 (35.4)	21	34.3
1994	6.49	19.1	37.2 (42.8)	16	22.7
1995	6.63	20.0	30.8 (34.5)	13	49.4
1996	6.70	16.1	29.9 (33.4)	13	24.5
1997	6.18	15.6	27.1 (30.3)	13	21.3
1998	6.26	15.5	35.8 (39.4)	11	16.1
1999	6.04	16.3	35.3 (37.1)	6	14.0
Media	6.38	17.4	31.8 (35.9)		29.1

8. IMPACTO AMBIENTAL Y ECONOMÍA DE LOS SISTEMAS DE ABSORCIÓN ACCIONADOS POR ENERGÍA SOLAR

Los sistemas frigoríficos contaminan por tres vías principalmente: destrucción del ozono estratosférico; incremento del efecto invernadero directo como consecuencia de la naturaleza del refrigerante y aumento del efecto invernadero indirecto como consecuencia del dióxido de carbono emitido al generar frío.

Los sistemas de compresión mecánica producen los tres efectos contaminantes. Aunque se están introduciendo refrigerantes que no destruyen el ozono (HFCs), éstos tienen un importante potencial de efecto invernadero directo, y hasta ahora los sustitutos casi siempre trabajan con una eficiencia energética inferior a la del refrigerante (CFC) sustituido, por lo que el potencial de efecto invernadero indirecto suele ser mayor.

Los sistemas de absorción alimentados con combustibles fósiles sólo generan un efecto contaminante: el potencial de efecto invernadero indirecto. Pero como su eficiencia en refrigeración y en climatización con máquinas de simple efecto es inferior a la eficiencia de los ciclos de compresión mecánica, la producción de dióxido de carbono es mayor en todos los casos, excepto para las máquinas alimentadas por calor residual o por calor de energía renovables. Si el calor que acciona las máquinas de absorción proviene de la conversión térmica de la energía solar, entonces la emisión de dióxido de carbono se reduce notablemente, ya que sólo se produce el generado por la maquinaria de la planta solar. La energía solar nos ahorraría la emisión del CO₂ que genera la combustión. Esta solución es óptima desde el punto de vista ambiental, ya que se evita la destrucción del ozono, el potencial de efecto invernadero directo y se reduce al mínimo el potencial de efecto invernadero indirecto.

Cuando las máquinas de absorción son accionadas por energía solar es necesario incluir el coste de la instalación solar en el coste del frío. Actualmente, el precio del colector plano de la figura 10 está comprendido entre 420 y 600 €/m² instalado al que hay que sumar el coste de la máquina de absorción: alrededor de 430 €/kW. Es importante tener en cuenta que esta instalación también se puede utilizar como sistema de alimentación a una instalación de calefacción de forma que con el mismo campo de colectores proporcionar calor para calefacción y calor para aire acondicionado. Así, la instalación solar funciona prácticamente todo el año.

En el futuro habrá que valorar económicamente también el ahorro del CO₂. Esto supondrá una mejora de la rentabilidad económica. El mercado de emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea podría estar en marcha en el año 2005.

CONCLUSIONES

1. Las máquinas de absorción de simple efecto de calentamiento indirecto, condensadas por agua, pueden ser accionadas por el calor producido en colectores solares planos de calidad hasta una temperatura de condensación de unos 38 °C.
2. Si la temperatura de condensación es superior se necesitan convertidores solares de tubos de vacío.
3. La conversión térmica de la energía solar en colectores planos de calidad, produce calor entre 70 °C y 90 °C. Con este calor se podrá producir frío para climatización, accionando un ciclo de bromuro de litio – agua.
4. Se están desarrollando colectores planos de energía solar que pueden alcanzar temperaturas de hasta

160 °C. En el futuro, con el calor producido en estos colectores se accionarán las máquinas de doble efecto condensadas por agua y las condensadas por aire que están en desarrollo.

5. El coste por metro cuadrado de una instalación de aire acondicionado con máquina de bromuro de litio está en torno a 500 €/m² para la instalación solar y 420€/kW para la máquina frigorífica.

6. El uso de la energía solar para accionar máquinas de absorción es una opción rentable desde el punto de vista medioambiental, ya que ahorra emisiones de CO₂. La implantación del mercado de emisiones de CO₂ alrededor del año 2005 afectará positivamente la rentabilidad económica de los sistemas accionados por energía solar.

REFERENCIAS

ASHRAE, Refrigeration Handbook (1994). Absorption Cooling, Heating and Refrigeration Equipment.

Folkerts L., Van Orshoven D., Pavic D. and Mack M. (1995) TIM insulated Flat Plate Collectors using advanced Plastic Materials. Proc. 2nd Munich Discussion Meeting 95, Germany.

Guillen Marco J.A. (1988). Cogeneración y gas natural: Sistemas de cogeneración. Empresa Nacional del Gas, S.A. Avenida de América 38, 28028 Madrid, España.

Herold K.E., Radermacher R., Klein S. (1996) Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press, Boca Raton, USA.

Hollands, K.G.T. and Iynkaran K. (1993) Analytical Model for the thermal conductance of compound honeycomb transparent insulation, with experimental validation. Solar Energy, 51,3,pp 223-227, USA.

Izquierdo M., Hernández F. and Martín E. (1994) Solar cooling in Madrid: available solar energy. Solar Energy, Vol. 53, 431- 443, UK.

Izquierdo M., Hernández F. and Martín E. (1997) Solar cooling in Madrid: energetic efficiencies. Solar Energy, Vol. 60, 367-377, UK.

M. Izquierdo and E. Martín (1995). The engine exhaust gases as energy source of an air condensed mobile absorption machine, 19th International Congress of Refrigeration, The Hague.

M. Izquierdo Millán, J. Turet Claparols y M. Poveda Ciorraga (1991). Climatización de edificios con gas natural. Montaje e Instalaciones, Febrero 1991, 79- 85, Madrid.

Red Eléctrica de España (1998). Proyecto INDEL, Atlas de la demanda eléctrica española. Proyecto de Investigación y Desarrollo Electrotécnico . Pº del Conde de los Agitanes, 177, Alcobendas, 28109 Madrid.

IDAE. monografía “ El consumo de energía de las familias españolas”, Paseo de la Castellana, 95. 28046 Madrid.

Energía 2002 (2002). Foro Nuclear. www.foronuclear.org.