

lograr un alto rendimiento medio anual del sistema solar térmico integrado en la red de distribución de un sistema de calefacción de distrito.

3.7 Climatización solar

En sintonía con los requisitos propios de la climatización, existe una gran variedad de posibilidades de aplicación de la tecnología solar en dicho sector. El caso ideal es la coincidencia temporal de la demanda de frío y la oferta de radiación solar. Además, el calor solar podrá utilizarse en los períodos de transición y en invierno para el apoyo a la calefacción. El potencial de mercado con respecto a sistemas de refrigeración es enorme, especialmente porque se observa un crecimiento en la demanda de refrigeración (requerimientos elevados del aire acondicionado, mayor área de edificios de oficina dotados de más aparatos técnicos, etc.).

Hasta la fecha, en el mercado de equipos utilizados para aplicaciones de climatización predominan las máquinas por compresión que funcionan con energía eléctrica. Anualmente se venden a nivel mundial unos 100 millones de instalaciones estacionarias y unos 35 millones de instalaciones móviles. La compatibilidad medioambiental de los refrigerantes convencionales, así como el aprovechamiento de energía, constituyen un tema de discusiones crítico. El consumo medio anual de energía eléctrica debido al funcionamiento durante el verano de instalaciones por compresión en los edificios climatizados de Europa Central se sitúa entre 10 kWh y 20 kWh por m² de área útil climatizada. Por lo tanto, el consumo de energía primaria relativo a la climatización es de 30 kWh/m² a 60 kWh/m² /9/. En el área mediterránea estos consumos son claramente superiores, pudiendo llegar a doblar estas cifras.

Entre algunas de las ventajas ecológicas de las tecnologías de refrigeración mediante energía térmica en comparación con las máquinas por compresión de funcionamiento eléctrico, se pueden mencionar las siguientes:

- Se lleva a cabo una sustitución de la energía eléctrica para el compresor de la máquina con el propósito de ahorrar energía primaria.
- No se aplican refrigerantes controvertidos (CFC).
- Se reducen considerablemente las emisiones de CO₂.

3.7.1 Tecnología de climatización solar

En la climatización solar se utiliza la energía térmica como fuerza motriz para la producción de frío. Las tecnologías para la producción de frío y la climatización solar pueden clasificarse en sistemas cerrados, con máquinas de absorción o adsorción, y sistemas abiertos (enfriamiento desecativo). En la tabla 3.1 se resumen estas tecnologías.

Proceso	Cerrado		Abierto	
Circuito de refrigerante	Circuito cerrado		Refrigerante (agua) en contacto con la atmósfera	
Principio	Producción de agua fría		Deshumidificación de aire y refrigeración por evaporación	
Absorbente	Sólido	Líquido	Sólido	Líquido
Pares de sustancias típicas	Agua/gel de sílice; Amoníaco/sal*	Bromuro de litio/agua; Amoníaco/agua	Agua/gel de sílice; Agua/celulosa de cloruro de litio	Agua/cloruro de calcio; Agua/cloruro de litio
Tecnología disponible en el mercado	Máquina de adsorción	Máquina de absorción	Enfriamiento desecativo	
COP	0,3–0,7	0,6–0,75 (simple efecto) < 1,2 (doble efecto)	0,5 → 1	> 1
Temperaturas típicas en el generador	60–95 °C	80 °C 110 °C (simple efecto) 130 °C –160 °C (doble efecto)	45 °C–95 °C	45 °C–70 °C
Tecnología solar	Captador de tubos de vacío/captador plano	Captador de tubos de vacío/captador plano	Captador plano/captador de aire	Captador plano/captador de aire
* En desarrollo				

Tabla 3.1 Cuadro sinóptico de las tecnologías de refrigeración.

Máquina de absorción

Igual que en el caso de las máquinas por compresión, un refrigerante se evapora a un nivel bajo de presiones y temperaturas. Al evaporarse, la energía equivalente a la entalpía de evaporación se transfiere al refrigerante y se produce de este modo el efecto de refrigeración deseado.

Funcionamiento del circuito de refrigerante

Según se representa en la figura 3.23, el vapor del refrigerante proveniente del evaporador (1) es absorbido en el absorbedor (2). La disolución líquida resultante, con alta concentración de refrigerante, se pasa a un nivel de presión superior mediante una bomba (3) hacia el generador (4). En éste, bajo el suministro de calor, el refrigerante se evapora y circula al condensador, donde se condensa cediendo su calor al agua de refrigeración (5). Al pasar por la válvula de expansión (6) se expande a un nivel de presión inferior y vuelve a llegar al evaporador (1). De esta manera se cierra el circuito del refrigerante. La disolución con baja concentración de refrigerante proveniente del generador (4) circula después de pasar por la válvula de expansión (6) hacia el absorbedor, con el fin de absorber el vapor de refrigerante. De esta manera se cierra el circuito del absorbente.

En definitiva, el proceso se compone de dos circuitos que se intersecan: el circuito del refrigerante y el circuito del absorbente. El circuito del refrigerante funciona de acuerdo con el principio del desplazamiento del equilibrio térmico de un par de sustancias bajo diferentes condiciones de temperaturas y presiones. La transferencia de calor desde el absorbedor (2) y el condensador (5) al ambiente se lleva a cabo a través de una torre de refrigeración.

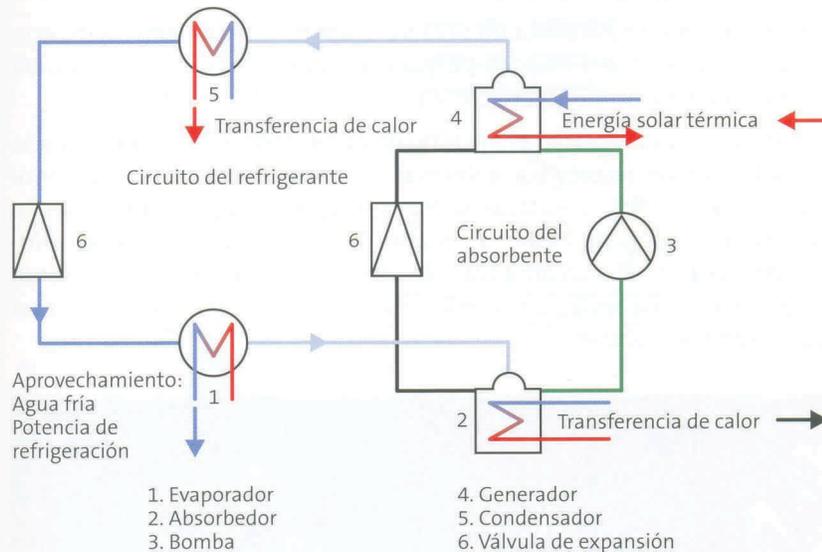


Figura 3.23 Representación esquemática de un ciclo de absorción de simple efecto.

Según el nivel de temperaturas frías deseado se utilizan diferentes pares de sustancias. En el caso de la producción de frío para la refrigeración de edificios, suele emplearse el agua (refrigerante) y el bromuro de litio (LiBr, absorbente). Cuando se exijan temperaturas inferiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ se suele emplear amoníaco (NH_3) y agua. En el mercado existen sistemas con una potencia de refrigeración desde 35 kW hasta 5 MW. Las máquinas de absorción necesitan potencias eléctricas nominales muy bajas, son propensas a pocos desgastes y requieren poco mantenimiento.

La eficiencia de las máquinas de refrigeración accionadas con energía térmica se describe por medio del COP (en inglés, Coefficient of Performance), que se define como la relación entre la potencia de refrigeración y la potencia térmica necesaria.

En los procesos de simple efecto se suelen alcanzar valores de COP de 0,7 y en los procesos de doble efecto incluso más de 1. Sin embargo, las temperaturas requeridas en el generador aumentan en relación con el proceso de simple efecto desde $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el proceso de doble efecto. Por eso se prefiere el uso de captadores de tubos de vacío o de colectores planos de muy alta eficiencia. Tam-

bién es posible el empleo de calor residual (de un proceso de cogeneración, turbinas de gas, etc.), bien sólo, o bien como sistema de apoyo en combinación con la tecnología solar.

Mientras que el rendimiento de los captadores solares disminuye al aumentar la temperatura de trabajo, el rendimiento de la máquina de absorción aumenta con temperaturas de trabajo elevadas. En este contexto, se han de desarrollar conceptos de regulación que minimicen el uso de energía primaria total.

A continuación se presenta un sistema solar térmico de altas temperaturas con captadores cilindro-parabólicos que alimenta una máquina de absorción de doble efecto con calor solar para la climatización.

El sistema se inauguró en el invierno de 2003/2004 en un hotel situado en Dalamán, en la costa turca del mar Egeo, y recibió el premio de innovaciones R.I.O. 2004 en otoño de ese mismo año. La puesta en marcha se efectuó en abril de 2004. La instalación provista de captadores cilindro-parabólicos con un área total de 180 m² climatiza el hotel, calienta la piscina en las estaciones más frías y seca la ropa en este hotel equipado con 700 camas.



Figura 3.24 Campo de captadores cilindro-parabólicos en el Hotel Ibera Sarigermepark, en Turquía (Foto: Solitem).

El COP de una máquina de absorción de simple efecto de aproximadamente 0,7 requiere una potencia térmica de un factor de $1/0,7=1,43$ superior en relación con la potencia de refrigeración de la máquina. Por consiguiente, una potencia de refrigeración de 100 kW exige una potencia térmica de 143 kW. El COP de una máquina de absorción de doble efecto varía entre 1,27 y 1,5, según las condiciones de trabajo (en promedio, 1,4). Con una potencia de refrigeración de 100 kW sólo se necesita, por consiguiente, una potencia térmica de 71,4 kW. En consecuencia, se reduce la superficie de captación de una instalación solar casi hasta la mitad, si bien es cierto que las instalaciones con

captadores cilindro-parabólicos suelen ocupar más espacio, tienen un precio superior y mayores requisitos de mantenimiento y de seguridad, con lo que la tecnología de climatización solar seleccionada en numerosas ocasiones acaban siendo los sistemas con máquinas de absorción de simple efecto conectadas a instalaciones de captadores planos de alta eficiencia o a tubos de vacío.

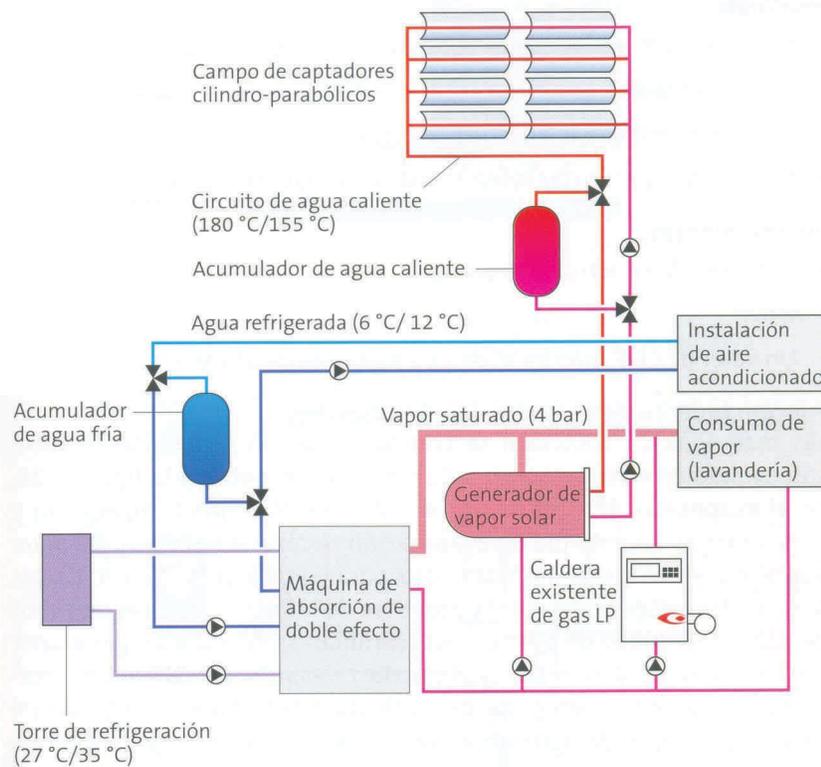


Figura 3.25 Esquema de una instalación solar a altas temperaturas con captadores cilindro-parabólicos, circuito de agua caliente, producción de vapor y máquina de absorción.

En el circuito primario solar circula un fluido de trabajo líquido que sale de los captadores a una temperatura de 180 °C y transfiere el calor solar a esta misma temperatura hacia el generador de vapor, donde se enfría hasta 155 °C, cediendo su calor al vapor saturado que se encuentra a una presión de 4 bar. El vapor saturado se utiliza en parte para la producción de frío en la máquina de absorción de doble efecto y en parte como calor de proceso en una lavandería. Un acumulador de agua caliente sirve para compensar las desigualdades entre la oferta y la demanda de energía solar.

Máquina de adsorción

En la tecnología de adsorción se adsorbe agua como refrigerante en un cuerpo sólido, por ejemplo gel de sílice, liberándose entalpía de enlace en la superficie. El nivel de temperaturas necesarias para este proceso es de 60 °C–95 °C, por lo tanto se pueden emplear captadores de tubos de vacío o captadores planos.

Ventajas:

- No se utilizan refrigerantes controvertidos, sólo agua.
- Proceso sencillo.
- Poca susceptibilidad a perturbaciones.
- Nivel de temperaturas inferior al de una máquina de absorción.

Inconvenientes:

- Volumen de construcción grande.
- Caro.
- Un valor de COP inferior al de una máquina de absorción.

Funcionamiento de una máquina de adsorción

Las máquinas de adsorción se componen de un recipiente en vacío subdividido en cuatro cámaras. Como se representa en la figura 3.26, en el evaporador (1) se evapora el refrigerante a una temperatura y presión bajas. La entalpía de evaporación necesaria se extrae del agua que se ha de refrigerar (enfriamiento, por ejemplo, de 14 °C a 9 °C). Las dos cámaras intermedias (2, 3), provistas de intercambiadores de tubos de cobre revestidos de gel de sílice, cambian su función de generador (desorbedor) (2) y colector (adsorbedor) después de cada ciclo, desviando el circuito de refrigeración y calentamiento. En el adsorbedor (3) se añade el vapor de agua en la superficie del gel de sílice. La energía equivalente a la entalpía de enlace se transfiere a una torre de refrigeración. En el desorbedor (2) el proceso se lleva a cabo en dirección contraria. En este caso se suministra calor generado por un sistema solar térmico a una temperatura de aproximadamente 80 °C, y se libera el refrigerante adsorbido en la superficie del gel de sílice.

La cámara superior es el condensador (4). El refrigerante condensado allí se conduce al evaporador a través del circuito de recirculación. Todos los componentes están conectados por medio de válvulas de mariposa, que se abren y cierran automáticamente debido a las diferencias de presiones predominantes, posibilitando de esta manera la formación de un circuito cerrado, con funcionamiento periódico. En caso necesario, el calor residual sigue utilizándose gracias a una instalación de recuperación de calor. Para mayor información se pueden consultar en Internet las webs www.adsorber.de y www.gbunet.de.

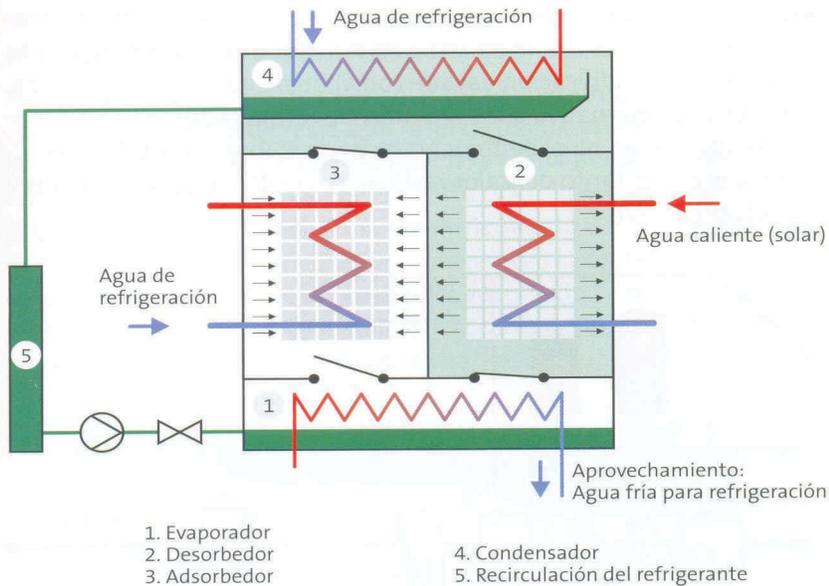


Figura 3.26 Esquema de una máquina de adsorción. La función de las cámaras 2 y 3 cambia después de cada ciclo, para esto se desvían los circuitos de refrigeración y de calentamiento.

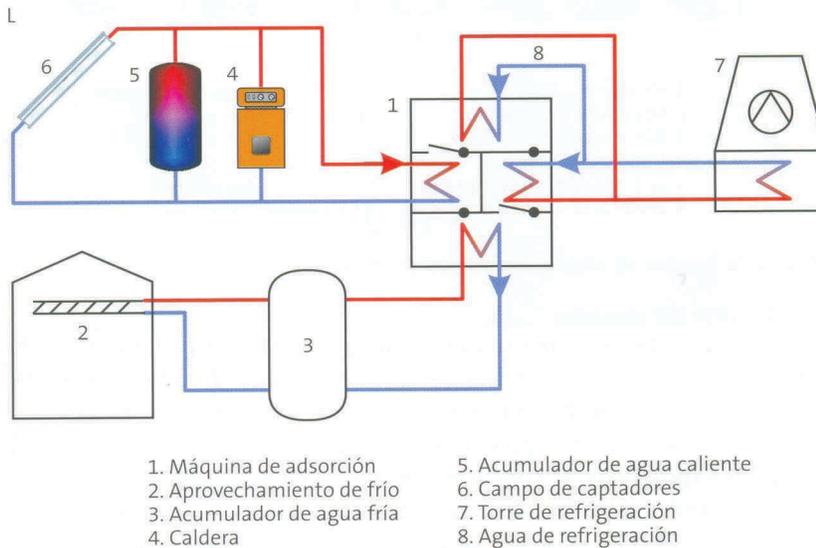


Figura 3.27 Esquema de un sistema de adsorción con calentamiento solar.

Sistemas abiertos: Enfriamiento desecativo

En cuanto a las instalaciones de climatización con enfriamiento desecativo, se trata más bien de sistemas abiertos, contrariamente a las máquinas de refrigeración descritas anteriormente, las cuales producen agua fría en un circuito de refrigeración cerrado. Estos sistemas

deshumidifican y enfrían directamente el aire. El enfriamiento desecativo se basa en el principio de refrigeración por evaporación mediante la previa deshumidificación del aire con el fin de aumentar su eficacia. Suponen una alternativa a los sistemas de refrigeración convencionales. Debido al bajo nivel de temperaturas de trabajo, de 45 °C a 95 °C, es posible el uso tanto del calor residual como de captadores planos y captadores de aire.

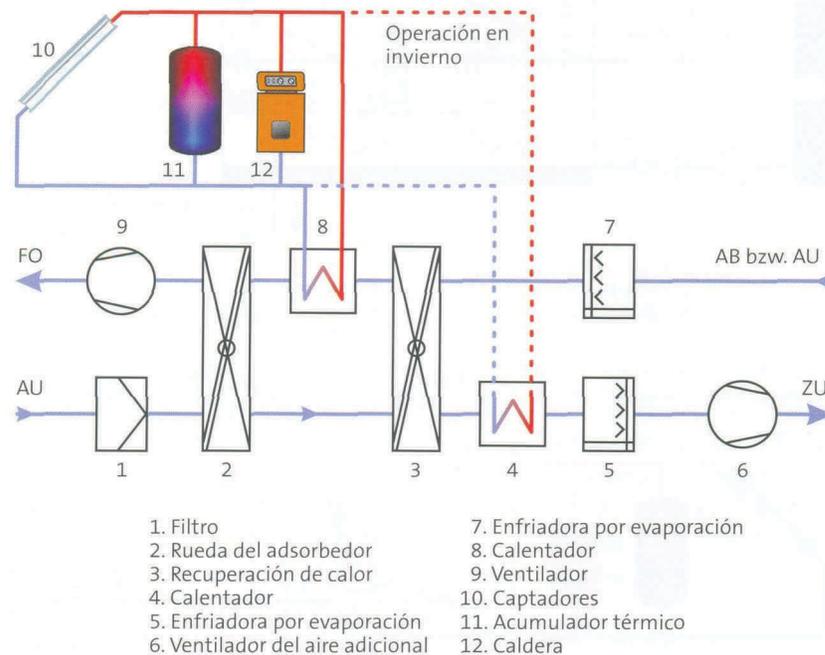


Figura 3.28 Esquema de una instalación de enfriamiento desecativo.

Descripción del proceso

En el proceso de enfriamiento desecativo (figura 3.28), el aire filtrado del exterior (1) se seca con una denominada rueda del adsorbedor (2). A continuación, se enfría en un sistema de recuperación de calor (3), y luego se humedece con agua en un refrigerador por evaporación (5). El agua se evapora y extrae del aire la entalpía de evaporación necesaria. De esta manera se enfría el aire en los sistemas hasta alcanzar 16 °C.

El gel de sílice es un producto deshumidificador fabricado a base de silicio y no contaminante que se suele utilizar, por ejemplo, en los embalajes de aparatos técnicos sensibles a la humedad. El gel de sílice adsorbe el vapor de agua contenido en el aire que circula por la rueda del adsorbedor, reteniendo las moléculas de agua en la propia estructura, hasta que se satura. La fuerza motriz es la diferencia de presión parcial (la presión parcial del vapor de agua en el aire es mayor que la de por encima de la superficie del adsorbente).

Debido a las propiedades higroscópicas se logra deshumidificar el aire ya antes de alcanzar la temperatura de condensación.

Mediante el suministro de calor solar (8) se vuelven a liberar las moléculas de agua del gel de sílice a un nivel de temperaturas relativamente bajo, de 45 °C a 95 °C, lo que permite a la rueda del adsorbedor la adsorción de vapor de agua en el siguiente ciclo. En invierno y en la temporada de transición, el sistema de enfriamiento desecativo funciona como un equipo de refrigeración convencional con recuperación del calor, en donde se emplea la rueda del adsorbedor a modo de recuperador de calor adicional. La instalación contribuye al calentamiento del aire de impulsión (4) en el período de transición.

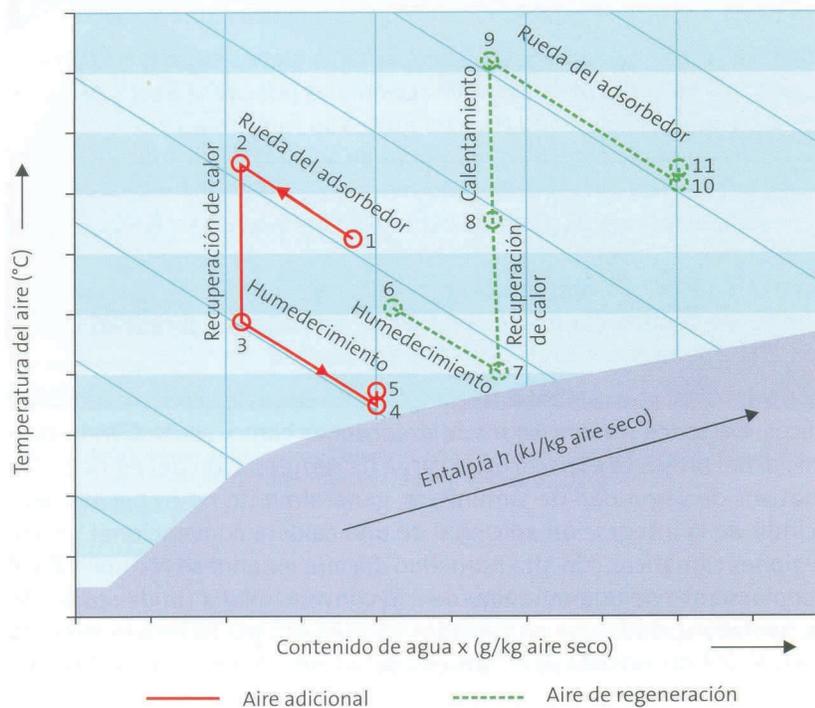


Figura 3.29 Cambios de estado de aire (en verano) en el diagrama h-x de un sistema de enfriamiento desecativo.

Cambios de estado:

- 1-2 Deshumidificación del aire exterior mediante adsorción.
- 2-3 Enfriamiento (previo) del aire exterior por medio de la recuperación del calor.
- 3-4 Enfriamiento mediante refrigeración por evaporación controlada.
- 4-5 Calentamiento debido a la potencia térmica del ventilador.

- 6-7 Enfriamiento del aire de extracción. Por lo general, se emplea el aire de extracción para la regeneración del adsorbedor (aire de regeneración). Sólo en caso de que esté sometido a temperaturas elevadas y/o contaminado como, por ejemplo, en las naves de producción, se suele utilizar también aire del exterior.
- 7-8 Calentamiento del aire de regeneración debido a la recuperación de calor al enfriarse el aire de impulsión (2-3).
- 8-9 Calentamiento posterior del aire regenerativo (calor solar, calor proveniente de un proceso de cogeneración, etc.)
- 9-10 Desorción del agua en la rueda del adsorbedor (1-2) debido a la corriente del aire regenerativo.
- 10-11 Calentamiento debido a la potencia térmica del ventilador.

Hasta la fecha se han instalado en Alemania siete sistemas de climatización de enfriamiento desecativo accionadas por energía solar térmica. Las experiencias acumuladas en relación a su funcionamiento son positivas. En comparación con las máquinas de adsorción y absorción, resulta más fácil realizar un conexionado hidráulico estable con una instalación solar. El primer sistema de climatización de enfriamiento desecativo operado sólo con energía solar, con 100 m² de captadores de aire (figura 3.30), logra enfriar desde finales de junio de 2001 la ampliamente acristalada planta de sesiones de la Cámara de Industria y Comercio situada en el sur del Alto Rin, en Friburgo.

El enfriamiento sólo mediante energía solar se suele llevar a cabo raras veces. De todos modos, se ha de determinar con exactitud en la fase inicial del proyecto el perfil de la carga de refrigeración del edificio. Por motivos de seguridad de suministro, generalmente no es posible prescindir de la integración adicional de una caldera convencional. En las regiones climáticas con alta humedad del aire exterior se recomienda el acoplamiento de una máquina de frío convencional a fin de reducir la temperatura, dado que en períodos con un alto grado de humedad la deshumidificación del aire en la rueda del adsorbente resulta insuficiente.

3.7.2 Aspectos económicos

Si se utilizan fuentes de calor baratas, como el calor residual, los procesos de climatización accionados por energía térmica pueden resultar económicos. Como los costes del calor solar suministrado suelen ser superiores a los del calor residual, resulta difícil llevar a cabo una operación rentable de los procesos de climatización solar en la actualidad. En comparación con los sistemas presentados, es más factible alcanzar este objetivo mediante un sistema de enfriamiento desecativo /10/.

El caso más problemático en cuanto a la rentabilidad de la operación se presenta cuando se trata de máquinas de adsorción, en vista a que los costes de inversión, incluida la de los elementos periférico, ascienden