



Fundación de la Energía de  
la Comunidad de Madrid



[www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)



Madrid  
**Ahorra**  
con Energía



La Suma de Todos



CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA

**Comunidad de Madrid**

[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

GUÍA DEL FRÍO SOLAR. Ahorro y eficiencia energética con refrigeración solar

# Guía del Frío Solar. Ahorro y eficiencia energética con refrigeración solar



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE INDUSTRIA,  
TURISMO  
Y COMERCIO



Instituto para la  
Diversificación y  
Ahorro de la Energía



ahorra  
energía

Medida de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética para España (2004/2012) puesta en marcha por la Comunidad de Madrid, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).







# Guía del Frío Solar. Ahorro y eficiencia energética con refrigeración solar

Madrid, 2011



Fundación de la Energía de  
la Comunidad de Madrid



[www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)



La Suma de Todos



CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA

**Comunidad de Madrid**

[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

Esta Guía se puede descargar en formato pdf desde la sección de publicaciones de las páginas web:

[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

(Consejería de Economía y Hacienda, organización Dirección General de Industria, Energía y Minas)

[www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)

Si desea recibir ejemplares de esta publicación en formato papel puede contactar con:

**Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid**

[dgtecnico@madrid.org](mailto:dgtecnico@madrid.org)

**Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid**

[fundacion@fenercom.com](mailto:fundacion@fenercom.com)

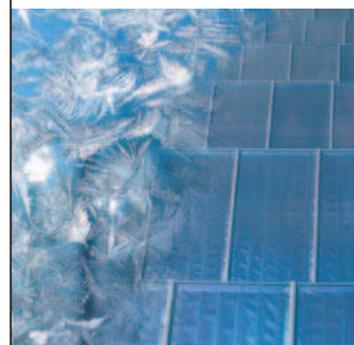
La Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, respetuosa con la libertad intelectual de sus colaboradores, reproduce los originales que se le entregan, pero no se identifica necesariamente con las ideas y opiniones que en ellos se exponen y, por tanto, no asume responsabilidad alguna de la información contenida en esta publicación.

La Comunidad de Madrid y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, no se hacen responsables de las opiniones, imágenes, textos y trabajos de los autores de esta guía.

Depósito Legal: M. 14.350-2011

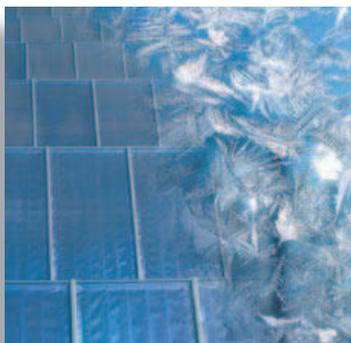
Impresión Gráfica: Gráficas Arias Montano, S. A.

28935 MÓSTOLES (Madrid)



# Autores

- Capítulo 1. **Consideraciones sobre tecnologías de frío solar**  
*D. Juan Carlos Lavandeira*  
Fundador y Gerente de Zapalia.  
Coordinador de I+D del PSE-ARFRISOL Proyecto Singular Estratégico de I+D sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar.
- Capítulo 2. **Termodinámica de la refrigeración por sorción**  
*D. Jorge Pistono Favero*  
*D. Isaac Sarries Olmos*  
Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica (GIT)  
Universidad de Oviedo  
[www.uniovi.es/vicinves/Web\\_investigacion/unidades/gruposInv/DptoEnergia/IngTermica/main](http://www.uniovi.es/vicinves/Web_investigacion/unidades/gruposInv/DptoEnergia/IngTermica/main)  
[www.uniovi.es/MMTermicos](http://www.uniovi.es/MMTermicos)  
[www.ciatea.org](http://www.ciatea.org)
- Capítulo 3. **Frío solar: tecnología de absorción en triple estado**  
*D. David Hernandez García. Customer Support Director.*  
ClimateWell  
[www.climatewell.com](http://www.climatewell.com)
- Capítulo 4. **Acoplamiento y optimización de los flujos de calor en los sistemas de frío solar**  
*D. Juan A. Avellaner Lacal, Director General de I+D, Formación y RR.II.*  
*D. Juan Antonio González Mon, Gerente de U.N. Solar Térmica.*  
Soliker (Grupo Unisolar)  
[www.grupounisolar.com](http://www.grupounisolar.com)
- Capítulo 5. **Diseño eficiente de los edificios para refrigeración solar**  
*D. José Antonio Ferrer Tevar, Jefe de Análisis Energéticos de Edificios.*  
*Dña. M<sup>ª</sup> del Rosario Heras Celemín. Unidad de Investigación sobre Eficiencia Energética en Edificación*  
CIEMAT  
[www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)
- Capítulo 6. **Directrices para el diseño y la viabilidad de sistemas de frío solar**  
*D. Juan Carlos Lavandeira. Fundador y Gerente de Zapalia.*  
Coordinador de I+D del Proyecto Singular Estratégico de I+D sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar  
PSE-ARFRISOL
- Capítulo 7. **Frío solar en el sector terciario o en el residencial comunitario**  
*D. David Carvajal Sánchez-Moreno, Director Técnico.*  
*D. Francesc Padrós Corominas, Apoderado.*  
Absorsistem  
[www.absorsistem.com](http://www.absorsistem.com)
- Capítulo 8. **Potencial de mercado del frío solar**  
*D. Pedro Luis Rodríguez. Director General.*  
ClimateWell  
[www.climatewell.com](http://www.climatewell.com)



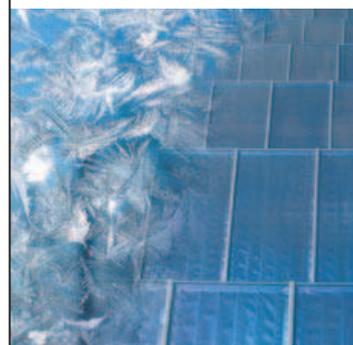
## Guía del Frío Solar

### Capítulo 9. **Ayudas de la Comunidad de Madrid**

D. José Antonio González Martínez  
Subdirector General de Promoción Industrial y Energética.  
Dirección General de Industria, Energía y Minas.  
Comunidad de Madrid  
[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

### Capítulo 10. **Proyectos emblemáticos**

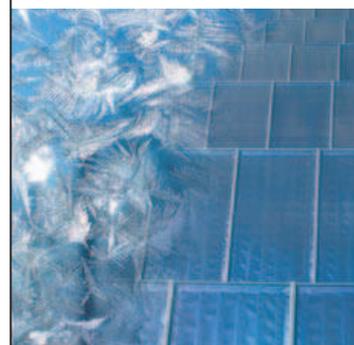
- **Ahorro con frío solar en una vivienda unifamiliar**  
ClimateWell  
[www.climatewell.com](http://www.climatewell.com)
- **Ahorro con frío solar en una oficina**  
ClimateWell  
[www.climatewell.com](http://www.climatewell.com)
- **Instalación de frío solar en edificio de oficinas ubicado en Almería dentro del proyecto ARFRISOL**  
D. Juan Luis Bote García, Jefe del Grupo de Instalaciones  
D. Javier Grávalos Moreno. Dpto. I+D+i.  
Acciona Infraestructuras  
[www.acciona.es](http://www.acciona.es)
- **Banco de Pruebas de Frío Solar de Gijón (BPFSG)**  
Universidad de Oviedo  
[www.uniovi.es/vicinves/Web\\_investigacion/unidades/gruposInv/DptoEnergia/IngTermica/main](http://www.uniovi.es/vicinves/Web_investigacion/unidades/gruposInv/DptoEnergia/IngTermica/main)  
[www.uniovi.es/MMTermicos](http://www.uniovi.es/MMTermicos)  
[www.ciatea.org](http://www.ciatea.org)
- **Edificio de producción vegetal refrigerado con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción**  
Absorsistem  
[www.absorsistem.com](http://www.absorsistem.com)
- **Hotel refrigerado con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción**  
Absorsistem  
[www.absorsistem.com](http://www.absorsistem.com)
- **Industria embotelladora de agua, refrigerada con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción**  
Absorsistem  
[www.absorsistem.com](http://www.absorsistem.com)



# Índice

PRESENTACIÓN	9
1. CONSIDERACIONES SOBRE TECNOLOGÍAS DE FRÍO SOLAR	11
2. TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN POR SORCIÓN	23
3. FRÍO SOLAR: TECNOLOGÍA DE ABSORCIÓN EN TRIPLE ESTADO	53
4. ACOPLAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR EN LOS SISTEMAS DE FRÍO SOLAR	81
5. DISEÑO EFICIENTE DE LOS EDIFICIOS PARA REFRIGERACIÓN SOLAR	101
6. DIRECTRICES PARA EL DISEÑO Y LA VIABILIDAD DE SISTEMAS DE FRÍO SOLAR	123
7. FRÍO SOLAR EN EL SECTOR TERCIARIO O EN EL RESIDENCIAL COMUNITARIO	131
8. POTENCIAL DE MERCADO DEL FRÍO SOLAR	145
9. AYUDAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID	149
10. PROYECTOS EMBLEMÁTICOS	153
– Ahorro con frío solar en una vivienda unifamiliar	155
– Ahorros con frío solar en una oficina	159
– Instalación de frío solar en edificio de oficinas ubicado en Almería	163
– Banco de Pruebas de Frío Solar de Gijón (BPFSG)	171
– Edificio de producción vegetal refrigerado con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción	177
– Hotel refrigerado con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción	181
– Industria embotelladora de agua, refrigerada con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción	185





# P RESENTACIÓN

La refrigeración con Frío Solar es una tecnología que necesita un impulso por parte de las Administraciones y empresas, habida cuenta de los beneficios potenciales que aporta, que si bien tiene décadas de vida, su nivel de implantación es aún muy bajo pese a que se podría instalar tanto en el sector primario, como en el industrial, en el de servicios y en el residencial.

En este contexto, la Consejería de Economía y Hacienda, en colaboración con la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid y diversas empresas e instituciones del sector energético y de servicios, han elaborado esta guía, dirigida tanto al público profesional como al ciudadano, como instrumento para dar a conocer esta tecnología y sus posibilidades como alternativa a las otras más difundidas.

La guía explica qué es el Frío Solar y detalla los tipos de sistemas y cuáles son sus posibles aplicaciones y su nivel de compatibilidad con otros equipos de calefacción, ventilación y refrigeración.

Es importante señalar que los sistemas citados en la guía pueden contribuir a conseguir los fines que persigue la Comunidad de Madrid con la campaña **Madrid Ahorra con Energía** a través de su extensa colección de publicaciones relacionadas con la eficiencia energética.

Esperamos que esta aportación de conocimientos sirva para mantener vivo el espíritu de la citada campaña y desde aquí animamos a consultar la serie de Guías de Ahorro y Eficiencia Energética enfocadas a diversos sectores y que pueden descargarse en la web de la Fundación.

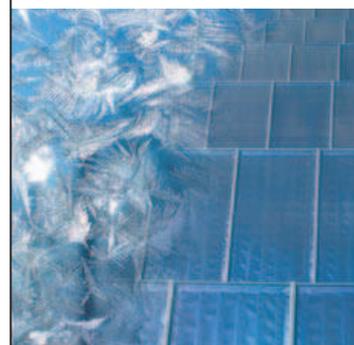
**Carlos López Jimeno**

Director General de Industria, Energía y Minas  
Consejería de Economía y Hacienda  
Comunidad de Madrid



# 1

## CONSIDERACIONES SOBRE TECNOLOGÍAS DE FRÍO SOLAR



Estas notas pretenden dar una visión general de lo que se puede entender por frío solar y sus distintas tecnologías.

Antes de comenzar a hacer ninguna consideración tecnológica, debemos tener unos conocimientos básicos comunes.

Analizaremos qué se considerará frío en estas hojas, los niveles de refrigeración, las tecnologías solares y las de refrigeración que se pueden mover con energía solar.

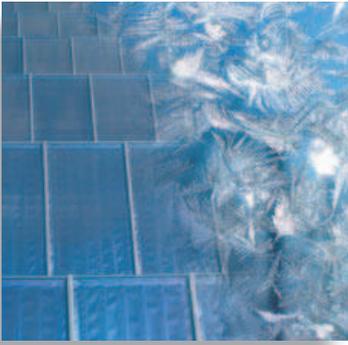
En relación con el concepto de frío, podemos comentar que existen múltiples formas de entender este término, pero considerando las acepciones de este fenómeno físico, podríamos definirlo como el término que se aplica a los cuerpos cuya temperatura es inferior a la del ambiente y a las sensaciones que experimentamos al estar en contacto con cuerpos que se encuentran a esas temperaturas.

Como se puede ver, dicho término es relativo (ya que lo que es frío para unos puede no serlo para otros), aunque se puede considerar relacionado con el contenido de calor a bajas temperaturas.

Asimismo, se entiende por refrigeración a la producción de frío consistente en un proceso o unión de procesos que de manera controlada pueden producir bajas temperaturas.

La refrigeración es importante por su implicación en múltiples actuaciones de nuestra vida:

- Conservación de productos, alimentos,...
- Aplicaciones industriales en la producción de elementos químicos, construcción,...



## Guía del Frío Solar

- En la industria de la salud (mantener medicamentos, sangre, embriones,...).
- Calidad de vida, haciendo posible disponer de temperaturas agradables en las zonas calurosas, hoteles, escuelas, oficinas,...
- Otras múltiples aplicaciones que hacen de la necesidad de refrigeración, un objetivo de nuestra sociedad.

Pero... ¿cuáles son las formas de lograrlo?:

Considerando el enfriamiento como un proceso de eliminación de calor de un cuerpo o un espacio, bajando la temperatura sin que se modifique su estado físico, logrando que la temperatura sea inferior a la de su entorno.

Para lograr esto, desde hace muchos siglos se han experimentado múltiples formas, algunas naturales y otras artificiales.

- **Naturales**

Son procesos naturales consistentes en pérdida de calor de forma espontánea, ya sea por:

- Radiación (enfriamiento radiativo).
- Convección – evaporación (enfriamiento evaporativo).
- Conducción (contacto entre diferentes cuerpos con menor temperatura).

- **Artificiales**

Están basados en la utilización de diversos procesos, ya sean con la mezcla de fluidos con propiedades termodinámicas especiales u otras.

- Procesos químicos, con la disolución de solutos en solventes.
- Procesos químicos con transiciones de cambio de fase de algún elemento (fusión, evaporación, sublimación) que ocurren a baja temperatura.

- Mecánicos, como expansión de gases previamente comprimidos, procesos termo-eléctricos, termo-acústicos,...

Otro de los elementos importantes a considerar sobre el enfriamiento son los niveles a los que trabajar.

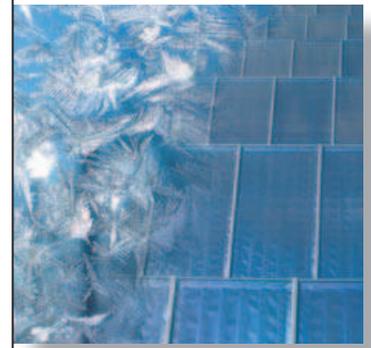
Considerando la temperatura ambiente como base se pueden considerar los siguientes niveles:

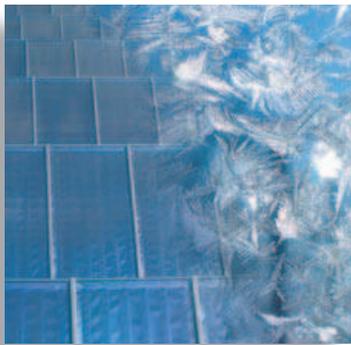
- Enfriamiento: entre los 24 °C y los 14 °C. Se puede conseguir a través de algunos procesos naturales.
- Refrigeración: entre los 14 °C y los 0 °C, cuando comienza a producirse el cambio de estado del agua.
- Subenfriamiento: operando en el rango de temperatura de 0 °C hasta los -15 °C. En este rango se forma el hielo.
- Congelación: en el rango entre los -15 °C y los -35 °C. Rango que se utiliza para la conservación de productos.
- Subcongelación: en el rango de los -30 °C y los -200 °C.
- Criogenia o muy baja temperatura: alrededor del cero absoluto.

El hecho de conocer los diversos niveles, nos permite definir los niveles en los que pueden trabajar las tecnologías de frío solar.

Ahora también se debe aclarar que consideraremos las dos formas de transformar la energía solar en energía: la solar térmica (energía en forma de calor) y la solar fotovoltaica (energía eléctrica).

Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características y particularidades, tanto de equipos que posibilitan dichas transformaciones, como los rendimientos de las mismas. Supondremos que se conocen las bases de las mismas.





## Guía del Frío Solar

Asimismo debe considerarse que cada tecnología tiene sus costes, aunque el factor común es que el recurso solar es gratuito y no varía en el tiempo.

En el esquema adjunto se pueden observar las diferentes tecnologías que pueden trabajar con energía solar.

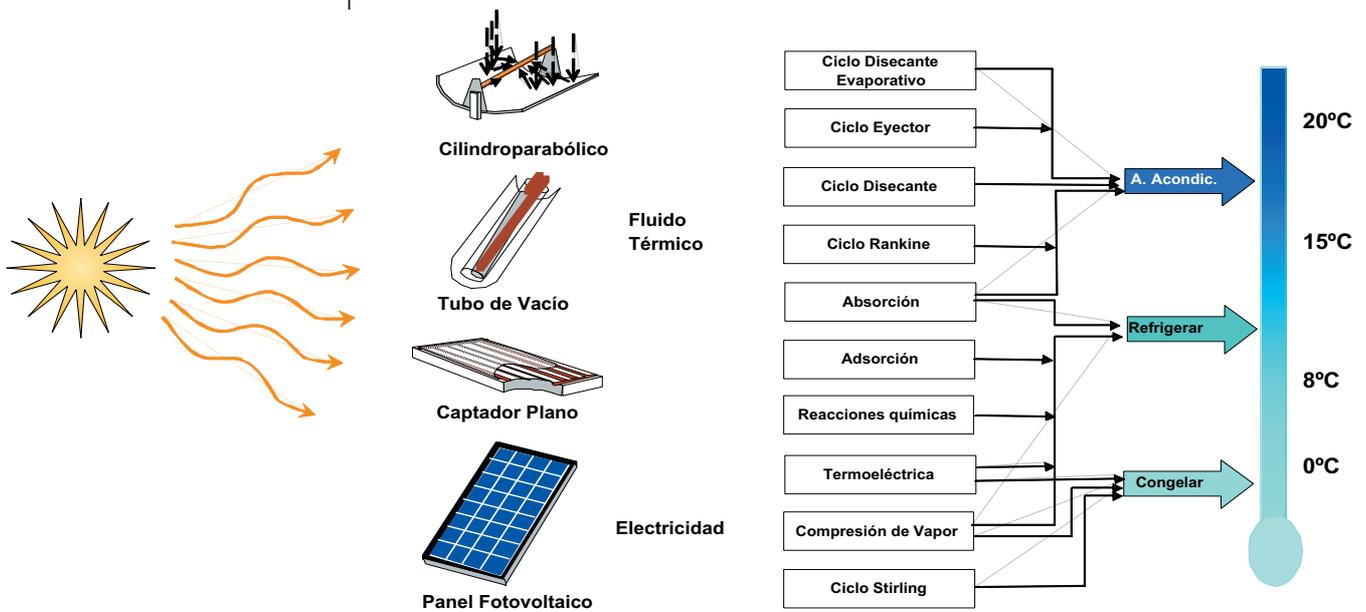


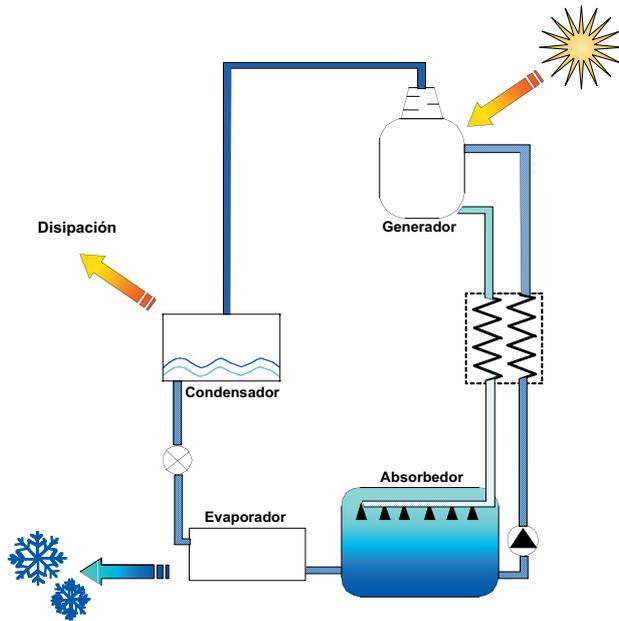
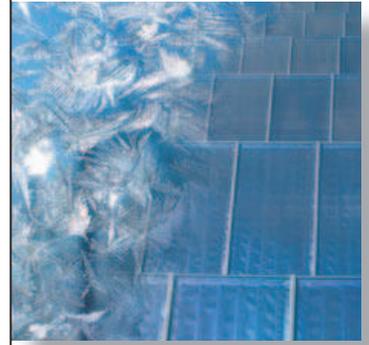
Figura 1. Tecnologías que pueden trabajar con energía solar.

## 1. REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

Este fue el primer sistema de absorción que se introdujo de forma práctica hacia 1886 (**Ferdinand Carré**) en base a una patente de 1859.

Los sistemas de sorción se basan en la capacidad de unos elementos en absorber a otros.

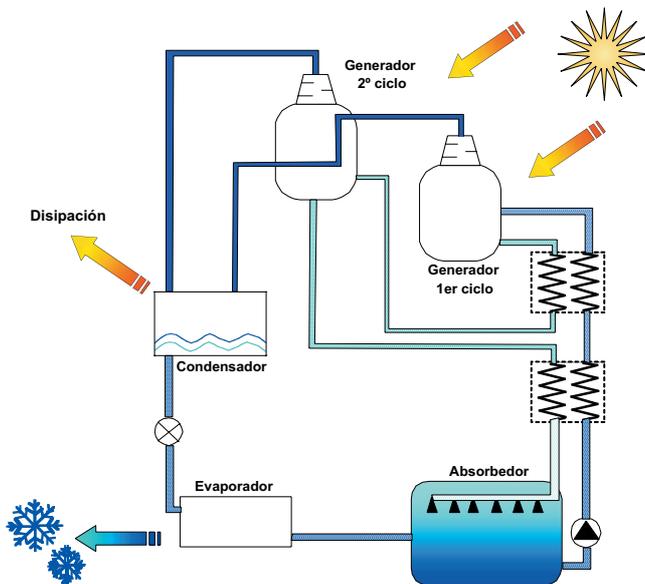
Si en un contenedor donde se ha hecho el vacío se introduce un elemento como puede ser agua, se evaporaría quitando calor al entorno (evaporador). Para absorber el vapor de agua, se introduce un elemento que absorba el vapor de agua, como puede ser el amoniaco (absorbedor). Para poder liberar ese vapor para futuras aplicaciones, se debe calentar y eso se hace aplicando el calor de energía solar (generador). De esta forma se separan los elementos, el uno vuelve al absorbedor y la otra parte debe ser condensada (condensador) para volver al evaporador. Ver la figura 2.



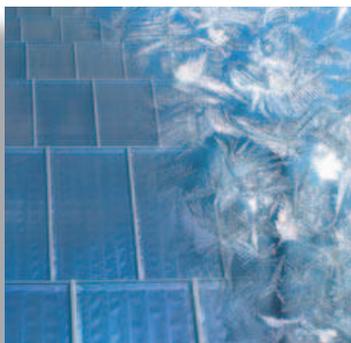
**Figura 2.** Refrigeración por absorción.

El calor de la energía solar, se aplica a una parte del sistema denominado generador (la temperatura puede ser menor de 100° C). Cuanto menor es la temperatura del generador mayor debe ser la superficie de intercambio.

Los rendimientos habituales de estos sistemas son del orden de 0,7 que puede incrementarse al 1,35 si el sistema es de doble efecto como se plantea en la figura.



**Figura 3.** Sistema de doble efecto.

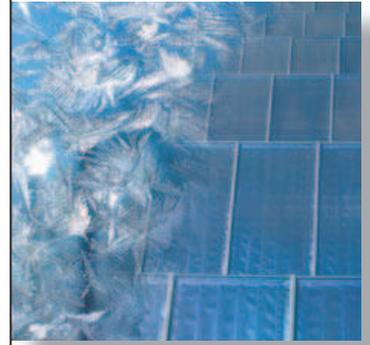


## Guía del Frío Solar

Esto representa el esquema más sencillo de absorción.

Existen diversas modificaciones que representan cambios para mejorar algunos de los inconvenientes del sistema básico, así tenemos:

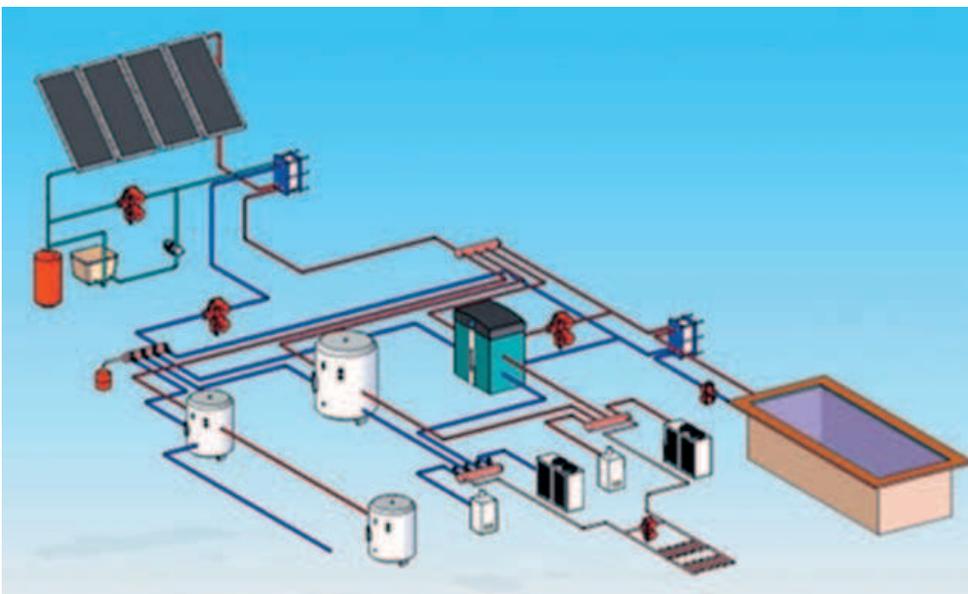
- **Sistemas de multiefecto** (doble o triple) según se ha visto antes. La única limitación radica en que la fuente necesaria para hacer funcionar el sistema debe ser superior a 120 °C.
- **Ciclo Absorción por difusión**, denominado también sistema Electro-lux. Su principal modificación radica en la incorporación de un gas inerte (como puede ser el hidrógeno) de forma que mantenga la presión constante en todo el circuito. Así las zonas que en el sistema simple eran de alta y baja presión, se mantienen constante en este sistema.
- **Generador termoquímico** o Triple estado. Patentado por ClimateWell en el 2000. El sistema funciona en condiciones de vacío con un par LiBr/agua. El sistema dispone de dos sistemas paralelos que operan intermitentemente entre etapas de carga y descarga. A diferencia de otros sistemas, en la deserción el sistema se acerca a la saturación y llegando a la formación de cristales sólidos que hacen que el sistema almacene energía a través del proceso. A diferencia de la mayoría de los sistemas, que evitan la cristalización, el sistema TCA (generador termoquímico) lo utiliza. Este sistema presenta, de esta forma, una mayor densidad energética, así como una mejor transferencia de calor y masa en los procesos.
- **Ciclo de absorción abierto**. La mayor diferencia de este sistema radica en que no hay un condensador. La solución débil se reconcentra en un proceso de evaporación en un captador solar. La solución concretada se calienta hasta evaporar el agua, entonces la presión de vapor del refrigerante y la concentración del absorbente aumenta. Un inconveniente es que el refrigerante del sistema debe poder liberarse al medioambiente, dado que al evaporarse se libera al aire.
- **Ciclos intermitentes**. El principio de estos ciclos radica en los tradicionales de absorción, aunque en estos el captador solar se utiliza como generador y no hay bombas. Hay dos procesos principales, el de generación y el de refrigeración.



Cualquiera de estos sistemas, que son los más ampliamente utilizados, debe disponer de elementos complementarios para poder funcionar.

Desde el sistema solar, almacenamiento (mas o menso grande en función de varios parámetros), disipación, control,... Todo ello hace que el sistema se complique y deba ser equilibrado para poder ser factible y rentable.

Se puede ver en el diagrama adjunto un esquema de un sistema con máquina ClimateWell y varios elementos para su funcionamiento.



**Figura 4.** Esquema de un sistema con máquina ClimateWell y varios elementos para su funcionamiento.

## 2. SISTEMAS DE ADSORCIÓN SÓLIDA Y REACCIÓN QUÍMICA

Un sistema de adsorción movido con energía solar es un sistema cerrado que tiene dos fases en la etapa de refrigeración:

- Refrigeración / adsorción y
- Regeneración / desorción.

El refrigerante es evaporado en el generador (o evaporador) y adsor-



## Guía del Frío Solar

bido por una sustancia sólida que tenga una altísima porosidad microscópica. En el proceso de regeneración, el adsorbedor se calienta hasta conseguir que el refrigerante se desorba volviendo al evaporador (que actúa como condensador).

Algunos ejemplos como pares refrigerante/adsorbedor son: agua/zoolita, metanol/carbón activado.

La adsorción y las reacciones químicas son elementos similares unos y otros. La diferencia entre estos procesos son los procesos en los ciclos, mientras que las fuerzas que actúan en la adsorción son fuerzas físicas, las que causan la adsorción de los procesos químicos son químicas.

La desorción y desorción física es más fácil de hacerla reversible que la adsorción de reacciones químicas, además de precisar 10 veces más de calor las segundas.

Al igual que en el caso de la absorción, hay múltiples variantes y soluciones técnicas, como por ejemplo:

- **Ciclo de Adsorción intermitente.** La mayoría de los sistemas de refrigeración por adsorción que hay instalados en el mundo son de este tipo. Utilizando carbón activado y metanol, se utilizan principalmente para producción de hielo.

Tal y como aparece en el esquema (modelo con válvula), la mayoría de los sistemas integran el adsorbente en el captador (tanto captadores planos como de tubos de vacío).

- **Sistemas continuos de adsorción.** Al igual que el anterior, se puede complicar haciéndolo continuo con un condensador, un evaporador, un reactor de porción y una válvula de mariposa y un elemento de expansión.

### 3. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DESECANTES

La refrigeración desecante es una combinación de deshumidificación y refrigeración evaporativa.

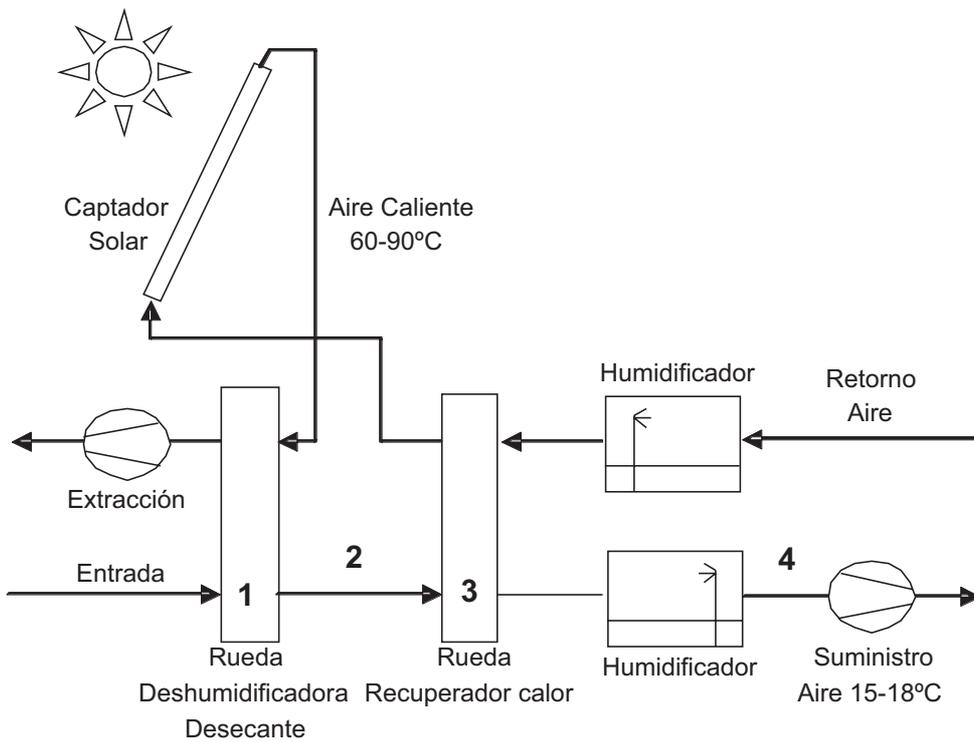
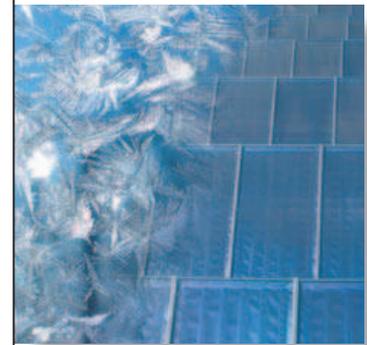


Figura 5. Etapas de la refrigeración desecante.

En (1) se extrae la humedad del aire por medio de un material desecante, con lo cual se elimina la carga de calor latente. El aire calentado (2) se enfría en la rueda del intercambiador (3). La temperatura del aire se baja y humedece por medio de un proceso de enfriamiento evaporativo...

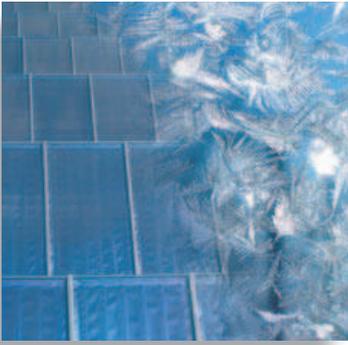
Los materiales desecantes se pueden regenerar aplicándoles calor (desde los captadores solares). Estos materiales desecantes pueden ser sólidos o líquidos.

El mayor problema de estos sistemas es la imposibilidad de utilizar estos sistemas en zonas con una humedad elevada.

#### 4. SISTEMAS RANKINE-DÚPLEX

El sistema, aunque se haya realizado de forma práctica, se considera un modelo demostrativo en emplazamientos con alta radiación y altas demandas de refrigeración.

El sistema propone poner en marcha un sistema Rankine de potencia acoplado a un sistema de refrigeración por compresión de vapor.



## Guía del Frío Solar

Utiliza vapor a alta presión como fluido que mueve una turbina en el ciclo de potencia. Esa turbina a su vez mueve un compresor para el ciclo refrigerador.

El fluido de cada uno de los ciclos puede ser diferente.

El rendimiento global es del orden del 10%, por lo que, unido a su complejidad, debe ser aplicado a grandes sistemas de refrigeración.

Un posible esquema (de los primeros propuestos en 1975) de este modelo puede ser el presentado en el diagrama adjunto.

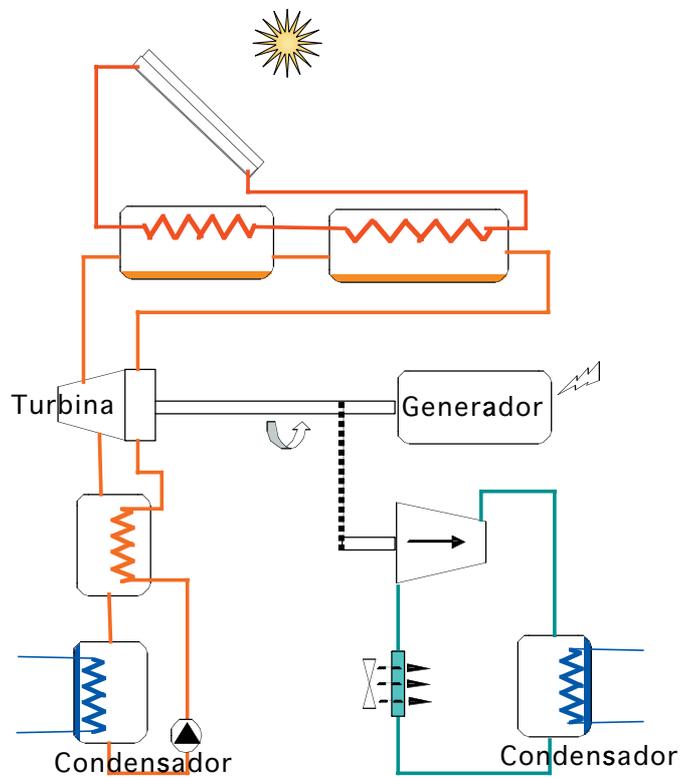
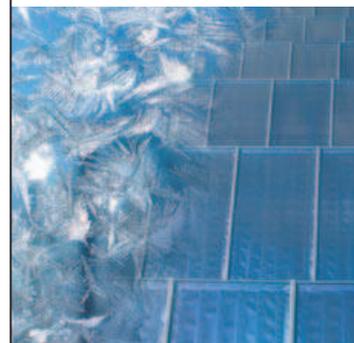


Figura 6. Esquema de un sistema Rankine-Dúplex.

## 5. SISTEMAS DE COMPRESIÓN DE VAPOR CON SOLAR

Este sistema se compone por un sistema de compresión de vapor y un sistema fotovoltaico. Aunque este sistema sigue siendo muy caro, debido al coste de inversión en los sistemas solares fotovoltaicos y por el bajo rendimiento de la fotovoltaica. De todas formas, es un sistema efectivo y simple para zonas sin una red eléctrica y con necesidades de refrigeración. El caso concreto de almacén para vacunas en zonas



aisladas o en conflicto. Estos sistemas pueden trabajar entre temperaturas de 0 – 8 °C, aunque los precios comerciales son superiores a los 2.000-5.000 €.

## **6. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN CON SISTEMA STIRLING**

El sistema está indicado para aplicaciones que precisen bajas o muy bajas temperaturas. El principio de un sistema de refrigeración Stirling es el cambio de volumen producido por un pistón, lo que induce un cambio de presión y temperatura de un gas (sin cambio de fase).

El calor necesario para el motor Stirling debe ser de alta calidad en el entorno de los 600 °C, lo cual implica la necesidad de contar con captadores solares de altísima calidad.

Este sistema es el de mayor rendimiento (cerca del 30%) pero el problema es el coste del sistema Stirling.

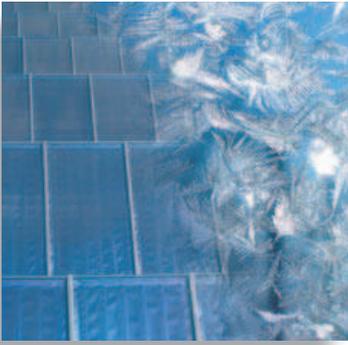
## **7. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR CÉLULAS TERMOELÉCTRICAS**

El sistema de refrigeración con células Peltier puede aplicarse para pequeñas aplicaciones. Actualmente se utilizan en pequeñas neveras. El frío se obtiene haciendo pasar corriente eléctrica a través de un circuito o dispositivo electrónico con diferentes uniones metálicas de ciertos elementos semiconductores. El fenómeno se conoce como efecto Seebeck inverso.

No hay ninguna parte móvil y no hay fluido en el sistema. Son sistemas pequeños (por ahora) para refrigeración móvil, pero la tecnología está desarrollándose y ya se comienzan a disponer de sistemas de varios cm<sup>2</sup>.

## **8. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN CICLO EYECCIÓN**

Se han utilizado ampliamente en grandes sistemas donde hay que mover grandes volúmenes de aire y mantener la hermeticidad ambiente, como en el caso de las grandes instalaciones de pulpa y de papel.

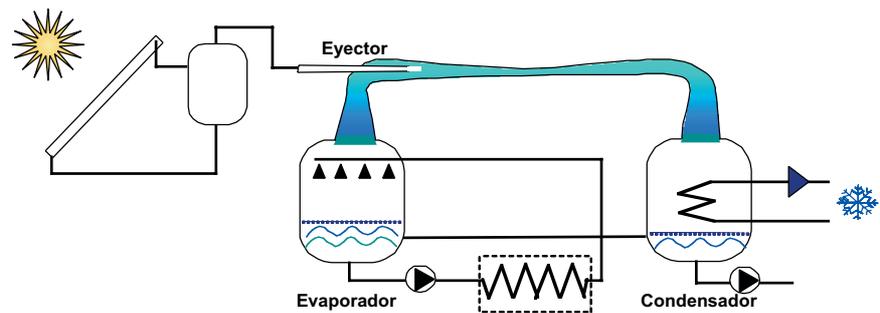


### Guía del Frío Solar

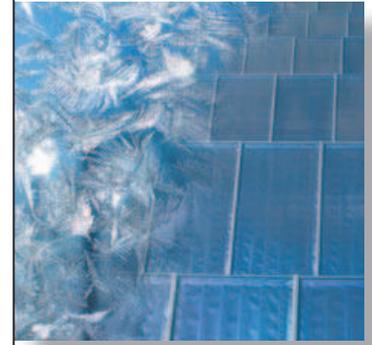
En la figura adjunta se puede ver un esquema muy simplificado del sistema de compresión de vapor por eyector del compresor de vapor. El vapor entra por la tobera y se expande.

En la inyección de alta velocidad se produce una aspiración desde el evaporador de baja presión. El vapor para llegar a ese estado debe tomar calor del agua que se pulveriza. El agua así se enfría. El agua así enfriada vuelve al evaporador con algunos grados mas y se vuelve a utilizar.

La parte de vapor de agua que se mezcla en la tobera, fluye a gran velocidad y transforma su energía cinética en presión y con ello debe conseguir la condensación de este agua fría, por lo que la presión debe ser alta. El condensando es devuelto al evaporador para formar parte del ciclo.



**Figura 7.** Esquema del sistema de compresión de vapor por eyector del compresor de vapor.



# 2 TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN POR SORCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

La primera máquina de aplicación práctica para obtención de frío fue construida por **Ferdinand Carré** en 1857 (de absorción), primeramente usando éter sulfúrico que substituyó, por muy inflamable, por amoníaco; el inventor francés patentó su sistema en los Estados Unidos en 1860, siendo usado por los Estados Confederados cuando, durante la Guerra de Secesión, les fue cortado el suministro de hielo natural del norte. En 1862 en la Exposición Universal de Londres esta máquina maravilló a la opinión pública con la producción regular de enormes bloques de hielo.

En las páginas siguientes se intenta presentar un resumen de los fundamentos de la refrigeración que utiliza la avidéz de una sustancia, líquida (absorción) o sólida (adsorción) por otra, vapor. Es preciso, antes de tratar los principios de estos sistemas frigoríficos, precisar algunos conceptos generales comunes a toda la tecnología frigorífica.



Figura 1. Enfriamiento de un sistema.

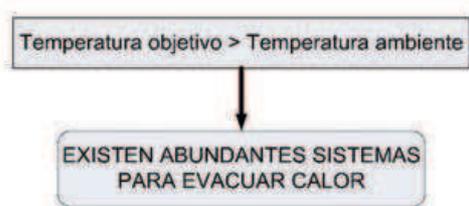


## Guía del Frío Solar

Si se ponen en comunicación dos **sistemas**<sup>1</sup> que tengan la misma temperatura no se produce entre ellos intercambio de calor y se dice que se encuentran en **equilibrio térmico**.

En cambio, si se ponen en contacto dos sistemas que se encuentran inicialmente a temperatura distinta<sup>2</sup>, fluye energía en forma calorífica del de mayor temperatura hacia el que la tiene menor; el primero tiene un incremento negativo de energía interna, y disminuye su temperatura, y el segundo tiene un incremento positivo de energía interna, igual en valor absoluto a la disminución del primero, en cumplimiento del **Primer Principio de la Termodinámica**, y su temperatura aumenta. Decimos en lenguaje corriente que el primer sistema se **enfría** y que el segundo se **calienta**.

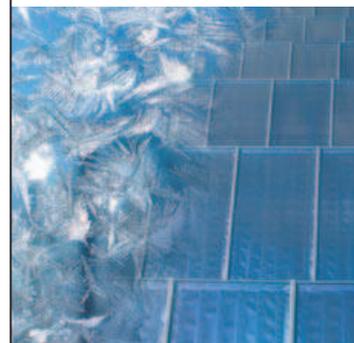
Para enfriar un sistema (cuerpo, sustancia, recinto, etc.) es, por tanto, preciso ponerlo en «**comunicación térmica**» con otro a menor temperatura, y **no es posible enfriar un sistema sin calentar otro**.



**Figura 2.** Enfriamiento de un sistema hasta una temperatura superior a la ambiental.

Naturalmente, si uno de los dos sistemas tiene mucha más capacidad calorífica que el otro<sup>3</sup>, el intercambio de energía no produce cambio de temperatura observable en el sistema de mayor capacidad, como ocurre con los **focos térmicos** ideales, los baños termostáticos y, en general con sistemas de gran masa, como el que denominamos habitualmente **ambiente**.

- 1 Como es sabido, en Termodinámica se suele denominar *sistema* a cualquier cosa que queramos analizar; se suele hablar de *sistema cerrado* cuando ninguna masa atraviesa sus límites y *sistema abierto* cuando sí lo hace; en el primer caso el sistema puede definirse por la masa que está presente desde el principio hasta el final del proceso, y en el segundo por el *volumen de control* que fija los límites o contorno a considerar.
- 2 Por simplificar, el conjunto de los dos sistemas puede suponerse aislado de su entorno.
- 3 Llamamos capacidad calorífica al producto de la masa del sistema por el calor específico medio ponderado de las sustancias que lo componen.



Con suficiente tiempo, al no existir el aislamiento perfecto o adiabático ideal, todos los sistemas en contacto se encontrarían en equilibrio térmico entre sí y con su ambiente, pero es posible mantener, durante períodos largos, un sistema a temperatura distinta de la de su entorno, con tal de proveerlo de un aislamiento eficaz y de un sistema (o **fuentes térmica**) que intercambie con aquél energía calorífica, cediéndosela si la temperatura ha de ser mayor que la ambiental, y tomándosela si la temperatura debe ser menor que la ambiental; según acaba de verse, éste segundo sistema habrá de hallarse a temperatura superior o inferior a la del primero según sea la temperatura deseada para éste último.

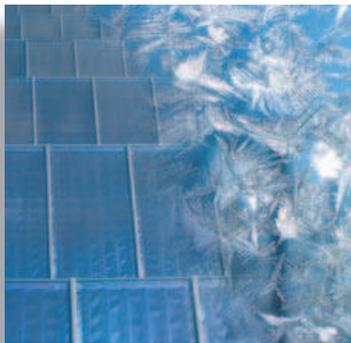
Los fenómenos naturales proporcionan ocasionalmente estas fuentes térmicas que pueden ser utilizadas y conservadas algún tiempo, pero el objeto de la técnica es conseguir fuentes térmicas a voluntad para poder modificar según deseemos la temperatura de otros sistemas.

En la tecnología que nos ocupa, se trata de obtener fuentes frías a temperatura inferior a la ambiental; puesto que no se dispone de una segunda fuente a temperatura inferior a la primera, el mantener a baja temperatura la primera fuente térmica implica que el calor extraído de ésta última ha de ser cedido al entorno, a temperatura superior; ello no es posible de modo espontáneo, según el **Segundo Principio de la Termodinámica**, uno de cuyos enunciados, debido a Clausius<sup>4</sup>, expresa que **el calor no se transmite nunca espontáneamente de un cuerpo a otro cuya temperatura sea más elevada.**

Ello significa que para poder pasar calor de un cuerpo frío a otro más caliente es preciso proporcionar desde el exterior cierta cantidad de energía. Dado que un sistema a temperatura menor que la de su entorno recibe naturalmente energía calorífica de éste último, el mantenimiento de tal temperatura inferior a la ambiental exige:

- absorber del sistema frío un flujo de calor igual al que le proporciona el entorno (flujo energético que variará con la calidad del aislamiento térmico).

4 Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), profesor de física en las Universidades de Zürich, Würzburg y Bonn, publica en 1850 su tratado en que por vez primera relaciona los descubrimientos de Mayer, Joule y Carnot, formula de modo completo los dos primeros principios de la Termodinámica y crea el concepto de energía interna.



## Guía del Frío Solar

- elevar de nivel de temperatura a dicho flujo (lo que se consigue mediante máquinas y técnicas ideadas para ello) con **aportación de energía** adicional.
- cederlo a otra fuente térmica; en general, devolverlo al propio entorno.

## 2. DEFINICIONES

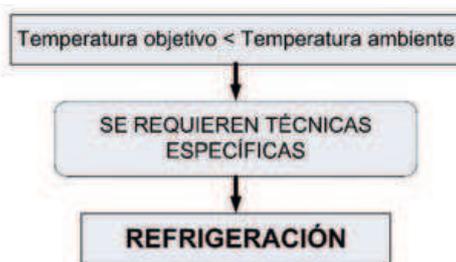


Figura 3. Enfriamiento por debajo de la temperatura ambiental.

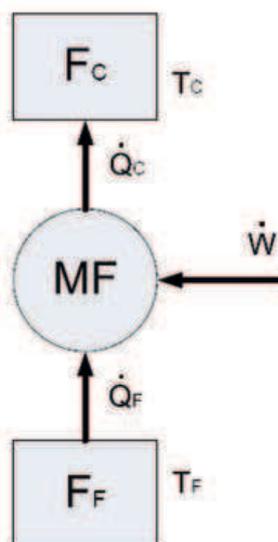
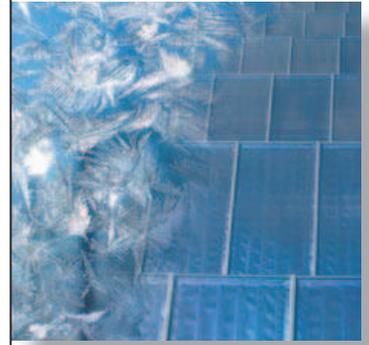


Figura 4. Esquema de principio de máquina frigorífica.

Para fijar el vocabulario a utilizar, y como colofón del apartado anterior, daremos a continuación algunas definiciones.

- **Enfriar** un sistema es **disminuir la temperatura** del mismo. Si la temperatura deseada como objetivo es mayor que la ambiental, no es difícil



encontrar sistemas a temperatura menor que ella, por ejemplo, el aire o agua del entorno; bastará entonces poner al sistema en contacto térmico con éstos para que les ceda energía térmica, enfriándose. Así podemos hablar de enfriamiento o evacuación de calor de motores, de torres de enfriamiento evaporativo, de dejar enfriar un guiso, etc.

- **Refrigerar** significa **enfriar por debajo de la temperatura ambiente**. Para ello, no existiendo en el entorno un foco a temperatura inferior a la deseada, es preciso usar técnicas adecuadas, que son las que constituyen la **tecnología frigorífica**.
- **Máquina frigorífica** es el aparato que, mediante la aportación de energía externa, **es capaz de absorber calor de una fuente y cederlo** (aumentado) **a otra fuente a temperatura superior**.

### 3. MÁQUINA FRIGORÍFICA Y BOMBA DE CALOR

En la figura 4 se representa el esquema de principio de una máquina frigorífica, forzosamente biterma conforme a otro enunciado<sup>5</sup> del Segundo Principio. La máquina **MF** absorbe de la fuente fría el flujo de calor  $\dot{Q}_F$ , recibe del exterior la energía  $\dot{W}$  y cede a la fuente caliente el flujo de calor  $\dot{Q}_C$ .

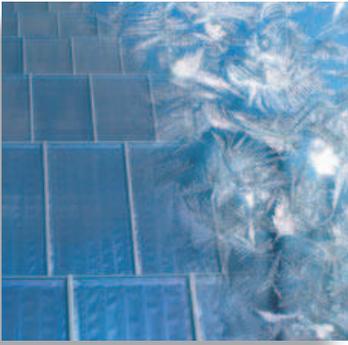
Conforme al Primer Principio de la Termodinámica se cumple en todo caso, en valores absolutos

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_F + \dot{W}$$

Por tanto, como se ha dicho, una máquina frigorífica toma de la fuente fría (evaporador o equivalente) una cierta cantidad de calor, le añade la energía que se le proporciona para su funcionamiento, y cede la suma de ambas energías a la fuente caliente (condensador o equivalente).

Cuando la fuente fría está a temperatura inferior a la ambiental la energía absorbida de dicha fuente es el efecto útil  $\dot{Q}_F$  (llamado comúnmente **potencia frigorífica**) que se desea conseguir, y la fuente caliente es el

5 Debido principalmente a William Thomson (1824-1907; luego Lord Kelvin); profesor de física natural en la Universidad de Glasgow durante 53 años, es uno de los físicos más importantes del siglo XIX.



## Guía del Frío Solar

ambiente, que a efectos prácticos puede considerarse como un foco térmico, de gran capacidad y temperatura invariable en períodos cortos. En este caso se trata de una **máquina frigorífica** propiamente dicha.

Cuando el foco térmico ambiental es la fuente fría de la que se absorbe calor, y la fuente caliente es un sistema (recinto, etc.) que se desea calentar, el efecto útil deseado es  $\dot{Q}_c$  y la máquina se denomina entonces **bomba de calor**.

En ambas máquinas, y salvo diseños especiales, la energía calorífica intercambiada con el ambiente se considera sin valor económico, es decir, perdida en el frigorífico y gratuita en la bomba de calor.

Resulta posible con una sola máquina térmica enfriar útilmente una fuente (por ejemplo una cámara fría) y calentar también útilmente otra fuente (por ejemplo una oficina), obteniendo un doble efecto con solamente una aportación de energía externa; esta técnica de aprovechamiento del calor evacuado en el condensador está recomendada por los analistas de ahorro energético, pero sólo resulta rentable en ocasiones, dada la mayor inversión, por lo que es preciso llevar a cabo cuidadosamente los correspondientes cálculos económicos.

## 4. UNIDADES

Dado que el calor es una forma de energía (en tránsito), no parecen en principio necesarias otras unidades que las de energía y temperatura del Sistema Internacional, es decir:

— julio (J) = N x m para la energía.

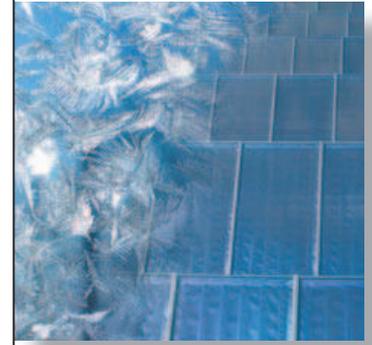
— vatio (W) = J / s para el flujo de calor o potencia frigorífica.

— kelvin (K) para la temperatura.

Sin embargo para ésta última es más corriente utilizar el grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>6</sup> y para las otras magnitudes quedan muchos manuales, catálogos, tablas de datos, y aún libros de texto que utilizan otras unidades, bien por tradición, bien por no tener claro el concepto de calor, bien

---

<sup>6</sup> Lo más usual es operar con diferencias de temperatura; en ese caso, y sólo en él,  $1^{\circ}\text{C}$  es totalmente equivalente a 1 K.



porque en el uso industrial del país se conserve otro sistema de medidas; éste último caso es especialmente importante en EE.UU., que es sin duda la nación donde están más avanzadas las tecnologías frigoríficas y de climatización.

Por ello se presentan a continuación tablas de equivalencias de las unidades más usadas en la actualidad.

Recuérdese que se ha dado en llamar Frigoría (Frig) a la kcal cuando se trata de refrigeración, con lo que

$$1 \frac{\text{Frig}}{\text{hora}} = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{hora}} = 4,1868 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{hora}} \frac{\text{hora}}{3.600\text{s}} = 1,163 \text{ W}$$

También que la tonelada de refrigeración americana (**CTR** = Commercial Ton of Refrigeration) se refiere a la potencia necesaria para fabricar 1 short ton (2.000 lb) de hielo, en un día, partiendo de agua a 0°C, casi exactamente, y dado que el calor de solidificación o de fusión del hielo a esa temperatura es 143,35 BTU/lb ≈ 144, se tiene

$$1 \text{ CTR} = 2.000 \text{ lb} \times 144 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \frac{1}{24 \text{ hora}} = 12.000 \frac{\text{BTU}}{\text{hora}}$$

Además de los símbolos habituales en el SI, en las tablas que siguen aparecen abreviaturas también usuales:

**BTU:** unidad de energía (calorífica) del Sistema Imperial (Inglaterra, EE.UU.).

**°F:** grado Fahrenheit.

**°R:** grado Rankine.

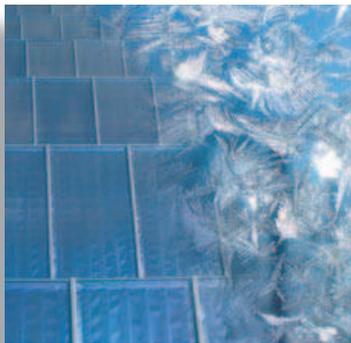
**th:** termia.

**hph:** caballo de vapor x hora (horsepower hour).

**Tabla 1.** Equivalencias de unidades de temperatura.

	K	°C	°F	°R
K	1	C+273,15	(5/9)F+255,37	(5/9)R
°C	K-273,15	1	(5/9)(F-32)	(5/9)(R-491,67)
°F	(9/5)K-459,67	(9/5)C+32	1	R-459,67
°R	(9/5)K	(9/5)C+491,67	F+459,67	1

**Nota:** las cifras en negrita son exactas.



**Tabla 2.** Equivalencias de unidades de energía.

	<b>kJ</b>	<b>kWh</b>	<b>kcal</b>	<b>BTU</b>	<b>th</b>	<b>hph</b>
<b>kJ</b>	<b>1</b>	0,277778x10 <sup>-3</sup>	0,238846	0,947817	0,23892x10 <sup>-3</sup>	0,372506x10 <sup>-3</sup>
<b>kWh</b>	<b>3.600</b>	<b>1</b>	859,845	3.412,14	0,860112	1,34102
<b>kcal</b>	<b>4,1868</b>	<b>1,163x10<sup>-3</sup></b>	<b>1</b>	3,96832	1,00031x10 <sup>-3</sup>	1,55961x10 <sup>-3</sup>
<b>BTU</b>	1,05506	0,293071x10 <sup>-3</sup>	0,251996	<b>1</b>	0,252074x10 <sup>-3</sup>	0,393015x10 <sup>-3</sup>
<b>th</b>	4.185,5	1,16264	999,69	3.967,09	<b>1</b>	1,55912
<b>hph</b>	2.684,52	07457	641,186	2.544,43	0,641386	<b>1</b>

**Nota:** las cifras en negrita son exactas.

**Tabla 3.** Equivalencias de unidades de potencia frigorífica.

	<b>kW</b>	<b>kcal/h</b>	<b>BTU/h</b>	<b>CTR</b>
<b>kW</b>	<b>1</b>	859,845	3.412,14	0,284345
<b>kcal/h</b>	<b>1,163x10<sup>-3</sup></b>	<b>1</b>	3,96832	0,33069x10 <sup>-3</sup>
<b>BTU/h</b>	0,293071x10 <sup>-3</sup>	0,251996	<b>1</b>	83,3333x10 <sup>-6</sup>
<b>CTR</b>	3,51685	3.023,95	<b>12.000</b>	<b>1</b>

**Nota:** las cifras en negrita son exactas.

## 5. EFICIENCIA

Se trata de comparar el efecto útil con la energía aportada para obtenerlo. No se le denomina rendimiento porque este nombre suele reservarse a una relación entre producto (salida) y aportación (entrada) que pueda variar entre 0 y 100%.

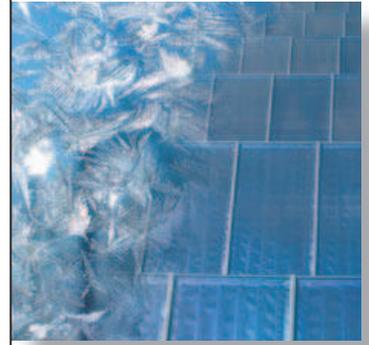
Por influencia norteamericana también suele conocerse a la **eficiencia** con el nombre de **COP** (Coefficient Of Performance).

De acuerdo a lo dicho anteriormente sobre cuál es el efecto útil en cada caso, la eficiencia puede definirse por la fórmula

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}}$$

Para máquinas frigoríficas; e varía entre 0,4<sup>7</sup> para una instalación de absorción amoníaco/agua de pequeño tamaño y 3,5÷4 para una gran instalación de compresión centrífuga de vapor para aire acondicionado. En la bomba de calor se tiene

<sup>7</sup> Algunos sistemas de refrigeración poco usados (vórtice, eyección de vapor, etc.) dan eficiencias aún menores.



$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}}$$

El COP de una bomba de calor es evidentemente siempre mayor que la unidad y alcanza valores de 6 a 7 en grandes máquinas bien construidas. Está claro que la diferencia de temperaturas entre las fuentes fría y caliente es un factor determinante para la eficiencia de las máquinas térmicas inversas o frigoríficas. En efecto, la máquina de mejor rendimiento sería aquella ideal que no tuviera pérdidas por efectos disipativos (rozamientos, viscosidad, etc.), ni pérdidas exergéticas externas por diferencias de temperaturas en los intercambios térmicos, diferencias imprescindibles al no ser infinitas las superficies de contacto; es decir, lo que se conoce como máquina térmica totalmente reversible. Una máquina frigorífica ideal, reversible, tendría una eficiencia

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Dando, en esta expresión, valores de 40°C y 30°C a la temperatura de la fuente caliente, tabla 4, puede verse cómo la eficiencia máxima posible (la de la citada máquina reversible) disminuye rápidamente con el descenso de la temperatura de la fuente fría. Téngase en cuenta que la eficiencia que puede esperarse obtener en una máquina real bien construida es del orden de un tercio a un quinto de la eficiencia de la máquina ideal, con lo que queda claro que la consecución de temperaturas muy frías resultará de elevado costo de funcionamiento.<sup>8</sup>

**Tabla 4.** Disminución de la eficiencia ideal con la temperatura fría.

$t_c = 40\text{ °C}$ ----- $\varepsilon_R$	$t_F$ (°C)	$t_c = 30\text{ °C}$ ----- $\varepsilon_R$
9,44	10	14,15
6,83	0	9,10
5,26	-10	6,58
4,22	-20	5,06
2,91	-40	3,33
1,98	-65	2,19
1,24	-100	1,33
0,65	-150	0,68
0,30	-200	0,32

8 La eficiencia también disminuye al aumentar la temperatura del ambiente (foco caliente).



## 6. TRABAJO MÍNIMO PARA PRODUCIR EL FRÍO $\dot{Q}_F$

La exergía del flujo de calor tomado de la fuente fría  $\dot{Q}_F$  es, siendo  $\eta_C$  el factor de Carnot,

$$\dot{E}_F = \eta_C \cdot \dot{Q}_F = \left(1 - \frac{T_a}{T_F}\right) \cdot \dot{Q}_F$$

donde  $T_a$  y  $T_F$  son las temperaturas absolutas del ambiente y del foco frío.

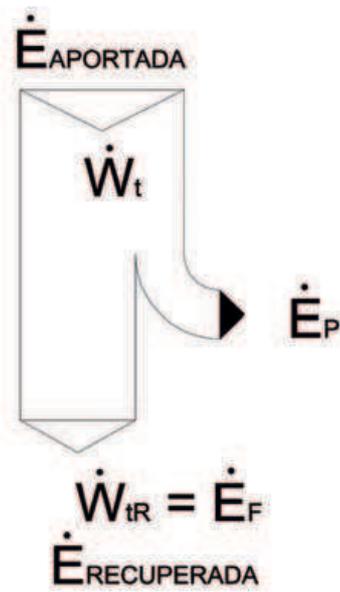
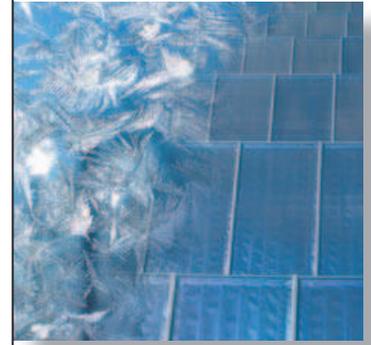
Puesto que  $T_a > T_F$  el factor de Carnot resulta ser negativo, y cuando la fuente fría cede la potencia calorífica  $\dot{Q}_F$  también es negativo, por lo que la fuente fría, o sistema a enfriar tiene un incremento positivo de exergía que le es proporcionado por la máquina frigorífica.

En una máquina reversible a la que se aportara energía mecánica, no existirían pérdidas exergéticas, y por tanto en ella «producir el frío»  $\dot{Q}_F$  requeriría el trabajo técnico<sup>9</sup>

$$\dot{W}_{tR} = \frac{T_a - T_F}{T_F} \cdot |\dot{Q}_F|$$

que será, por tanto, el trabajo mínimo necesario para extraer la energía calorífica  $\dot{Q}_F$  del sistema a enfriar. Este último junto con la máquina frigorífica y el medio ambiente forman un sistema global adiabático que tiene un incremento entrópico  $\Delta \dot{S}_u$  si existen irreversibilidades, como es inevitable en procesos reales.

<sup>9</sup> No existiendo pérdidas exergéticas, la exergía aportada (=energía mecánica=trabajo técnico, es decir sin tener en cuenta el trabajo de flujo, y suponiendo que el proceso es en régimen permanente, y que son despreciables las variaciones de energía cinética y potencial) ha de ser igual a la exergía recuperada (=valor exergético del calor extraído).



**Figura 5.** Diagrama exergético global de una instalación frigorífica.

La pérdida exergética será pues

$$\dot{E}_p = T_a \cdot \Delta \dot{S}_u$$

y, como muestra la figura 5, el trabajo técnico proporcionado a la máquina se emplea parcialmente en cubrir las irreversibilidades de la instalación, degradándose en calor que se cede al medio ambiente, y sólo parcialmente, por tanto, en producir el efecto útil buscado  $\dot{Q}_F$ .

El trabajo técnico que hay que proporcionar a la máquina frigorífica resulta ser, en términos absolutos

$$\dot{W}_t = \dot{E}_F + \dot{E}_p = \dot{W}_{tR} + \dot{E}_p$$

Por tanto, la pérdida exergética del universo equivale al trabajo adicional que hay que entregar a la máquina frigorífica irreversible, en comparación con el que requiere la reversible.



## Guía del Frío Solar

El grado de reversibilidad antes definido será

$$\varphi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} = \frac{\frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_t}}{\frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_{tR}}} = \frac{\dot{W}_{tR}}{\dot{W}_t} = \frac{\dot{E}_{recuperada}}{\dot{E}_{aportada}}$$

Puesto que la potencia mínima  $\dot{W}_t = \dot{E}_F$ , que es el flujo de exergía de salida o recuperada del proceso de enfriamiento, y la potencia real  $\dot{W}_t$  es el flujo de exergía de entrada o aportada se ve que el **grado de reversibilidad** de la instalación frigorífica coincide con el llamado **índice de calidad** o **eficiencia exergética**; también recibe el nombre de **coeficiente económico**.

Podemos expresar también, según se deduce combinando las fórmulas anteriores:

$$\varphi = 1 - \frac{T_a \cdot \Delta \dot{S}_u}{\dot{W}_t} = \varepsilon \frac{T_a - T_F}{T_F}$$

Si el sistema del que se absorbe  $\dot{Q}_F$  no permanece a temperatura constante sino que pasa de  $T_{F1}$  a  $T_{F2}$ , se tiene una refrigeración a temperatura variable en la que el trabajo mínimo necesario para obtener el frío  $\dot{Q}_F$  viene dado por la expresión

$$\dot{W}_{tR} = T_a (\dot{S}_1 - \dot{S}_2) - |\dot{Q}_F|$$

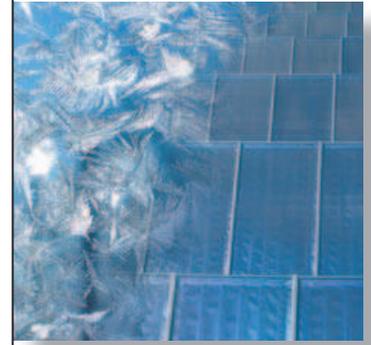
con lo que la eficiencia de la máquina reversible es

$$\varepsilon_R = \frac{|\dot{Q}_F|}{T_a (\dot{S}_1 - \dot{S}_2) - |\dot{Q}_F|}$$

y el calor extraído del sistema frío es

$$|\dot{Q}_F| = T_{Fm} (\dot{S}_1 - \dot{S}_2)$$

donde  $T_{Fm}$  es la **temperatura termodinámica media** de la fuente fría durante la refrigeración y la eficiencia de la máquina ideal es



$$\mathcal{E}_R = \frac{T_{F_m}}{T_a - T_{F_m}}$$

Recuérdese, por último, que la pérdida exergética en un proceso irreversible viene dada por

$$e_p = T_a \cdot \int \frac{|\delta w_r|}{T_F}$$

Si no hubiera trabajos disipativos<sup>10</sup>, no habría pérdidas exergéticas y el proceso sería reversible. En cambio la fórmula anterior indica que **la existencia de rozamientos es termodinámicamente más perjudicial cuanto menor sea la temperatura del proceso irreversible**. Dicho de otro modo, las pérdidas de carga por circulación del refrigerante deben evitarse sobre todo en el evaporador, cuyas tuberías es económico sobredimensionar.

## 7. PROCESOS ELEMENTALES DE LA REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

### 7.1. Evaporación

Si calentamos un líquido contenido en un recipiente, como en la figura 6, se produce lo que se denomina evaporación<sup>11</sup> o vaporización del mismo; si el líquido es una sustancia pura la vaporización tiene lugar a temperatura constante.

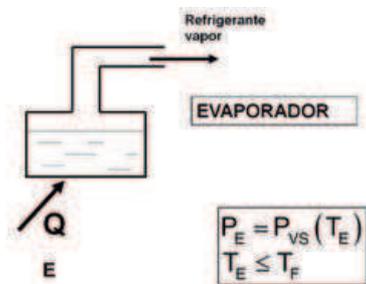
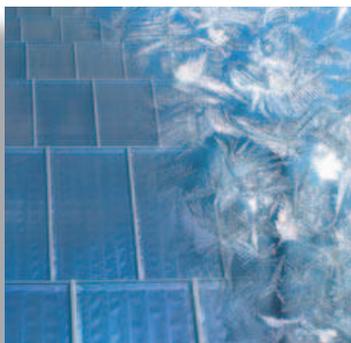


Figura 6. Evaporación de refrigerante.

10 En la expresión anterior  $W_r$  simboliza el **trabajo disipativo** específico.

11 El término **evaporación** suele reservarse para el caso en que el cambio de fase tiene lugar a la presión ambiental; a otras presiones se suele hablar de **vaporización**; se suele denominar **ebullición** a la vaporización cuando la presión de vapor iguala la presión atmosférica.



## Guía del Frío Solar

Si no se calienta el líquido, si el recipiente está abierto a la atmósfera, la tensión de vapor del líquido será continuamente mayor que la presión de vapor de la parte evaporada, y el líquido continuará evaporándose, tomando para ello la energía necesaria (**calor latente de evaporación**) de su entorno, mientras éste no se encuentre a temperatura inferior.

Si el recipiente se cierra, la evaporación solamente prosigue hasta la igualación de presión y tensión de vapor, momento en que se alcanza el equilibrio entre las fases, y líquido y vapor están saturados.

Si del recipiente cerrado extraemos vapor mediante algún sistema, disminuimos su presión, y la evaporación proseguirá mientras exista líquido.

### 7.2. Absorción

En un recipiente similar al anterior (figura 7) se tiene una sustancia, el absorbente, de gran afinidad con el refrigerante, de modo que en contacto con el vapor de éste se mezcla con él, generalmente sin gran variación del volumen del absorbente líquido, en los casos que nos interesan. La absorción del vapor de refrigerante reduce su presión, de modo que se produce un flujo del vapor hacia el recipiente del absorbente, como si éste *aspirara* a aquél. La cantidad de refrigerante que está en equilibrio con el absorbente depende de la temperatura, disminuyendo con el aumento de ésta en los pares de sustancias que nos interesan; la absorción, también en general, es exotérmica, por lo que si se quiere mantener el flujo de refrigerante es preciso **evacuar el calor producido por la disolución**, manteniendo al menos constante la temperatura de la mezcla binaria. Finalmente el absorbente se irá saturando, disminuyendo la velocidad de absorción hasta llegar al equilibrio o saturación en las condiciones existentes de presión y temperatura.

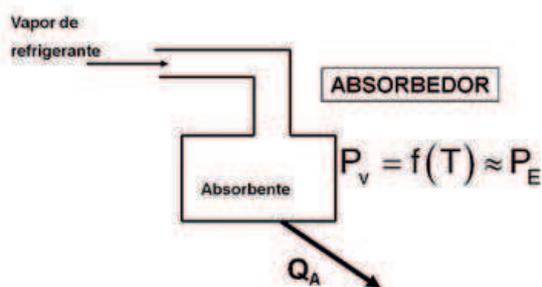
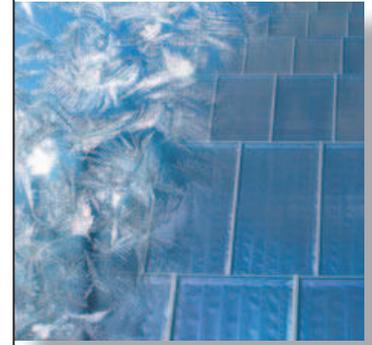


Figura 7. Absorción del vapor de refrigerante.



### 7.3. Hervido

En el estado final del apartado anterior, se aporta calor al recipiente; suponiendo al refrigerante mucho más volátil que el absorbente, éste prácticamente continúa líquido y desorbe al anterior, **generando** una corriente de vapor de refrigerante puesto que la presión de vapor de éste al **hervir** y salir del líquido es mayor que la existente en la tubería o ambiente con el que se comunica el recipiente; el efecto es similar a una compresión del vapor de refrigerante por parte del **hervidor** o **generador**.

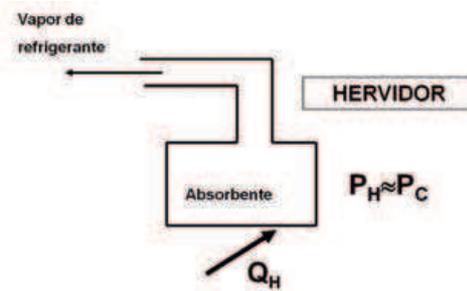


Figura 8. Hervido de la mezcla refrigerante-absorbente.

### 7.4. Condensación

Si el recipiente del apartado 7.1 se pone en contacto con un vapor de refrigerante del que se mantiene constante la presión, y ésta última fuera superior a la presión de vapor del líquido, el vapor se condensaría hasta llegar al equilibrio en que ambas fases estén saturadas; puesto que la presión de vapor del líquido depende de su temperatura, y la licuación de vapor significa aportación de energía por cesión del calor latente de condensación (igual al de vaporización), para mantener el proceso durante algún tiempo será preciso evacuar dicha energía cedida en la licuación, por algún medio externo.

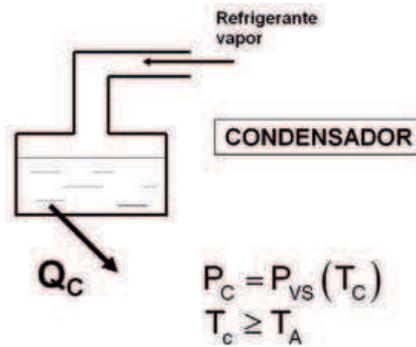
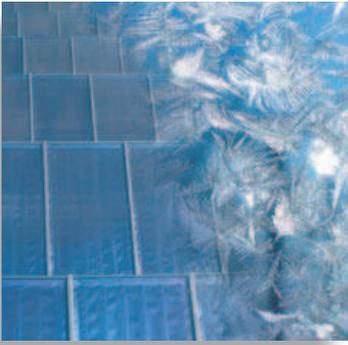


Figura 9. Condensación del refrigerante.

### 7.5. Ciclo discontinuo

#### 7.5.1. Ciclo cerrado discontinuo: evaporación + absorción

Uniendo los dos recipientes mencionados en los apartados anteriores se tiene una máquina elemental de refrigeración por absorción. En efecto, se evacua calor del absorbedor, por ejemplo por medio de agua a temperatura ambiente, lo que provoca un flujo continuado de vapor de refrigerante que, al salir del líquido del recipiente de la izquierda (figura 10) causa la extracción de un flujo de calor tomado del sistema (cámara, tubos de agua, etc.) que esté en contacto con dicho recipiente; éste de la izquierda hace la función de **evaporador** y el de la derecha la de **absorbedor**.

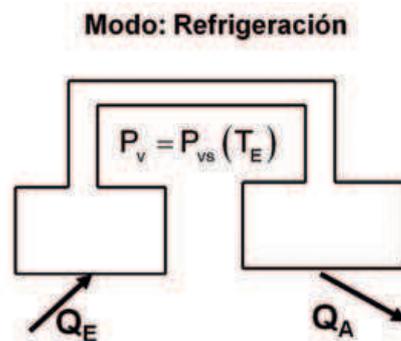
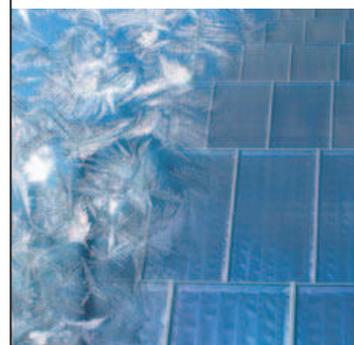


Figura 10. Refrigeración discontinua por absorción.



### 7.5.2. Ciclo cerrado discontinuo: hervido + condensación

Cuando el absorbente quede saturado se colocan los recipientes de tal modo que al de la derecha se le aporte energía calorífica, a una temperatura conveniente, y al de la izquierda se le substraiga calor a temperatura ambiente (figura 11); el sentido de las flechas se invertiría; el recipiente derecho expulsaría vapor de refrigerante, en la función de **generador**, y en el izquierdo, que actúa como **condensador**, se licuaría dicho vapor; al cabo de un tiempo se volvería al estado inicial, con lo que podría volver a utilizarse el conjunto para enfriar un sistema, intermitentemente.

Modo: Carga (recuperación estado inicial)

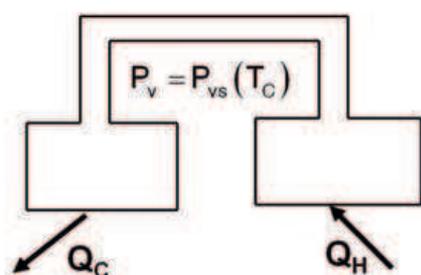
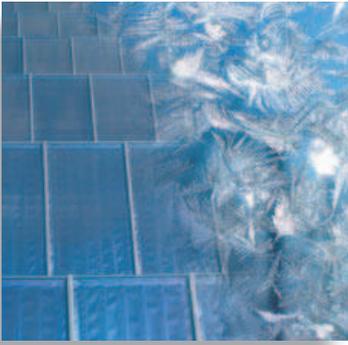


Figura 11. Refrigeración discontinua: recarga del equipo.

Cuando, por ejemplo porque el absorbente es sólido (**adsorción**), no resulta fácil hacer circular por tuberías la mezcla sorbente-refrigerante, es preciso proceder periódicamente a la recarga de la máquina frigorífica; si se desea funcionamiento continuo, hay que duplicar la instalación, de modo que mientras una máquina está *produciendo frío*, la otra se está recargando y así sucesivamente. En máquinas en que en alguno de los procesos pasa a fase sólida el absorbente (como ocurre con el CLi, que cristaliza, en la máquina ClimateWell<sup>12</sup>, es también preciso disponer de dos *barriles*, es decir, en realidad, dos máquinas combinadas que refrigeran y se cargan alternativamente de modo automático, para conseguir refrigeración continuada, aunque en este caso no se puede hablar estrictamente de adsorción, en que el absorbente se mantiene sólido en todo momento).

Los sistemas de refrigeración por absorción utilizados en la práctica son, en esencia, diseños que permiten llevar a cabo estos mismos procesos elementales de modo continuo.

12 Véase <http://www.climatewell.com/es.html#/innovacion/como-funciona>



## 8. EL CICLO TEÓRICO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

El efecto frigorífico se obtiene por evaporación de un vapor húmedo de bajo título (es decir, casi totalmente líquido) que por lo tanto sale del evaporador como vapor de alto título, saturado, o ligeramente sobrecalentado. Para restablecer de modo continuo las condiciones de entrada al evaporador es preciso ceder calor al ambiente, para lo cual hay que elevar la temperatura del refrigerante por encima de la ambiental; ello requiere elevar la presión hasta la de condensación y evacuar el calor en el condensador; finalmente una estrangulación aproximadamente isentálpica devuelve al refrigerante al estado de entrada al evaporador, dispuesto para continuar produciendo el deseado efecto frigorífico.

La única diferencia conceptual<sup>13</sup> con la refrigeración por compresión mecánica es que el papel del compresor es ocupado por el conjunto absorbedor/generador, lo que limita la relación de presiones condensación/evaporación alcanzables, aunque también en la absorción existen diseños de más de dos presiones para obviar en parte dicha limitación.

### 8.1. Ciclo de absorción elemental

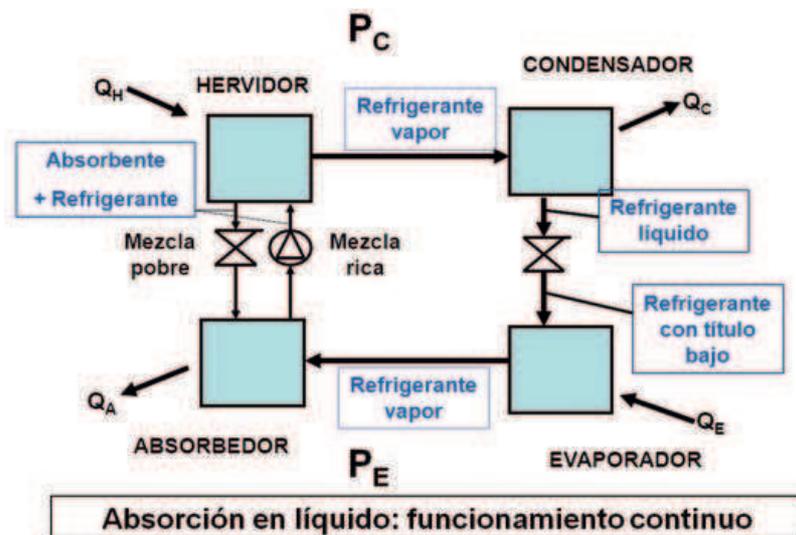
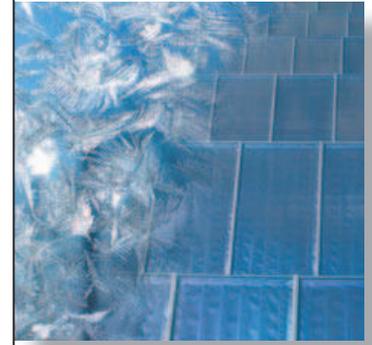


Figura 12. Ciclo elemental de absorción: esquema de flujo.

13 Además de que la energía suministrada a la máquina es en este caso calor en lugar de trabajo mecánico.



Del **generador** o **hervidor** sale refrigerante, idealmente puro, como vapor saturado, a temperatura y presión altas; en el **condensador** cede el calor  $Q_c$  al ambiente, pasando al estado, aproximado de líquido saturado a alta temperatura; sufre una estrangulación en la **válvula de laminación**, pasando al estado de vapor húmedo de título pequeño, a presión y temperatura bajas; el refrigerante entra entonces al **evaporador**, del que sale, tras recibir el calor  $Q_e$ , en el estado de vapor saturado o ligeramente sobrecalentado, siempre a baja temperatura y presión; este vapor saturado es aspirado por el absorbente en el **absorbedor**, del que se evacua al ambiente el calor  $Q_A$ ; la llamada **solución rica**, o sea la mezcla binaria así formada con alta concentración de refrigerante, aún a baja presión, es bombeada al generador; en éste recibe el calor  $Q_H$ , con lo que separa el vapor que reinicia el ciclo; puesto que hay un flujo de absorbente del absorbedor al hervidor, es preciso retornarlo, para lo cual la **solución pobre** (en refrigerante) vuelve al absorbedor a través de una válvula.

Como puede verse existen dos circuitos de fluidos:

- uno exterior, recorrido solamente por el refrigerante (idealmente), que no se diferencia del circuito análogo de un ciclo de compresión mecánica de vapor,
- otro interno, por el que circula la mezcla binaria con dos concentraciones distintas, y que está constituido por el conjunto absorbedor-bomba-hervidor-válvula-absorbedor; de éste no conviene que salga el absorbente.

También puede verse que existen aquí también dos presiones distintas, señaladas en la figura 12.

## 8.2. Eficiencia máxima

La eficiencia de un ciclo de absorción, como índice de la bondad energética de la instalación, es la relación entre el resultado obtenido, y la energía aportada, es decir,

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_H}$$

El máximo valor teórico que puede conseguirse para la eficiencia de la máquina frigorífica de absorción indicará, por un lado la perfec-



## Guía del Frío Solar

ción conseguida en la máquina real, y por otro permitirá compararla con otros sistemas de obtención de frío.

Dicho valor máximo se obtendrá en una máquina reversible, en la que no hay pérdidas exergéticas; en esta máquina deberán ser constantes las temperaturas de los focos frío y caliente, es decir la del recinto frío del que se absorbe energía en el evaporador y la del fluido que suministra energía al hervidor, para evitar irreversibilidades externas. No habiendo pérdidas exergéticas, la exergía del calor tomado en el hervidor deberá ser igual a la del frío producido en el evaporador, puesto que se puede suponer que los demás intercambios son con el ambiente (absorbedor y condensador), de valor exergético nulo, y que la potencia de la bomba es despreciable.

$$\dot{A}_{Q_H} = \eta_C \cdot \dot{Q}_H = \frac{T_H - T_0}{T_H} \cdot \dot{Q}_H = \dot{A}_{Q_E} = \frac{T_E - T_0}{T_E} \cdot (-\dot{Q}_E)$$

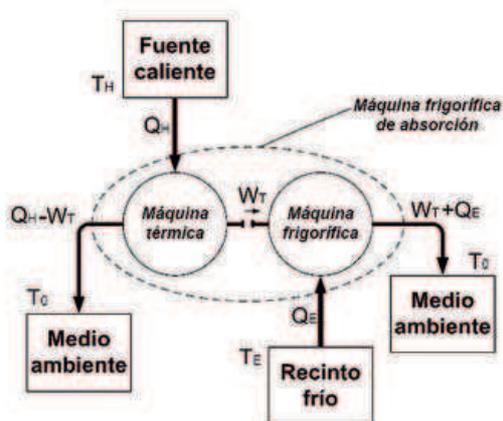
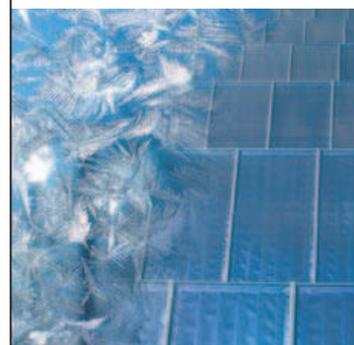
La eficiencia máxima será:

$$\varepsilon_{rev} = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_H} = \frac{T_E}{T_E - T_0} \cdot \frac{T_H - T_0}{T_H} = \varepsilon_{(0,E)} \cdot \eta_{(H,0)}$$

La primera fracción del último término es la eficiencia de una máquina frigorífica reversible que opera entre la temperatura  $T_E$  y la ambiental  $T_0$ ; la segunda fracción es el rendimiento termodinámico de un motor térmico<sup>14</sup>. Por lo tanto la máquina de absorción es el equivalente al acoplamiento de un motor térmico con una máquina frigorífica de compresión mecánica, como muestra la figura 13; el motor recibe el calor  $Q_H$  y produce el trabajo  $W_t$  (cediendo al ambiente la diferencia) que acciona mecánicamente la máquina frigorífica, que absorbe  $Q_E$  del foco frío (cediendo al ambiente el calor de condensación, suma del absorbido y el trabajo).

Una consecuencia destacada es que la refrigeración por absorción tiene eficiencias menores que la refrigeración por compresión mecánica, ya que la eficiencia de refrigeración viene multiplicada por una cantidad menor que la unidad ( $\eta_C$ ).

14 Máquina térmica productora de energía mecánica, que recorre el ciclo en sentido dextrógiro.



**Figura 13.** Equivalencia de la máquina de absorción con el acoplamiento de una máquina de compresión mecánica con un motor térmico.

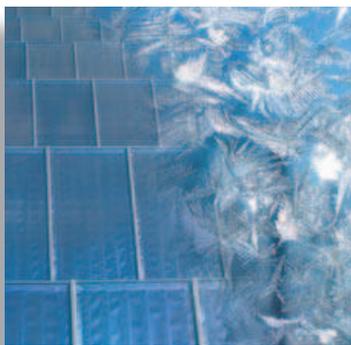
En la tabla 5 se presenta la eficiencia máxima de la refrigeración por absorción, que corresponde a una máquina reversible; se ha tomado la temperatura ambiente como 20°C, y se varían tanto la temperatura de evaporación como la de hervido.

**Tabla 5.** Eficiencia de la máquina de absorción reversible.

$t_e$ (°C) \ $t_h$ (°C)	0	-20	-50	-100	-150	-200
50	1,268	0,588	0,296	0,134	0,067	0,031
100	2,928	1,357	0,683	0,309	0,155	0,071
150	4,196	1,944	0,979	0,443	0,222	0,102
200	5,196	2,408	1,213	0,549	0,275	0,127

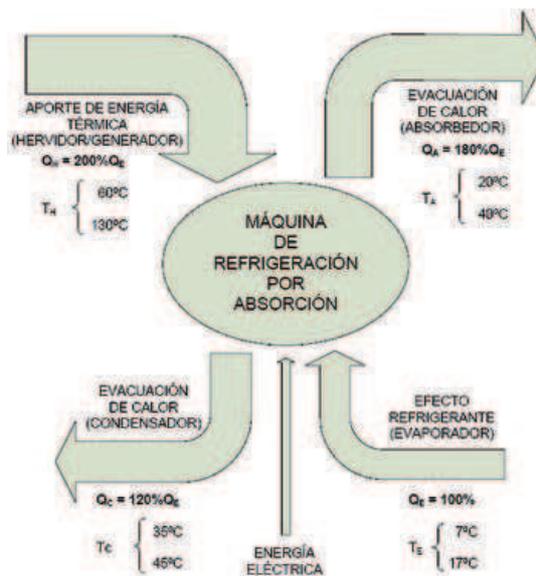
Si se aumenta la temperatura ambiente disminuye la eficiencia y viceversa, como se comprueba fácilmente. Pueden compararse estas eficiencias máximas con las de la tabla 4, que da las eficiencias máximas de una máquina frigorífica a la que se aporta energía mecánica, con ventaja, como se ha dicho, para ésta última.

Todo lo dicho sobre la eficiencia es comparando **energías**, con un punto de vista del Primer Principio. No se tiene en cuenta en cambio el costo de las distintas energías. Un acercamiento al tema desde la perspectiva del Segundo principio, es decir, operando con **exergías** da resultado completamente distintos y con ello, la refrigeración por absorción es perfectamente equiparable económicamente con la refrigeración por compresión mecánica de vapor. Este segundo análisis, más profundo y realista, está llevando a una nueva puesta en valor de la absorción y una recuperación parcial de su papel en la refrigeración actual.



### 8.3. Intercambios energéticos con el exterior

Para aclarar el funcionamiento de la refrigeración por absorción de vapor puede ser útil el esquema de balance de energías intercambiadas con el exterior por el fluido en su recorrido cíclico, esquema reflejado en la figura 14.



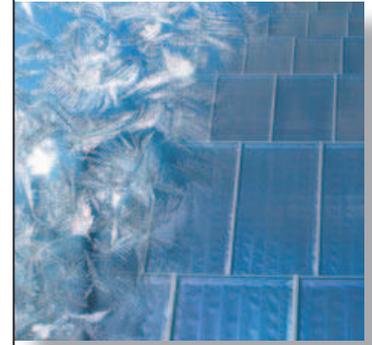
**Figura 14.** Esquema del intercambio energético de la máquina de absorción con el exterior.

El fluido recibe  $\dot{Q}_H$  a la temperatura del hervidor,  $\dot{Q}_E$  a la temperatura de evaporación, y la energía mecánica/eléctrica aportada a la bomba; cede al ambiente  $\dot{Q}_C$  en el condensador y  $\dot{Q}_A$  en el absorbedor.

Dado el funcionamiento cíclico en régimen permanente, el Primer Principio impone la igualdad de entradas y salidas o balance de energías siguiente:

$$\dot{Q}_H + \dot{Q}_E + \dot{W} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_A$$

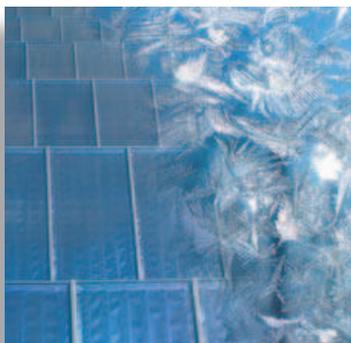
Se verá luego que las energías cambiadas en generador y absorbedor son del mismo orden de magnitud; que las cambiadas en evaporador y condensador, también similares entre sí, son del orden de la mitad de las anteriores; y que la potencia de la bomba es completamente despreciable, tanto que en la mayoría de los casos en los cálculos no es tomada en consideración. Por estas relaciones de magnitud la eficiencia es siempre inferior a la unidad (0,5 a 0,9) en el ciclo simple normal.



## 9. CARACTERÍSTICAS DESEABLES EN EL PAR REFRIGERANTE-ABSORBENTE

Las sustancias que forman el par refrigerante absorbente han de cumplir algunas condiciones para ser adecuadas para su uso en refrigeración.

- *Ausencia de fase sólida* en el campo de temperaturas y concentraciones en las que va a ser utilizado; de lo contrario se produciría la interrupción del flujo.
- *Elevada relación de volatilidad*; el refrigerante debe ser mucho más volátil que el absorbente, para su fácil separación; de otro modo las exigencias de aportación de calor pueden hacer el proceso prohibitivo.
- *Afinidad*: el absorbente debe tener una fuerte afinidad por el refrigerante en las condiciones de absorción; ello reduce el caudal de absorbente a circular y el tamaño del intercambiador entre absorbedor y generador; sin embargo una afinidad excesiva se asocia a un gran calor de dilución, lo que significa mayor energía a aportar al generador.
- *Presión*: lo ideal es que las presiones sean moderadas, para evitar grandes espesores, y superiores a la atmosférica, para que no sea posible la entrada de aire.
- *Estabilidad química*: las sustancias no deben descomponerse en las condiciones de servicio a lo largo de los años.
- *Corrosión*: no debe atacar a los materiales del circuito; en ocasiones se añaden inhibidores de corrosión
- *Seguridad*: cuando se trata de locales habitados es importante que los fluidos sean no tóxicos e ininflamables, lo que es menos importante en la industria.
- *Condiciones ecológicas*: bajo o nulo ODP y bajo TEWI, al igual que los refrigerantes de las máquinas de compresión mecánica.
- *Propiedades de transporte*: la viscosidad y la tensión superficial no debieran ser altas; la conductividad térmica debe ser elevada.



## Guía del Frío Solar

- *Calor latente*: cuanto mayor sea significa una reducción del caudal másico de refrigerante, y por tanto de absorbente a circular, para igual carga frigorífica; es decir, conductos y, en general, elementos menores, es decir de menor coste.

Además, idealmente, el refrigerante habría de satisfacer las características deseables para los refrigerantes primarios (véase anexo), incluido el costo reducido y la fácil disponibilidad.

No se conoce ningún par de sustancias que cumpla todas las condiciones listadas. En el apartado siguiente se describen las más usuales.

## 10. SISTEMAS DE ABSORCIÓN USADOS

### 10.1. Amoníaco/agua

El par amoníaco/agua, en que el refrigerante es el amoníaco y el absorbente el agua, cumple con la mayoría de los requisitos mencionados en el apartado anterior, excepto que requiere presiones de trabajo elevadas en la parte de alta, y que la relación de volatilidades es demasiado baja, lo que obliga a acudir a artificios especiales<sup>15</sup> para conseguir la separación casi completa del agua y que por el circuito externo circule exclusivamente amoníaco; además el amoníaco es un refrigerante clasificado en el grupo II en cuanto a seguridad, por razón de su toxicidad, lo que restringe el uso en locales habitados.

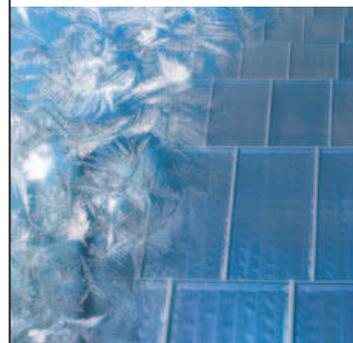
Con todo, permite alcanzar bajas temperaturas (-33 °C a la presión atmosférica normal), por lo que es ampliamente utilizado en instalaciones de refrigeración industriales, por ejemplo refinerías.

### 10.2. Agua/bromuro de litio

El agua como refrigerante y el bromuro de litio como absorbente es una combinación de sustancias de elevada seguridad, bajo precio, gran estabilidad y afinidad, el calor latente más elevado de las sustancias usuales; además el ciclo es más simple que el del  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  por la mayor facilidad de separación del refrigerante.

---

<sup>15</sup> Lo que complica y encarece la instalación y obliga a prever circuitos de enfriamiento para el analizador/desflegmador, además de la columna de destilación habitualmente llamada rectificador.



El mayor inconveniente es la tendencia a la formación de sólidos, tanto porque el agua se hiela por debajo de 0 °C, como porque el BrLi cristaliza incluso en concentraciones moderadas, especialmente cuando el enfriamiento es por aire<sup>16</sup>, lo que limita las aplicaciones a temperaturas de evaporación no inferiores a 2 °C<sup>17</sup>, y a circuito de agua para enfriamiento.

La baja temperatura requerida en el hervidor (véanse los detalles más adelante) hace el par ideal en aplicaciones donde la fuente de calor sea de bajo nivel térmico, como el agua calentada por paneles solares; es muy utilizado en instalaciones de refrigeración para aire acondicionado, en que la temperatura de evaporación no suele ser inferior a los 5-10 °C, entre otras razones (no toxicidad) porque la eficiencia es notablemente superior a la del par NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O.

### 10.3. Otras combinaciones refrigerante/absorbedor

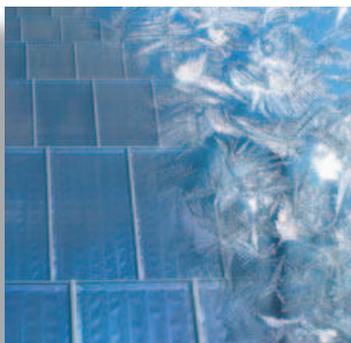
Se han probado diversas combinaciones, en principio adecuadas para la refrigeración por absorción con ciclos simples, y con menos problemas de cristalización que el par agua bromuro de litio, pero no son utilizados normalmente por diversas razones entre las que están la limitada experiencia en cuanto a estabilidad y corrosión, y la toxicidad de algunos refrigerantes, además del pequeño número de máquinas de absorción, comparado con las existentes de compresión mecánica; se estudia la adición de inhibidores de corrosión y retardadores de cristalización.

Algunos pares son:

- Amoníaco/sales.
- Metilamina/sales.
- Alcoholes/sales.
- Amoníaco/disolventes orgánicos.

16 Recuérdese que el salto de temperaturas para el intercambio líquido/gas ha de ser sensiblemente mayor que en el caso líquido/líquido.

17 Como margen de seguridad para evitar absolutamente la posibilidad de formación de hielo.



## Guía del Frío Solar

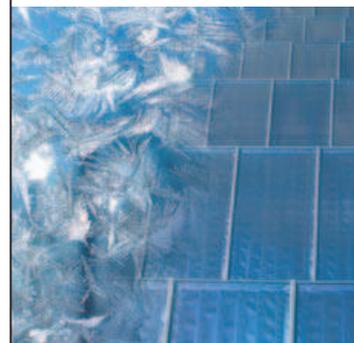
- Anhídrido sulfuroso/disolventes orgánicos.
- Hidrocarburos halogenados/disolventes orgánicos.

## 11. COMPARACIÓN DE LAS REFRIGERACIONES POR ABSORCIÓN Y POR COMPRESIÓN MECÁNICA

En ambos casos el efecto frigorífico se produce por la evaporación de un líquido, que entra al evaporador con título cercano a cero y sale con título igual o superior a la unidad; el volver a obtener fluido a baja temperatura en fase líquida del vapor que ya ha producido el efecto frigorífico requiere en ambos casos la aportación de una energía exterior (como exige el Segundo Principio) y la evacuación al ambiente de la suma del calor extraído del foco frío más la energía aportada (conforme al Primer Principio) por medio del condensador. La diferencia conceptual estriba solamente en que la energía aportada del exterior es energía mecánica en el caso del compresor, mientras que en el conjunto absorbedor/hervidor que realiza análogamente la aspiración-compresión del vapor, la energía aportada es calorífica, y a temperatura moderada.

En ello reside la diferencia fundamental entre ambos sistemas de refrigeración lo que supone diversas diferencias de menor nivel, con ventajas e inconvenientes para cada uno. En los dos tipos la instalación lleva tuberías, válvulas, intercambiadores y elementos auxiliares.

Absorción	Compresión mecánica
2 tanques y 1 pequeña bomba; por lo tanto: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generalmente más costoso.</li> <li>• <b>Silencioso y sin vibraciones.</b></li> <li>• El conjunto absorbedor/hervidor ocupa mucho más volumen que el motocompresor.</li> <li>• Prácticamente <b>sin mantenimiento.</b></li> </ul>	1 gran compresor (equipo con estrechas tolerancias); por tanto: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalmente <b>menor inversión.</b></li> <li>• Suele requerir aislamiento acústico/ vibratorio.</li> <li>• <b>Menor volumen.</b></li> <li>• Mantenimiento especializado.</li> </ul>
<b>Energía barata</b> , a menudo residual, de bajo nivel térmico.	Energía cara, relativamente.
Hay que enfriar absorbedor y condensador y eventualmente deflegmador y rectificador.	<b>Sólo se enfría el condensador.</b>
El límite de temperatura está hacia los -40 °C.	Es posible bajar de -100 °C.
Baja eficiencia (0,5 a 0,9).	<b>Eficiencia elevada</b> (1,5 a 4 aprox.).



Esta última diferencia ha llevado a que la refrigeración por absorción, pese a ser el primer sistema aplicado en la práctica sea poco utilizado en la actualidad<sup>18</sup>, en comparación con la compresión mecánica que supone más del 95% de las aplicaciones de frío.

A pesar de ello, últimamente la preocupación por el ahorro energético<sup>19</sup>, junto con el más apropiado enfoque exergético, viene llevando a considerar con mayor interés la posibilidad de usar un sistema de absorción. Así son casos típicos:

- Cuando se dispone de abundancia de energía calorífica residual, que no necesita estar a alta temperatura; así en las petroquímicas es usual que existan sistemas de absorción.
- En el caso de que se disponga de una caldera para producir vapor para calefacción en invierno, puede seguirse utilizando en verano para refrigeración.
- Dada la baja temperatura del hervidor, particularmente en el caso del agua/bromuro de litio (60-80 °C), la absorción es particularmente adecuada para el aprovechamiento de energía solar de bajo nivel (paneles).
- El bajo nivel vibroacústico hace la absorción recomendable, por ejemplo, para A.A. de hospitales.

En ocasiones se utilizan combinadamente los ciclos de compresión mecánica y de absorción. Se trata de sistemas de refrigeración para acondicionamiento de aire de gran capacidad, y en aquellos casos en que la energía primaria a la instalación se le entrega en forma de vapor a alta presión. El vapor se alimenta a una turbina de contra-presión que acciona el compresor centrífugo de la máquina de compresión mecánica; el vapor de baja presión a la salida de la turbina proporciona el calor a entregar al hervidor de la máquina de absorción. La solución más económica es normalmente cuando la carga de refrigeración es proporcionada en un tercio por la máquina de compresión y dos tercios por la de absorción. La regulación se suele disponer de modo que cuando la carga de refrigeración disminuye

18 Según se comenta repetidamente en este texto, la situación está cambiando hacia una mayor presencia de la absorción/adsorción.

19 Se han desarrollado máquinas de absorción de varias etapas con las que se consiguen eficiencias superiores a 1,5.



## Guía del Frío Solar

un 20-35% del valor de proyecto la máquina centrífuga se para y el vapor se suministra al hervidor a través de una reducción de presión en *bypass* de la turbina; algo de vapor se usa para mantener caliente la turbina en previsión de su arranque cuando aumente la carga frigorífica.

## 12. ANEXO: PROPIEDADES DESEABLES EN UN REFRIGERANTE PRIMARIO

### A) Propiedades termodinámicas

- Elevada diferencia entálpica entre líquido y vapor saturados; en efecto, puesto que

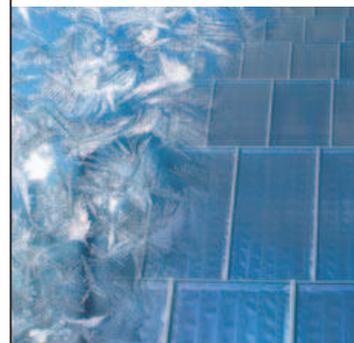
$$\dot{Q} = \dot{m} * q$$

cuanto mayor sea  $q$ , menor será  $\dot{m}$  y por tanto menores, a igualdad de volumen específico, las dimensiones de tuberías, válvulas, compresor y accesorios, con la consiguiente importantísima economía de inversión.

- Relación  $P_c/P_e$  tan pequeña como sea posible, pues con ello se tiene menor retorno de vapor de la parte de alta a la de baja.
- Temperatura y presión críticas elevadas en comparación con las esperadas de condensación, para que no sean excesivos la superficie del condensador y el flujo másico del refrigerante (con los consiguientes valores de la inversión y de la potencia consumida).
- Pequeño volumen específico del vapor saturado, con lo que, *cøteris paribus* se necesitará menores dimensiones de compresor, tuberías, etc.
- Buena conductividad térmica.
- Temperatura de congelación suficientemente baja para el servicio requerido.

### B) Propiedades de mecánica de fluidos

- Baja viscosidad, para que las pérdidas de carga en tuberías y conductos sean reducidas.



- Elevada solubilidad con el agua para que, en caso de entrar ésta, quede disuelta y no en forma libre que supondría obstrucción del paso por congelación en las zonas de baja temperatura.

### C) Propiedades para la construcción mecánica

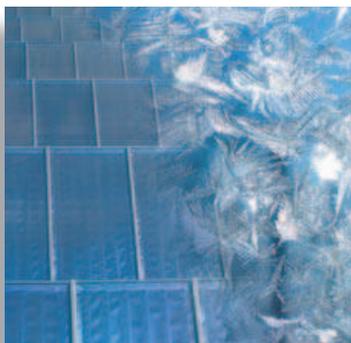
- Presión moderada a la temperatura de condensación, pues lo contrario encarece al precisar mayores espesores, mejores materiales y más cuidadosa ejecución y montaje.
- Presión no muy inferior a la atmosférica<sup>20</sup> a temperatura de evaporación pues lo contrario exige una perfecta, y cara, estanqueidad para evitar entradas de aire y la consiguiente humedad; bajas presiones encarecen la instalación con purgas, desaireadores y deshumectadores.
- Carencia de agresividad química hacia el lubricante y los materiales usuales de construcción, ni aún en presencia de agua.

### D) Propiedades para la seguridad

- Fácil detección de fugas.
- Que no sea inflamable y menos explosivo en las proporciones en que se mezclará con el aire (en principio pequeñas).
- Que no sea tóxico para el organismo humano, en las proporciones y tiempos de exposición en que es probable que pueda actuar.
- Que no sea perjudicial, en caso de fuga, para los productos a enfriar (por ejemplo alimentos), de los que puede ser evacuado por la aplicación de calor o de vacío siempre que no se hayan producido reacciones químicas irreparables.
- Estabilidad química en las condiciones de trabajo; la descomposición del producto en el circuito llevaría a la formación de gases incondensables, con la consiguiente elevación de presión de condensación; según las circunstancias los productos de la descomposición pueden formar ácidos que ataquen al lubricante y a los materiales de construcción del circuito.

---

<sup>20</sup> Interesa que la presión sea superior a la atmosférica incluso a la temperatura de evaporación para asegurar que no habrá entrada al circuito de elementos extraños; eso se cumple para casi todos los refrigerantes normalmente utilizados, excepto, por ejemplo, el R-11 y el R-114.



### E) Propiedades económicas generales

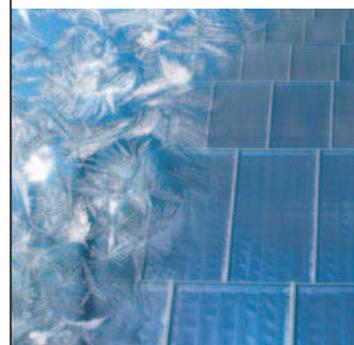
- Disponibilidad, fácil obtención.
- Precio tan bajo como sea posible.

### F) Propiedades ecológicas

- Reducido ODP.
- Reducidos GWP y TEWI.

## 13. BIBLIOGRAFÍA

- ANDRÉS, Juan A. de, y GARCÍA, Manuel: *Calor y Frío Industrial I*, cap XXV, U.N.E.D. 1983.
- ASHRAE: *Fundamentals*, Ashrae Handbooks, SI Edition, 2009.
- BAEHR, Hans D.: *Tratado moderno de termodinámica*, Tecnilibro, 1987, cap. 7.
- CARRIER INTERNATIONAL LTD.: *Manual de aire acondicionado*, parte 7, cap 4, Marcombo-Boixareu, 1983.
- KING, Guy R.: *Modern Refrigeration Practice*, cap 10, McGraw-Hill, 1971.
- RAŽNEVIĆ, Kuzman: *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, McGraw-Hill, 1976, tablas 123, 127-2 y 132-1.
- SEGURA, José: *Termodinámica técnica*, AC 1979, Reverté, 1990, cap. 20.
- STOECKER, W.F.: *Refrigeración y Acondicionamiento de Aire*, cap 11, McGraw-Hill, 1970.
- THRELKELD, James L.: *Ingeniería del ámbito térmico*, cap 5, Prentice-Hall, 1973.



# 3

## FRÍO SOLAR: TECNOLOGÍA DE ABSORCIÓN EN TRIPLE ESTADO

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas solares térmicos convencionales han estado tradicionalmente ligados a soluciones de agua caliente sanitaria, calefacción y climatización de piscinas. Aunque en ACS se pueden conseguir unos porcentajes de cobertura muy altos, para calefacción, esta cobertura es más baja siendo necesario un sistema principal de energía convencional. Uno de los motivos es, por la coincidencia de que cuando mayor necesidad de calor tenemos es cuando menor radiación solar podemos conseguir. Con los sistemas de climatización o frío solar existe una coincidencia entre la oferta (radiación solar) y la demanda (necesidad de frío) siendo por eso unos sistemas eficientes y rentables.

Con un sistema de refrigeración solar, dependiendo de las zonas y las características de la instalación se pueden conseguir una cobertura muy alta de ACS y climatización. En este último caso se puede además apoyar con energías alternativas como la geotérmica o la biomasa.

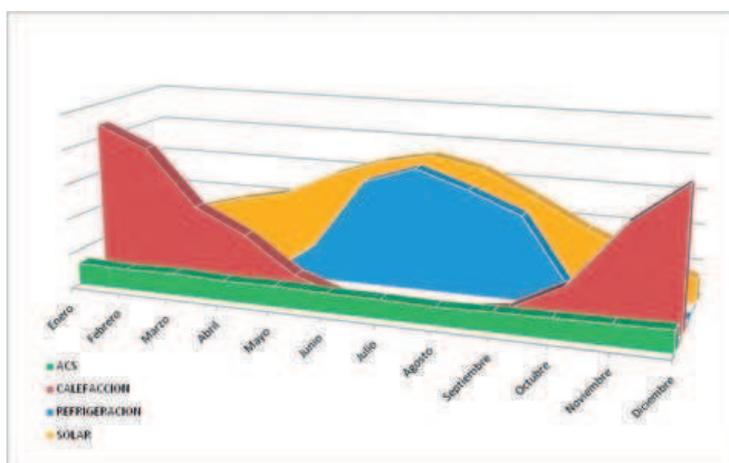


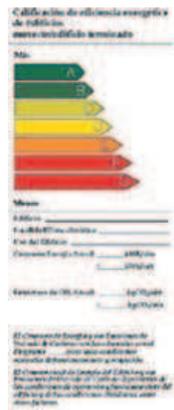
Figura 1. Ejemplo de Cobertura/Demanda en Viviendas.



## Guía del Frío Solar

La energía solar térmica está tomando gran importancia afianzada por distintas normativas locales y diferentes reales decretos.

Con el Código Técnico de Edificación (CTE) se establecen los requisitos básicos de edificación, desde el punto de vista de la protección del medio y el ahorro de la energía, donde la energía solar tiene un papel esencial.



De esta manera se favorece la promoción de edificios de alta eficiencia energética y de mínimos consumos energéticos, al mismo tiempo que se le facilita al cliente final la información necesaria para saber el consumo energético y el beneficio ambiental por las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas.

La refrigeración solar, además de favorecer el ahorro energético y la utilización de energías renovables, proporciona al cliente final calidad de vida y confort.

Dentro de los conceptos utilizados en la climatización de edificios es importante diferenciar dos: confort y demanda energética.

El confort está ligado a la sensación que expresa el grado de satisfacción con el medio que nos rodea. Según la Real Academia Española: *(Del fr. confort, y este del ingl. comfort). 1. m. Aquello que produce bienestar y comodidades.*

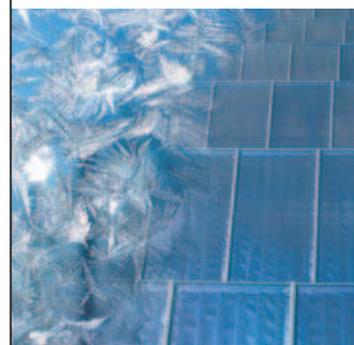
Los sistemas de refrigeración mediante energía solar y máquina de absorción influyen principalmente en la temperatura aunque es muy importante controlar el factor humedad.

Según el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, el confort térmico implica una sensación neutra en el individuo, respecto al ambiente térmico y según la Norma UNE-EN-ISO 7730, el confort térmico se define como «esa condición de la mente en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico».

Se establecen entonces las siguientes condiciones de confort como objetivo a alcanzar:

**Tabla 1.** Condiciones de confort según Norma UNE-EN-ISO 7730.

Estación	Temperatura Operativa (°C)	Velocidad media del aire (m/s)	Humedad Relativa (%)
Verano	23 - 25	0,18 - 0,24	40 - 60
Invierno	20 - 23	0,15 - 0,20	40 - 60



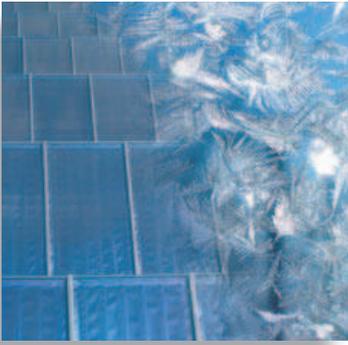
La demanda energética, o necesidades energéticas de una edificación para alcanzar unas condiciones de confort, viene definida por:

- Características constructivas del edificio (aislamiento, orientación, ventilación...).
- Zona climática (radiación solar, lluvia, viento, humedad relativa...).
- Utilización del edificio (residencia, oficina, deporte...).

Por tanto, a la hora de diseñar un sistema de climatización de un edificio es necesario conocer la utilización del mismo, así como los requisitos de humedad y temperatura.

Los beneficios por la utilización de un sistema de Frío Solar son:

- Beneficio medioambiental por la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, por un lado ahorrando en fuentes de energía y por otro evitando las refrigeraciones dañinas para el medio ambiente.
- Aprovechamiento máximo de energía solar en la época de máxima radiación.
- Alta Eficiencia energética por ser un sistema centralizado que engloba varias aplicaciones (agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración).
- Mejora la calificación energética de la vivienda.
- Sustitución de la demanda de combustible fósil mediante la utilización de radiación solar, ayudando así a cumplir los objetivos de la política europea en el uso creciente de energías renovables.
- Independencia sobre la utilización de otras fuentes de energía convencionales (electricidad, gas...) y del riesgo de cambios de precios o carencia de las mismas.



### Guía del Frío Solar

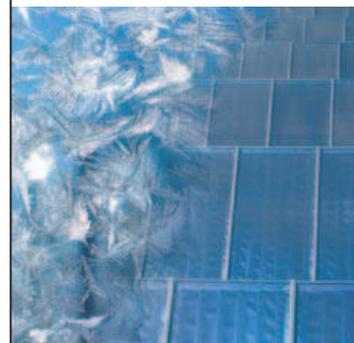
- La máquina de absorción actúa como elemento de seguridad, protegiendo la instalación de sobrecalentamientos y reduciendo por tanto los costes de mantenimiento al mismo tiempo que prolonga la vida útil de la instalación.
- Apoyo de la estabilidad de las redes eléctricas reduciendo tanto el consumo eléctrico como el pico de demanda.
- Confort y salud por la forma limpia, invisible y uniforme de distribución del calor/frío a través de sistemas radiantes.



## 2. TECNOLOGÍA DE ABSORCIÓN

El uso de las máquinas de absorción constituye una buena alternativa a la refrigeración por compresión.

Las máquinas de absorción no tienen compresor; el evaporador y el condensador realizan la misma función que en las enfriadoras convencionales, pero la compresión mecánica es reemplazada por una compresión térmica. Esta es realizada por un absorbente químico (el



más común es LiBr, pero también LiCl o  $H_2O$ ) y un generador térmico, con una bomba para proporcionar el cambio de presión. Al prescindir del compresor, el consumo eléctrico desciende considerablemente.

Además de las ventajas económicas asociadas a la relación del consumo eléctrico, esta tecnología también presenta ventajas medioambientales ya que es accionado por energía térmica en lugar de eléctrica, pudiendo aprovechar por tanto, calor residual de otros procesos e incluso energía solar.

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 la energía solar nos ahorraría la emisión del  $CO_2$  que genera la combustión.

Esta solución por tanto, es óptima desde el punto de vista ambiental, ya que se evita la destrucción del ozono y se reduce el efecto invernadero así como desde el punto de vista económico, por la reducción de consumo eléctrico.

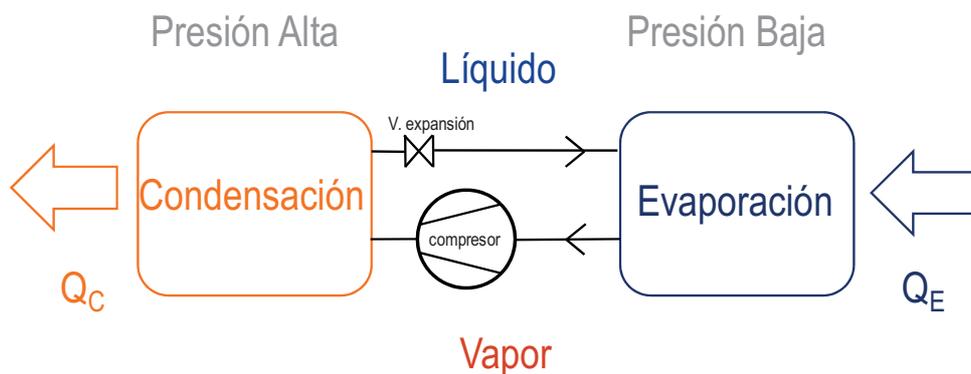
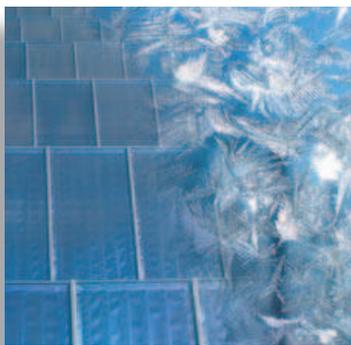
## 2.1. Refrigeración Convencional

La refrigeración convencional está basada principalmente en la compresión de un gas para producir frío. En el efecto de refrigeración se emplea un fluido (refrigerante en estado líquido) que absorbe calor del medio gracias a su ebullición a baja presión.

Los elementos principales son:

- Evaporador.
- Condensador.
- Compresor.
- Dispositivo de expansión.

En la figura 2 se pueden ver los flujos de energía principales:



**Figura 2.** Elementos principales en ciclo de compresión.

El balance energético o rendimiento (COP) es la relación entre el frío útil obtenido en el evaporador y la energía consumida en el compresor. Los valores típicos suelen estar entre 2 y 3.

$$COP = Q_e / W$$

En la tabla 2 se pueden ver distintas tecnologías de compresores y su horquilla de valores de rendimiento.

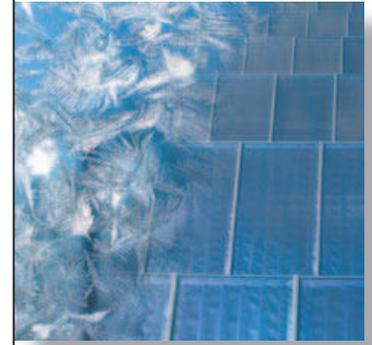
**Tabla 2.** COP's de distintas tipologías de compresores.

Tipología de Compresor	COP (temperatura de enfriamiento del aire > 0°C)
Alternativo	1,5 - 3
De tornillo	2,5 - 4
Centrífugo	5 - 6

## 2.2. Refrigeración por absorción

En el ciclo de absorción, el compresor es sustituido por un ciclo de absorción y aporte de calor. Para ello se buscan sustancias que tengan mucha afinidad es decir una gran capacidad de «absorber» a otra en su fase de vapor. Los elementos principales son:

- Evaporador.
- Absorbedor.
- Regenerador.
- Condensador.



De esta manera se sustituye también el compresor por una bomba de circulación reduciendo el consumo eléctrico. En la figura 3 se pueden ver los componentes y flujos de energía principales del ciclo de absorción:

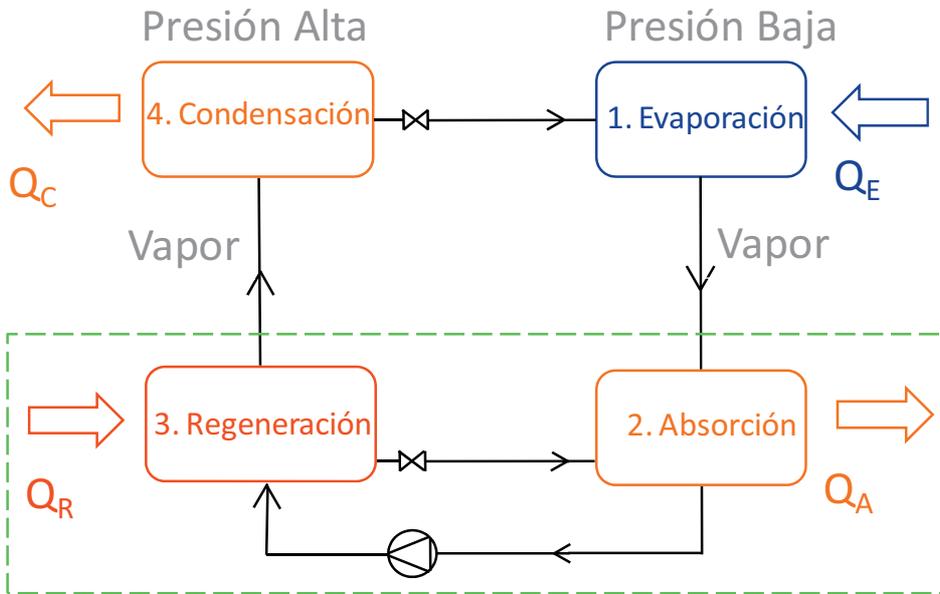


Figura 3. Ciclo de absorción.

Por tanto el rendimiento o COP viene dado por la relación entre el frío obtenido en el evaporador y el calor aportado (regeneración):

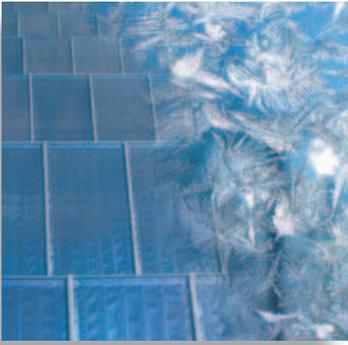
$$COP = Q_e / Q_r$$

donde:

$Q_e$ : energía de evaporación.

$Q_r$ : energía de regeneración.

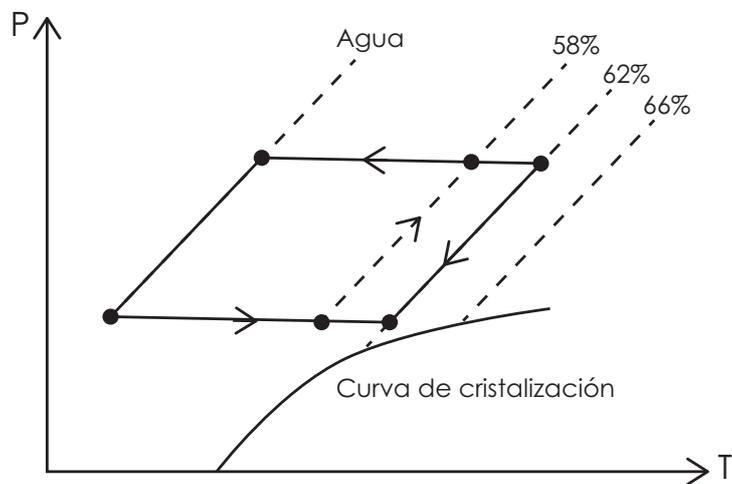
También existen ciclos de *doble* o de *triple efecto* que aprovechan el calor residual de la compresión térmica para realizar una segunda/tercera etapa de compresión, a Tª menor, aumentando la eficiencia del ciclo.



**Tabla 3.** COP's de referencia para distintas tecnologías de absorción.

Sistema absorción	COP (temperatura de agua fría > 0°C)	Temperatura Activación (°C)
Simple Efecto	0.6 - 0.7	> 80
Doble Efecto	0.9 - 1.2	> 150
Triple Efecto	1.5	> 200

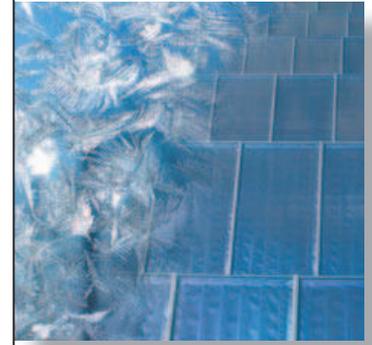
En el ciclo de absorción agua-bromuro de litio que podemos observar en el diagrama de Dühring (ver Fig. 4), los números del 1 al 4 indican las etapas del ciclo de absorción. Los porcentajes en la figura indican la concentración de bromuro de litio en agua. Existe pues peligro de cristalización cuando la temperatura de absorción (etapa 2) baja demasiado o cuando la temperatura de regeneración (etapa 3) sube demasiado. Es por tanto importante el control de estas dos etapas para evitar que el fluido llegue a cristalizar, lo que inutilizaría la máquina por la obstrucción de los conductos y el bloqueo de las bombas.



**Figura 4.** Diagrama de Dühring.

Por tanto algunos aspectos importantes a considerar son:

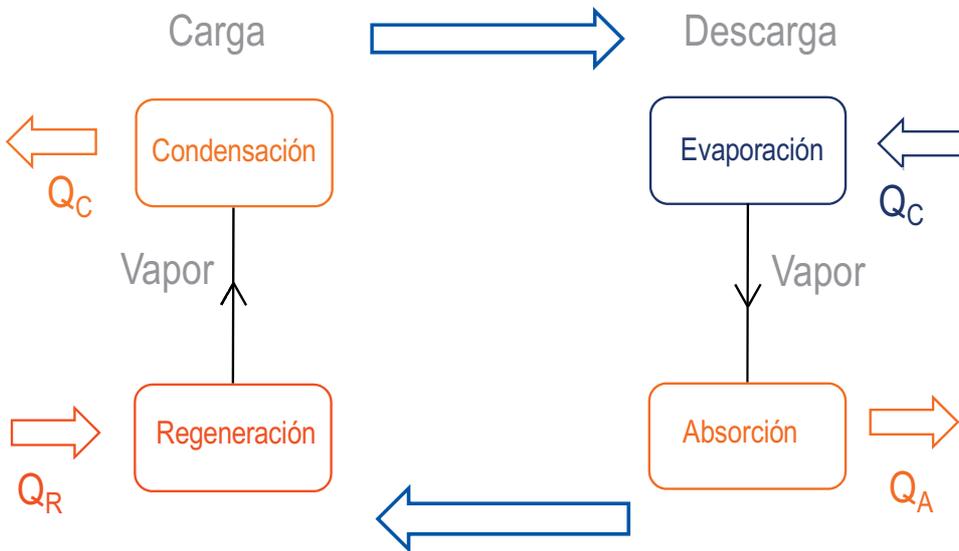
- Cristalización (control de Tª de Regeneración y Tª de Absorción).
- Consumo eléctrico.
- Almacenamiento de energía y/o continuidad del ciclo.



### 2.3. Refrigeración en Triple Estado

La tecnología de absorción en triple estado se ha materializado en una máquina de absorción que trabaja en modo discontinuo diferenciando la «carga» (regeneración y condensación) de la «descarga» (evaporación y absorción). De esta manera, se puede conseguir que mientras una parte de la máquina se está cargando, la otra parte está aportando frío y mediante el control interno de la máquina se le da continuidad a estos ciclos.

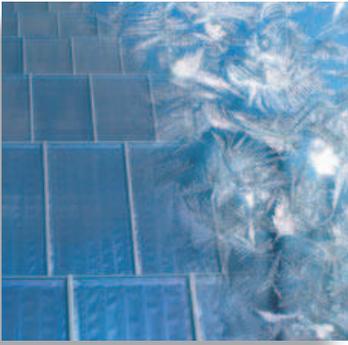
En la figura de abajo se puede ver el proceso de absorción en modo discontinuo. El equilibrio energético entre todos los intercambiadores de calor de la máquina es el que condiciona la estabilidad del ciclo.



**Figura 5.** Proceso de absorción modo discontinuo (carga y descarga).

Es por tanto un ciclo de absorción simple con las siguientes características:

- Utiliza LiCl (absorbente) + H<sub>2</sub>O (refrigerante).
- Almacena energía químicamente.
- Entrega calor y frío de forma continua, día y noche.
- El consumo eléctrico es mínimo.
- COP = 0,68



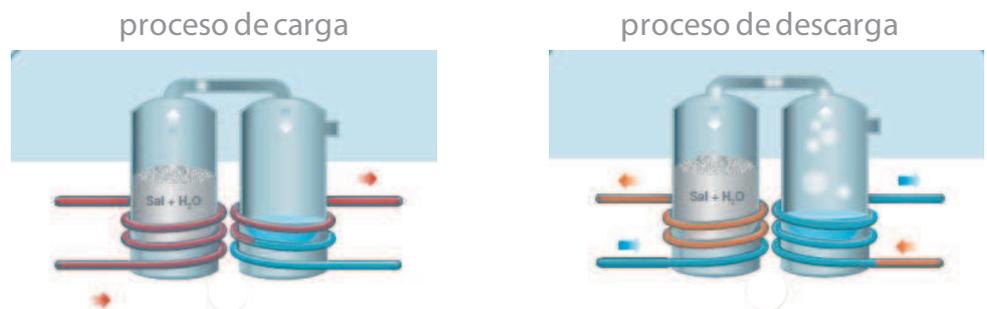
## Guía del Frío Solar

Existen en el mercado máquinas de absorción en triple estado que constan de dos partes, que a su vez, están formadas por dos contenedores.

El sistema se compone de dos contenedores, un contenedor (reactor), contiene el Cloruro de Litio y otro contenedor (evaporador-condensador), contiene agua. Para favorecer el proceso de condensación y evaporación ambos depósitos están en presión de vacío.



En el proceso de carga es necesario aportar calor para provocar que el agua se transforme en vapor y se mueva al otro contenedor conectado a un foco frío donde el agua condensa. El proceso de descarga consiste en mover nuevamente el agua hacia la sal mediante el calor «robado» del edificio y aprovechando la gran afinidad de ambas sustancias. En la figura de abajo se puede ver este proceso:

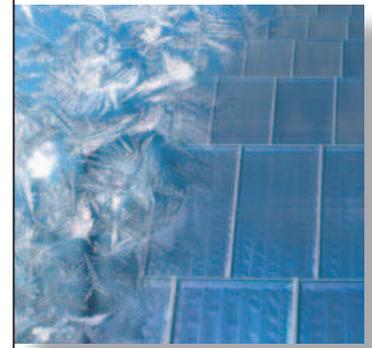


**Figura 6.** Proceso de carga y descarga de máquina de absorción ClimateWell.

Las características del proceso son:

- La sal, Cloruro de Litio, nunca cambia de posición.
- Sólo el Agua se desplaza.
- A igual temperatura en ambos contenedores, el agua es atraída por la sal hasta que se agota el agua en el condensador.

Por tanto, las ventajas principales de la tecnología de absorción en triple estado son:



1. la cristalización es parte del proceso, lo que permite trabajar con temperaturas de Regeneración y de Absorción variables, no siendo necesario un depósito regulador de temperatura.
2. El consumo eléctrico se reduce drásticamente al no necesitar bombas de circulación, siendo el consumo de la máquina únicamente el del panel de control de la misma.
3. La capacidad de almacenamiento de energía está incorporada en el proceso, por lo que no es necesario un depósito de almacenamiento de frío.

### 3. SISTEMAS DE FRÍO SOLAR

Para el funcionamiento de la máquina de absorción es indispensable que esta lleve conectados tres circuitos externos:

- Sistema de captación o foco de calor.
- Sistema de distribución (aporte de frío o calor).
- Sistema de disipación o excedente de calor.

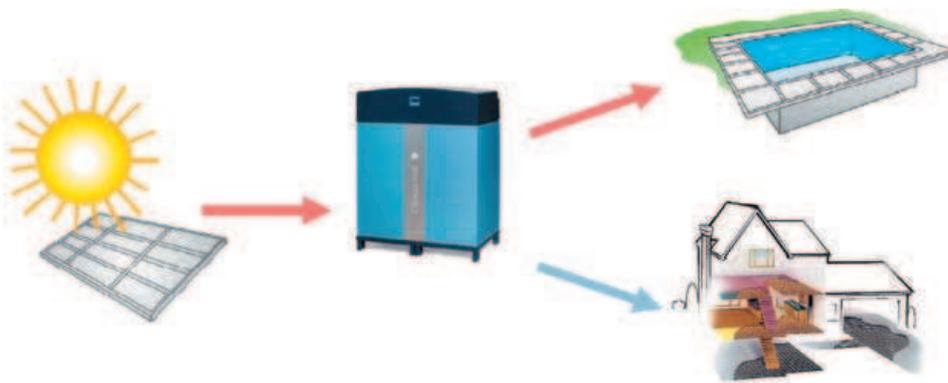


Figura 7. Esquema básico de un sistema ClimateWell.

#### 3.1. Sistema de captación o Fuente de calor

La máquina de absorción recibe su energía en forma de agua caliente de la fuente térmica de calor. Esta puede ser paneles solares térmicos, calor residual de una planta de cogeneración (trigenera-



## Guía del Frío Solar

ción) o recuperación de calor procedente de gases, de procesos industriales...

Durante la carga, el agua procedente de la fuente térmica necesita estar por lo menos 50 °C por encima de la temperatura del disipador de calor. Las temperaturas de entrada a la máquina de absorción no tienen por qué ser constantes, ya que esta puede trabajar con temperaturas variables.

En general las temperaturas de trabajo estarán entre 80-110 °C con una potencia en torno a 15-20 kW.

Si la fuente térmica es de colectores solares, entonces esta temperatura dependerá de la potencia suministrada por estos. Lo que, a su vez, depende de la radiación solar, de las dimensiones y eficiencia de los colectores y del caudal de circuito. Es importante señalar que este tipo de ciclo de absorción no necesita que se controle la temperatura o el flujo, sino que se cargará únicamente con diferentes potencias dependiendo de la temperatura y del caudal.

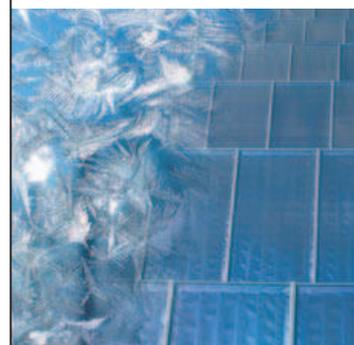
Hay que remarcar que dado que las temperaturas de trabajo de la máquina de absorción son bastante altas, los materiales de los paneles deberán soportar sin problemas estas temperaturas y trabajar en estos rangos con un alto rendimiento.

A modo indicativo, para la zona de España se necesitarán aproximadamente entre 30 y 38 m<sup>2</sup> de apertura de captadores solares (por máquina), con una inclinación de 30°. En todos los casos, es aconsejable dimensionar correctamente este apartado para aprovechar al máximo la energía solar conociendo los datos técnicos de cada tipo de captador a utilizar.

### 3.2. Sistema de distribución

El líquido de distribución se enfría por evaporación de agua (o se calienta por condensación si está entregando calefacción), que se encuentra en interior de la máquina en condición de vacío.

En el modo de refrigeración, cuando más alta sea la temperatura que va al sistema de distribución, más eficaz será el funcionamiento de la máquina de absorción, por lo que las temperaturas óptimas de traba-



jo son 10-16 °C. Con temperaturas más bajas, se reducirá la potencia frigorífica de la máquina y el rendimiento del ciclo de absorción.

El sistema de distribución conectado a la máquina de absorción puede ser suelo radiante, sistema de refrigeración de techos, calefacción / refrigeración de conducción central, unidades de tratamiento de aire (UTAs), inductores, etc.

Los sistemas que trabajan con aire, por ejemplo UTAs, combinadas con vigas frías o conductos de aire, tienen la ventaja de que su temperatura de trabajo es flexible. Además cubren tanto cargas sensibles como cargas latentes, por lo que hay una renovación controlada de aire. En general, estos sistemas tendrán menos inercia que los sistemas de agua.

Los sistemas radiantes suelen estar diseñados para trabajar con temperaturas cercanas a la temperatura ambiente que se pretende conseguir, por lo que son sistemas muy eficientes al requerir menos energía para mantener la temperatura de confort. Esto es posible gracias a la gran superficie de contacto que existe entre la distribución de calefacción/refrigeración y la superficie radiante, y entre esta y el aire interno de la zona a climatizar. Esto, además de dar una gran masa térmica, facilita un buen confort. El inconveniente de estos sistemas es que sólo abarcan cargas de refrigeración sensibles.

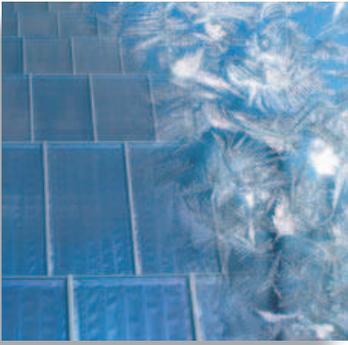
La fuente térmica puede, por supuesto, conectarse directamente al sistema de distribución y, dar calor sin pasar por la máquina de absorción.

Además, en el caso en que exista exceso de energía, esta podrá ser cargada en la unidad ClimateWell y ser utilizada posteriormente para calentar o refrigerar cuando la demanda lo requiera y previamente se den las características técnicas de la instalación para este fin.

### **3.3. Sistema de Disipación**

Los sistemas de refrigeración solar deben contar siempre con un sistema de disipación de calor. El fluido de disipación se calienta por condensación de agua, que se encuentra en interior de la CW en condición de vacío.

Las máquinas de absorción necesitan disipar energía, tanto en el proceso de carga como en el de descarga. En el primer caso se disipa el



## Guía del Frío Solar

excedente del aporte térmico, mientras que en el segundo se disipa toda la energía que se capta en la casa.

Las bajas temperaturas en la disipación mejoran la capacidad de refrigeración ClimateWell, con lo que es importante la selección del tipo y dimensiones del disipador de calor para optimizar el rendimiento y minimizar costes. La temperatura del disipador de calor depende de las condiciones ambientales y de su eficiencia.

Ejemplos de disipadores de calor que pueden utilizarse en un sistema ClimateWell son:

### a) *Piscina exterior/interior.*

Es posible climatizar la piscina, utilizando así doblemente la energía y alargando el periodo de baño. El enfriamiento se produce principalmente por la evaporación del agua en su superficie, por lo que el factor importante es la lámina de agua expuesta al aire; cuanta más superficie tenga, mayor enfriamiento se producirá. Otros factores influyentes serán las renovaciones de agua, la radiación y el contacto con el agua.

En el caso de que la piscina sea interior, habrá que considerar la humedad del ambiente.

### b) *Sistema de precalentamiento para agua caliente doméstica.*

Es idóneo en los casos en que haya una gran necesidad de agua caliente, por ejemplo para duchas, cocina, lavandería, etc. Por lo tanto será muy recomendable en el caso de hoteles y hospitales ya que aumenta el rendimiento y con ello la rentabilidad del sistema.

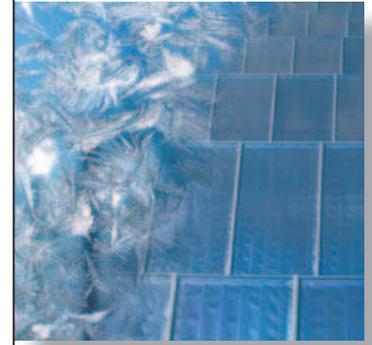
Este sistema supone un bajo consumo eléctrico, pero el inconveniente que tiene es que depende del consumo de agua caliente sanitaria (ACS), el cual es complicado de predecir. Por esta razón, con este sistema de disipación siempre será necesario tener otra fuente de disipación alternativa.

### c) *Torre de refrigeración.*

Este sistema es muy efectivo para instalaciones de grandes dimensiones, ya que ofrece temperaturas de entrega baja y bastante estable.

La refrigeración evaporativa permite que la torre desprenda temperaturas por debajo de la temperatura de bulbo seco ambiente lo cual es necesario para instalaciones de refrigeración solar en climas cálidos.

Sin embargo requiere un mantenimiento higiénico (principalmente contra la legionella) y supone además un consumo de agua.



d) *Circuitos geotérmicos, como pozos o bombas de calor geotérmicas.*

Estos son una buena solución debido a que la temperatura de la tierra se mantiene prácticamente constante durante todo el año.

Los factores a tener en cuenta son, la composición de la tierra, la del tubo y la de la capa freática. La profundidad recomendada para una máquina de absorción sería de entre 150 y 200 m. El dimensionado del colector geotérmico tendrá en cuenta los factores anteriores para ser capaz de retornar unas temperaturas adecuadas.

e) *Condensador refrigerado por aire.*

Es sólo válido para determinados climas y es muy importante hacer un estudio previo para analizar el comportamiento en cada caso.

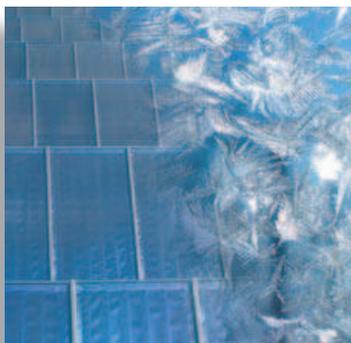
Hay que tener en cuenta que, a diferencia de la torre de refrigeración, los sistemas condensados por aire no pueden disipar a temperaturas más bajas que la temperatura del bulbo seco ambiente, por lo que en climas cálidos no será efectivo.

Si se desea, se pueden utilizar dos o más sistemas de disipación de calor en una sola instalación, conectándolos en serie o en paralelo. En ese caso, se dará siempre preferencia al disipador que menos energía eléctrica consuma y será necesario un control de temperatura.

La potencia de disipación máxima por máquina es entre 20-30 kW y en cualquier caso, la temperatura de retorno a las unidades ClimateWell nunca deberá superar los 35 °C.

#### **4. APLICACIONES**

Podemos agrupar las distintas aplicaciones del frío solar en tres grandes grupos:



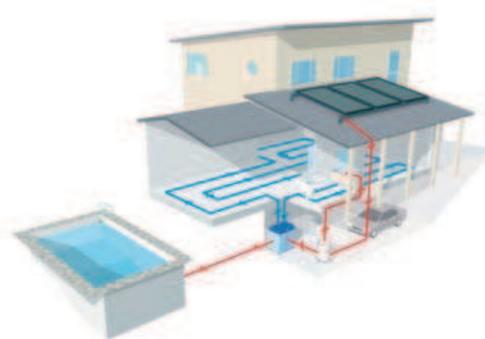
## Guía del Frío Solar

- Residencial: unifamiliares y bloques de viviendas.
- Sector Terciario: hoteles, hospitales, geriátricos, colegios, centros comerciales, etc.
- Recuperación de calor (de aplicación en procesos con excedente de calor).

### 4.1. Residencial

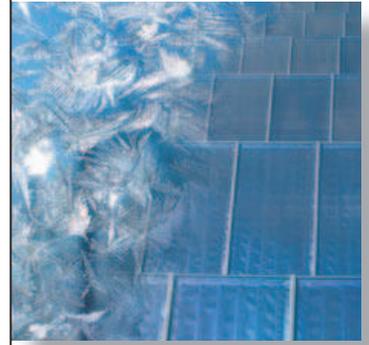
Los edificios residenciales pueden ser muy variados, desde viviendas unifamiliares hasta bloques de viviendas. Las características constructivas y de diseño generalmente están influidas por las condiciones climatológicas de la zona teniendo en cuenta el uso residencial que se le va a dar.

La climatización de este tipo de edificios requiere equipos generadores de frío y calor con consideraciones importantes sobre la elección del sistema de distribución más adecuado en cada caso.



**Figura 8.** Esquema general de una instalación de frío solar en vivienda unifamiliar.

La utilización de energía solar térmica debe ser considerada, como mínimo, para cubrir las necesidades de agua caliente sanitaria según lo indicado por el Código Técnico de la Edificación, en cada caso. Dada esta obligatoriedad de contar con este tipo de sistemas renovables, el usuario final se plantea la posibilidad de considerar sistemas más grandes para aprovechamiento en calefacción y ahora, con la combinación de una máquina de absorción, para producir frío. De esta manera se aprovecha la energía solar a lo largo de todo el año y aparte de los beneficios medioambientales, el usuario se «independi-



za» en gran medida de las subidas de las tarifas de energías convencionales.

Este tipo de instalaciones, aunque implican una inversión importante, suponen un ahorro considerable desde el primer momento de utilización lo que facilita que en pocos años se pueda amortizar la inversión.

El aprovechamiento de la energía de disipación hacia la piscina da la posibilidad al usuario de aprovechar durante más meses esta instalación de forma gratuita.

Es importante destacar que una instalación de Frío solar, con un control adecuado, permite conseguir las temperaturas de confort, según se observa en el gráfico de abajo donde se muestran las temperaturas exteriores, interiores y de la piscina del verano de 2007 en Madrid. Destacando que durante los meses de verano el sistema ha mantenido unas temperaturas dentro de la horquilla de confort, nunca sobrepasando los 25 °C, cuando la temperatura exterior llegaba a los 38 °C.

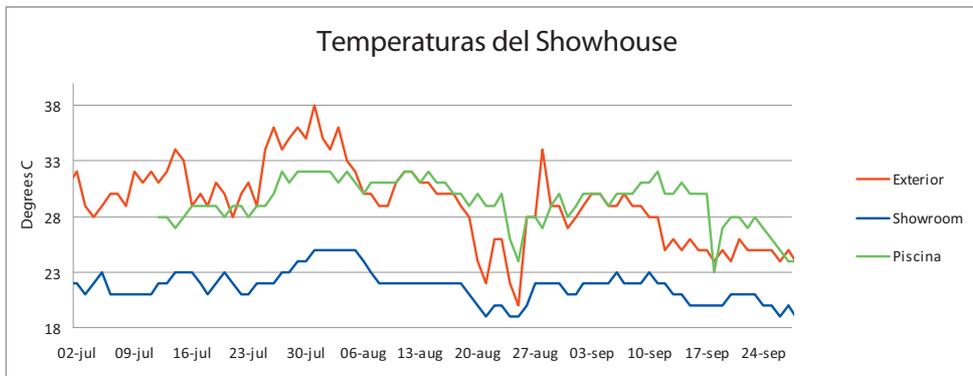


Figura 9. Gráfico de Temperaturas. Show House ClimateWell. Madrid. 2007.

#### 4.2. Sector Terciario

Las posibilidades de combinación de sistemas de climatización en el sector terciario son tantas como las posibilidades arquitectónicas y de diseño de los edificios. La tipología de edificios y su uso final determinará en gran medida el tipo de sistema de climatización a elegir. En este sentido, podemos encontrar edificios muy variados ya que existe un componente de diseño más marcado que en el uso residencial (tradicional) que en algunas ocasiones puede no ser el más adecua-



## Guía del Frío Solar

do para paliar las demandas energéticas por la ubicación, orientación del edificio o incluso los huecos de fachada y que deben ser reducidas mediante sistemas activos.

Como indicábamos, la actividad y horario de este tipo de edificios plantea en cada caso un estudio de ingeniería acorde a las pretensiones de satisfacción del confort de los usuarios. Llevándolo a un extremo, no es lo mismo pensar en un sistema de climatización para un gimnasio donde el tipo de cargas y la definición del horario requerirán de sistemas potentes y poco inerciales, que en un hotel donde la demanda es más estacional y el tipo de cargas puede ser más previsible.

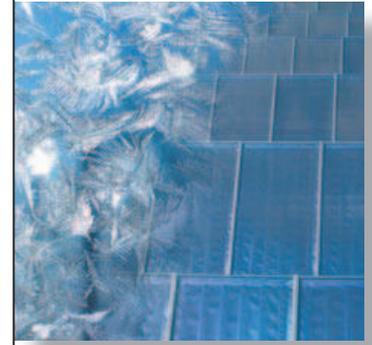
Es por tanto imprescindible en cada caso, que estos parámetros sean conocidos para definir claramente la demanda energética y por tanto los sistemas de climatización adecuados a instalar.

Aunque estos proyectos pueden ser más complicados, tanto en fase de proyecto como en su ejecución, abren un abanico de posibilidades a la integración de sistemas de aprovechamiento energético renovable con sistemas convencionales.

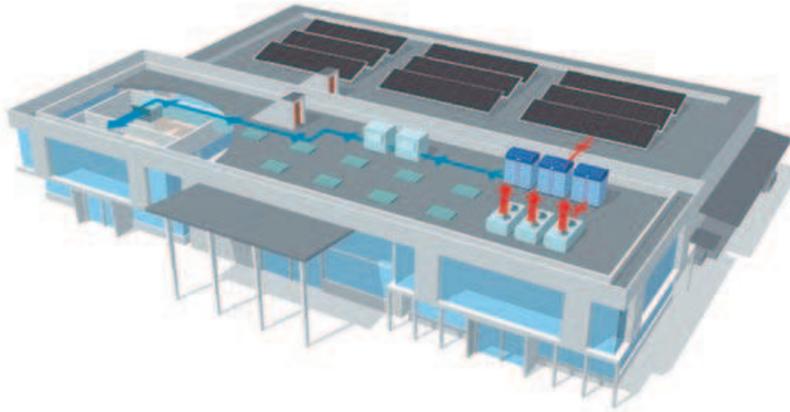
Una vez conocida la demanda, se debe plantear la utilización de los sistemas renovables en aquellas franjas de consumo donde el sistema esté trabajando de forma continua. Es decir, la demanda energética base, dejando trabajar los equipos convencionales para cubrir los picos de demanda. Esta combinación de energías renovables con sistemas convencionales de climatización permite por un lado, el máximo aprovechamiento de la energía renovable, reduciendo el consumo de energía convencional y por otro lado asegurar el confort de los usuarios.

El sector terciario abre nuevas posibilidades de aprovechamiento energético de los sistemas de frío solar. Por ejemplo, si el edificio requiere un volumen alto de ACS como puede ser un hotel o un hospital, se puede aprovechar la energía de disipación para precalentamiento de ACS, reduciendo por tanto el consumo de una caldera.

Cada vez más, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> será un indicador y limitador energético y deberá tenerse en cuenta en la fase de diseño de cada edificio. En las rehabilitaciones de edificios se debe valorar y pensar cómo se pueden integrar y controlar las energías renovables



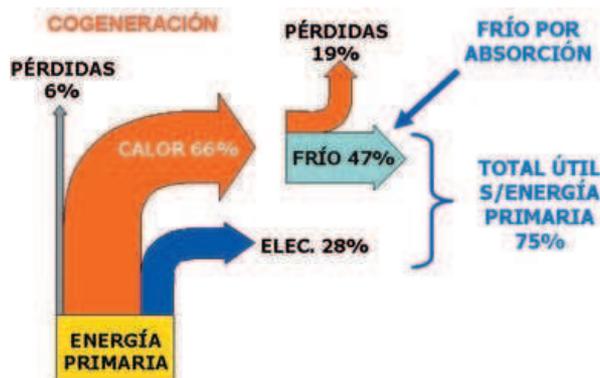
con los sistemas convencionales, ya que el potencial de ahorro es importante.



**Figura 10.** Esquema general de una instalación de frío solar en hospital.

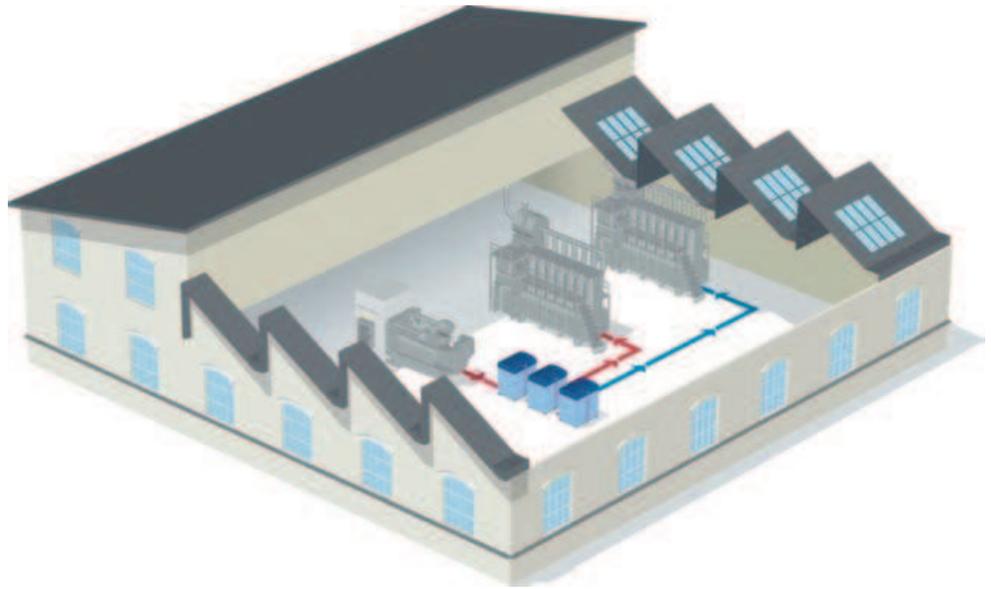
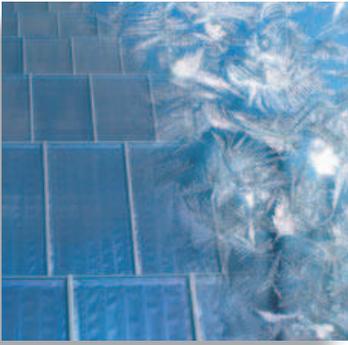
### 4.3. Recuperación de calor

El aprovechamiento del calor residual de un proceso industrial o de un motor de cogeneración implica la recuperación, mediante intercambiadores, de un flujo de calor para su posterior utilización o aplicación en otro proceso.



**Figura 11.** Energía en proceso de cogeneración.

Este tipo de instalaciones suelen ser incluso más rentables dado que no se debe invertir en un sistema de aporte energético, ya que éste ya existe. Limitándose esta parte del proyecto, a estudiar y valorar técnica y económicamente la recuperación y aprovechamiento de este foco de energía.



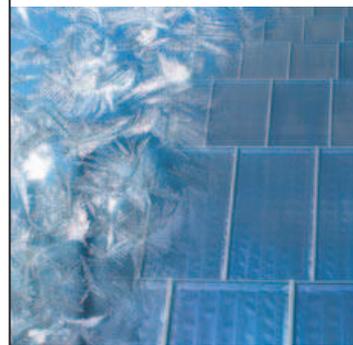
**Figura 12.** Esquema general de una instalación de frío mediante recuperación de calor residual.

#### 4.4. Resumen

Por tanto, las posibilidades de aplicación de la refrigeración solar con máquina de absorción son muy variadas; desde viviendas unifamiliares hasta oficinas, bloques de viviendas, hoteles, hospitales, centros comerciales, etc.

Si tenemos instalaciones grandes, estos sistemas son todavía más rentables. Las principales ventajas en aplicaciones industriales (y otras aplicaciones de tamaño y consumos grandes como redes de distrito) de refrigeración solar se pueden resumir en lo siguiente:

- Debido a consumos grandes de frío y, en algunos casos continuos durante todo el año, se pueden obtener tiempos de operación largos de los equipos de frío, obteniendo un mejor rendimiento del sistema.
- Los campos solares se pueden diseñar cerca del ideal de 100% de utilización, obteniéndose así ahorros energéticos máximos por unidad de superficie de colectores solares.
- El gran tamaño de los sistemas conlleva un coste de instalación unitario de aproximadamente 50% en comparación con sistemas



pequeños (sector doméstico, casas multifamiliares, pequeños hoteles,...).

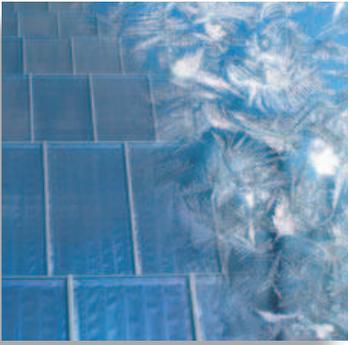
- El tamaño grande de las instalaciones hace más viables los sistemas de acumulación a periodos de tiempo más largos (menor relación superficie – volumen), lo cual permite amortiguar en mayor grado los desfases entre demanda y disponibilidad de la energía solar.
- En muchos casos hay disponibilidad de calor residual o calor de sistemas de cogeneración como fuente auxiliar, por lo cual las fracciones solares pueden ser más bajas que en el caso de utilización de una caldera de apoyo, y por lo tanto el nivel de utilización de la energía solar puede ser superior.

Por tanto los elementos clave a considerar como ahorro de energía primaria son:

- Utilización de una fracción solar alta, lo más ajustada posible a la demanda.
- Aprovechamiento y optimización de todos los focos energéticos del sistema y en particular de los tres circuitos conectados a la máquina de absorción (incluido el calor de disipación).
- Utilización de calor residual disponible, ya sea desde un proceso industrial o incluso desde un motor de cogeneración.

## 5. INSTALACIONES

A continuación se describen dos instalaciones tipo:



5.1. Unifamiliar

5.1.1. Esquema

Sistema solar recomendado por ClimateWell Unifamiliar 2 (Sur de España)

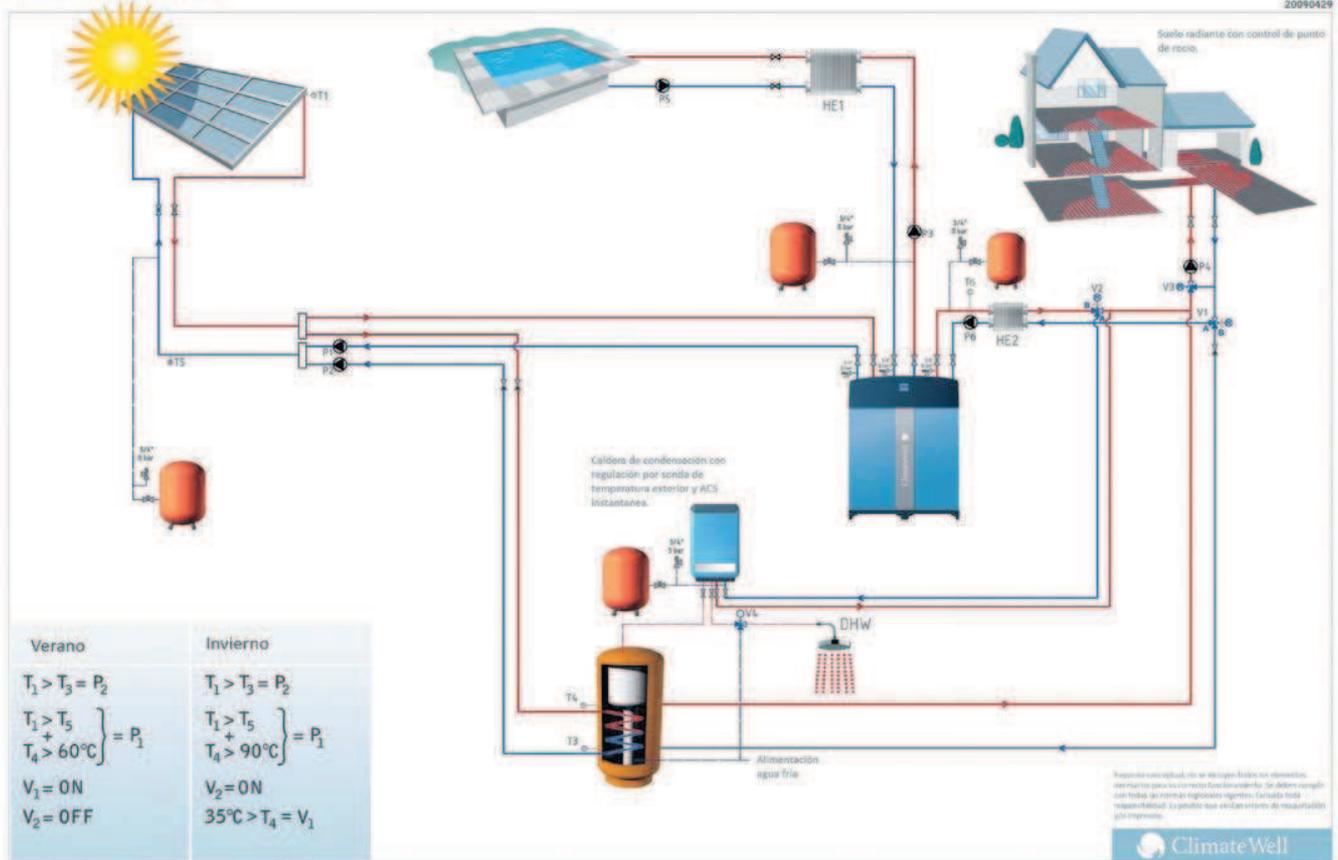
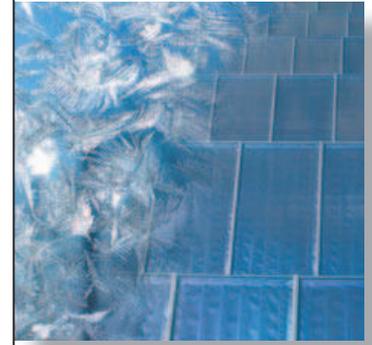


Figura 13. Esquema de principio de instalación de frío solar en unifamiliar.

5.1.2. Descripción

Sistema de climatización de frío solar ClimateWell mediante suelo radiante y piscina como disipación aumentando la temporada de baño del usuario final, pensado para zonas de inviernos suaves (sur de España) donde las demandas de calefacción se pueden casi cubrir con energía solar.

La calefacción y el ACS están garantizados mediante el depósito de inercia solar que incluye un depósito de ACS tipo «tank in tank», junto



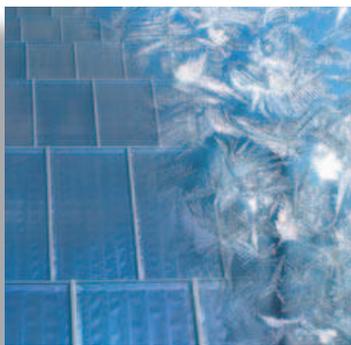
con la caldera de condensación de gas. La unidad ClimateWell, con este esquema, puede funcionar tanto en modo climatización (modo verano), como en modo calefacción (modo invierno), siempre que se den los requerimientos técnicos que así lo permitan, según las recomendaciones del fabricante.

Tanto en verano como en invierno la producción de ACS con energía solar tiene prioridad, diferenciándose, a través del control de la instalación los modos de funcionamiento para refrigeración (con máquina de absorción) o para calefacción aprovechando el sistema de producción y acumulación solar.

Para cubrir aquella demanda de ACS en la que la energía solar no es suficiente, se dispondrá de una caldera. El agua caliente sanitaria precalentada es almacenada en el tanque solar y pasa a través de la caldera aumentando su temperatura si es necesario. Si el tanque solar tiene suficiente temperatura la caldera no arrancará. La válvula termostática regulará la temperatura en la entrega.

En el caso de zonas con una demanda de calefacción mayor, el esquema debe incluir una caldera mixta para ACS y calefacción.

Los sistemas de distribución radiantes, (suelo o techo) deben disponer de un control del punto de rocío para evitar condensaciones, limitando la temperatura mínima de impulsión.



## 5.2. Hospital

### 5.2.1. Esquema

Sistema solar recomendado por ClimateWell Hospital

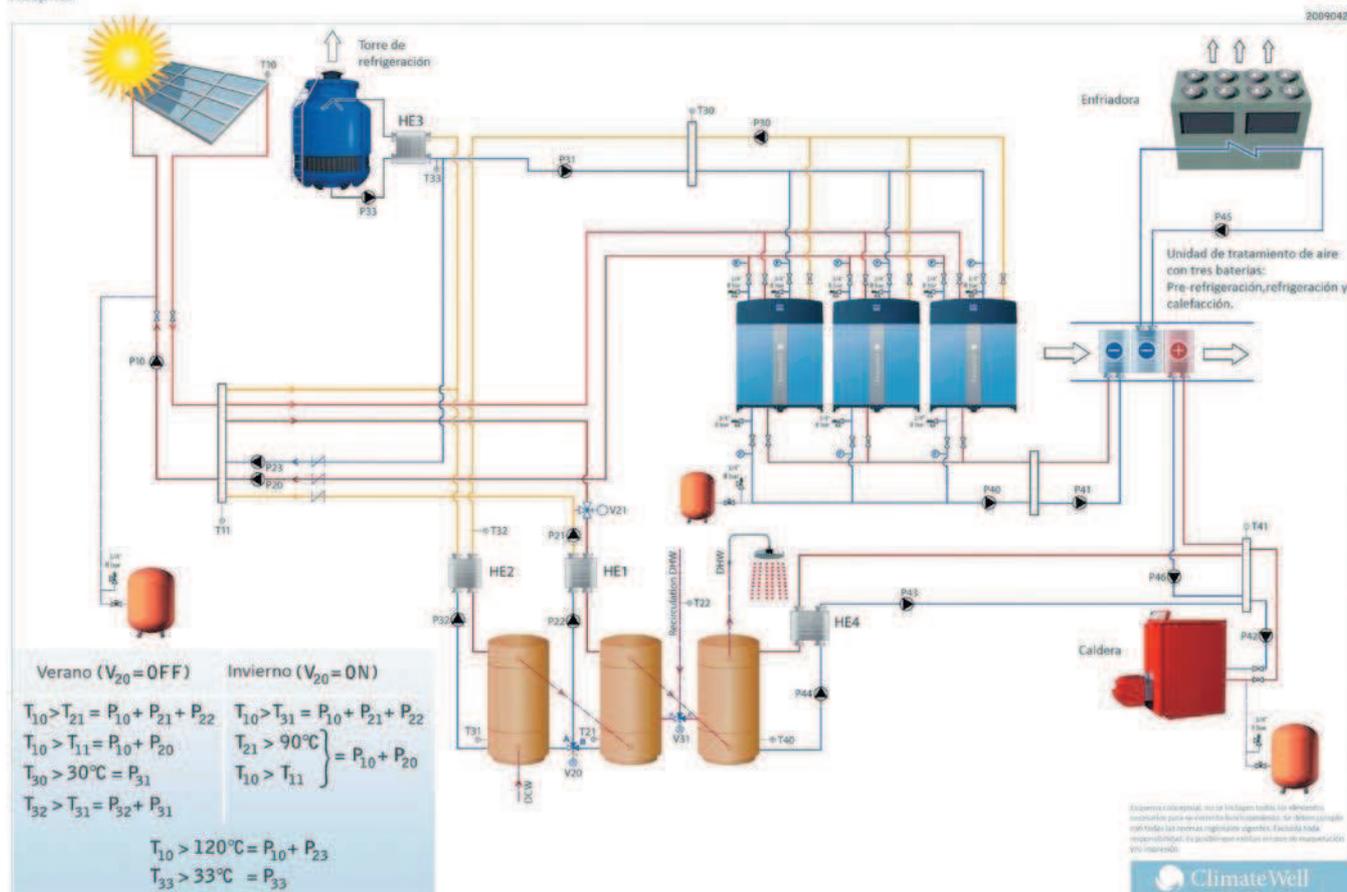
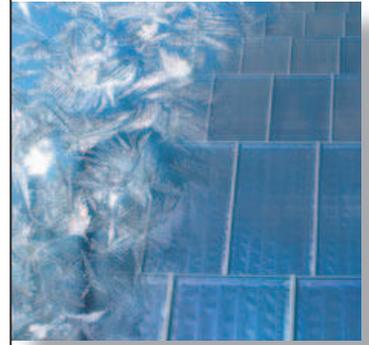


Figura 14. Esquema de principio de instalación de frío solar en hospital.

### 5.2.2. Descripción

Sistema de climatización de frío solar ClimateWell con precalentamiento del ACS y torre de refrigeración para grandes instalaciones con gran consumo de ACS. La producción del ACS se garantiza a través de un tanque de precalentamiento, un tanque de almacenamiento solar y un tanque de agua, todo ello ayudado por una caldera convencional. El frío necesario para la climatización es aportado por las unidades ClimateWell (demanda base) y por un sistema de refrigeración convencional conectados a la unidad



de tratamiento de aire (UTA). La caldera también se conecta a la unidad de tratamiento de aire para la entrega de calefacción en invierno.

La refrigeración convencional tiene su propio sistema de control independiente. En época estival no conviene que toda la energía que genera el campo de captación pase al depósito de agua caliente ya que tenemos que proporcionar simultáneamente calor a las máquinas de frío solar para así aportar frío al sistema y conseguir ahorros energéticos.

El control del sistema solar se puede realizar mediante control por temperaturas o bien por medio de una sonda de radiación correctamente ubicada.

En invierno buscaremos que la energía solar caliente directamente los depósitos, el de precalentamiento y el de ACS solar. De esta manera el aprovechamiento del campo de captación será máximo en invierno, ya que recordemos que está dimensionado para la cobertura de frío solar del verano.

Es importante considerar y dimensionar correctamente el foco de disipación, en este caso la torre de refrigeración, no solo para evacuar el calor del edificio sino también el exceso de temperatura de los paneles solares que podamos tener en un momento dado teniendo en cuenta que la máxima temperatura que admite la máquina de absorción es 110 °C.

Las unidades de absorción y la unidad de refrigeración convencional están conectadas a dos diferentes intercambiadores de calor de la unidad de tratamiento de aire.

La caldera está conectada también a la unidad de tratamiento de aire, entregando calor si fuese necesario.

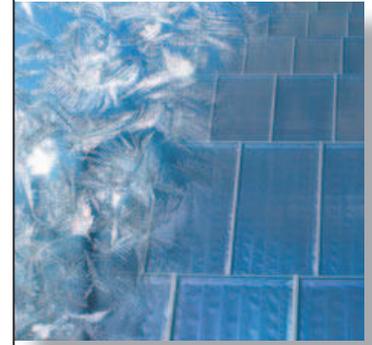
El ACS pasará a través de los tanques con tres diferentes niveles de temperatura. El primero es el del calor primario con evacuación de energía desde la máquina de absorción a una relativa baja temperatura, el segundo es el calentado directamente con energía solar a media temperatura y el último es el calentado con una caldera auxiliar. La regulación de la caldera se determinará según la temperatura interna del tanque acumulador.



## 6. EFICIENCIA ENERGETICA EN LA REFRIGERACION SOLAR

La eficiencia energética en los sistemas de frío solar implica lo siguiente:

- Dimensionar y ajustar el sistema teniendo en cuenta los flujos energéticos de acuerdo a la demanda del edificio en cada momento. Para lo que se recomienda la utilización de software de simulación dinámico. Esto permite detectar comportamientos de la instalación no adecuados (por ejemplo, temperaturas demasiado altas) y evaluar las coberturas energéticas y consumos.
- Simplificación del esquema de principio evitando tramos largos y mal aislados, así como, redundancias y aportes energéticos no aprovechables.
- Identificación clara de los equipos y sus características, considerando la mejor opción según las necesidades energéticas específicas del edificio (cargas sensibles, latentes, necesidades de humidificación o deshumidificación, tratamiento de aire, ventilación, etc.).
- Considerar sistemas convencionales de refrigeración o calefacción modulantes o con el mayor número de etapas, permitiendo la integración con los sistemas de energías renovables, de esta manera se ajustará el consumo a las necesidades reales.
- Optimizar las transferencias térmicas teniendo en cuenta el correcto dimensionado y el rendimiento de cada intercambiador y valorando el coste de inversión en referencia a la energía aprovechada, para evitar encarecer la instalación de forma injustificada.
- Optar por componentes eficientes energéticamente con rendimientos altos y con posibilidad de integración en el control general de la instalación. (Ej., bombas con variador de frecuencia).
- Reducción del consumo eléctrico mediante la optimización e integración de los componentes al control general de la instalación (bombas, válvulas motorizadas, etc.).
- Desarrollar, según las características de la instalación, un sistema de control lo mas centralizado posible, lo que implica utilización de sistemas «afines» de climatización.



- Es importante dejarse aconsejar por empresas especializadas en eficiencia energética para servicios de ingeniería y auditoría.

## 7. BIBLIOGRAFIA

DR. HANS MARTIN HENNING (2004): *Solar Assisted Air-Conditioning in Buildings. A Handbook for Planners*. Springer-Verlag Wien New York. Freiburg, Germany.

DANIEL GARCÍA ALMIÑANA (2007): *Instalaciones de Refrigeración y Aire Acondicionado*. Editorial UOC. Barcelona, España.

IGNACIO ZABALZA y ALFONSO ARANDA (2009): *Energía Solar Térmica*. Prensa Universitaria de Zaragoza, Zaragoza, España.

ÁNGEL L. MIRANDA (2008): *Técnicas de Climatización*. Editorial Marcombo, Barcelona, España.

DR. FÉLIX A. PEUSER, KARL-HEINZ REMMERS y MARTÍN SCHANAUSS (2004): *Sistemas Solares Térmicos. Diseño e Instalación*. Solarpraxis AG, Berlín, Alemania.

REAL DECRETO 1027/2007 (2007): *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*. RITE. Paraninfo. Madrid, España.

REAL DECRETO 47/2007 (2007): *Certificación Energética de Edificios de Nueva Construcción*. España.

REAL DECRETO 314/2006 (2006): *Código Técnico de la Edificación*. España.

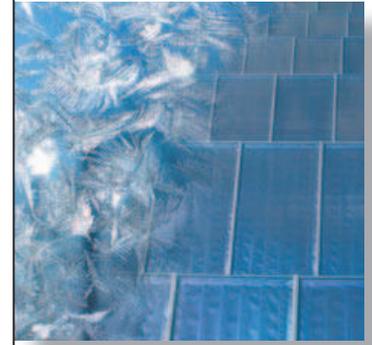
NORMA UNE-EN-ISO 7730: *Ambientes Térmicos Moderados*.

Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002, relativa a la *Eficiencia Energética de los edificios*.

Fundamentos de climatización, ATECYR.

Guía de Diseño para la Refrigeración Solar, ClimateWell.





# 4 ACOPLAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR EN LOS SISTEMAS DE FRÍO SOLAR

## 1. INTRODUCCIÓN

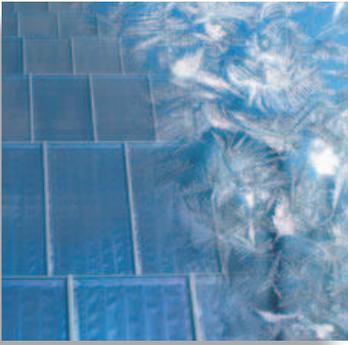
Una instalación de frío solar, en general, se integra en un sistema más complejo de climatización en la que intervienen diferentes equipos y demandas, produciéndose flujos de calor entre las diferentes partes del mismo. El balance de todo este intercambio de calor debe optimizarse bajo el principio de eficiencia energética y la minimización de los costes del servicio; e incluyendo los beneficios del uso de energías renovables<sup>1</sup>.

La base del diseño de sistemas complejos de climatización, en el que participan equipos con diferentes eficiencias, cargas y costes de la unidad energética utilizada, se traduce en buscar la combinación óptima de costes variables, por un lado: cantidad y tipo de energía consumida en cada momento; precios de las diferentes tipos de energía utilizados, que pueden o no depender del tramo horario de consumo (electricidad y gas); del rendimiento de los equipos en cada momento; y de la consideración de estrategias de gestión como la de almacenamiento; y, por otro, la consideración de nuevas variables: costes fijos, de mantenimiento, necesidades de espacios, etc. También intervienen consideraciones sobre riesgos de suministro de servicio, disponibilidad de equipos, etc. Por ello, el diseño de estos sistemas es complejo y se tratará, además, en otras partes del documento.

En relación a los esquemas técnicos de instalaciones de frío solar, el más simple se compone de los siguientes elementos: campo solar de

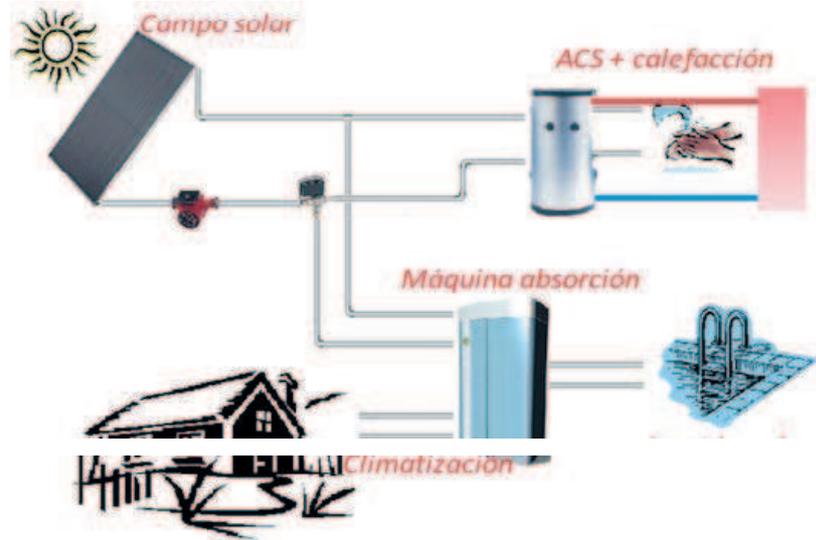
---

<sup>1</sup> RD 314/2006 del Código Técnico de la Edificación; y sus documentos básicos de ahorro de energía HE 1-5; así como el RD 314/2006 sobre procedimientos de certificación de edificios y otros como LEED, DELS, etc., son elementos importantes para marcar una senda rápida que debe recorrerse en esta materia si quiere alcanzarse el horizonte 2020.



## Guía del Frío Solar

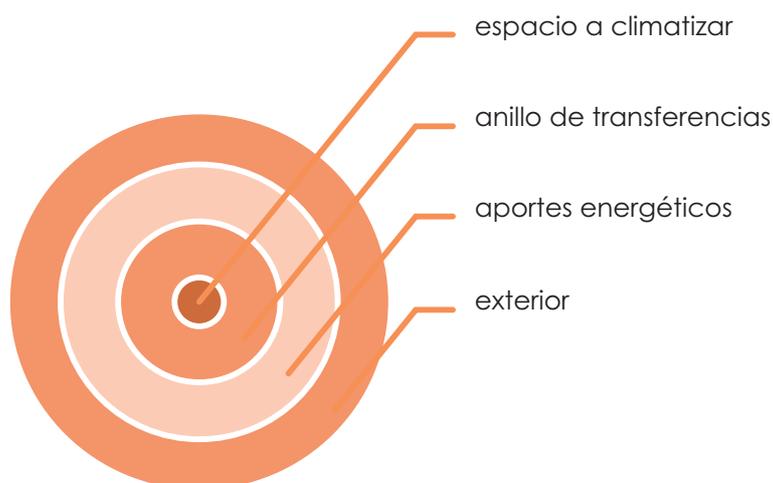
captadores térmicos con su almacenamiento, u otro sistema de aporte de calor; máquina de absorción que genera un fluido a menor temperatura que la del ambiente y extrae calor del habitáculo a climatizar; y, drenaje del calor extraído a un sumidero de calor.



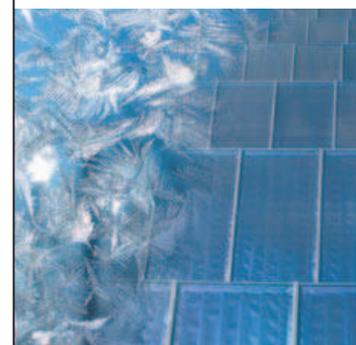
**Figura 1.** Esquema básico de una instalación de frío solar sencilla.

Un esquema más complejo puede incluir: aporte térmico con energía solar, biomasa o geotermia; un anillo para transferencias de calor con bombas geotérmicas, intercambiadores, máquinas de absorción y sondas geotérmicas; unos sumideros de calor geotérmicos, o de refrescamiento radiativo, piscina de evacuación o torres de refrigeración; y todo ello apoyado por grandes inercias estructurales tales como suelo radiante y acompañado con sistemas bioclimáticos de reducción de la demanda. Este esquema sería el de un gran proyecto de climatización de distrito. El sistema debe funcionar con permeabilidad bidireccional, pues se trata de aportar calor o frío al espacio a climatizar y esa energía debe ser inyectada o extraída por medio de equipos activos y pasivos. En el gráfico adjunto se esquematiza esta idea de anillos de calor, frío e incluso electricidad en una microred de energía inteligente<sup>2</sup>.

2 Directiva 2010/31/UE, de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética en los edificios, de gran repercusión en el medio plazo pues señala que en 2020 todos los edificios deben de disponer de sistemas energéticos suficientes para lograr un balance casi cero. En esta dirección se recomienda la lectura de: Rajkovich, N et al. Zero net energy myths and modes of thought. EO-LBNL. September 2010.



**Figura 2.** Esquema de microred energética.

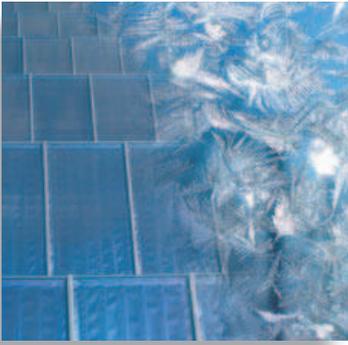


De esa forma, en un análisis general los sistemas de frío solar deben integrarse plenamente en esquemas y estrategia más generales de diseño y control, contemplando entre otros los siguientes aspectos:

- a) **Estrategias pasivas** que tratan de disminuir la demanda energética logrando reducir las necesidades de climatización y en invierno las necesidades de calefacción. A ella debe sumarse la búsqueda de inercias para aplanar la curva de demanda muy ligada a los ciclos diarios e incluso estacionales<sup>3</sup>.
- b) Sistemas **solares** de captadores planos que aprovechan la energía solar en forma térmica utilizando equipos de alta eficiencia (Unisol, Soliker o similares<sup>4</sup>) que inyectan la energía al sistema de almacenamiento al objeto de estabilizar el aporte de calor.
- c) Utilización de **biomasa** como equipo más convencional y regulable pues disponen de un sistema de almacenamiento de pellets, alimentados por tornillo flexible desde el camión cisterna; desde cuyo silo alimenta a la caldera por medio de un sinfín regulable que ajusta la potencia a las necesidades solicitadas desde el sistema de control según las necesidades de calefacción y como bomba térmica de la máquina de absorción indirectamente.

3 Ver [www.arfrisol.es](http://www.arfrisol.es), página que recoge muchos ejemplos de aplicación de técnicas de arquitectura solar y en especial el frío solar.

4 Avellaner, J. La tecnología TIM: Captadores planos para altas temperaturas. I Congreso Técnico de Energía Solar Térmica en Castilla y León. León, 2009.



## Guía del Frío Solar

- d) Sistemas de **geotermia** compuestos por sondas que intercambian calor con el terreno impulsados por bombas geotérmicas o directamente desde los intercambiadores de calor; y funcionamiento bidireccional.
- e) Equipos de **absorción** que recibe de un anillo de calor solar, de biomasa o a través y bombea calor desde el habitáculo hacia el sumidero de calor.
- f) El uso de **refrescamiento** nocturno activado con sistemas radio-convectivos<sup>5</sup>, como técnica moderna que permite reducir fuertemente las demandas en verano con unos consumos reducidos.
- g) El gobierno de todos estos sistemas funcionando coordinadamente es complejo y requiere estrategias especiales que permitan, además de una regulación y control de la demanda, actuaciones predictivas sobre la evolución de la demanda y de oferta de energía.

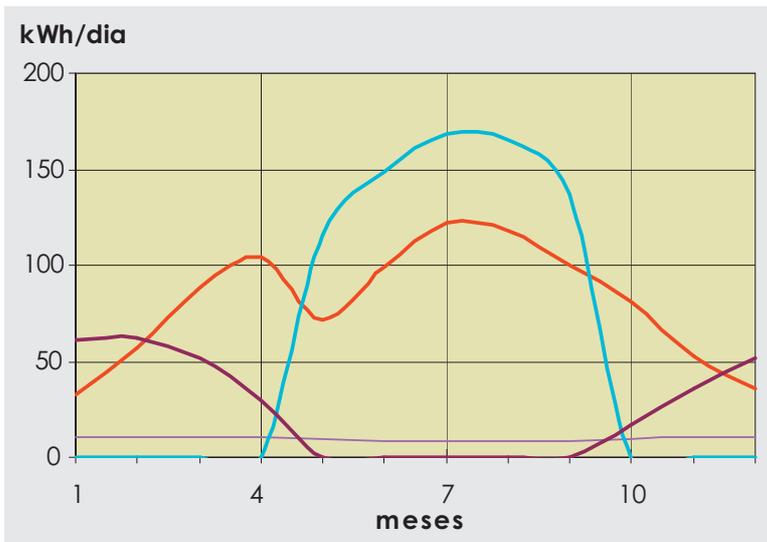
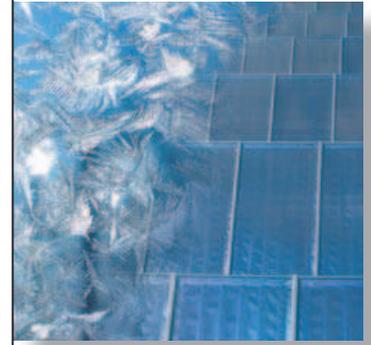
En resumen el frío solar, al depender de una fuente variable debe disponer de estrategias de apoyo alternativas, bien renovables como en el caso que aquí se propone con biomasa o bombas de calor geotérmico que combina la parte renovable con un apoyo eléctrico de origen fotovoltaico; bien con sistemas convencionales pero sin olvidar los sistemas de consumo energético cero.

Por último, se destaca el importante efecto de complementariedad que tienen los sistemas: primero, la simultaneidad de la demanda de frío (ver gráfico adjunto: trazo azul) y el aporte solar (trazo rojo); segundo la complementariedad de calefacción (trazo marrón) y frío a lo largo del año, proporcionando una importante componente de viabilidad económica a este tipo de instalaciones al poder alcanzar con los sistemas solares más de 1.500 horas de servicio, aproximadamente 50% para cada necesidad<sup>6</sup>.

---

5 Abalos, I. Avellaner, J. Paneles radio-convectivos para su utilización en aplicaciones bioclimáticas. II Congreso Solar Térmico en Castilla y León. EREN. León, 2010.

6 Se señala que en el proyecto 3 ENCULT, dentro del VII Programa Marco, y que trata de la rehabilitación de edificios del patrimonio cultural con medidas de eficiencia energética e implantación de energías renovables, se tiene como base de diseño los temas de conservación. En él intervienen 22 participantes y Soliker contribuye con su experiencia en integración arquitectónica solar.

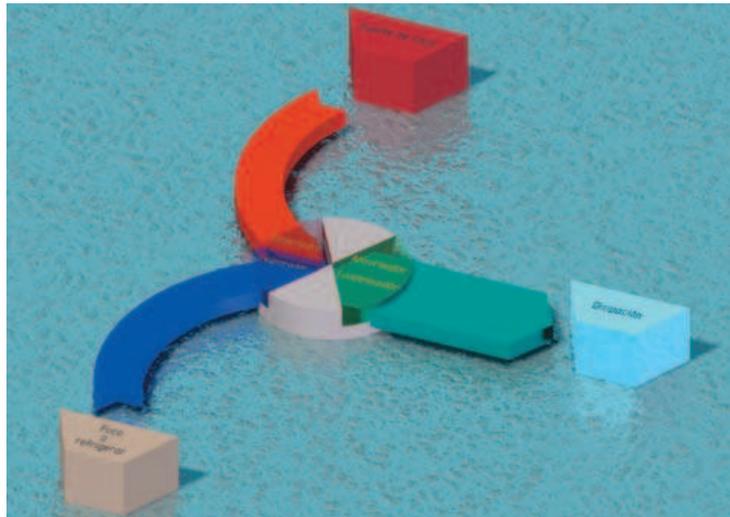
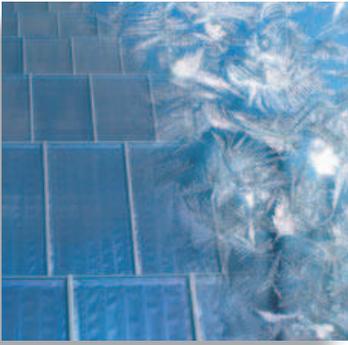


**Gráfica 1.** Producción de frío solar (azul), calefacción (violeta) y radiación solar incidente (rojo); 20 captadores TIM-UNISOL.

Tras esta consideración general del nivel de complejidad que puede alcanzarse con estos sistemas, se describe a continuación: la máquina de absorción, los circuitos de aporte de calor, de distribución de frío y de disipación de los calores inyectados y bombeados.

## 2. LA MÁQUINA DE ABSORCIÓN COMO INTERCAMBIADOR DE CALOR

Las máquinas de absorción utilizadas para la producción de frío y alimentadas con energía solar se componen de tres focos térmicos: el foco **solar** se inyecta en el generador o bomba térmica, que vaporiza el refrigerante de su mezcla con el absorbente; el vapor se condensa por extracción de calor hacia el foco **disipador**; el refrigerante pasa al evaporador donde se vuelve a vaporizar a muy baja presión y temperatura por inyección de calor del **foco a refrigerar** donde es atrapado por el absorbente con inicio del ciclo. Es decir hay dos inyecciones de calor: a alta temperatura, la solar, y a baja temperatura del líquido a refrigerar; y una sola extracción de calor suma de las dos.



**Figura 3.** Esquema del arrastre de calor del foco a refrigerar por el bombeo solar.

De esta forma, el calor que se extrae del foco a refrigerar en el evaporador, se lleva al foco disipador o condensador, circulando el calor a contracorriente, para lo cual es necesario aportar trabajo desde el foco solar, calor que fluye de forma natural y que permite arrastrar al anterior.

A la vista de la complejidad de la circuitería interior, de los estrechos rangos de funcionamiento para lograr equilibrar cargas de ciclo de condensación y de evaporación, el buen funcionamiento de la máquina depende del correcto dimensionamiento en potencias y mantenimiento de temperaturas de trabajo en unos márgenes estrechos; esto implica un dimensionamiento preciso y una regulación estricta.

Como se ha señalado anteriormente el diseño de una instalación de frío solar está ligado al resto de equipos con los que va a trabajar, especialmente los convencionales que le ayudarán en caso de necesidad por falta de oferta solar e identificar el elemento más restrictivo de la instalación y no a partir de la máxima demanda, pues seguramente no sea el punto óptimo. Así, se propone llevar un análisis de aproximaciones como el que se propone en el diagrama de dimensionado adjunto en el que intervienen, principalmente: las demandas de frío a lo largo del tiempo; las capacidades disponibles de energía para hacer funcionar la máquina: captadores solares, biomasa, energía residual de otro sistema, geotermia, etc.; y las capacidades de disipación a través de torre de refrigeración, piscina, o disipación geotérmica.

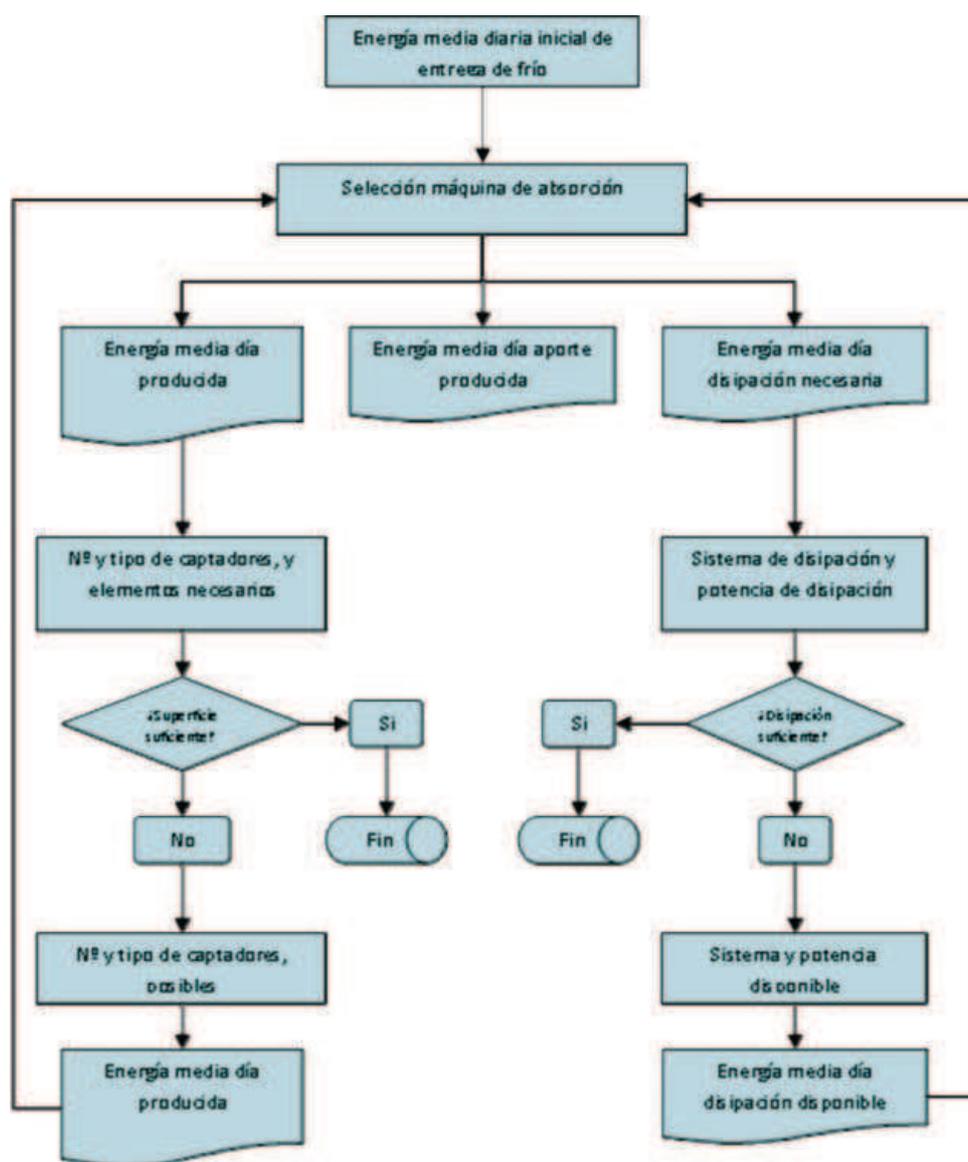
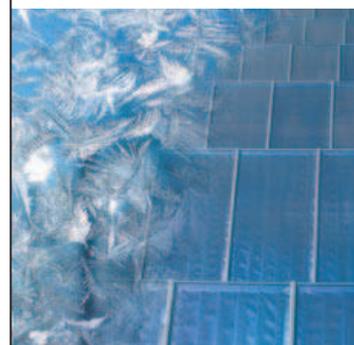
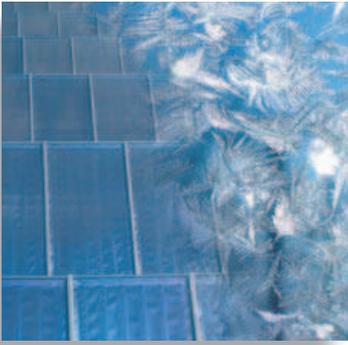


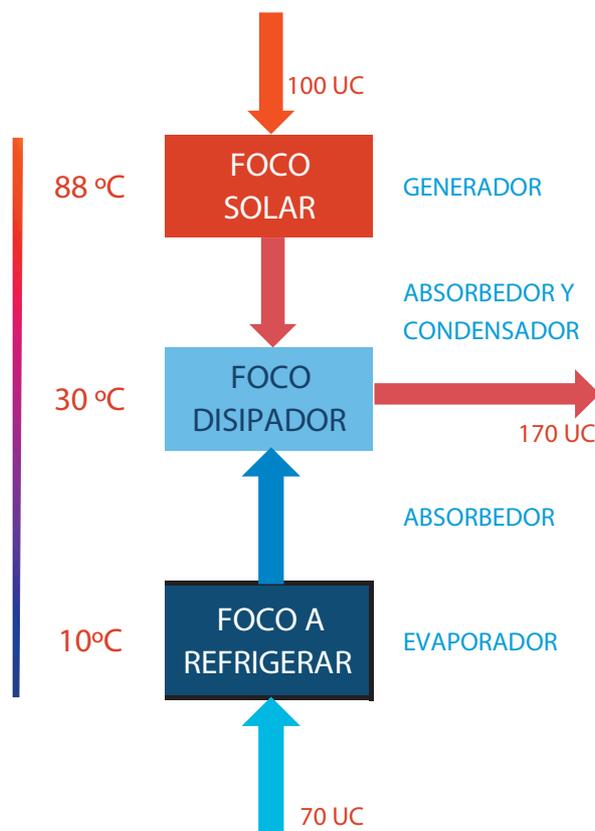
Figura 4. Flujograma de cálculo de un sistema de frío solar.

Paralelamente a estas cuestiones técnicas deben tenerse en cuenta, en todo momento, los costes de equipos e instalación necesarios. Así por ejemplo si se puede disipar en una piscina ya realizada, el costo del sistema de disipación, sería mínimo, aunque el tamaño de la piscina va a limitar el tamaño de máquina. Por otro lado si se propone una torre de refrigeración hay que asumir además de los costes de los equipos el mantenimiento especial que requiere.



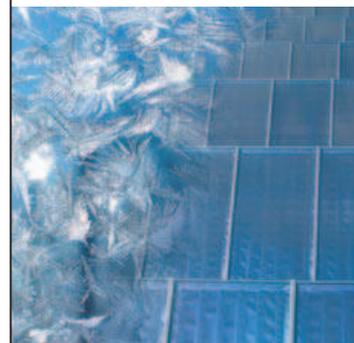
### 3. CIRCUITO DE APOORTE DE CALOR

Las máquinas de absorción, como se ha señalado, funcionan por el flujo de calor que circula desde un foco caliente al foco de disipación; estos niveles de temperatura dependen fundamentalmente de la pareja absorbente-refrigerante y tecnología de simple o doble efecto, utilizada por la máquina. Las temperaturas y balances típicos se muestran en los diagramas adjuntos en los que se relacionan con las partes internas de la máquina.



**Figura 5.** Diagrama de flujos de calor entre focos y partes de equipos, temperaturas y balance típico.

El foco de calor pueden ser captadores solares térmicos de alta eficiencia para funcionar con máquinas de adsorción, o máquinas de absorción de simple efecto. Además de esto se puede utilizar cualquier calor residual que tenga el nivel térmico y la cantidad de calor diaria necesaria para satisfacer la máquina de absorción seleccionada. También se puede alimentar con cualquier fuente de calor convencional como calderas alimentadas por cualquier tipo de combustible.



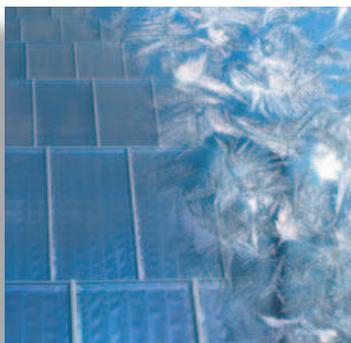
El calor se envía a la máquina por medio de un fluido caloportador, normalmente agua o glicolada cuando los circuitos corran peligro de congelación, debe llegar en condiciones de temperatura, presión y caudal determinado por lo que el dimensionado de tuberías, bombas, etc., deben ser el adecuado. En algunos casos, se introducen intercambiadores de calor entre la fuente de calor y la máquina de absorción, que permite separar circuitos mejorando el mantenimiento y el establecimiento de caudales distintos en los circuitos de máquina y aporte; en cuyo caso debe trabajarse con un diferencial de alrededor de 10 °C respecto a la conexión directa, con la consiguiente pérdida de eficiencia y en el caso de los captadores solares implica una bajada en el rendimiento térmico de captación.

- **Campo de captadores solares**

Los captadores solares térmicos constituyen una forma de suministrar la energía necesaria a la máquina de absorción para que pueda bombear el calor desde el foco frío al foco caliente, esto es internamente desde el evaporador al condensador. Sin embargo para poder aportar este trabajo es necesario alcanzar temperaturas por encima de un umbral. Las temperaturas necesarias para trabajar en las máquinas de simple efecto, oscilan en el margen entre 75 y 90 °C, por lo que se deben seleccionar el tipo de captadores y dimensionar el campo para trabajar con saltos térmicos entre 78-88 °C, para lo cual el caudal y punto de consigna deben seleccionarse adecuadamente.

Para lograr esas especificaciones, el captador utilizado debe de tener un buen rendimiento en esos rangos de temperatura y, por ello, se han seleccionado captadores de tubo de vacío, aunque se ha demostrado que en nuestras latitudes los captadores planos de alta eficiencia puede conseguirse estas temperaturas logrando sistemas más eficientes, robustos y económicos.

Este tipo de fuente energética tiene la gran ventaja, que la producción de los captadores, se acopla, normalmente, bien a la demanda de frío: cuando hay sol, hace calor, y se precisa de refrigeración; además que a más radiación mayor producción para una mayor demanda de frío. Sin embargo, dependiendo de la tecnología utilizada, hay que diseñar una acumulación importante con depósito de inercia para estabilizar la entrega de energía a la máquina de absorción, pues el óptimo funcionamiento, como se ha señalado, se logra con



## Guía del Frío Solar

regímenes lo más uniformes posibles, sin transitorios; pues, el funcionamiento discontinuo hace que se pierda gran cantidad de energía en la llegada al punto de consigna de todos los equipos internos.

- **Caldera de biomasa**

Las calderas de biomasa, funcionan como cualquier otra caldera, con la particularidad, que el arranque y parada, no son inmediatos y requieren ciertas rampas de calentamiento; por ello, se recomienda trabajar con depósitos de inercia, además que amortiguar transitorios es siempre bueno para todo tipo de equipos térmicos. Las calderas de biomasa se pueden colocar en serie con los captadores solares térmicos, de forma que completen el calentamiento que producen los primeros en caso de baja radiación y conseguir con ello una producción de frío más uniforme. Estas dos fuentes renovables, solar y biomasa, se complementan muy bien para aportar estacionalmente energía a los edificios en forma de frío o calefacción.

- **Sistema con calor residual**

Cuando se dispone de calores residuales de otros procesos, refrigeración de máquinas, o de sistemas de cogeneración se adapta bien a una producción simultánea de recuperación de calor o producción de frío (trigeneración). En estos casos, la temperatura de trabajo de estos calores residuales puede hacer funcionar las máquinas tanto las de simple como las de doble efecto y en este último lograr un mejor COP de la máquina.

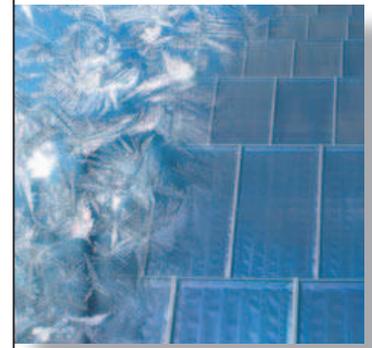
- **Geotermia**

Con recursos geotérmicos de media entalpía, por encima de los 90 °C, se puede utilizar para este tipo de aplicaciones de frío con unos niveles de eficiencia muy alto aportando además niveles de estabilidad muy altos. También se puede utilizar bombas de calor geotérmicas para conectarlas en serie con las máquinas de absorción y lograr un bombeo escalonado de calor hasta el nivel térmico requerido, en caso de que se disponga de fuentes de menor entalpía que la señalada.

- **Sistemas híbridos**

La combinación de estas u otras fuentes de calor integrando sistemas híbridos es interesante, pero para lograr ciertos niveles de

eficiencia, requieren sistemas de gestión soportados por estrategias potentes, que tengan en cuenta especialmente los transitorios de los sistemas que es donde realmente se pierden cantidades de energía importantes.



#### 4. CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN DE FRÍO

El circuito de aporte de frío, es una característica del edificio y según el tamaño de la instalación, se pueden presentar los siguientes sistemas: enfriamiento del suelo, (suelo refrescante); utilización de fan-coils, distribuidos por el edificio; aportando el frío a una UTA que lo inyecta al edificio; en pequeñas instalaciones, tales como viviendas unifamiliares, pequeños edificios de oficinas, pueden presentarse tanto suelos radiantes como sistemas con fan-coil. Las características más destacables de cada uno de ellos son las siguientes:

- **Suelo Radiante**

Es un sistema muy inercial, ya que es necesario enfriar toda la masa del suelo radiante para alcanzar la temperatura de consigna a temperatura de refrigeración aunque valorando precisamente esta ventaja de la inercia para estabilidad y regulación de los sistemas. Con este método no se tiene una sensación de exceso de frío o zonas con fuertes gradientes de temperatura; más bien es un refrescamiento general del ambiente pues la extracción de calor se hace de forma extensa y sin puntos fríos. Por ello, a la hora de dimensionar la instalación, no son necesarios grandes depósitos de acumulación de frío, pues el suelo radiante puede realizar parte de ésta función, salvo que se quieran modificar mucho el horario de entrega de frío. Así, el sistema de control debe anticiparse a refrigerar antes de que se produzca la necesidad y cortar el suministro con anticipación, igualmente. Debe tenerse la precaución de no llevar al suelo a temperaturas inferiores al punto de rocío, pues aparecerán condensaciones en la superficie del suelo; para ello, hay que vigilar la pareja temperatura-humedad relativa que define ese punto de rocío.

- **Fan-Coils**

Con este tipo de instalación de menor coste y complejidad que la anterior y muy adecuada en instalaciones de rehabilitación. Se tra-



## Guía del Frío Solar

ta de enfriar directamente el aire del espacio a refrigerar, y la sensación de frío es mucho mayor que da del suelo radiante. También su respuesta es mucho más rápida al ser un sistema prácticamente sin inercia; sin embargo, esto nos obliga a disponer de sistemas de acumulación del frío y mucha mayor potencia en los sistemas. La desventaja que presenta éste sistema de distribución para trabajar con sistemas de frío solar, es que al tener un intercambio de calor entre el fluido caloportador y el aire, es necesario un salto térmico superior, lo que obliga a trabajar con temperaturas de fluido bastante bajas, y esto hace bajar la potencia efectiva de las máquinas de frío solar ya sean adsorción o absorción y por ello el COP.

- **Apoyo de los sistemas de frío solar a las grandes instalaciones de frío**

En los grandes edificios o en sistemas industriales, el frío se produce en una gran enfriadora de compresión (aunque también hay grandes máquinas de absorción como en la T4 con trigeneración y máquinas de 1,5 millones de frigorías), y normalmente se utiliza agua como fluido caloportador, trabajando con temperaturas de impulsión de 7-12 °C, y retornos a 15-20 °C. Sobre estos circuitos de retorno del agua hacia la gran enfriadora, todo o parte del caudal puede derivarse hacia la instalación de frío solar y lograr disminuir o incluso evitar que el compresor arranque, logrando un ahorro directo importante por sustitución del consumo convencional por el solar.

De esta forma, es interesante diseñar ambos sistemas de forma coordinada para hacer compatible el funcionamiento de los sistemas base y los de frío solar; además de permitir dimensionar las potencias y los depósitos tampón de acuerdo a esa complementariedad, reduciendo la potencia instalada de forma drástica. De igual forma este tipo de integración requiere sistemas de control en el que la histéresis (diferencia entre la curva de control de subida y la de bajada) permita disminuir la marcha y paro excesivo.

- **Apoyo en las Unidades de Tratamiento de Aire (UTAs)**

Este tipo de unidades se montan en instalaciones medianas, o grandes de climatización, con el fin de tratar el aire, que se usará para climatizar las distintas zonas de los edificios controlando la temperatura, humedad y la renovación. El tratamiento se hace en distin-

tas baterías de calor y frío, que permiten variando las propiedades psicométricas del aire conseguir llevarle al punto de confort deseado. De esta forma, el frío producido con equipos de absorción solar pueden inyectarse directamente una de éstas baterías; o bien situándolos en serie con los sistemas convencionales a la salida de éstas baterías.

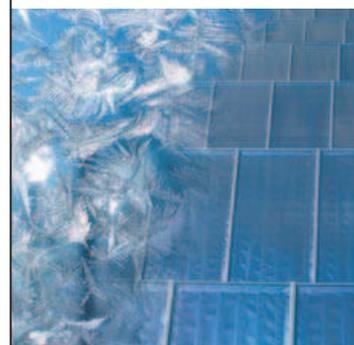
Un caso particular es la climatización en zonas tropicales con humedad relativa muy alta y no se trata tanto de ajustar la temperatura seca sino la temperatura de bulbo húmedo, para lo cual es necesario retirar grandes cantidades de agua. Esto se realiza en baterías de frío, en las que se enfría el aire por debajo de la temperatura de rocío que es bastante alta, por lo que las máquinas de absorción se adaptan bien para éstas aplicaciones logrando COP más altos.

En conclusión, cada sistema de distribución del frío se adaptará a las circunstancias del edificio: uso, tipología, zona climática, etc., de forma que el prescriptor tenga en cuenta todas las variables en juego y elija el tipo de integración más adecuado de los equipos solares. Igualmente, el punto de diseño se intentará fijar a la mayor temperatura posible y dimensionar los equipos de forma óptima en potencia, caudales de circulación, intercambiadores, almacenamiento, control, y estrategia de funcionamiento. Como regla general, en cualquier aplicación solar y más en frío solar, se obtendrá el mejor rendimiento de la instalación situando la misma por debajo de la demanda máxima (~75%), pues con ello se asegura la entrega de toda la producción de energía solar.

## 5. CIRCUITOS DE DISIPACIÓN DEL CALOR

El circuito de disipación del calor de la bomba solar y de la carga térmica del edificio (condensador), no es un circuito auxiliar de segunda importancia; pues un incorrecto dimensionado inducirá una bajada substancial del rendimiento de la máquina, e incluso puede llegar a colapsar todo el sistema por un proceso de realimentación positiva.

La condición de funcionamiento de éste circuito/foco, es el de conseguir disipar la energía procedente del edificio (condensador), además de disipar la energía del motor del ciclo de absorción (Absorbedor). Para que estos flujos de calor se realicen, se debe mantener el foco de disipación por debajo de





## Guía del Frío Solar

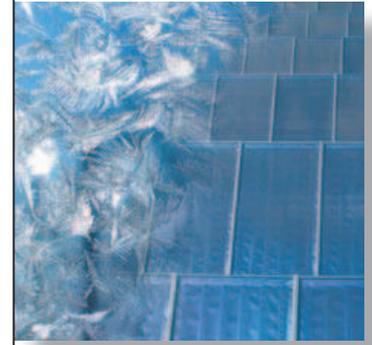
una temperatura, que vendrá dado por el par refrigerante-absorbente, así como de la temperatura necesaria en el foco caliente (Generador). Ésta temperatura en el caso de frío solar, máquinas de simple efecto suele funcionar en torno a los 30 °C. Así el objetivo de este foco, es disipar esos dos flujos de energía. Se define una potencia de disipación, que vendrá dada por un caudal y un salto térmico, y además el foco tiene que tener la capacidad de absorber ésta potencia sin elevar su temperatura por encima de ésta temperatura máxima de funcionamiento.

Los sistemas de disipación que se suelen utilizar, son: las torres de refrigeración, disipación en el terreno «geotérmica», piscinas abiertas o estanques.

- **Torres de disipación**

Es el sistema más sencillo de dimensionar y acoplar a las máquinas de absorción, salvo en climas con humedades relativas muy altas. Se trata de aprovechar el gran salto entálpico de evaporación del agua para enfriar el agua no evaporada. Se dan básicamente dos tipos de torres de refrigeración: abiertas y cerradas. En las torres abiertas el agua a enfriar se rocía en contracorriente con aire ambiente, en tiro natural o forzado, enfriándose el agua que desciende al utilizar parte del calor en evaporar el propio agua que es arrastrada con el aire al exterior. Las torres cerradas, tienen dos circuitos: uno exterior que funciona como la torre abierta, y otro interior por el que circula el fluido caloportador en el interior de una batería de transmisión de calor que permite transferir el calor para la evaporación a través de su superficie. Las primeras, tienen un mayor rendimiento que las segundas, pero el mantenimiento es mucho más costoso en las segundas.

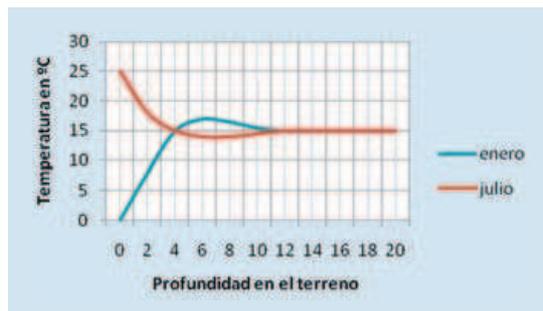
Así aunque las torres de refrigeración funcionan con un gasto energético muy bajo, y su dimensionamiento es bastante fácil y adaptable, tienen dos inconvenientes importantes: primero, tienen un alto consumo de agua, por lo que en zonas cálidas donde el agua pueda escasear, hay que replantearse su uso; y, segundo, debido a su temperatura habitual de trabajo y a que en su funcionamiento siempre hay áreas de agua estancada y se crea un hábitat muy favorable para la existencia de legionela. Así, para evitar problemas de salud pública se exige por reglamento unas operaciones de mantenimiento, con limpiezas y tratamientos ex-



haustivos, que conllevan costes anuales que en algunos casos pueden hacer inviable económicamente una instalación.

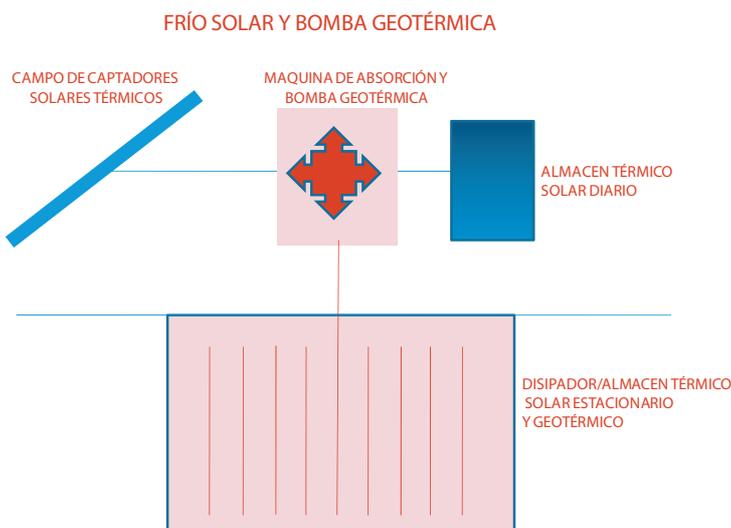
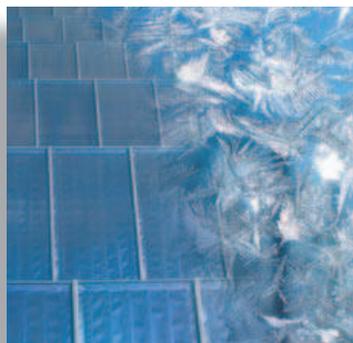
• **Disipación en el terreno**

El agua de refrigeración que extrae el calor en el rango de 30-35 °C, puede inyectarse en el terreno a través de sondeos geotérmicos, con sondas tipo U y separados entre ellos, arpas horizontales o verticales de haces de tubería, que ceden calor al terreno a lo largo del recorrido de la tubería. Debe señalarse, tal como se recoge en la gráfica que a medida que se profundiza hasta unos 50 metros la temperatura está muy estabilizada, según el emplazamiento, hacia unos 15 °C; después empieza a aumentar poco a poco. Por ello, parece ser un sumidero de calor adecuado para las máquinas de absorción que pueden disponer a unos 10 metros de profundidad de saltos térmicos entre 15-20 °C.



**Gráfica 2.** Variación estacional de temperaturas con la profundidad en el terreno.

Los sistemas de malla horizontal se extiende tras un movimiento de tierras con una profundidad entre 3 y 5 m que posteriormente se tapa con el terreno; incluso en la actualidad se están haciendo sistemas embebidos a la hora de hacer las cimentaciones y en la propia superestructura se almacena calor. Por otro lado, los sondeos tipo U (conducto de entrada y salida por el mismo tubo) son más fáciles de realizar, cuando los espacios disponibles son pequeños, que aunque son más costosos que los horizontales utilizan, sin embargo, poco terreno.

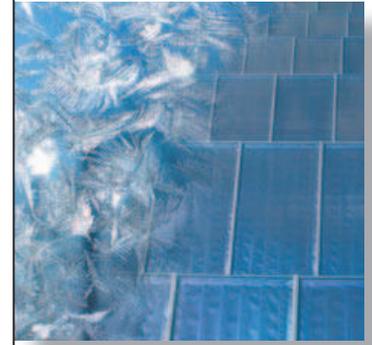


**Figura 6.** Climatización con bomba de calor geotérmica reversible y máquina de absorción.

El correcto dimensionamiento de estos sistemas es muy complicado, pues la transmisión de calor del terreno depende de muchos factores, como composición, humedad, nivel freático, etc. En muchos casos no se sabe la potencia y temperatura de disipación, hasta que no se ha realizado la instalación. Pese a ello es un sistema que una vez montado, funciona bastante bien, con un mantenimiento mínimo. Además si se utiliza una bomba de calor reversible, se puede utilizar en invierno como foco para calentar el edificio, además de con ésta práctica regenerar el terreno, evitando así llegar a saturar la capacidad de almacenamiento de calor.

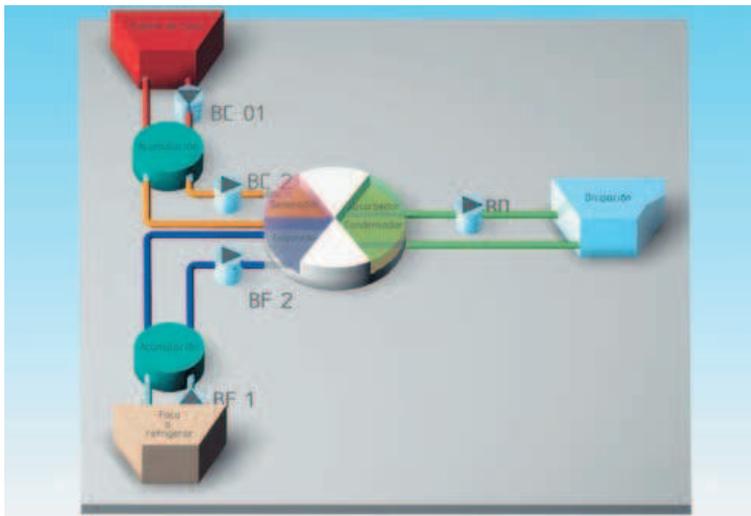
- **Disipación en piscina**

En este caso el sumidero de calor es la masa de la piscina transfiriendo el calor por medio de un intercambiador y elevando su temperatura. Tienen un especial interés cuando, además de la disipación, interese aumentar la temperatura. El punto débil, en el caso de piscinas de poco vaso, es que puede llegar el caso de que se caliente la piscina excesivamente y haga inviable un baño refrescante e incluso el funcionamiento de la máquina de absorción. En estos casos, la piscina será el elemento que limitará el dimensionado de la instalación de frío por absorción; esto es, su capacidad de disipación en el ciclo diario y el consiguiente enfriamiento nocturno. A partir de esa potencia se dimensionará la potencia del campo de captadores solares o las otras fuentes señaladas.



## 6. ESTRATEGIAS DE CONTROL

La mayoría de las máquinas de absorción comerciales disponen de un sistema de control para su instalación en el sistema completo de frío (fuente de calor, disipación y circuito de frío), hay muchos casos en que éste sistema se reduce a los sistemas de seguridad de la máquina para evitar cristalizaciones internas que bloquearían la circulación interna de líquidos y vapores. Por eso, es interesante analizar los sistemas de control y los equipos que hay que añadir a la máquina de absorción para controlar y regular tanto los circuitos que abastecen a la máquina, como el resto de la instalación de frío. Se anota que en muchas ocasiones una correcta instalación no funciona por un mal sistema de control; o, en caso contrario una incorrecta instalación puede hacerse funcionar con un buen sistema de control. Para analizar estos sistemas hay tres elementos y circuitos a controlar que son expuestos a continuación y que se han esquematizado en la figura adjunta.



**Figura 7.** Esquema de la instalación completa de frío por absorción.

- **Control de la máquina de absorción**

En la máquina de absorción internamente hay, principalmente, dos circuitos para el caso de simple efecto: un circuito estático regulado por válvulas de paso automáticas y una bomba que reinyecta la solución concentrada del absorbedor al generador. El equilibrio de balances entre los focos de calor, refrigeración y disipación se lleva a cabo por medio de controles sobre presiones y temperaturas y regulación o no de flujos internos de forma que se mantengan



## Guía del Frío Solar

las variables del ciclo establecidas por el fabricante; y regulando los flujos de entrada de forma que no haya recalentamientos ni bloqueos en parte alguna de los circuitos. Estos controles no son accesibles al usuario pero es necesario conocerlos para identificar posibles averías.

### • Control de los circuitos

Para analizar los circuitos externos de la máquina que como se ha señalado son tres y cada uno de ellos se rige por un criterio diferente aunque todos ellos se relacionan uno con los otros al objeto de mantener un balance térmico cuasi estacionario. Como ejemplo de análisis del sistema de control sobre los diferentes focos térmicos, se propone: un sistema de frío alimentado por un subsistema de captadores térmicos de alta temperatura, con acumulación; un subsistema de aporte de frío al edificio, con acumulación; y, un subsistema de disipación cerrado con torre.

#### — Circuitos de aporte de calor a la máquina

El control básico para el circuito de aporte de calor será el de las dos bombas: una del circuito primario y otra la salida a la inercia o acumulación hacia la máquina, tal como recoge el esquema. Así, la bomba BC 1 funcionará por control diferencial, entre temperatura de depósitos y la de captadores. Una histéresis adecuada para este circuito puede ser  $2\div 6$  °C. Añadiendo las protecciones de seguridad adecuadas para el circuito de captadores y el depósito de acumulación. La bomba BC 2, actuará por medio de un termostato de alta con arranque en 85 °C y paro en 78 °C. El flujo de calor está comandado por la válvula de admisión de la máquina de absorción.

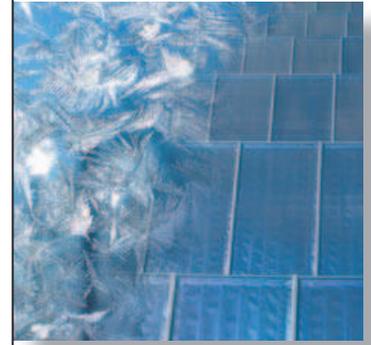
#### — Circuito de extracción de frío hacia la aplicación

De acuerdo al esquema, la bomba BF1 envía el frío al edificio desde la acumulación intermedia y se controla por medio de un termostato de baja, con arranque y paro en función de la demanda; así, si se tratara de un suministro de frío al suelo radiante, podrían marcarse los arranques por debajo de 17 °C y paro por encima de 20 °C; y siempre controlando la temperatura de rocío que marcaría el máximo de aporte al sistema de suelo radiante. En el caso de fan-coils, las temperaturas pueden oscilar

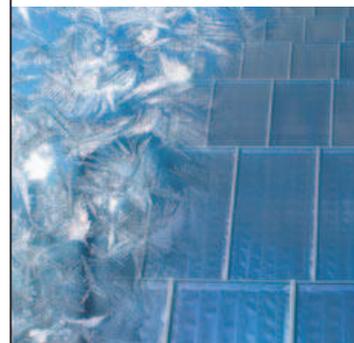
entre  $7\div 12$  °C, aunque interesa con carácter general mantenerlas lo más altas posibles en relación a la eficiencia del sistema. Por otro lado, la bomba BF2, controla la extracción de frío de la máquina y si la máquina de absorción no la controla, deberá regularse su funcionamiento con un termostato diferencial entre el depósito y la salida de máquina, con arranques periódicos para comprobar la disponibilidad de energía.

— *Circuito de disipación*

Algunas máquinas de absorción aportan una señal de mando para activar la bomba cuando necesitan disipar calor de la máquina. En caso contrario se deberá activar la bomba siempre que estén activadas la BF 2 o la BC 2. Por otro lado, el control de velocidad de los ventiladores se hará midiendo la temperatura de entrada a la máquina de absorción, activando las dos velocidades, cuando exceda de  $25\div 28$  °C; con ello se garantiza que a la máquina no entran temperaturas superiores a los 30 °C. En el caso de las máquinas de bromuro de litio, pueden tener problemas de cristalización y, por ello, no admiten temperaturas inferiores a 22 °C. En este caso, se instala una válvula de 3 vías, que mezcla parte de la impulsión a la máquina con el retorno y de ésta forma el fluido de entrada a la máquina estará por encima de la temperatura mínima.







# 5

## DISEÑO EFICIENTE DE LOS EDIFICIOS PARA REFRIGERACIÓN SOLAR

### 1. INTRODUCCIÓN

Todos los seres vivos, en general, requieren de un hábitat adecuado para el desarrollo de sus funciones vitales, siendo la adaptación al medio una de las características determinantes de su subsistencia. Esta adaptación al medio implica, además de las diferentes trayectorias evolutivas seguidas por cada especie, el desarrollo/aplicación de técnicas que posibiliten esta integración. El hombre por su carácter homeotérmico, su notable carencia de protecciones naturales y su amplia distribución geográfica requiere de un espacio envolvente que le permita subsistir confortablemente.

Cualquier edificio desde la fase diseño hasta la explotación para la que fue concebido debe prever, desde un punto de vista energético y de confort térmico, los efectos del clima sobre la evolución termodinámica del sistema. Puesto que los elementos pasivos son parte integrante de la construcción, cuando no la propia construcción, es necesario tener en cuenta los datos climatológicos desde el principio de la concepción y en todas y cada una de las etapas del proyecto.

Debemos considerar los edificios como sistemas termodinámicos abiertos, en situación permanente de no-equilibrio y de paredes diabáticas, capaces por tanto de intercambiar masa/energía con el entorno; su estado termodinámico en cada instante es el resultado de su respuesta a las variaciones externas/internas de su entorno. Esta situación nos lleva a la necesidad de conocer y prever en lo posible las fluctuaciones significativas del entorno para llegar al entendimiento, predicción y/o simulación del estado termodinámico del edificio.

Ahora bien el diseño energéticamente consciente pasa por el aprovechamiento de los recursos naturales del lugar donde se construye.



## Guía del Frío Solar

Para ello es necesario que se den las condiciones adecuadas para que estos recursos puedan ser usados. Luego el urbanismo o mejor aún, el planeamiento urbanístico es una condición necesaria que debe ser considerada para llegar a utilizar la energía solar de una forma global.

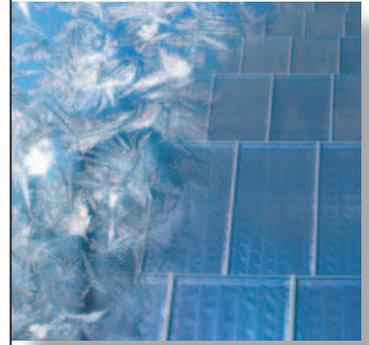
La utilización de la energía solar, para suplir los requerimientos energéticos de los edificios en cuanto a calefacción, refrigeración e iluminación reduce substancialmente el consumo energético de energía convencional. Son edificios que al reducir la demanda de energía disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros agentes de polución a la atmósfera.

Los objetivos que debe perseguir la utilización de la energía solar en la edificación son:

- Propiciar las condiciones adecuadas para conseguir edificios más eficientes desde el punto de vista energético tanto en obra nueva como en rehabilitación de la ya existente.
- Favorecer la utilización de los recursos naturales renovables para el acondicionamiento de los edificios, también conocido como uso de técnicas naturales de acondicionamiento, considerando los componentes, las técnicas constructivas y el emplazamiento del edificio.
- Integrar los sistemas solares activos de calentamiento térmico, producción de frío o de generación de electricidad como otro componente más de la «envolvente» del edificio.

Esto se consigue partiendo de la utilización de la energía solar de forma pasiva a través de una arquitectura coherente energéticamente o Arquitectura Bioclimática. En esta arquitectura se deben tener en cuenta las técnicas naturales de acondicionamiento desde el diseño, para obtener edificios eficientes energéticamente.

Por otra parte, la utilización de la energía solar activa se propicia con la integración de los sistemas de energía solar para aplicaciones térmicas de calentamiento de fluidos y de producción de electricidad usando captadores solares térmicos y módulos fotovoltaicos considerándolos como un componente más del edificio. Esta integración debe ser considerada desde los primeros pasos del diseño, favoreciendo su integración en los edificios.



La arquitectura bioclimática puede definirse como aquella que optimiza sus relaciones energéticas con el entorno medioambiental mediante su propio diseño arquitectónico. Con esta definición se quiere ir más allá de lo que significan términos tales como «Arquitectura solar» o «Arquitectura pasiva» que corresponden a aspectos parciales del problema global. Aunque se conoce con el nombre de Arquitectura Bioclimática, es realmente una Arquitectura llana y lisa, y sin ningún tipo de adjetivos, donde el clima proporciona una serie de condicionantes que hay que tener en cuenta en el diseño arquitectónico. Por lo tanto, la Arquitectura Bioclimática pretende sentar las bases para la realización de unos edificios racionalmente construidos, de modo que, con un consumo mínimo de energía convencional, se mantengan constantemente las condiciones de confort requeridas.

A la hora del diseño del edificio hay que considerar los recursos naturales que pueden utilizarse como fuentes o como sumideros de calor dependiendo de la aplicación que se desee utilizar: calefacción o refrigeración. Se consideran como fuentes: los factores climáticos exteriores (radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y dirección y velocidad del viento) y como sumideros: la tierra (tubos enterrados), la atmósfera y el cielo (temperatura aparente).

En el presente capítulo, se analizarán algunas de las consideraciones necesarias para la reducción de la demanda de energía del edificio, antes del diseño de los sistemas de refrigeración solar.

## 2. CONFORT TÉRMICO

Colocando a una serie de individuos en las mismas condiciones térmicas encontraremos diferencias de parecer sobre el estado de idoneidad de la temperatura y humedad, si bien habrá una mayoría que opinen del mismo modo. Por ello se hace necesario abandonar posiciones deterministas en cuanto a la definición del estado ideal de confort, y hablar bien de bandas de confort, bien de porcentajes de individuos que están en estado de confort en unas condiciones dadas. Si bien el confort térmico es solo una parcela del confort general; es una parcela muy importante, ya que es una necesidad primaria, y cuanto más primaria es una necesidad mayor necesidad de ser satisfecha tiene. Por tanto, para poder hablar de estado de confort, previamente a la decoración, la moda ó la música deberán satisfacerse el hambre y el frío, es decir las necesidades primarias, que en última



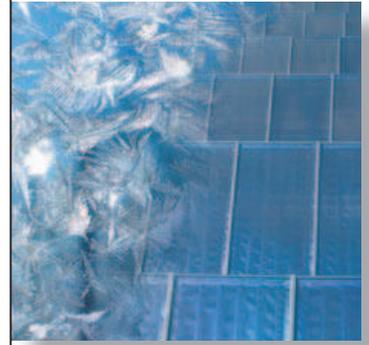
## Guía del Frío Solar

instancia son necesarias para sobrevivir. El estado confort térmico se define como el valor nulo del balance energético establecido entre el cuerpo humano y las condiciones exteriores que lo rodean. Es decir cuando la cantidad de energía producida por el cuerpo humano es igual a la suma de los flujos de energía que se establecen entre la persona y el exterior. Por tanto podría definirse, como una sensación neutra de los sentidos con respecto a las condiciones ambientales que lo rodean. Es diferente la sensación de confort, al balance neutro de energía, ya que el cuerpo actúa para igualar a cero este balance. Si la actuación de estos mecanismos es desmesurada (excesiva sudoración o respiración) se produce un estado de disconfort térmico. Dentro de los mecanismos de transferencia energética podemos hacer una distinción básica: los comunes a toda la materia (radiación, convección y transmisión) y los propios de los seres vivos (producción metabólica, sudoración y respiración).

### **3. PRINCIPALES FACTORES DEL DISEÑO ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE**

Para conseguir un mejor rendimiento energético es fundamental reducir en lo posible tanto las pérdidas caloríficas en invierno como los aportes indeseados en verano. Además, para mantener una situación de confort térmico, debemos tener en cuenta una serie de factores que influyen de manera relevante en la consecución de este fin; como el intercambio térmico en un edificio depende fundamentalmente de la diferencia de temperaturas entre interior y exterior y los cambios de estado psicrométrico son función también de esta diferencia, a través de infiltraciones, podemos considerar el conjunto de parámetros meteorológicos como factores extrínsecos al edificio. Dentro de estos factores se puede incluir también el grado de ventilación. Por otro lado el comportamiento de los edificios frente a las condiciones externas es muy diferente de unos a otros en función de sus características físicas y geométricas, en lo que podríamos denominar factores intrínsecos.

Podemos afirmar que la principal fuente energética que influye en el balance energético del edificio es la Radiación solar. Toda la actividad atmosférica tiene como fuente energética al Sol. Su distinta distribución sobre la superficie terrestre crea los gradientes necesarios para movilizar la atmósfera y provocar sus intercambios con el suelo. La atmósfera, que refleja, absorbe y transmite la radiación solar recibi-



da hará que ésta sea menor en el suelo (en el edificio) que la recibida en su superficie exterior. Así mismo, la radiación que incide sobre la «piel» del edificio es en parte reflejada de nuevo hacia el exterior, en parte transmitida hacia el interior a través de huecos y ventanas, y en parte absorbida y transformada en energía térmica, contribuyendo de este modo al balance energético del edificio. El análisis de la interacción radiación solar-edificio cobra especial importancia en diseños que incorporan elementos solares pasivos (invernaderos adosados, muros trombe, etc.) o activos (colectores solares) y en diseños donde el análisis de sombras es relevante.

El viento es otro elemento climático de suma importancia en la arquitectura, aparte de su incidencia en la estabilidad de los edificios debe tenerse muy en cuenta por su influencia en el aislamiento térmico y las infiltraciones. Los intercambios caloríficos en las paredes expuestas al viento se reflejan por un aumento de los coeficientes superficiales de transmisión de calor de muros y cubiertas. Su repercusión es aún mayor en muros poco aislados y especialmente en los huecos acristalados.

A la hora de realizar el balance energético de un edificio, debemos analizar los flujos energéticos que se producen, el flujo global de pérdidas de un edificio es la suma de todos los flujos de pérdidas a través de todos y cada uno de los elementos del mismo. La Termodinámica indica que el modo natural de fluir la energía es del foco caliente al foco frío. Por tanto para que un edificio, de modo natural, reciba energía calorífica éste debe ser el foco frío con respecto a algún foco caliente, como en condiciones de invierno, los alrededores del edificio están más fríos que la temperatura de confort que deseamos alcanzar, mientras que la temperatura aparente del sol es del orden de 6.000 °C, por lo que puede actuar como foco caliente.

Si el objetivo del diseño arquitectónico es únicamente obtener la máxima energía de este foco caliente, desarrollando componentes especiales para ello, podría ser contraproducente durante el periodo de verano. Por ello, los efectos de cada técnica deben evaluarse en condiciones de verano y sus efectos deben eliminarse fácilmente durante esta época, a no ser que también sean beneficiosos.

Al contrario que en el caso de invierno, durante el verano se pretende que el foco caliente sea el edificio; por tanto, se han de buscar focos fríos para poder eliminar la energía desde el edificio hacia esos focos



## Guía del Frío Solar

fríos. Dependiendo del foco frío considerado se estudiará una técnica. Los focos fríos van a ser: el suelo a una profundidad determinada, el gradiente de humedad entre el ambiente exterior y el interior, y el cielo nocturno.

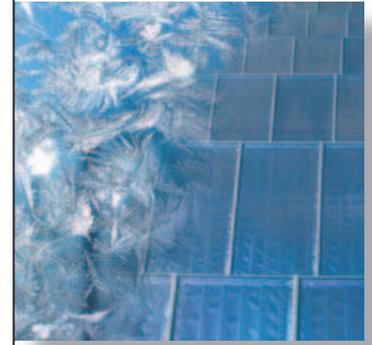
Las técnicas de refrigeración natural pueden estar dedicadas a evitar los sobrecalentamientos (técnicas «preventivas») como son la ventilación y el sombreado, o técnicas que procuran realmente refrigeración (técnicas «correctivas»), ya que efectivamente consiguen una reducción efectiva de la temperatura interior del edificio, entre estas están los tubos enterrados, la refrigeración evaporativa y la refrigeración radiativa.

Ambos tipos de medidas no sólo no son incompatibles, sino que es recomendable el uso simultáneo a fin de optimizar la eficiencia del diseño. Así pues, siempre son recomendables unos sistemas de sombreado adecuados y la distribución estratégica de huecos para generar ventilación cruzada, tanto durante las horas adecuadas del día como durante la ventilación nocturna.

Antes de captar la energía solar, hay que tener en consideración que el edificio debe estar bien aislado para evitar por una parte pérdidas de energía desde el interior y en segundo lugar evitar renovaciones de aire frío desde el exterior —considerando que la ventilación es imprescindible para alcanzar el confort en los espacios cerrados—.

La captación de energía solar se optimiza con una orientación adecuada de los edificios, y con una distribución adecuada de las ventanas. Hay que tener en cuenta que las ventanas abiertas al sur, donde se recibe radiación solar durante todos los días del año, tendrán una captación máxima en invierno, y en cambio en verano con un sistema elemental de protecciones solares (retranqueo, toldos, pérgolas, etc.) es fácil evitar toda ganancia directa de radiación solar.

El almacenamiento de la energía captada, se logra distribuyendo adecuadamente las masas de inercia térmica (producto de la densidad por la capacidad calorífica del material). La ventaja de usar este tipo de materiales es que captan la energía a las horas que mayor aporte existe, y debido al efecto del desfase temporal esta energía es liberada a las horas en que hay menor aporte energético. Es decir, un material con un desfase de doce horas tendría su máxima captación en el mediodía solar y su máxima cesión al ambiente interior a las



doce de la medianoche. Por último, la distribución de energía se puede conseguir, en parte, con la distribución adecuada de las masas de inercia y con el correcto diseño de la circulación del aire a través de las piezas del edificio (correcto diseño de los huecos de distribución interiores).

En condiciones de verano estas ideas cambian drásticamente, si bien algunas de las consideraciones siguen siendo válidas. El aislamiento correcto sigue siendo un factor fundamental, así como en invierno evita la pérdida de energía desde el interior, en verano evita la ganancia de energía desde el exterior. Asimismo las inercias térmicas juegan un papel importante evitando que las temperaturas interiores suban de forma alarmante, pero esta estrategia debe ir acompañada de una adecuada ventilación nocturna que evite que el almacenamiento de energía vaya incrementándose día a día, y que acabe produciendo una situación de discomfort continua en el tiempo.

En situación de verano las técnicas más elementales son: el control solar y las estrategias de ventilación. Aparte de estas, existen técnicas más sofisticadas que no solo evitan el calentamiento, sino que además producen una disminución efectiva de la temperatura del aire: técnicas evaporativas, conductos enterrados, etc.

En el control solar juega un papel primordial la orientación de las ventanas. La ventana no es únicamente un elemento captador de energía, sino que además es una fuente de iluminación natural, por tanto no debe ser considerada como un enemigo en verano, sino que proporciona, aparte de la iluminación antes mencionada la posibilidad de establecer ventilaciones que atemperen las condiciones interiores.

Dependiendo de las temperaturas interiores y exteriores podrá ser conveniente en establecer corrientes de aire dentro del espacio ocupado. Por otra parte si se han tenido en consideración las corrientes preferentes de viento en la zona donde está inmerso el edificio, y dependiendo de ellas se ha practicado una correcta estrategia de distribución de huecos, será posible establecer corrientes de aire efectivas en el interior del edificio que lo sitúen dentro de las condiciones de confort. Las estrategias de ventilación pueden clasificarse en varios apartados: ventilación cruzada, efecto chimenea y ventilación nocturna. El efecto chimenea se produce en edificios en los que la parte alta del mismo es posible sobrecalentarla, con lo cual por



## Guía del Frío Solar

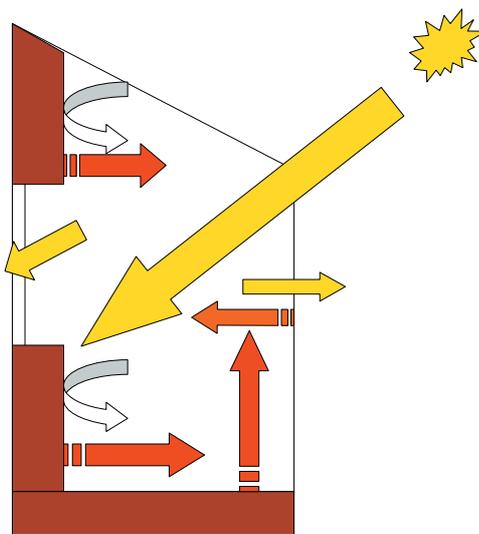
La diferencia de densidades entre el aire caliente y frío se produce un efecto de succión que acelera las renovaciones de aire desde el exterior. Las estrategias de ventilación nocturna son efectivas en los lugares en donde existe un considerable salto térmico entre el día y la noche, con ellas se consigue enfriar la estructura del edificio con el fin de evitar acumulaciones de energía.

### 3.1. Técnicas naturales de calefacción

Los conceptos básicos que hay que tener en cuenta en las técnicas naturales para calefacción son: ganancias solares, masa térmica, aislamiento, orientación.

#### 3.1.1. Ganancia solar

Hay que tener en cuenta la ganancia de la radiación solar, por lo tanto es determinante el vidrio y otros materiales traslúcidos o transparentes de acristalamiento, por su elevada transmitancia a la radiación solar (onda corta) y mínima a la radiación de onda larga produciendo el llamado efecto invernadero. Al incidir la radiación solar sobre un vidrio, ésta se ve transmitida en un porcentaje muy elevado, pasando al interior e incidiendo sobre otros elementos (paredes y suelo) que la absorben asimismo en un porcentaje muy elevado.



Estos elementos aumentan su temperatura, emitiendo a su vez radiación de onda larga, la cual no puede escapar debido a que el vidrio es opaco a esta longitud de onda.

Por convección el aire del espacio invernadero se calienta y extrae energía de los elementos masivos (techos, suelo, paredes), alcanzando una temperatura muy elevada incluso en condiciones de aire exterior frío.



### 3.1.1.1. Ganancia Directa

Es el modo más sencillo para la captación solar. El elemento principal es la ventana, y únicamente requiere una adecuada orientación. Se le llama ganancia directa porque no existe ningún elemento intermedio entre la radiación solar y el espacio que se desea calentar, salvo el vidrio.

Los condicionantes principales del diseño son, el lugar de colocación de la ventana, su inclinación con respecto a la vertical y el tipo de vidrio utilizado. La inclinación de los vidrios es un parámetro que debe emplearse con sumo cuidado para latitudes intermedias y bajas (como es el caso de la franja mediterránea), ya que el ángulo de incidencia solar en verano es muy elevado, con lo cual las ganancias pueden ser excesivas y producir sobrecalentamientos. En general es aconsejable la posición vertical, y siempre colocando sombreadamientos.

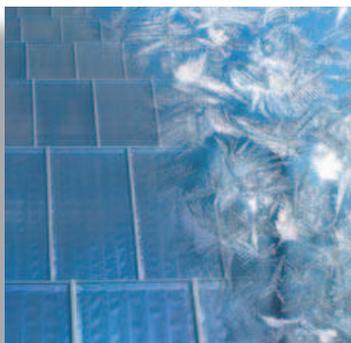
### 3.1.1.2. Ganancia Indirecta

En este apartado se incluyen los componentes que entre la radiación solar y el espacio que se desea calentar colocan elementos que almacenan y, posteriormente, distribuyen la energía. Así como en el caso anterior, el único fenómeno de transferencia de calor que interviene la radiación, en este caso los fenómenos que se producen son de conducción y la convección.

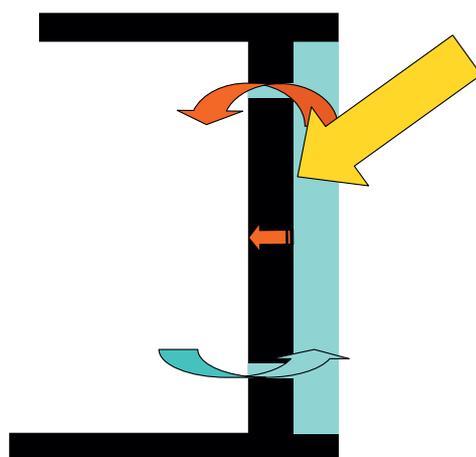
Básicamente existen dos tipos de sistema: el que exclusivamente tiene un muro masivo, tras un vidrio (el cual produce el efecto invernadero, favoreciendo la ganancia energética del muro) y los que, además, combinan el almacenamiento con la convección introduciendo el aire caliente en el espacio que queremos calentar.

Los diseños varían dependiendo de si se realiza sobre un muro vertical o sobre el techo, pero el principio de funcionamiento es el mismo.

Dentro de este tipo de técnicas se incluye un componente que, tradicionalmente, se ha usado en diseño pasivo conocido como muro Trombe en honor del arquitecto que lo empleó por primera vez.



## Guía del Frío Solar



Esquema del Muro Trombe

Este componente consiste en un muro masivo, sin aislamiento y con colores oscuros, para aumentar la absorción de radiación solar, delante del cual se coloca un vidrio con el fin de producir el efecto invernadero. La distancia entre el vidrio y el muro es pequeña, de manera que el volumen de aire que se va a calentar sea también pequeño y se alcancen temperaturas elevadas fácilmente. En

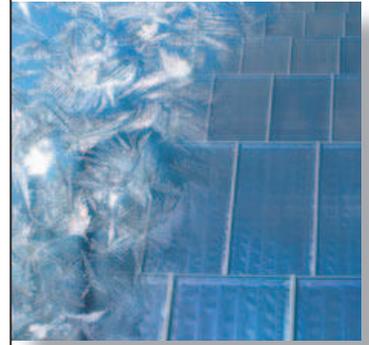
la parte inferior y superior del muro existen unas aperturas practicables de modo que bien por convección natural, bien forzada (mediante un ventilador controlado por un termostato), exista un paso de aire caliente desde el componente hacia el espacio habitado. A su vez, el aire que penetra en el espacio invernadero del muro Trombe está precalentado debido a que se toma de las condiciones interiores.

Es evidente que este es un sistema que funciona exclusivamente en condiciones de invierno. Durante el verano, deben adoptarse medidas que eviten las ganancias solares, o incluso que favorezcan la ventilación de los espacios interiores. En este sentido se desarrolló una modificación del elemento, llamado muro de Trombe-Mitchel.

También puede darse el caso en el que el sistema captador de la energía solar está separado físicamente del espacio que se quiere calentar, y la distribución de la energía se hace a través del aire u otro fluido hasta el lugar de la demanda.

### 3.2. Orientación

La posición de máxima captación de energía solar es aquella que en todo momento es perpendicular a la incidencia de los rayos solares, por lo que la orientación óptima de las ventanas en nuestra latitud, es la sur. Las protecciones solares a diseñar deben ser adecuadas para no afectar la captación invernal y evitar la estival. Por otra parte la relación entre área de ventanas y superficie a acondicionar tiene también una importancia capital para un aprovechamiento óptimo de la radiación solar.



Si la orientación sur recibe durante todo el día la radiación solar, la norte estará continuamente sombreada, debido a lo cual, las condiciones térmicas de esta zona serán mucho más frías. Por tanto deben evitarse grandes huecos y tener un cuidado especial con el aislamiento térmico. Por otra parte no es conveniente que sea una zona ciega, ya que hay que prever la generación de corrientes de aire para refrigerar en verano.

Las fachadas este y oeste reciben el sol por la mañana y por la tarde (dividiendo ambos periodos a partir del mediodía solar) respectivamente. Ambas fachadas son desfavorables en verano, ya que la captación es muy difícil de evitar a no ser que se empleen persianas correderizas (o similares) que obstruyan completamente la incidencia solar. Es especialmente desfavorable para el verano la orientación oeste, ya que al ser la captación por la tarde se añade además las elevadas temperaturas que se han alcanzado en el ambiente después de muchas horas de insolación.

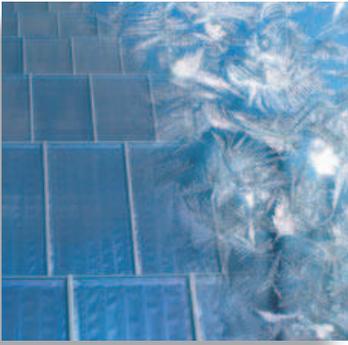
Asimismo no debe olvidarse que, dependiendo de las direcciones preferentes de viento de cada zona, los huecos deben abrirse de forma adecuada para permitir las ventilaciones en verano, y protegerse de los vientos fríos en invierno.

### 3.3. Inercia térmica

Aunque se han separado en apartados diferentes la orientación y las inercias térmicas, estas van siempre unidas debido a que la orientación del edificio es algo que mediatiza absolutamente las decisiones posteriores de diseño. Quiere significarse con ello, que la adecuada orientación del edificio es crucial para obtener un aprovechamiento óptimo de los recursos naturales. Las masas de inercia térmica almacenan el calor y posteriormente la reemiten con un cierto desfase temporal y con una cierta atenuación, dependiendo ambos de las características de los materiales de que está compuesta.

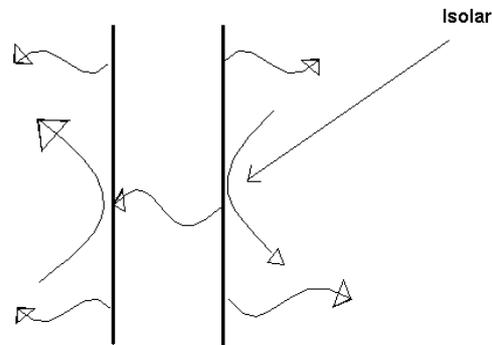
Las principales masas de inercia en un edificio están en los muros y suelos. Una adecuada distribución de las masas de inercia térmica combinada con un adecuado aislamiento y una estrategia de ventilación correcta es crucial para conseguir un edificio confortable.

Ya que la radiación solar incidente sobre la superficie es, en parte, absorbida, en parte reflejada, dependiendo del material y del color



## Guía del Frío Solar

del muro. La energía absorbida se distribuye bien hacia el interior del muro a través de la conducción, bien hacia el exterior mediante los fenómenos de radiación y convección.

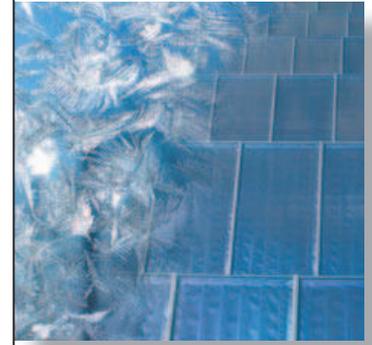


Una parte de la energía transmitida hacia el interior del muro se emplea en aumentar la temperatura del muro, con lo cual esta energía queda almacenada en el mismo. Este es el efecto de la inercia térmica: El almacenamiento de energía mediante el aumento de temperatura de la estructura. Cuando la onda térmica llega de una cara a otra del muro se han producido dos fenómenos: Una amortiguación de la cantidad de energía debido a que parte de la misma se ha empleado en aumentar la temperatura del muro, y un desfase temporal del pico de la onda térmica el cual llega a la cara opuesta con un cierto retardo temporal. Eligiendo adecuadamente las características del muro (conductividad, densidad, capacidad calorífica y espesores de las distintas capas) podemos controlar el tiempo de desfase.

Hay que considerar además que el uso de aislamiento incide directamente sobre el diseño de las masas de inercia. Por tanto el diseño de un muro debe tener en consideración ambos fenómenos.

## 4. TÉCNICAS NATURALES DE REFRIGERACIÓN

Como se ha indicado anteriormente la transferencia natural del calor se produce siempre desde el foco caliente al foco frío, y nunca a la inversa, a no ser que se incluya en el proceso una máquina térmica, por lo que es importante considerar los distintos agentes ambientales que favorece la transferencia energética entre el edificio y el medio ambiente, estos son: el cielo, la atmósfera y el terreno, conocidos como sumideros de calor según sean cada uno de ellos serán distintos los mecanismos que se deben considerar.



La refrigeración pasiva en su concepto más amplio se dedica al desarrollo de diseños arquitectónicos que mantengan las condiciones de confort en el edificio sin necesidad de un consumo energético en sistemas convencionales de aire acondicionado.

El principal objetivo de las técnicas naturales para refrigeración es evitar que el espacio habitado se sobrecaliente por encima de las condiciones de confort. Tiene por tanto una primera tarea meramente preventiva. La defensa de sobrecalentamientos se realiza a través de tres mecanismos fundamentalmente: Protección solar, ventilación y masa térmica.

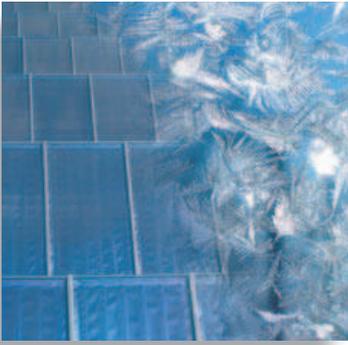
#### 4.1. Control solar

Dado que la principal fuente de energía es el sol debe procurarse que penetre la mínima cantidad de energía posible dentro del recinto a controlar. Para ello hay que dotar al edificio de instrumentos de intercepción de la radiación solar.

Existe gran cantidad de elementos de protección solar: cortinas, persianas, toldos, etc., en una primera división se puede diferenciar entre protecciones fijas y móviles.

Las protecciones fijas forman parte de la propia estructura del edificio: retranqueos, aleros (tanto verticales como horizontales), balcones, etc. Hay que tener especial cuidado con el diseño de estos elementos, ya que deben proteger en verano, pero deben dejar pasar la radiación solar en invierno. Las protecciones móviles suelen tener un control manual, dependiendo de las necesidades y de las condiciones climáticas. Como norma general, todas las protecciones solares deben ser exteriores al vidrio de la ventana, dado que si son interiores la radiación llega a penetrar en el espacio a controlar y se producen sobrecalentamientos.

Asimismo pueden utilizarse como protección la vegetación de hoja caduca frente a los huecos vidriados. Este tipo de protección presenta una ventaja adicional sobre las artificiales. Al ser la planta un ser vivo tiene un mecanismo termorregulador el cual hace que se mantenga constante su temperatura frente a los cambios exteriores, lo cual procura, además de la protección a la incidencia solar un suavizado de las condiciones ambientales. Es importante que la vegetación sea de



## Guía del Frío Solar

hoja caduca, porque de este modo está poblada en verano produciendo el efecto protector y en invierno no tiene hojas dejando penetrar los rayos solares.

### 4.2. Ventilación

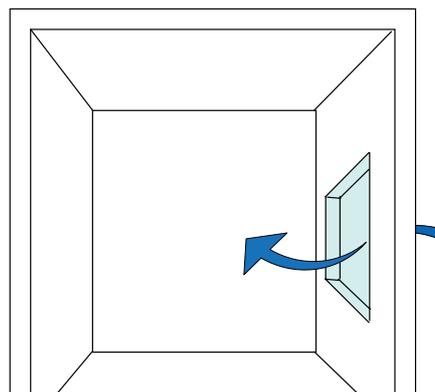
La ventilación en un edificio en verano tiene varios objetivos: adecuar las condiciones ambientales a las exigencias de confort y evacuar la energía almacenada en las masas de inercia térmica para evitar el sobrecalentamiento paulatino del edificio.

El provocar intercambios de aire del interior con el exterior en verano, será beneficioso únicamente en el caso que la temperatura exterior del aire sea menor que la interior, en caso contrario estaríamos calentando el ambiente. Por otra parte hay que considerar que para alcanzar el estado de confort no únicamente es importante la temperatura ambiente, sino también la velocidad del aire y la temperatura media radiante, que depende en mayor medida de la temperatura superficial de los muros que de la del aire.

Dentro de esta técnica de refrigeración natural podemos distinguir varios tipos: simple, cruzada, nocturna y por efecto chimenea.

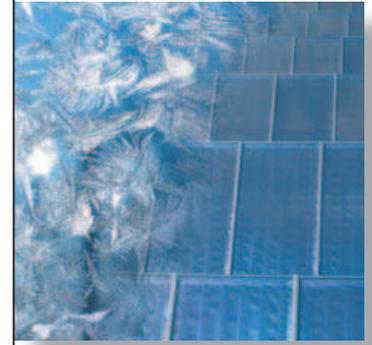
#### 4.2.1. Ventilación simple

Con este técnica el número de renovaciones de aire conseguido es menor que con el resto. En la figura se esquematiza este proceso. Como puede verse existe una única apertura, a través de la cual, y por diferencia de presiones el aire entra y sale.



Para que este efecto sea eficiente la orientación del hueco con respecto a la dirección del viento ha de ser coincidente, en caso contrario el efecto es muy pobre.

Si el hueco está en contacto con una zona especialmente protegida de la insolación (patios abiertos o porches en la fachada norte) el

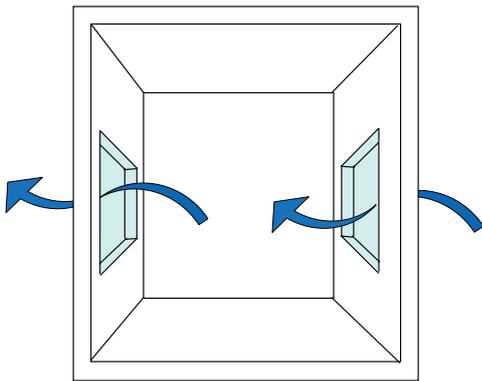


efecto puede ser muy beneficioso, ya que el intercambio que se produce es con una masa de aire que está preacondicionada.

#### 4.2.2. Ventilación cruzada

Se establece este tipo de ventilación cuando existen huecos entre dos fachadas diferentes, sin que haya obstrucciones interiores entre ambos huecos, es decir que se pueda establecer una línea ininterrumpida entre ambas aperturas.

En la siguiente figura se presentan el caso en el que las fachadas en que están localizados los huecos son opuestas, con este tipo de configuración se consigue un mayor número de renovaciones de aire.



Este tipo de ventilación sin ningún tipo de control, podría llegar a ser molesto debido a que la velocidad de viento interior puede ser elevada.

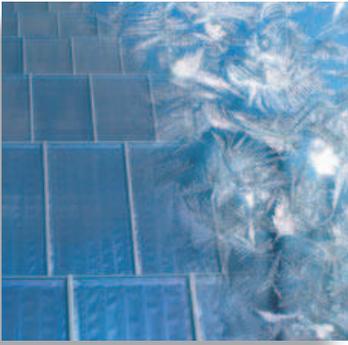
Para un correcto diseño de los huecos, y la elección de las fachadas para practicarlos, es imprescindible conocer las direcciones preferentes de viento en la zona, así como las posibles pantallas que van a afectar a la incidencia del viento sobre las mismas.

#### 4.2.3. Ventilación nocturna

La ventilación nocturna tiene la principal misión de aprovechar el descenso de temperaturas que generalmente ocurre durante la noche para evacuar la energía almacenada en las masas de inercia térmica en el edificio.

Es evidente que durante el transcurso del día la estructura del muro se calienta debido a la incidencia solar. Si esta energía almacenada no se elimina, el edificio irá aumentando paulatinamente su temperatura, de modo que se hará inhabitable.

Este efecto se nota en la mayoría de los edificios convencionales: Cuando empieza la época estival el edificio es fresco, en cambio a

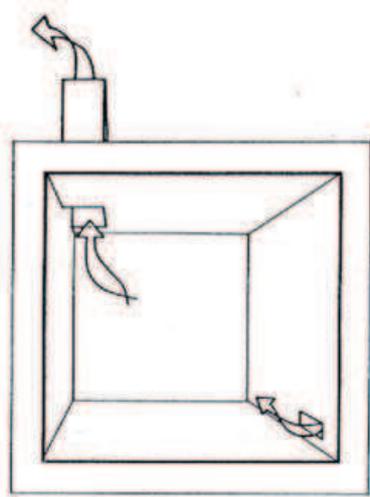


## Guía del Frío Solar

medida que avanza el verano el edificio va aumentando su temperatura, llegando a darse el caso que en condiciones exteriores frescas (un día fresco de verano, o durante la noche) el edificio tiene temperaturas fuera de los límites de confort.

### 4.2.4. Efecto chimenea

Este efecto presenta una gran eficiencia en cuanto al número de renovaciones de aire que provoca y consiste básicamente, en aprovechar el tiro de aire que se provoca cuando existe un gradiente térmico considerable a diferentes alturas y orientaciones.



En la figura se representa un edificio en sección, en donde en la parte superior hay una chimenea que está acristalada en su cara sur, por lo que tiene una importante ganancia solar. Debido a esta ganancia de energía el aire sufre un importante aumento de temperatura, lo cual se traduce en una disminución de la densidad y por tanto tiende a subir y escapar por las aperturas superiores. Esto produce un efecto de succión

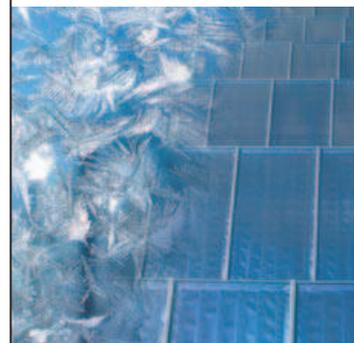
desde el exterior hacia el interior en los huecos inferiores, generando unas corrientes cruzadas de aire.

Si el aire procedente del exterior se toma de una zona preacondicionada el efecto resultante puede ser ideal para mantener las condiciones de confort.

Este tipo de elemento es ambivalente, ya que tiene un funcionamiento igualmente positivo en invierno, sin más que cerrar las aperturas superiores e inferiores, dejando que se produzca el efecto invernadero.

### 4.3. Conductos de aire enterrados

La técnica de tubos enterrados, consiste en enterrar una serie de tubos de tal modo que a través de ellos, circulará aire que, tomado



del interior del edificio pasará por los tubos, y de nuevo entrará en el edificio a una temperatura inferior. Es necesario tomar aire del exterior para realizar las necesarias renovaciones de aire nuevo para evitar la contaminación del aire usado.

El terreno presenta un gradiente térmico tal, que alrededor de los 14 m de profundidad, la temperatura es prácticamente constante a lo largo del año, e igual a la temperatura media anual de la zona estudiada. Durante los meses de verano, para profundidades iguales o inferiores a 3 m la temperatura del suelo puede estar entorno a los 22 °C por lo que es aprovechable para producir efectos refrigerativos. Si, además, la parte del suelo en donde se va a aplicar la técnica está sombreada, la reducción de la temperatura a 4 m es de alrededor de 2 °C.

La eficiencia del sistema dependerá fundamentalmente:

- De la temperatura del suelo, que será inferior cuanto más profundos estén enterrados.
- Del diámetro de los tubos.
- De la longitud total del tubo a través del cual pasará el aire.
- Del caudal de aire que circula a través de los tubos (o lo que es lo mismo para un diámetro dado la velocidad de circulación del fluido).

#### **4.3.1. Sistemas Radiantes**

En este caso el medio frío es el cielo nocturno, cuya temperatura aparente es menor que la ambiente.

A través del mecanismo de radiación, se emitirá energía desde una superficie al nivel del suelo (radiador) hacia el cielo. Por tanto, el radiador se enfriará. En contacto con este radiador pondremos un fluido, aire o agua, que, por convección, se enfriará. El valor de la temperatura de cielo depende de las condiciones atmosféricas, ya que no deben existir elementos que absorban y emitan radiación de onda corta como son el CO<sub>2</sub>, el vapor de agua, los aerosoles. En resumen se requiere de una atmósfera despejada (sin nubes) y clara (con pocos contaminantes).



## Guía del Frío Solar

Por otro lado, el material de que estén constituidos los radiadores será determinante en el rendimiento del sistema. Los radiadores pueden ser de dos clases, dependiendo del tipo de fluido que transporta la energía: de agua y de aire.

Esta técnica presenta su máxima efectividad durante horas en las que, usualmente, el edificio no demanda refrigeración, es decir durante la noche. Por ello habitualmente es necesario almacenar la energía, la capacidad refrigeradora, para emplearla cuando el edificio lo requiera. Las dimensiones, tanto del sistema de radiadores como del almacenamiento, deben estudiarse conjuntamente, ya que la eficiencia del sistema es una combinación de ambos elementos.

## 5. ESTUDIO ENERGÉTICO: SIMULACIÓN

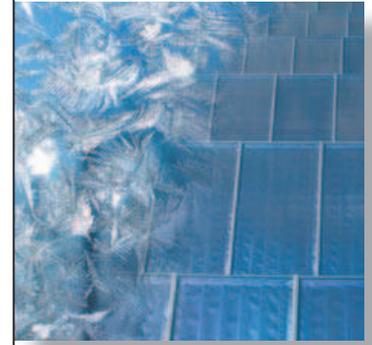
Las técnicas descritas necesitan de un estudio detallado para su correcto diseño, para ello, se identifica el edificio como un sistema complejo que se puede resolver mediante la **simulación**. Un modelo de simulación es una representación abstracta de un sistema real que permite valorar y predecir el comportamiento energético de un diseño, y permite conocer, no sólo su comportamiento durante un periodo de tiempo determinado, sino también evaluar su comportamiento futuro.

La normativa española (**Código Técnico de la Edificación**), que regula el comportamiento energético del edificio, limitando su demanda energética en función de los valores climáticos, los parámetros constructivos, las cargas y usos del edificio, así como sus sistemas de acondicionamiento, facilitando herramientas (**Lider y Calener**), para el cálculo de las exigencias básicas en cuanto al ahorro energético se refiere.

### 5.1. Métodos de simulación energética

Dentro de las múltiples clasificaciones que pueden hacerse se ha optado por dividir los modelos de simulación en tres grupos: estáticos, de correlación y dinámicos, cubriendo así los tres niveles de complejidad que se presentan en la literatura.

Los métodos estáticos son los que adoptan las hipótesis más restrictivas en cuanto al campo de aplicación del modelo, así como a la cantidad y fiabilidad de los resultados obtenidos. Los más usados son el método



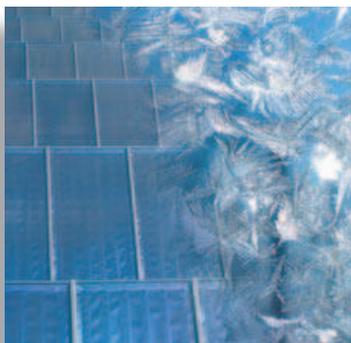
de grados-día que permite evaluar la carga térmica de los edificios y optimizar el diseño de la envolvente, y el método Bin, que se emplea cuando alguno de los parámetros que definen el cálculo del consumo energético en un edificio, no pueda garantizar un valor constante.

Los métodos de correlación se basan en simplificaciones obtenidas a partir del estudio sistemático de diversos fenómenos, utilizando, generalmente, como fuente de información los métodos más detallados de simulación energética de edificios (métodos dinámicos). Asimismo hacen uso de leyes empíricas sencillas que tienen un carácter general.

Los métodos de simulación dinámicos son los que mayor complejidad presentan ya que requieren una definición exhaustiva del edificio y una resolución a tiempos de paso cortos del sistema de ecuaciones planteado (normalmente de una hora). Todos ellos necesitan la entrada de una cantidad considerable de información y por tanto, su manejo es complicado. Actualmente, existen múltiples programas validados internacionalmente para calcular, de manera dinámica, la respuesta energética del edificio.

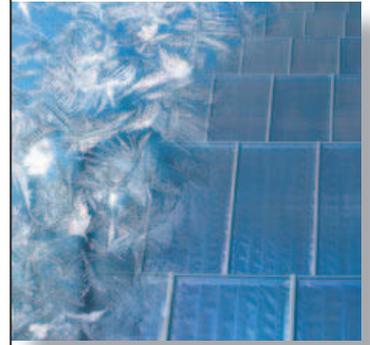
## 6. BIBLIOGRAFÍA

- BARUCH GIVONI, *Man Climate and Architecture* – Applied Science Publishers, Ltd – Londres, 1976.
- *Building-Integrated Photovoltaics*, Kiss Cathcart Anders Architects, P.C. NREL Technical Monitor: Robert Farrington. NREL/TP-472-7851UC Category: 1600□DE95004056. CADDET, Technical Brochure No. 78.
- CLARKE, J. et al. ESP-r A program for building energy simulation. Version 8 series. The PASSYS project. Contract JOUE-CT90-0022.CEC.
- DUFFIE, J. A. & BECKMAN, W. A. (1980). «Solar engineering of thermal processes». John Wiley & sons., New York NY.
- Fanger, P.O.L. *Thermal Comfort Analysis and applications in environmental engineering*. MacGraw Hill N.Y., 1970.
- GUEYMARD, C. (1987). «An isotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms». *Solar Energy* 38, págs. 367-386.



## Guía del Frío Solar

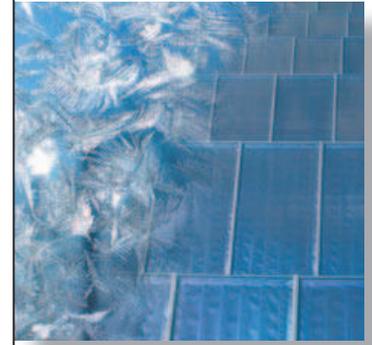
- HAY, J. E. & MCKAY, D.C. «Estimating solar irradiance on inclined surfaces: A review and assessment of methodologies». Solar Energy 3, págs. 203-240, 1985.
- IEA CADDET Renewable Energy Technologies, Mini-Review of Active (Thermal) Solar Energy 1995' CADDET Renewable Energy Centre, ETSU, Harwell, Didcot, Oxon OX11 0RA, United Kingdom, 1996.
- IQBAL, M. «An introduction to solar radiation». Academic Press, Toronto, 1983.
- LEFEBVRE, D.G. «Fundamentos sobre clima y arquitectura: II Transferencia energética». Curso energía solar en la edificación. IER-CIEMAT, 1994.
- MARCO, J., y HERAS, M. R. «Experiencia española en la evaluación energética de edificios solares pasivos». Rev. Montajes e Instalaciones. Marzo 1992. Págs. 105-114.
- SERRA, R.: «Clima, Lugar y Arquitectura. Manual de Diseño Bioclimático» Ediciones CIEMAT – Madrid, 1989.
- Solar Energy R&D in the European Community. Series A. Volume 6. Solar Collectors. Test Methods and Design Guidelines.
- T. MÜLLER, W. WAGNER, M. KÖHL, B. OREL, y K. HÖFLER: Colourface-Coloured Facades for Solar Heating System and Building Insulation.
- VICTOR OLGAY: Arquitectura y Clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1998.
- FERRER J. A. y otros (Editores: Helder Gonçalves y Susana Camelo). Os edificios Bioclimáticos a integraçao das Energias Renovávveis e os Sistemas Energéticos. ISBN=978-972-676-210-2. Lisboa, 2008.
- J. J. PÉREZ, D. BRAVO, A. BOSQUED, J. A. FERRER, y M. R. HERAS. «Estrategias de integración de las energías renovables en las instalación de climatización de los C-Ddl del PSE-ARFRISOL» Libro de ponencias, Arquitectura Bioclimática y Frío Solar. ISBN978-84-693-5141-3. Almería, 2010.



## 7. ENLACES WEB

- Página web del Código Técnico de la Edificación.  
<<http://www.codigotecnico.org/>>.
- Página web del US Department of Energy.  
<[http://www.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/)>.
- Página web del International Building Performance Simulation Association (IBPSA).  
<<http://www.ibpsa.org/>>.
- Página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).  
<<http://www.idae.es/>>.
- Página web del Proyecto Singular estratégico sobre arquitectura bioclimática y frío solar ARFRISOL.  
<<http://www.arfrisol.es/>>.
- Página web del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).  
<<http://www.ciemat.es/>>.





# 6

## DIRECTRICES PARA EL DISEÑO Y LA VIABILIDAD DE SISTEMAS DE FRÍO SOLAR

Se plantea en estas líneas, analizar las directrices o consideraciones para el diseño de sistemas solares de frío, evidentemente desde la necesidad de que los mismos sean viables.

Lo primero que debe comprenderse es la naturaleza misma de un sistema de frío solar.

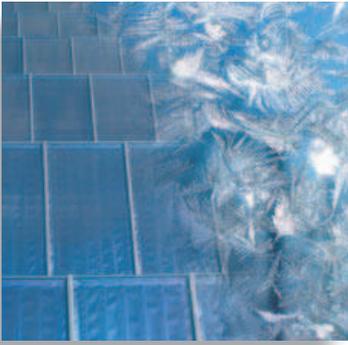
Se considera como tal el conjunto de elementos (o subsistemas) que hacen posible lograr nuestro objetivo de obtener frío con aporte de energía solar.

Estos elementos, que serán objeto de análisis, se pueden agrupar en cuatro:

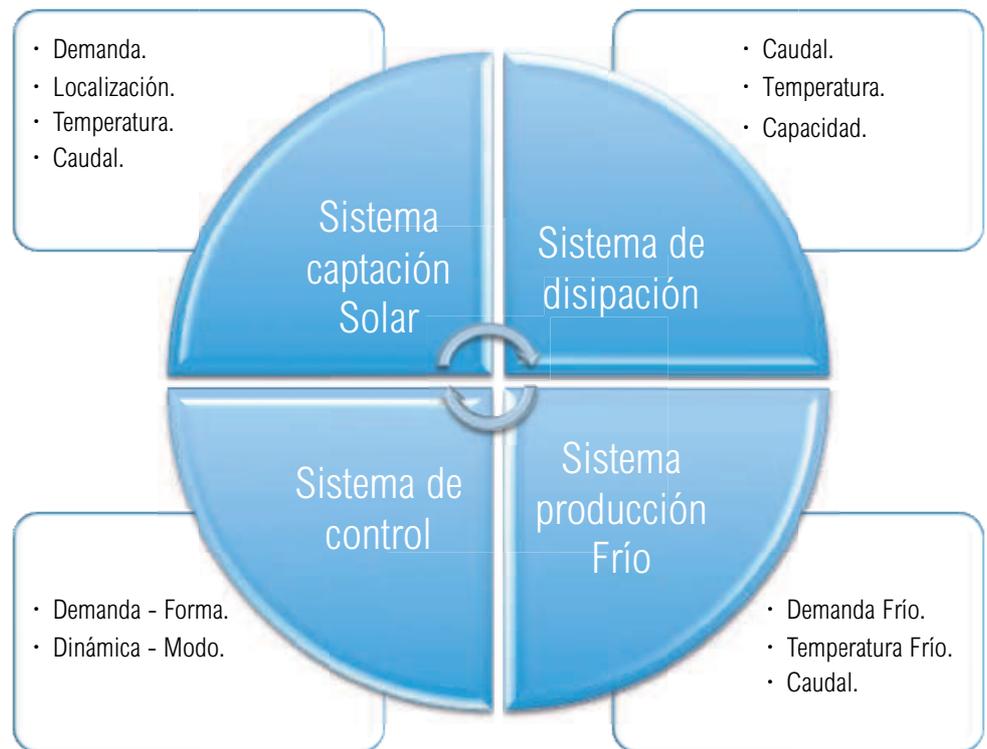
- sistema de captación solar,
- sistema de producción de frío,
- sistema de disipación y
- sistema de control.

El análisis de cada elemento por separado debe ayudar a comprender el problema, pero sólo la integración del conjunto hace de un sistema de frío solar algo que puede funcionar y ser rentable.

Pueden darse múltiples casos en los que cada elemento es factible, pero su conjunto no lo es en determinadas condiciones.



## Guía del Frío Solar



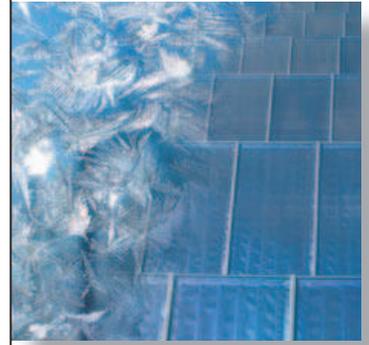
Cada sub-sistema se analiza de forma separada y en función de los parámetros relacionados con sus propias características de funcionamiento y las necesidades/parámetros del sub-sistema al que da servicio.

La primera preocupación del diseño de un sistema será la de contar con suficiente información sobre los distintos parámetros.

Como se podrá ver y descubrir, el proceso a partir de aquí supone interacciones para alcanzar un sistema factible (posteriormente deberá incorporarse la necesidad de que el sistema sea robusto).

Existe una interrelación entre todos los parámetros que determinan la viabilidad y posibilidades del proyecto.

Algunos de estos parámetros y sus relaciones son evidentes, como el caso de las temperaturas de trabajo y los caudales necesarios. Pero en otros casos, no lo son tanto, como el caso de la energía disponible (la generada por el sistema solar) y la demanda. Dado que el perfil de demanda puede ser tal que no permita aprovechar la energía captada. Por ello es necesario hacer un análisis detallado de estos elementos para determinar qué fracción de la



energía se aprovecha o en su defecto cómo hacer para aprovechar el máximo.

Cada modificación, en este caso, la incorporación de, por ejemplo, un depósito, supone incrementar el coste y la complejidad y repercutirá en el coste y la rentabilidad.

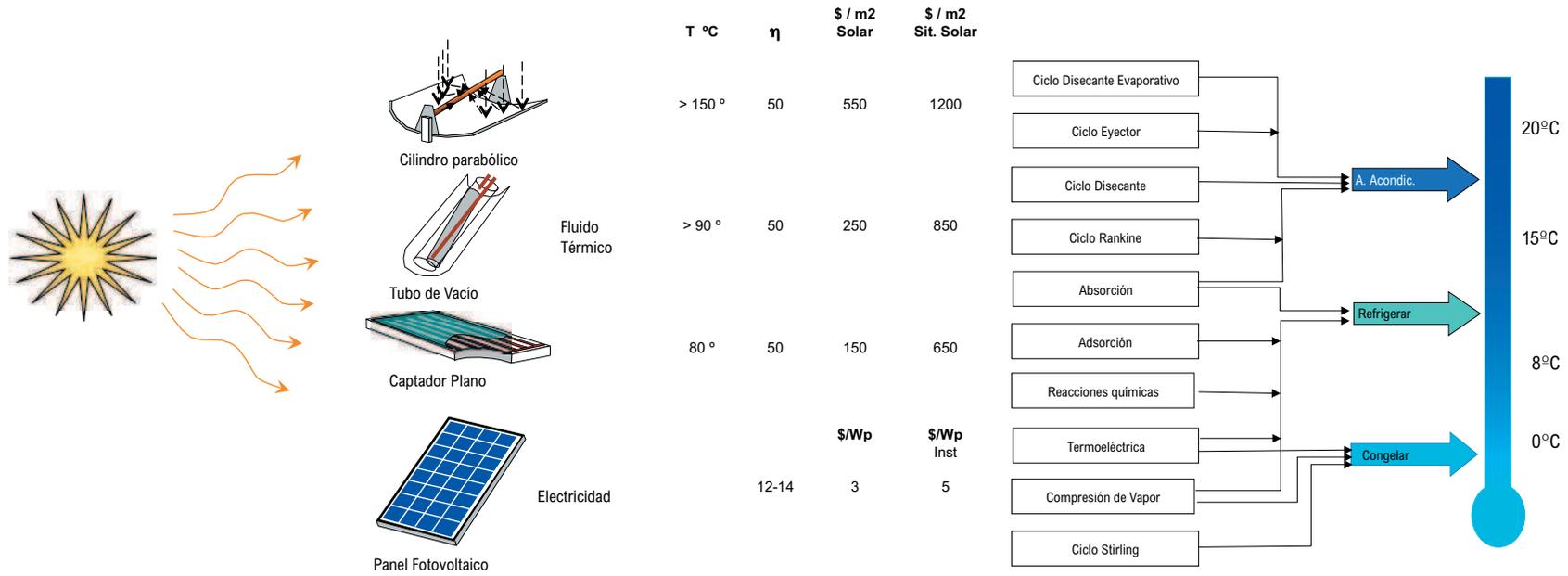
Aunque pueda considerarse que ciertas tecnologías de refrigeración solar están cerca de la madurez (la mayoría de las que se comentan en estas líneas), realmente no hay muchas tecnologías con el suficiente desarrollo y se han de considerar múltiples aspectos para comprender las posibilidades de su aplicación.

Pero la influencia del coste inicial es la mayor barrera para el uso generalizado y la maduración futura. Esto no significa que no sean viables incluso con los actuales costes. Significa que debe cuidarse al análisis.

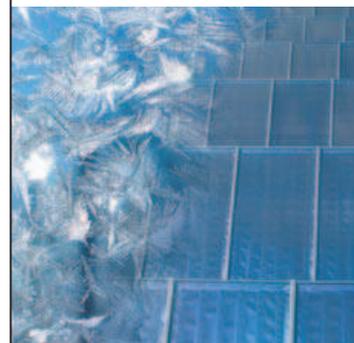
Dentro del concepto de madurez, es importante resaltar la diferencia entre el nivel técnico de las máquinas y el nivel comercial de aplicación.

Comoquiera que los sistemas de refrigeración solar se comparan en términos de su aplicación, desde el nivel de aplicabilidad y las consideraciones de los costes iniciales, las consideraciones del rendimiento neto de la instalación (considerando el sistema de refrigeración en su globalidad), durabilidad, coste de mantenimiento,...

En el cuadro que se adjunta se presentan diversos parámetros de los sistemas, con los costes finales de la tecnología que se aplica (desde la generación eléctrica / energética, pasando por el coste de los equipos solares y por los equipos de producción de frío).



**Figura 1.** Cuadro de costes. Parámetros de los sistemas, costes finales de la tecnología que se aplica (desde la generación eléctrica / energética, pasando por el coste de los equipos solares y por los equipos de producción de frío).



Cada equipo de frío está relacionado con alguna tecnología. Dichas tecnologías pueden variar en tamaño, tecnología solar óptima asociada, requerimiento de balance de sistema (aquellos equipos necesarios para que el sistema funcione, bombas, intercambiadores,...).

Asimismo debe considerarse que estos costes, presentados, son en base a las máquinas pequeñas, las adecuadas a cada tecnología.

En los sistemas fotovoltaicos, se han considerado los sistemas con un rendimiento del 12-14 % y con un coste final instalado de 4-5 €/Wp, por lo que cada metro cuadrado producirá 130 (promedio) W por cada 1.000 W/m<sup>2</sup>.

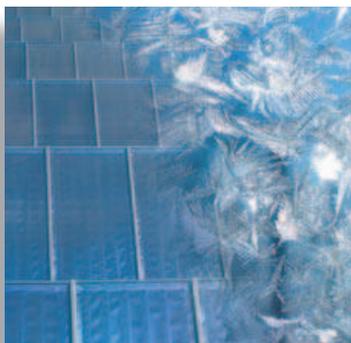
En el caso de sistemas térmicos, si consideramos un sistema solar térmico con captadores solares, podemos obtener la misma cantidad de energía, pero de forma general podemos considerar una eficiencia global del 50%.

Dependiendo de la temperatura de trabajo a la que necesitemos trabajar (debido a las necesidades del motor térmico al que acoplamos el sistema) debemos utilizar un tipo u otro de tipología de captadores solares térmicos. Ello no significa que debamos anclarnos a una tipología o un sistema determinado, sino que debemos conocer las limitaciones y la relación con las variables que se han comentado anteriormente.

Si precisásemos trabajar a 200 °C (por ejemplo para trabajar con motor energético con un rendimiento del 20%), posiblemente nuestra elección debería ser un sistema de tubo de vacío (tipo Sydney —vacío y CPC— o similar) con un coste del orden de 350 €/m<sup>2</sup> con un coste total de sistema del orden de 950 €/m<sup>2</sup>.

Considerando un sistema solar térmico trabajando con tubos de vacío sencillos, con una eficiencia del 50% cuando trabaja de forma continua con fluido a 150 °C, podremos pensar en un coste de 250 €/m<sup>2</sup> con un coste de instalación completa del orden de 800 €/m<sup>2</sup>.

Si se estuviera trabajando con un sistema de enfriamiento en el que fuese preciso trabajar a 90 °C, se podrían utilizar captadores planos eficientes y considerar un rendimiento neto de la instalación del 50% y se podría considerar un coste del orden de 150 €/m<sup>2</sup> y un coste global de la instalación en el orden de 650 €/m<sup>2</sup>.



## Guía del Frío Solar

Analizando el coste de sistemas solares térmicos trabajando con sistemas mecánicos, y comparándolos con los sistemas equivalentes a un sistema eléctrico convencional, se aprecia que no son más económicos ni en la inversión, ni en los costes de operación y mantenimiento. Solamente se logran diferencias cuando los costes de las energías utilizadas en el sistema convencional (habitualmente electricidad) alcanza niveles elevados o cuando la energía que se dirige al sistema de disipación puede ser utilizada (y por lo tanto considerada como rentable).

Estos detalles del coste de la energía y las posibilidades de uso de la energía que se envía a la disipación (energía de menor entalpia, pero con valor suficiente como para ser utilizado en procesos de ACS, precalentamiento...) son fundamentales para seleccionar las aplicaciones.

Piénsese en las múltiples aplicaciones en lugares soleados con una tarifa eléctrica superior al doble de la actual de España. Ello supone que en estos países existan soluciones con alta rentabilidad, que no lo son en España.

Continuando con las consideraciones de costes de tecnologías.

Los costes de las máquinas de producción de frío, como el caso de una máquina de absorción de una etapa pueden estar en el orden de 400 €/kW de frío.

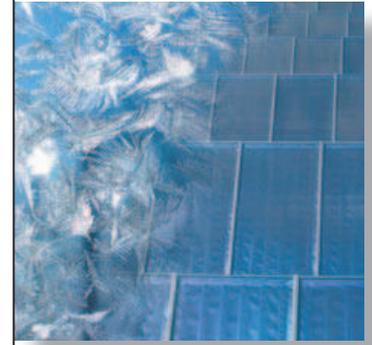
Una máquina de adsorción de una etapa (efecto simple) puede estimarse en el orden de 500 €/kW.

En el caso de las máquinas de enfriamiento con eyector, no se consideraran en este análisis, dado su bajísimo COP y su complicación en la utilización con sistemas solares (aunque posible y probable en el futuro).

Los sistemas desecantes costarían más que otros sistemas de sorción dado que necesitan mover un volumen elevado de aire y agua.

Los sistemas de absorción de doble efecto de LiBr-Agua así como los sistemas de adsorción de una etapa son comparables y sus costes totales están en el orden de 1.200 €/kW.

Los costes totales de una instalación de equipo de una etapa con LiBr-Agua puede ser tan bajo como: 1.000 €/kW.



Como se ha comentado anteriormente, la mayor barrera de uso de estas tecnologías vuelve a estar en el coste inicial de la inversión.

Las tecnologías de absorción y la de adsorción son comparables en rentabilidad y capacidad de tecnología.

Hoy las máquinas de adsorción son las más caras que las de absorción. La densidad energética de las de adsorción hacen preciso que los componentes sean mayores para la misma capacidad.

La gran parte de los costes globales de los sistemas de absorción o adsorción corresponden a los sistemas solares necesarios para su funcionamiento. Para poder rebajar la inversión inicial, es preciso que los sistemas puedan trabajar con captadores solares de menor precio (y normalmente con menor temperatura de funcionamiento).

Lo que es evidente, para analizar la posibilidad de lograr un sistema de frío solar global es que debe analizarse cómo se pueden rebajar los costes de los elementos y su relación con la mejora o empeoramiento de los rendimientos.

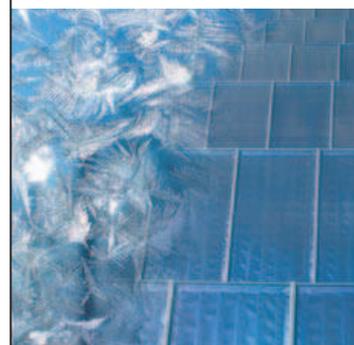
Este análisis de la cadena de valor de cada elemento, así como el análisis de los espacios en los que se pueden aplicar de forma rentable, debe ser el punto de origen desde donde desarrollar el mercado actual y el futuro.

Todo el esfuerzo de mejora o rentabilidad no se le puede solicitar a las máquinas, dado que ello obligaría a pensarse en el desarrollo de nuevos tipo de ciclos termodinámicos, pares de trabajo,... y ello nos coloca en un escenario muy complicado para el corto plazo.

Otras tecnologías de las que no se habla mucho en la actualidad, pero que continúan en progresión, son las células termoeléctricas (Peltier). Hoy se pueden conseguir sistemas con un coste final en el rango de 2.000 €/kW. Aunque el coste es elevado, para determinados casos y para aplicaciones remotas, potencias bajas... permiten resolver problemas que de otra forma no se lograría.

Al igual que ha pasado con el coste de los elementos electrónicos, dichos elementos seguirán bajando los costes y se irán acercado al umbral de rentabilidad de otras soluciones.





# 7

## FRÍO SOLAR EN EL SECTOR TERCIARIO O EN EL RESIDENCIAL COMUNITARIO

Los sistemas de refrigeración aprovechando la energía térmica obtenida de la captación de la radiación solar, aportan sin duda ventajas económicas para el usuario y de tipo ambiental para la sociedad en general. No obstante, en este tipo de proyectos es fundamental que se alcance una rentabilidad económica razonable que justifique la inversión y que a la vez sea cualitativamente igual a la refrigeración convencional ya que no cabe esperar que el usuario final renuncie a ella.

### 1. REFRIGERAR CON EL CICLO DE ABSORCIÓN

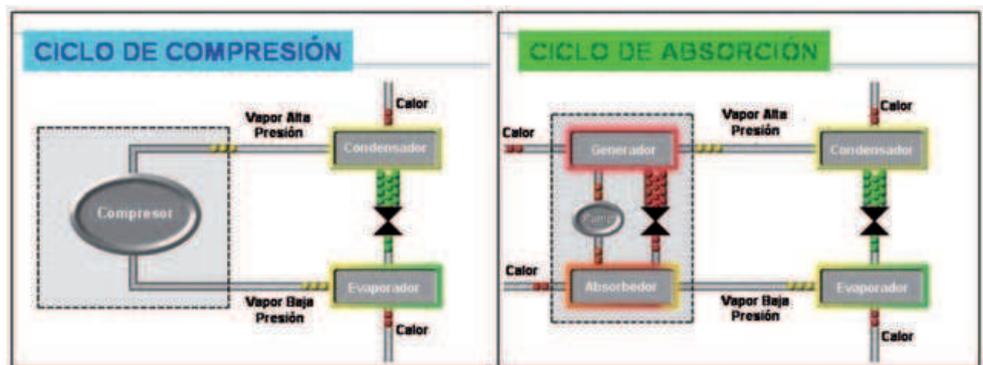
La técnica utilizada para lograr el efecto frigorífico a partir de energía térmica, solar o de otro origen, es principalmente la conocida como el ciclo de absorción. Como en el ciclo de compresión mecánica, se roba el calor del medio a enfriar mediante intercambio térmico a través de una superficie cuyo lado opuesto es una cámara a baja presión —**evaporador**— donde al entrar el fluido refrigerante se expande obteniendo el calor latente de vaporización de su entorno, o sea del medio a refrigerar. La diferencia es que la compresión del fluido refrigerante en vez de lograrse con medios mecánicos, el compresor, en el ciclo de absorción se obtiene calentando una solución líquida compuesta por el fluido **refrigerante** y otro agente llamado **absorbente**.

En el circuito de absorción, se aporta calor al recipiente denominado **generador** donde se halla la solución, logrando con ello que el fluido refrigerante se evapore separándose de la solución que consecuentemente queda más concentrada de absorbente. Como en el ciclo de compresión, el vapor separado en el generador y a más alta presión —en este caso como consecuencia de la ebullición— pasa a un



## Guía del Frío Solar

intercambiador de calor, el **condensador**, donde es condensado y en estado líquido es dirigido hacia el **evaporador**. Por su parte, la solución de la que se ha separado parte del fluido refrigerante, es encaminada hacia un recipiente contiguo al evaporador, el **absorbedor**, con quien comparte espacio y presión. La cualidad del absorbente, como su nombre indica, es su capacidad de absorber el fluido refrigerante cuando este está en fase gaseosa, a la salida del evaporador, integrándolo al estado líquido para volver al generador e iniciar de nuevo el ciclo.



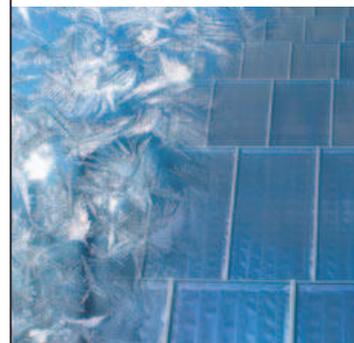
Por lo tanto se puede afirmar que existen grandes semejanzas entre los dos ciclos frigoríficos y que la diferencia se centra en la manera como se eleva la presión del refrigerante; en fase gaseosa en el ciclo de compresión y en líquida en el generador del de absorción. En el primer caso, el compresor aspira directamente el refrigerante en fase gaseosa procedente del evaporador, mientras que en el de absorción requiere un acompañante que lo integre en el líquido para poder ser calentado en el generador.



**Foto 1.**  
Ferdinand Carré.

Cabe destacar que el ciclo de absorción no es una novedad ya que fue descubierto y patentado por Ferdinand Carré en 1859, mucho antes del de compresión. Obtuvo el premio de la Exposición Universal de Londres de 1862 y en el 1875 el buque Paraguay, equipado con máquinas de absorción, transportó por primera vez carne congelada desde Buenos Aires hasta el puerto francés de Le Havre.

Existe otro proceso paralelo, denominado de adsorción basado en que el fluido refrigerante es adsorbido por un sólido para ser a continuación secado con calor provocando su evaporación, posterior



condensación y finalmente su evaporación en una cámara de baja presión donde, al igual que en los otros ciclos, extrae de su entorno el calor latente de evaporación, creando por lo tanto el efecto frigorífico. Dada su reducida presencia en el mercado del aire acondicionado por su dificultad para alcanzar bajas temperaturas, en este capítulo no trataremos de este tipo de máquinas.

## 2. CÓMO ABORDAR UNA INSTALACIÓN DE FRÍO SOLAR

Cuando un proyectista de instalaciones solares propone o se le pide una aplicación de refrigeración, generalmente para aire acondicionado, es menester que considere diversos aspectos relacionados con la utilización del frío para lograr que la instalación cumpla con las expectativas planteadas y sea económicamente viable.

Los dos principales obstáculos a salvar son: por una parte el carácter incierto de la radiación solar debido a factores estacionales y meteorológicos y por otra la no coincidencia horaria entre aquella y las necesidades de refrigeración del inmueble a climatizar.

En este segundo aspecto incidirán aspectos peculiares de cada edificio, que dependen de las propias ganancias internas de calor debidas entre otras a las aportaciones de la presencia humana, a la ventilación requerida, a la iluminación artificial o al uso de aparatos, factores todos ellos independientes del ciclo solar. Por lo tanto, la curva de esta demanda frigorífica a lo largo del día será sustancialmente distinta, por ejemplo, entre un restaurante, una biblioteca o un edificio residencial.

La primera de estas dificultades, la que se debe a la incerteza de la captación solar diaria, impone la necesidad de disponer de sistemas alternativos si se desea respetar el nivel de confort brindado por los equipos alimentados con energías convencionales.

Por esta razón, el diseño de instalaciones capaces de cubrir la totalidad de la demanda frigorífica a partir de energía solar térmica necesitan disponer en paralelo de un equipo convencional de igual capacidad frigorífica, lo que supone una alta inversión que raras veces se amortizará en un tiempo razonable, inferior a ocho años. Por lo tanto, casi siempre deberá considerar la posibilidad de cubrir con energía solar térmica, solo una parte de la demanda total de refrigeración. El objetivo será ahorrar energía.



## Guía del Frío Solar

La solución de cubrir los periodos de insuficiente radiación solar con calderas para calentar el agua del circuito de calor de la máquina de absorción no es recomendable ya que la eficiencia global de la caldera más la máquina de absorción sería por lo general inferior al 55% y por lo tanto contraria al objetivo que se persigue. Eventualmente, podría considerarse esta posibilidad si este apoyo térmico se realizara con una caldera de biomasa.

Por lo tanto, en la mayoría de los casos el diseño de la instalación estará enfocado a limitar la aportación de refrigeración solar a aquella que, aún no cubriendo la totalidad de la demanda, se requiere prácticamente de manera permanente a lo largo de todo el verano. Es pasar del objetivo ideal: *todo con frío solar*, a un objetivo razonable: *ahorrar con frío solar*; el resto se hará con medios convencionales.

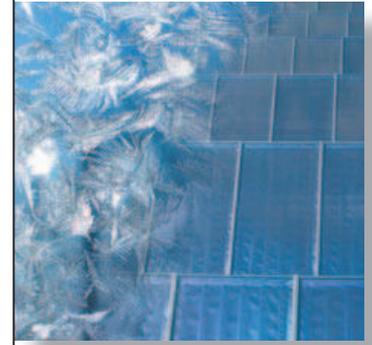
### 3. REFRIGERACIÓN PARCIAL O COMPLEMENTARIA

Esta estrategia requiere fundamentalmente tres condiciones:

1. Que la superficie a climatizar sea mínimamente grande (más de 1.000 m<sup>2</sup>).
2. Conocer el perfil de la demanda, para saber cuál es la demanda mínima de refrigeración requerida.
3. Que la temperatura del agua refrigerada sea la misma que la del circuito general alimentado con una enfriadora convencional, normalmente de 7 °C.

En la evaluación de la demanda frigorífica mínima, en el diseño y en la gestión de los caudales de los tres circuitos (agua caliente de origen solar, agua refrigerada y agua de enfriamiento) es donde cobra importancia el aspecto profesional del proyectista de clima.

El tercer aspecto, el de la temperatura del agua, es indispensable para poder compartir el circuito de agua que entra en los climatizadores entre 5 y 7 °C con el fin, no solo de enfriar, sino también para lograr la deshumectación del aire, condición indispensable para alcanzar el nivel de confort requerido del aire acondicionado. En consecuencia no pueden utilizarse otros tipos de enfriadoras empleadas algunas veces en aplicaciones llamadas de techo refrescante, que solo rebajan la temperatura



del agua a unos 17 °C porque el sistema está limitado por la temperatura de rocío debajo de la cual se producirían condensaciones y también porque les resulta difícil alcanzar más bajas temperaturas y que a medida que estas disminuyen su eficiencia se reduce drásticamente.

El elemento complementario de gran importancia es el dimensionado del almacenamiento de energía térmica en forma de agua caliente, para acumularla cuando la aportación solar es superior a la requerida por la máquina de absorción y poder utilizarla cuando inversamente esta sea inferior.

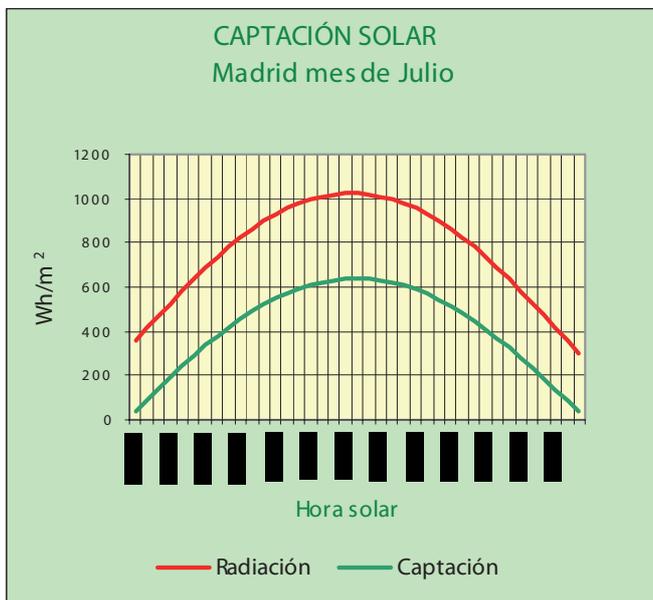
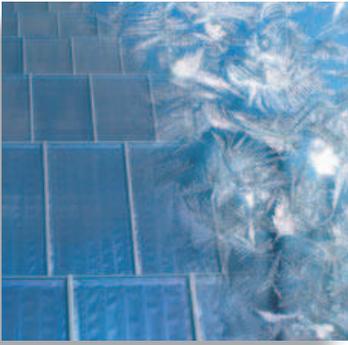


Figura 1.

Se puede considerar que un campo solar formado por captadores de características térmicas razonables<sup>1</sup>, orientados al sur con una inclinación de 34°, situados en la ciudad de Madrid, durante el mes de julio y entre las 7 y las 17 horas, recibirán una radiación solar de 7.890 Wh/m<sup>2</sup>/día, captando unos 4.038 Wh/día para alcanzar una temperatura nominal en el agua calentada de 88 °C. La radiación máxima a las 12:00 hora solar será de 1.022 Wh/m<sup>2</sup> lo que en ese momento nos permitirá captar, si no hay obstáculos meteorológicos, 640 Wh/m<sup>2</sup>.

La eficiencia frigorífica de una planta de absorción de simple efecto recibiendo el agua caliente a 88 °C, con entrada del agua del circuito

<sup>1</sup> Rendimiento óptico 84%, Coeficientes pérdida de calor  $k_1=3,36 \text{ W/m}^2/\text{K}$  y  $k_2=0,013 \text{ W/m}^2/\text{K}_2$ .



#### Guía del Frío Solar

de disipación del calor a 30 °C y refrigerando el agua a 7 °C con un  $\Delta t$  de 5 °C, es del 70% respecto a la energía térmica recibida con agua caliente. Consecuentemente, para obtener 1 kWh de agua refrigerada necesitaremos 1,43 kWh térmicos. Por lo tanto, a las 12:00 hora solar, se necesitarían 2,23 m<sup>2</sup> de captación para obtener la energía térmica necesaria.

No obstante, los 4.038 Wh captados durante el día, lo serán entre las 7:00 y las 17:00 h hora solar, es decir en un período de 10 horas, lo que significa que el valor medio a lo largo de estas horas será de 403,8 Wh/m<sup>2</sup>.

#### 4. EJEMPLO DE APLICACIÓN



**Foto 2.** Hotel IFA Continental. Las Palmas de Gran Canaria.

Supongamos una instalación de acondicionamiento de aire en un edificio tipo hotel o similar, cuya necesidad extrema de refrigeración es de 175 kWh que se obtiene mediante un equipo convencional de refrigeración por compresión de potencia equivalente y que ya está instalado. Se sabe también que la demanda mínima es del orden del 20% de la total, o sea unos 35 kWh.

Si se instala en serie con el retorno a la planta enfriadora de agua existente, un equipo de absorción de 35 kW accionado por agua caliente



de origen solar, estamos seguros que podrá funcionar permanentemente introduciendo en el sistema 35 kWh de refrigeración con agua a 7 °C mientras se aporte calor procedente de los captadores. Para hacer funcionar un equipo de absorción de 35 kW necesitaremos aportar un flujo constante de 8,6 m<sup>3</sup>/h de agua caliente a 88 °C con un salto térmico de 5 °C, lo que representa introducir en la máquina de absorción 70 kWh de calor para obtener los 35 kWh de capacidad frigorífica nominal.

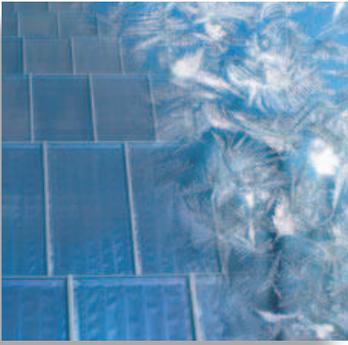


**Foto 3.** Hotel IFA Continental. Las Palmas de Gran Canaria.

Tomando como referencia el período de captación solar suficiente para alcanzar los 88 °C sin inversión térmica, o sea alrededor de 10 horas diarias, necesitaremos una potencia calorífica total de 500 kWh/día y por lo tanto será necesario instalar una superficie de captación de 123,8 m<sup>2</sup> que a razón de 4.038 Wh/día captados en cada m<sup>2</sup> de panel captador nos permitirá obtener el calor necesario.

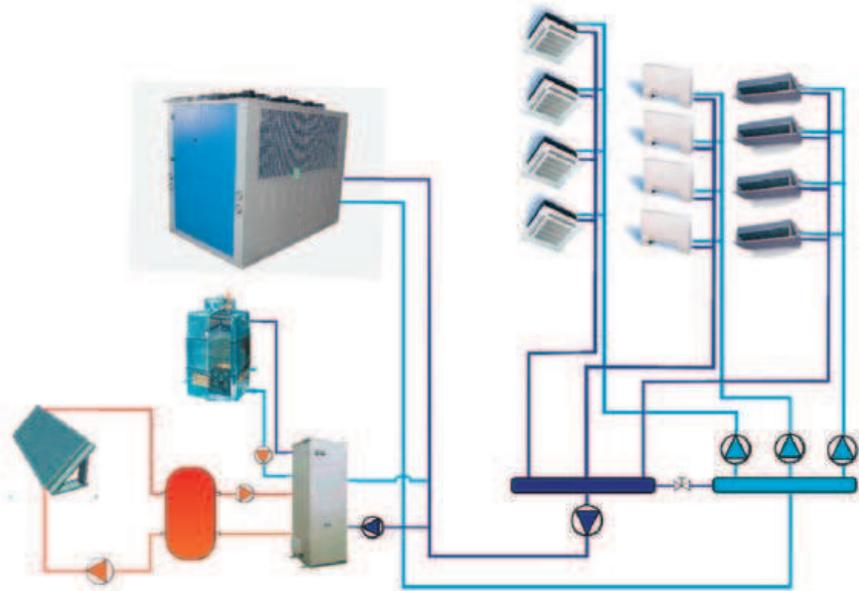
El ratio resultante es de 3,52 m<sup>2</sup>/kWh de frío, superior al normalmente considerado de 3 m<sup>2</sup>/kWh. Ello es debido a que en nuestro ejemplo la máquina de absorción funciona continuamente a plena potencia en vez de modular como en las instalaciones convencionales.

La curva de captación de calor del gráfico de la figura 1, indica que ya tendremos calor suficiente para poner la máquina en marcha a partir de las 9:00 hora solar y que dispondremos de energía suficiente para hacer-



## Guía del Frío Solar

La funcionar a plena potencia y sin interrupción hasta las 15:00 hora solar, produciéndose un superávit permanente de calor hasta esta hora, en que el exceso de calor habrá alcanzado los  $1.099 \text{ W/m}^2$  que habremos acumulado en un depósito para poder utilizarlo a partir de este momento. Si gestionamos correctamente este tampón térmico, se podrá continuar haciendo funcionar la planta a plena potencia hasta cerca de las 18:30 hora solar. La acumulación óptima para esta aplicación será de unos 63 litros por  $\text{m}^2$  de captador solar, o sea unos 7.800 litros en total.

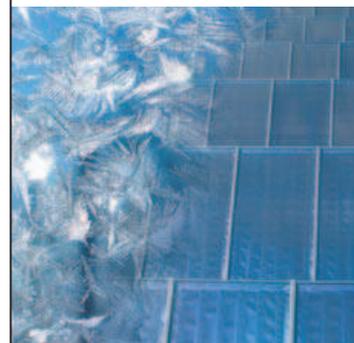


**Figura 2.** Esquema simplificado de una instalación de climatización con apoyo solar.

## 5. AHORRO DE ELECTRICIDAD Y EN EMISIONES DE $\text{CO}_2$

Con la instalación de esta planta enfriadora de agua por ciclo de absorción de 35 kW de capacidad frigorífica, se habrá ahorrado durante el período veraniego del orden de 40.000 kWh de refrigeración, que representan una reducción de consumo en la máquina convencional eléctrica de unos 15.000 kWh de electricidad. Ello significa que la máquina por ella misma, sin contar con la instalación que puede variar bastante de un lugar a otro ni el uso de los captadores solares en otras aplicaciones térmicas como la producción de ACS y/o calefacción, se amortiza en un plazo aproximado de dos años.

A este ahorro para el usuario, debe añadirse la reducción de emisiones de  $\text{CO}_2$  correspondientes a las que habría emitido la energía



eléctrica no utilizada, que en este caso y tomando como referencia la información del IDAE, puede suponer evitar que se arrojen a la atmósfera unos 9.700 kg de CO<sub>2</sub> durante los meses de verano.

## 6. LA DISIPACIÓN DEL CALOR

Toda instalación de refrigeración requiere que el calor robado al medio a refrigerar más el consumido para hacer funcionar el ciclo, sea extraído del mismo y disipado externamente. En el ciclo de compresión ello se efectúa a partir del condensador y también en el de absorción, si bien en este una parte debe eliminarse del absorbedor.

En ambos casos la disipación del calor es el punto más delicado del circuito y es fundamental asegurarse que se efectúa completamente ya que de lo contrario puede ser causa de averías e incluso de importantes daños en los equipos.

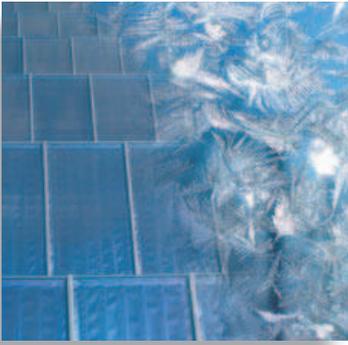
Existen dos formas de desprenderse de este calor sobrante: al aire o a un circuito de agua. Lo más eficiente es a un circuito de agua ya que en épocas de calor, cuando más se necesita la refrigeración, con el agua se obtienen temperaturas de enfriamiento más bajas y se mejora sensiblemente el rendimiento de los equipos. En este sentido se recomienda la consulta de la «*Guía técnica: torres de refrigeración*» publicada por el IDAE<sup>2</sup> que argumenta la conveniencia de la disipación por agua.

No obstante, en los últimos tiempos, se ha impuesto una tendencia en España en particular, a escoger la condensación por aire, en detrimento de la eficiencia de las instalaciones. Ello se justifica generalmente por evitar los riesgos de aparición de bacterias del tipo legionela en circuitos abiertos de enfriamiento evaporativo, debido a un deficiente mantenimiento en el tratamiento del agua.

En los equipos de absorción presentes en el mercado que utilizan en el ciclo una solución de agua (refrigerante) y bromuro de litio (absorbente), es necesario disipar el calor a temperatura máxima de 31 °C lo que prácticamente solo puede lograrse con agua. Igualmente, debe mantenerse una temperatura mínima de unos 24 °C para evitar que

---

2 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria. [www.idae.es](http://www.idae.es)



en determinadas circunstancias, al intercambiar calor con las zonas del circuito de absorción donde la solución está más concentrada, se produzca la cristalización del bromuro de litio que impediría la normal circulación de la solución y por lo tanto la interrupción del funcionamiento de la máquina, que requeriría la intervención de un especialista.

Para evitar este inconveniente, es necesario colocar una válvula de 3 vías de acción proporcional, con el by-pass hacia la aspiración de la bomba y la sonda en la tubería de entrada a la máquina del agua enfiada, para garantizar un caudal constante y temperatura variable entre 25 y 31 °C a la entrada de la planta de absorción y temperatura constante y caudal variable por el interior del equipo de disipación.

El agua para este circuito de enfriamiento, puede proceder de un acuífero o de un circuito cerrado que intercambie el calor con agua del mar donde ello sea posible y siempre utilizando intercambiadores de calor contruidos con materiales adecuados. Pero en la mayoría de los casos no se dispone de ninguno de estos medios y debe recurrirse a la instalación de una torre de disipación por evaporación.

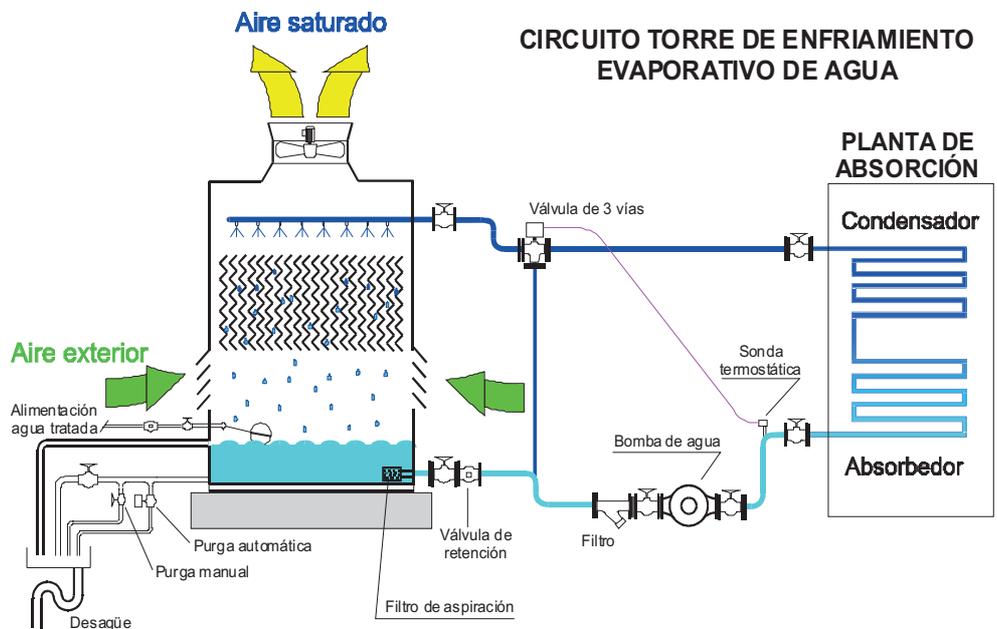
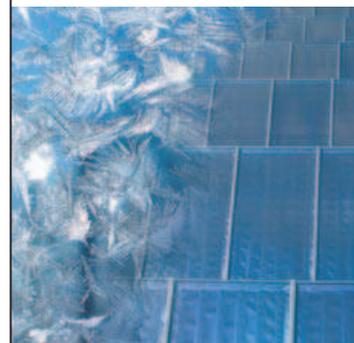


Figura 3. Disipación de calor con torre evaporativa de circuito abierto.

Para seleccionar e instalar la torre de enfriamiento, se recomienda tener muy en cuenta los siguientes aspectos:



1. Seleccionar de preferencia torres de circuito cerrado. Con ello se evitara n depósitos salinos y ensuciamiento de los circuitos interiores (condensador y absorbedor) de la máquina de absorción.
2. Escoger el emplazamiento totalmente al aire libre, salvo cuando se trata de equipos con ventiladores centrífugos con impulsión de aire conducida. Evitar obstáculos que puedan provocar que el aire caliente y saturado descargado por el ventilador pueda ser de nuevo aspirado por el mismo.
3. Seleccionar la torre para disipar la totalidad del calor especificado por el fabricante del equipo, dejándose un margen de seguridad de un 10% para cubrir pérdidas de eficiencia por ensuciamiento del relleno de intercambio térmico. El calor a disipar es la suma del que se aporta para hacer funcionar el equipo más el que se extrae del agua refrigerada como resultado del efecto frigorífico. Con este tipo de enfriadoras de simple efecto, el calor a disipar será aproximadamente igual a la capacidad frigorífica por 2,43 más el 10% de seguridad.
4. Cerciorarse de que la selección se realiza en base a la temperatura húmeda más alta previsible en el lugar de la instalación.
5. Seleccionar el equipo de bombeo de manera que no se reduzca el caudal de agua recomendado por el fabricante del equipo. Calcular cuidadosamente la presión a vencer teniendo en cuenta todas las resistencias del circuito: la propia torre de enfriamiento y la máquina de absorción (ambas representan una pérdida de carga bastante importante), más la válvula de retención, el filtro, la válvula de 3 vías (consultar el Kv según el fabricante), las válvulas y las tuberías.
6. Para el transporte del agua utilizar preferentemente tuberías de polipropileno o PVC, de sección adecuada.
7. Situar siempre la torre por encima de la máquina de absorción y la bomba suficientemente baja respecto al nivel de la balsa de la torre, para que esté suficientemente encebada y la presión sobre la aspiración de la bomba sea igual o superior al NPSH requerido por esta.
8. Colocar una válvula de retención para evitar que al pararse la bomba, parte de la instalación se vacíe en la balsa de la torre



## Guía del Frío Solar

provocando una innecesaria pérdida de agua, con riesgo de desbordamiento.

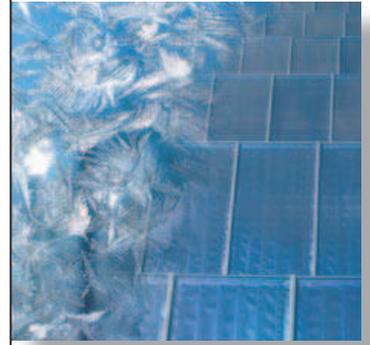
9. Asegurar una renovación de agua suficiente para evitar la concentración de sales. Lo más adecuado es provocar la purga o desagüe desde la balsa de la torre mediante una válvula solenoide controlada mediante un *conductivímetro* que mida en continuo la conductividad del agua, recomendándose en general que ésta no supere los  $800 \mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
10. Disponer igualmente de un sistema de tratamiento del agua de alimentación del sistema de manera que se garantice su calidad de acuerdo con las instrucciones del fabricante de la máquina de absorción.

Por último, cabe señalar la posibilidad en algunos casos de aprovechar parte del calor desechado a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  para precalentar el agua destinada a ser calentada para usos sanitarios o la del vaso de una piscina. En ambos casos será necesario colocar un intercambiador de calor en el circuito de conducción del agua caliente entre el condensador de la máquina de absorción y la entrada al disipador de calor, para separar el circuito de enfriamiento de la máquina del de aprovechamiento del calor.

## 7. RESUMEN DE LAS VENTAJAS OFRECIDAS POR LAS INSTALACIONES DE FRÍO SOLAR

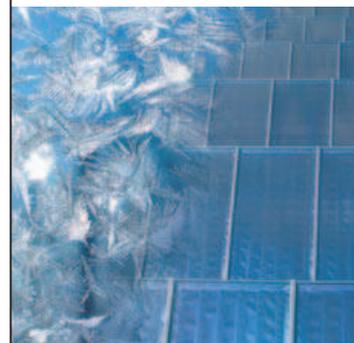
Como resumen de lo anteriormente expuesto, podríamos concluir que la utilización de una planta enfriadora de agua por ciclo de absorción que utilice la energía térmica procedente de captadores solares, siempre que se instale adecuadamente, ofrece las siguientes ventajas:

- a) Permite disipar provechosamente el exceso de calor del campo de captadores solares térmicos en verano.
- b) Instalada en serie con el retorno de una instalación convencional de acondicionamiento de aire y siempre que su capacidad frigorífica no sea superior a la demanda mínima frigorífica prevista, permite realizar un sustancial ahorro y su rápida amortización.



- c) Reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en la misma proporción que la electricidad que ahorra, pudiendo estimarse esta reducción en unos 230 g de CO<sub>2</sub> por kW de refrigeración obtenido.
- d) Utiliza energía verde, renovable y por lo tanto reduce nuestra dependencia de la importación de combustibles fósiles.
- e) Puede utilizarse parte del calor a disipar para calentar el vaso de una piscina o para precalentar el agua de alimentación del sistema de producción de agua caliente para usos sanitarios.
- f) Requiere escasos cuidados de mantenimiento aunque sí algunas revisiones preventivas para garantizar el rendimiento.
- g) Al carecer de piezas móviles, su eficiencia permanece constante en el tiempo y le concede una larga longevidad, estimada en más de 20 años, llegando fácilmente a los 30.





# 8

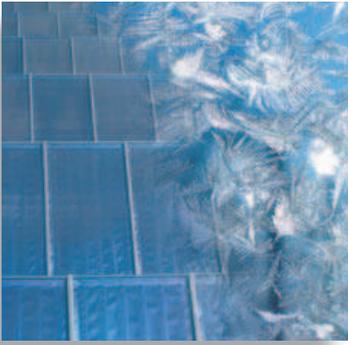
## POTENCIAL DE MERCADO DEL FRÍO SOLAR

La climatización, tanto para calefacción como para refrigeración, con energía solar térmica ha sido considerada el «gigante dormido» de todas las energías renovables. En la actualidad se está hablando de tecnologías híbridas que combinan los sistemas convencionales con algún sistema de energía renovable pero no se pueden considerar como soluciones definitivas para reducir drásticamente el consumo energético y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En los últimos años se han promocionado activamente las energías renovables para la generación de electricidad (energía eólica, energía fotovoltaica principalmente), la energía solar térmica para el consumo de ACS de los edificios, la generación de bio carburantes para un transporte más sostenible y últimamente la micro generación, la energía geotérmica y la biomasa como inicio de una promoción mucho más activa de la Energía Renovable para Climatización (calefacción y refrigeración), pero la verdad es que no son lo suficientemente activas para promocionar este gigante aún dormido que va dirigido el gran consumo de los edificios (hay que recordar que el consumo energético de los edificios es entre el 40-50%).

Los sistemas de refrigeración solar tienen la gran ventaja de que se utilizan cuando coinciden los niveles máximos de demanda y de producción, ya que las necesidades de climatización de un edificio se producen en la época de más radiación solar, hay que tener en cuenta también, que la energía solar térmica utilizada para refrigeración descongestiona la red de distribución eléctrica y extrae un mayor rendimiento de las instalaciones solares, a menudo infra-aprovechadas.

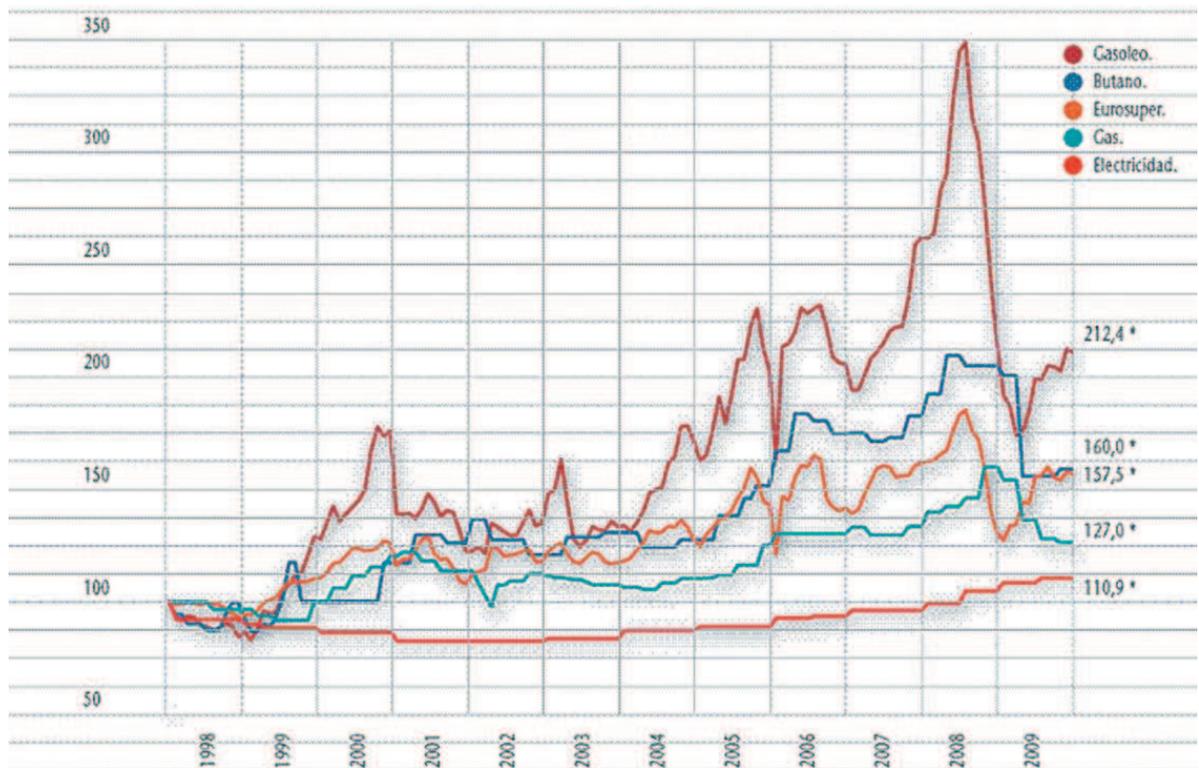
Según datos del Banco de España, España tenía un parque de 26.230.579 de viviendas a finales del año 2008, sobre un total de 16,90 millones de familias españolas. Según el IDAE, el consumo de energía



## Guía del Frío Solar

de los hogares es atribuible en un 56,25% al consumo de combustible del vehículo (o vehículos) y el resto (43,75%) a los consumos de la vivienda, porcentaje que se distribuye entre los siguientes conceptos: climatización (47%), seguido por el agua caliente (20%), electrodomésticos (16%), cocina de alimentos (10%) e iluminación (7%). Es lógico pensar que estos porcentajes se irán aumentando por nuestra propia búsqueda del confort, ya no solo en calefacción sino por la climatización.

La combinación de crecimiento demográfico, desarrollo económico e industrialización en el mundo significa que el consumo mundial de energía continuará aumentando. Estas tendencias, sumadas al mantenimiento del empleo de combustibles fósiles para producir energía primaria, también significan que las emisiones de gases de invernadero continuarán aumentando. Aun con medidas estrictas de reducción, las proyecciones actuales no muestran una estabilización de las emisiones hasta aproximadamente el año 2050.

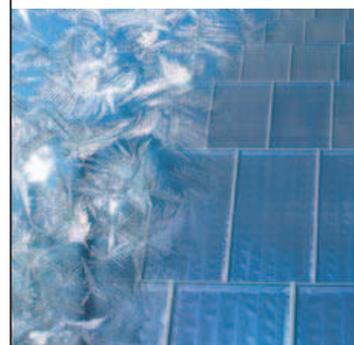


**Figura 1.** Evolución del precio de la electricidad y de otros productos energéticos para usos domésticos en España.

**Fuente:** UNESA (Avance 2009).

(\*) Datos a 14 de Diciembre de 2009.

Fuentes utilizadas: • Tarifa eléctrica último recurso: UNESA. • Tarifa de Último Recurso 2 de gas natural: Revista Hidrocarburos del Mº de Economía y BOE. • Precio Bombona de Butano: Revista Hidrocarburos del Mº de Economía y BOE. • Precio Eurosuper: Revista Hidrocarburos del Mº de Economía y UE Bulletin Petrolier (desde septiembre 2000). • Precio Gasóleo Calefacción: UE Bulletin Petrolier.



Una de las cuestiones políticas clave en el sector eléctrico español sigue siendo la diferencia creciente entre los ingresos de la tarifa regulada y los recios en el mercado mayorista. Este déficit tarifario está aumentando significativamente durante los últimos años.

En este contexto, la Comisión Nacional de Energía (CNE) ha estado recomendando un incremento significativo de las tarifas reguladas y que desde hace dos años vemos se van cumpliendo sus recomendaciones con aumentos constantes de las tarifas eléctricas, situación que seguirá con esa tendencia alcista.

Entre enero y mayo de 2010, la construcción en España descendió un 18,9% en términos interanuales. Durante el primer trimestre, las viviendas iniciadas se redujeron un 20% y las terminadas un 37% con respecto al mismo periodo del año anterior. Pero esta ralentización no deja que se sigan vendiendo e instalando sistemas de climatización en todos los sectores del mercado, a pesar de que el sector de climatización sea un mercado maduro tiene un volumen de ventas significativo.

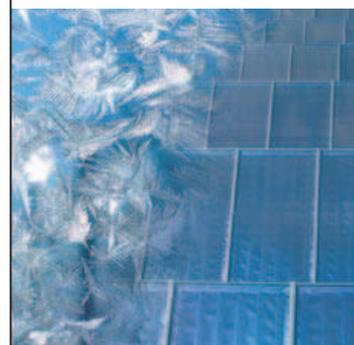
**Tabla 1.** Volumen de ventas del sector de la climatización. Fuente AFEC.

Sector	Tipo	2009	2008
Máquinas	Terciario/Industrial	182,05	274,82
	Comercial	264,75	320,85
	Residencial/Doméstico	368,07	481,61

Datos en millones de euros.

En estos años de recesión económica el sector de climatización se está reestructurando y se está adaptando a las nuevas tendencias de mercado, sobre todo a las referentes de eficiencia energética, con nuevos equipos con mejores rendimientos, pero todavía no son suficientes. Es hora de promover la integración de la energía renovable con los sistemas de climatización convencionales. En el mercado ya existen tecnologías para ello, y está claro que el encarecimiento de la energía poco a poco hará que estas tecnologías tengan más protagonismo en el mercado.





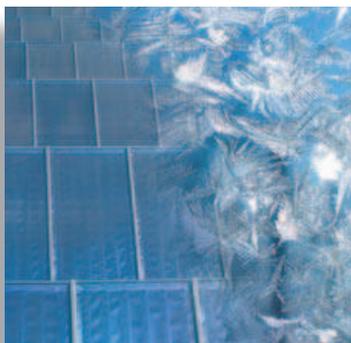
# 9

## AYUDAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID

### 1. FOMENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

- Convocatoria anual.
- Convocatoria de 2010: Orden de 11 de junio de 2010, del Consejero de Economía y Hacienda (BOCM de 24.06.10).
- Gestión:  
Dirección General de Industria, Energía y Minas.
- Todo tipo de beneficiarios.
- Actuaciones subvencionables y cuantía de las ayudas:
  - Solar térmica (excepto piscinas privadas e instalaciones obligatorias por Código Técnico Edificación u Ordenanzas municipales): 375 €/m<sup>2</sup> para refrigeración y 260 €/m<sup>2</sup> para el resto.
  - Solar fotovoltaica no conectada a red: 3,5 €/Wp con acumulación y 3 €/Wp sin acumulación.
  - Biomasa térmica y residuos: 30%.
  - Geotérmica: 30% del coste de referencia.
  - Instalaciones mixtas: cuantía proporcional.

Para Ayuntamientos de menos de 10.000 habitantes, la cuantía de la subvención será del 50% de la inversión subvencionable.
- Cuantía máxima de las ayudas:  
70% de la inversión en todos los casos, y
  - 200.000 € para personas físicas.



### Guía del Frío Solar

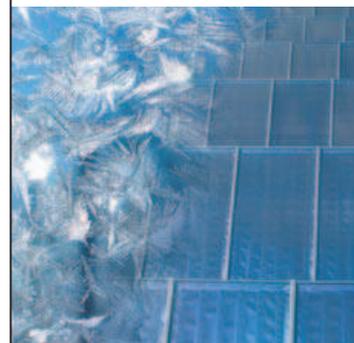
- 200.000 € en tres años para empresas.
- 300.000 € para resto de beneficiarios.
- Dotación presupuestaria 2010: 2.350.000 €.
- Plazo de presentación de solicitudes:  
Un mes a partir de la publicación en el BOCM.
- Período de realización de la inversión (convocatoria 2010):  
Desde 15 de octubre de 2008 hasta 20 de noviembre de 2010.

## 2. FOMENTO DEL AHORRO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

- Convocatoria anual.
- Convocatoria de 2010: Orden de 15 de noviembre de 2010, del Consejero de Economía y Hacienda (BOCM de 10.12.10)
- Todo tipo de beneficiarios.
- Actuaciones subvencionables y cuantía de las ayudas:
  - Auditorías energéticas en sectores industriales:
    - 50% de la inversión subvencionable.
    - Máximos:

CONSUMO ENERGÍA FINAL (tep/año) POR ESTABLECIMIENTO	VALOR MÁXIMO NETO DE AYUDA (€)
> 60.000	22.500
> 40.000 - 60.000	18.000
> 20.000 - 40.000	15.000
> 10.000 - 20.000	12.750
> 6.000 - 10.000	10.500
> 4.000 - 6.000	9.000
< 4.000	7.500

- Sustitución de equipos e instalaciones industriales en empresas no pymes:

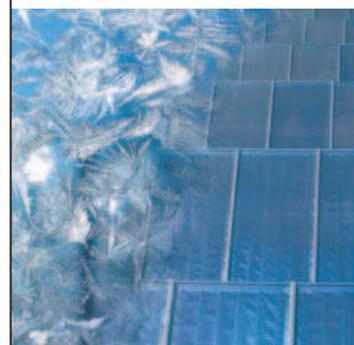


- 22 a 30% de la inversión subvencionable.
- Mejora de la eficiencia energética de instalaciones térmicas de edificios existentes:
  - 22% de la inversión subvencionable.
  - Auditorías 50% condicionado a ejecución.
- Mejora de la eficiencia energética de instalaciones de iluminación interior de edificios existentes:
  - 22% de la inversión subvencionable.
  - Máximo: 10.000 € viviendas y 50.000 € otros usos.
  - Auditorías 50% condicionado a ejecución.
- Renovación de instalaciones de alumbrado público exterior existentes, incluyendo sustitución de tecnología actual en semáforos y en rótulos luminosos por tecnología LED:
  - 40% de la inversión subvencionable, con cumplimiento de los ratios económico-energéticos establecidos.
- Estudios, análisis de viabilidad y auditorías de instalaciones de alumbrado exterior existentes:
  - 50% de la inversión subvencionable.
  - Máximo: 50.000 € por proyecto para municipios >100.000 habitantes y 25.500 € resto.
- Auditorías energéticas en cogeneraciones existentes en empresas industriales o de sector terciario:
  - 50% de la inversión subvencionable.
  - Máximo: 9.000 €
- Plantas de cogeneración de alta eficiencia en los sectores no industriales:
  - 10% de la inversión subvencionable.
  - Máximo: 200.000 €, con cumplimiento de determinados ratios económico-energéticos



### Guía del Frío Solar

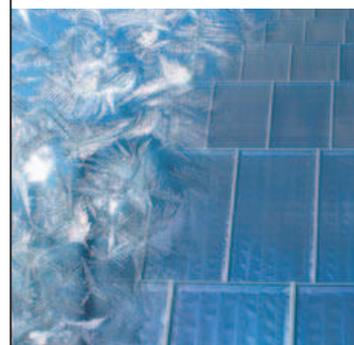
- Plantas de cogeneración de pequeña potencia:
  - 10 a 30% de la inversión subvencionable.
- Cuantías máximas:
  - Personas físicas: 200.000 €.
  - Empresas, empresarios autónomos, instituciones sin ánimo de lucro y otras entidades que desarrollen una actividad económica: 200.000 € en tres años (regla de «mínimis»).
  - Resto de beneficiarios: 500.000 €.
- Dotación presupuestaria 2010: 4.455.727 €.
- Plazo de solicitudes: 2 meses a partir de la publicación en el BOCM.
- Plazo de ejecución: del 1 de enero del año correspondiente al 30 de septiembre del año siguiente.



# 10 PROYECTOS EMBLEMÁTICOS

– Ahorro con frío solar en una vivienda unifamiliar.....	155
– Ahorro con frío solar en una oficina.....	159
– Instalación de frío solar en edificio de oficinas ubicado en Almería.....	163
– Banco de Pruebas de Frío Solar de Gijón (BPFSG).....	171
– Edificio de producción vegetal refrigerado con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción.....	177
– Hotel refrigerado con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción.....	181
– Industria embotelladora de agua, refrigerada con plantas enfriadoras de agua por ciclo de absorción.....	185





## AHORROS CON FRÍO SOLAR EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR

A continuación se muestran los datos más relevantes de un proyecto real de frío solar en una vivienda unifamiliar.

### 1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO

Tipo de instalación: **Vivienda Unifamiliar**

Localidad: **Málaga**

### 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

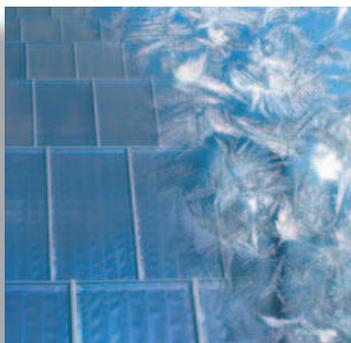
Datos del edificio			
Área a calefactar/refrigerar (m <sup>2</sup> )	180	Ganancias Internas (kW)	0,7
Coef. de Pérdidas por Transmisión (W/K)	289	Renovaciones de aire (ach)	0,8
Masa térmica (MJ/K)	45	Número de Personas	4
Temperatura de Consigna para Enfriadora (°C)	25	Tª de Consigna para Calefacción (°C)	21
Temperatura de Consigna para Frío Solar (°C)	22		

Número de máquinas ClimateWell	
ClimateWell Solar Chiller	1

Fuente de Calor	
Tipo de Fuente de Calor	Solar
Área de Apertura (m <sup>2</sup> )	34
Modelo	Plano Absorbedor Selectivo
Inclinación (°)	30
Orientación (°)	-15

Disipación 1	
Piscina Exterior	1
Área (m <sup>2</sup> )	32,0
Volumen (m <sup>3</sup> )	48,0

Sistema de Distribución		Intercambiadores	
Tipo	Suelo Radiante	Intercambiador de Distribución (kW)	10
Coef. Transferencia de Calor (W/K)	720	Intercambiador 1 (kW)	8
Caudal de la Distribución (kg/hr)	1.500	Intercambiador 4 (kW)	30



## Guía del Frío Solar

Agua Caliente Sanitaria (ACS)	
Consumo ACS (L/día)	180
Temperatura de ACS (°C)	45

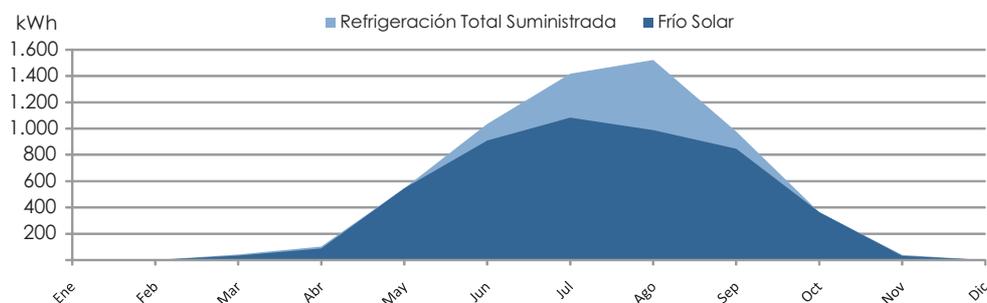
Acumulación Solar	
Volumen de ACS (m³)	0,2
Volumen de Calefacción (m³)	0,8

## 3. DATOS ENERGÉTICOS

Resultados Anuales con ClimateWell				
	Calefacción	ACS	Refrigeración	TOTAL
Energía Renovable Entregada (kWh)	5.774	2.199	4.891	12.864
Energía Auxiliar Entregada (kWh)	2.237	19	1.150	3.406
Emisiones de Dióxido de Carbono (kg)	607	5	615	1.227
Energía Térmica Equivalente (kWh)	3.195	27	1.917	5.139

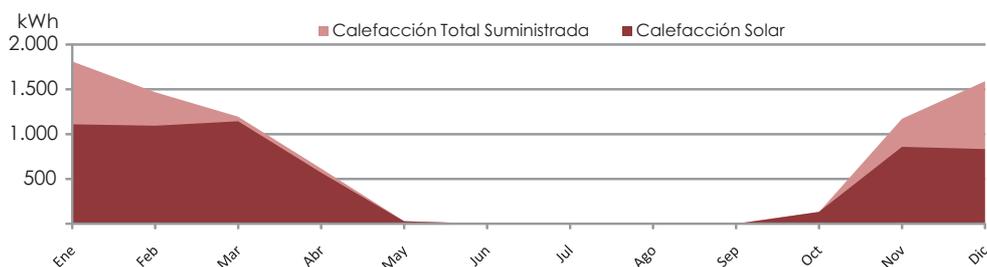
### 3.1. Refrigeración

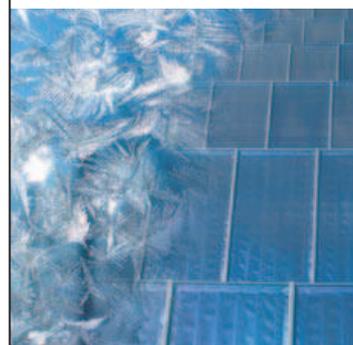
El sistema ClimateWell cubre el 81% de sus necesidades de frío.



### 3.2. Calefacción

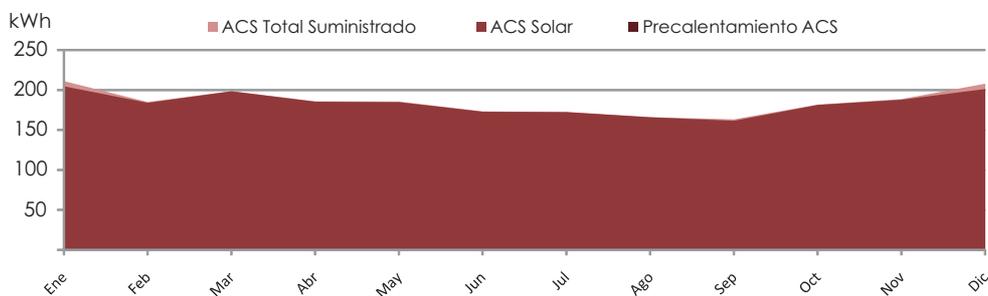
El sistema ClimateWell cubre el 72% de sus necesidades de calefacción.



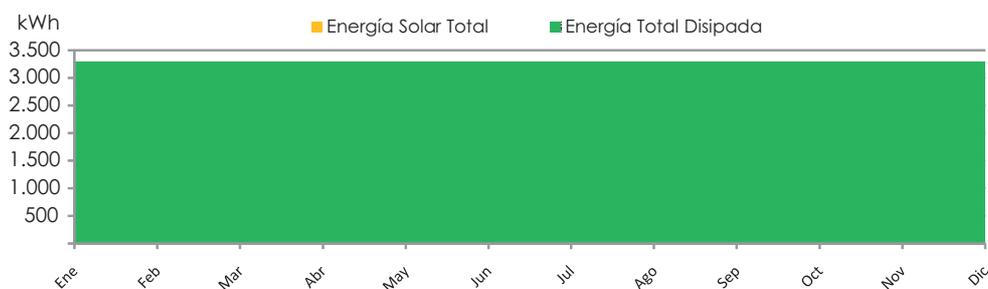


### 3.3. Agua Caliente sanitaria (ACS)

El sistema ClimateWell cubre el 99% de su demanda de ACS.



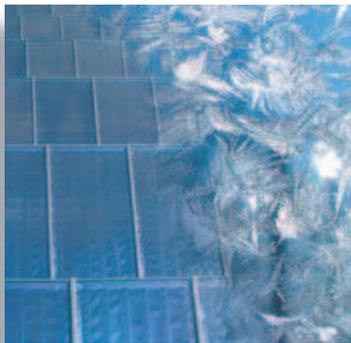
### 3.4. Energía Solar y Energía Disipada



## 4. CONSIDERACIONES

Para asegurar el aporte de energía desde el campo solar se debe tener en consideración las pérdidas por orientación, inclinación y sombras producidas por edificios o elementos cercanos.

Un factor importante a conocer y controlar es la humedad relativa de la zona para valoración de integración de equipos deshumidificadores o de una combinación de equipos. En todo proyecto de climatización se debe diferenciar y conocer las cargas sensibles y latentes para elegir la mejor opción de climatización o la combinación más adecuada. En este caso se optó por una combinación de dos sistemas de distribución cada uno con su equipo generador de frío y regulados mediante un sistema de control centralizado. Por un lado la máquina de absorción con suelo radiante y por otro una enfriadora aire-agua trabajando a fan-coils. Asegurando de esta manera el confort tanto en temperatura como en humedad de los usuarios.



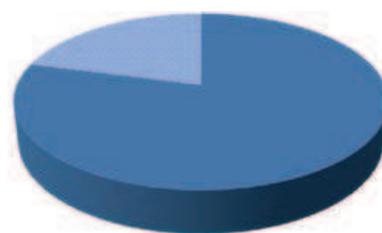
## 5. CONCLUSIONES

Resumen		
	Energía Ahorrada (kWh)	Reducciones (%)
Refrigeración	4.891	81%
Calefacción	5.774	72%
Agua Caliente Sanitaria	2.199	99%
<b>Total</b>		<b>79%</b>

Cobertura ClimateWell: 79%

Sistema Auxiliar: 21%

Cobertura energética



■ Cobertura ClimateWell  
■ Sistema Auxiliar

### 5.1. Impacto Medioambiental

Con este sistema se ahorran 4.778 kg anuales de dióxido de carbono, que es el equivalente de 2.053 litros de gasolina al año.



Ahorra

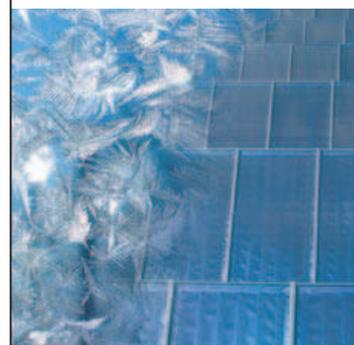
4.778 kg



=

2.053 L





## AHORROS CON FRÍO SOLAR EN UNA OFICINA

A continuación se muestran los datos más relevantes de un proyecto real de frío solar en una oficina.

### 1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO

Tipo instalación: **Oficina**

Localidad: **Valencia**

### 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Datos del edificio			
Área a calefactar/refrigerar (m <sup>2</sup> )	550	Ganancias Internas (kW)	3,30
Coef. de Pérdidas por Transmisión (W/K)	882	Renovaciones de aire (ach)	1,50
Masa térmica (MJ/K)	221	Número de Personas	60
T. <sup>a</sup> de Consigna para Calefacción (°C)	21	T. <sup>a</sup> de Consigna para Refrigeración (°C)	24

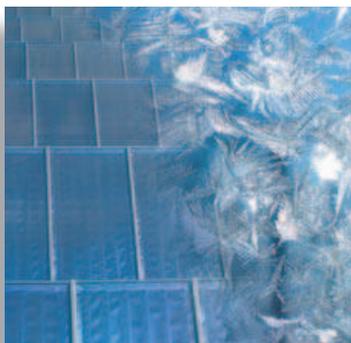
ClimateWell	
ClimateWell Solar Chiller	1

Fuente de Calor 1	
Tipo de Fuente de Calor	Solar
Área de Apertura (m <sup>2</sup> )	45
Modelo	Plano Alto Selectivo
Inclinación (°)	30
Orientación (°)	0

Disipación 1	
Torre de Refrigeración	
Potencia del Ventilador (kW)	0,30
Volumen de Recirculación (m <sup>3</sup> )	0,16
Temperatura de Consigna (°C)	28,0

Sistema de Distribución	
Tipo	Inductores
Coef. Transferencia de Calor (W/K)	900
Caudal de la Distribución (kg/hr)	2.060

Acumulación Solar	
Volumen de Calefacción (m <sup>3</sup> )	2,5



### 3. DATOS ENERGÉTICOS

Resultados Anuales con ClimateWell				
	Calefacción	ACS	Refrigeración	TOTAL
Energía Renovable Entregada (kWh)	4.083		10.185	14.269
Energía Auxiliar (kWh)	4.734		26.872	31.606
Emisiones de Dióxido de Carbono (kg)	1.691		14.363	16.054
Demanda de Energía Primaria (kWh)	6.763		44.787	51.550

#### 3.1. Refrigeración

El sistema ClimateWell cubre el 27% de sus necesidades de frío.



#### 3.2. Calefacción

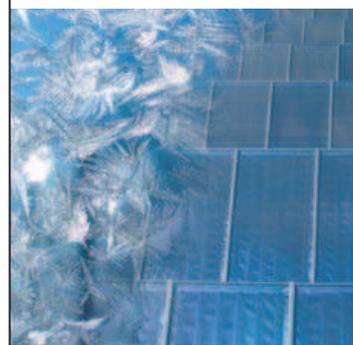
El sistema ClimateWell cubre el 46% de sus necesidades de calefacción.



### 4. CONSIDERACIONES

Nuevamente, por las condiciones climáticas de la zona y el tipo de edificio es muy importante conocer las cargas energéticas para valorar la mejor opción de climatización tanto técnica como económicamente.

Como sistema de distribución de frío se ha optado por el sistema ya instalado de inductores que permiten trabajar a temperaturas altas



para frío, mejorando de esta manera el rendimiento de la máquina de absorción.

El sistema de frío solar se planteó para cubrir una demanda energética base de manera que se aprovechara toda la energía renovable del sistema, siendo imprescindible la integración con sistemas de frío y calor convencionales para asegurar el confort de los usuarios.

Al ser un edificio de oficina, el consumo de agua caliente sanitaria es muy bajo por lo que se consideró hacer una instalación independiente para este fin.

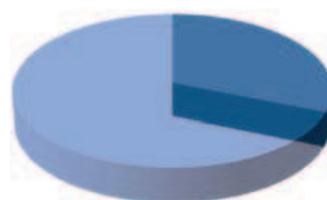
## 5. CONCLUSIONES

Resumen		
	Energía Ahorrada (kWh)	Reducciones (%)
Refrigeración	10.185	27%
Calefacción	4.083	46%
Agua Caliente Sanitaria		—
<b>Total</b>		<b>31%</b>

Cobertura ClimateWell: 31%

Sistema Auxiliar: 69%

Cobertura energética



■ Cobertura ClimateWell  
■ Sistema Auxiliar

### 5.1. Impacto Medioambiental

Con este sistema se ahorran 6.902 kg anuales de dióxido de carbono, que es el equivalente de 2.966 litros de gasolina al año.



Ahorra

6.902 kg



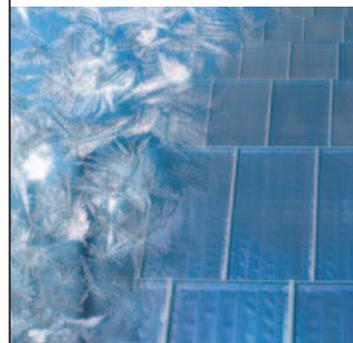
=

2.966 L





## INSTALACIÓN DE FRÍO SOLAR EN EDIFICIO DE OFICINAS UBICADO EN ALMERÍA



### 1. INTRODUCCIÓN

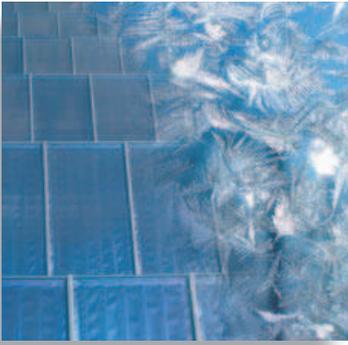
Este artículo proporciona una visión sobre los sistemas de refrigeración solar integrados en un edificio de oficinas utilizado por investigadores en la Plataforma Solar de Almería. Los sistemas implementados combinan técnicas de enfriamiento solar tanto activas como pasivas para reducir al mínimo el consumo energético de los sistemas de climatización, ventilación y calefacción (HVAC de sus siglas en inglés), manteniendo a su vez un adecuado confort térmico en el interior del edificio. La estrategia de control implementada en el sistema tiene como objetivo maximizar el uso de fuentes renovables frente las convencionales cuando las primeras estén disponibles. Esta es la clave para lograr una reducción del 80 al 90% del consumo total de energía respecto a las necesidades energéticas típicas de edificios de oficinas.

Este edificio forma parte del **proyecto ARFRISOL (ARquitectura bioclimática y FRío SOLar)**, con el que el **Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno Español** busca promover la eficiencia energética en edificios de oficinas. Como parte de los objetivos del proyecto, cinco edificios de oficinas se construirán o rehabilitarán en las cinco zonas climáticas de España con el fin de experimentar con técnicas de ahorro de energía y sistemas de energías renovables para demostrar que el consumo energético de dichos edificios se puede reducir en un 80-90%, mientras que el consumo de energía convencional restante puede ser suministrado mediante sistemas solares activos (por ejemplo, colectores solares térmicos para calefacción y refrigeración y módulos fotovoltaicos para electricidad).

Acciona Infraestructuras es responsable de la construcción del edificio de la **Plataforma Solar de Almería (PSA)**, en el sur de España. El propósito de este artículo es explicar las técnicas de refrigeración solar utilizadas en este edificio y las estrategias de control que han sido diseñadas para lograr un elevado rendimiento energético en las mismas.

### 2. EL EDIFICIO Y SUS SISTEMAS

El edificio se ha diseñado siguiendo los requisitos clásicos para construcciones bioclimáticas sostenibles adaptándolo a su entorno (por



## Guía del Frío Solar

ejemplo, el estudio de las condiciones climáticas locales, la orientación, los sistemas de protección solar, el uso racional de los recursos naturales y la integración en el entorno).

Ubicado en el desierto de Tabernas, en Almería, el edificio tiene que trabajar en condiciones climáticas drásticas, con temperaturas muy altas en verano y relativamente bajas por las noches y bajas temperaturas en invierno, lo que implica una alta demanda de energía tanto en verano como en invierno para mantener condiciones térmicas interiores de confort.

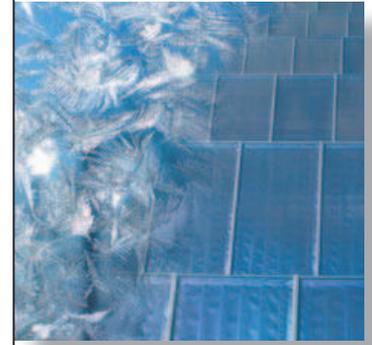
Sin embargo, gracias a su diseño bioclimático y la integración de técnicas pasivas de calefacción y enfriamiento, la demanda anual total de energía del edificio se espera que llegue a ser de 35 kWh/m<sup>2</sup>.



**Foto 1.** Edificio ubicado en la PSA.

Este edificio se ha diseñado como banco de pruebas para la integración de sistemas y técnicas de climatización activa y pasiva. Como tal, se integran sistemas tanto activos como pasivos de calefacción y refrigeración solar, junto con instalaciones convencionales de climatización y ventilación (HVAC). El objetivo es hacer posible la comparación de los rendimientos de los sistemas no convencionales respecto a los convencionales en un edificio ocupado continuamente durante todo el año.

Dada la particular ubicación del edificio en una de las regiones más calurosas y secas de Europa, los esfuerzos se centran en las técnicas de



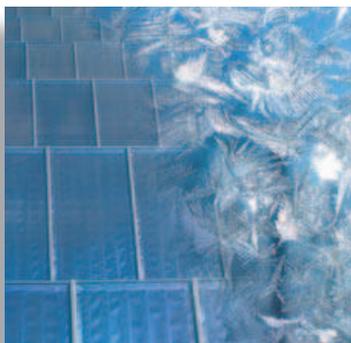
enfriamiento. En cuanto al confort térmico en verano, técnicas de refrigeración solar tanto activas como pasivas se combinan de forma que el confort térmico en el interior se pueda garantizar reduciendo al mínimo el consumo de energía, incluso con altas temperaturas ambientales. Como resultado, se integraron en el edificio los siguientes sistemas:

### 2.1. Sistemas pasivos de enfriamiento solar

El enfriamiento nocturno es proporcionado principalmente por medio de la ventilación natural impulsada por una chimenea solar con el fin de aumentar los índices de ventilación durante la noche. Durante el día, el sol calienta la parte superior de la chimenea, pintada de negro, situada en la cubierta del edificio, lo cual crea una corriente ascendente de aire en el interior de la misma. El flujo de aire que entra en la chimenea solar y las distintas zonas habitables del edificio están controlados por compuertas motorizadas que se cierran durante el día. Por la noche, las compuertas se abren permitiendo que la corriente ascendente de aire de la chimenea cree un flujo natural de aire extrayendo el aire caliente de las zonas interiores y renovándolo con aire más fresco que entra desde el exterior a través de compuertas en la parte baja de los cerramientos de las zonas a ventilar. En el edificio de Almería, la ventilación natural basada en la chimenea solar se limita a las zonas de oficinas, donde se tienen las mayores ganancias de calor.



Foto 2. Captador de una de las chimeneas solares.



## 2.2. Sistemas activos de enfriamiento solar

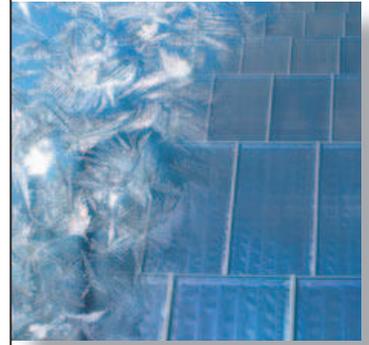
El eje central del sistema de refrigeración de este edificio es un sistema solar de enfriamiento por absorción compuesto por cuatro bombas de calor por absorción de 10 kW de potencia térmica cada una, alimentadas por 90 captadores planos de alto rendimiento capaces de ofrecer constantemente fluido caloportador hasta a 95 °C, máxima temperatura de trabajo para el correcto funcionamiento de la bomba de calor por absorción.

En el verano, este sistema es una alternativa real a las máquinas frigoríficas convencionales para el suministro de agua fría, ya que prácticamente no requiere energía adicional (aparte de la energía solar captada por los colectores solares) para enfriar el edificio. La bomba de calor por absorción utilizada en el edificio dispone de una tecnología patentada por el fabricante, Climatewell, que permite que la energía sea almacenada y entregada inmediatamente después. De esta manera, el sistema puede almacenar la energía a lo largo de las horas de sol y continuar enfriando el edificio, incluso después de la puesta del sol si es necesario. Hay que mencionar que el sistema está diseñado para que pueda almacenar y entregar energía al mismo tiempo.

Además, la tecnología empleada permite la variación de la temperatura del fluido de entrada [a la bomba de calor], ya que la diferencia de temperatura entre la fuente [los captadores planos] y el disipador de calor (en este caso una torre de refrigeración por razones prácticas) es superior a 50 °C.



**Fotos 3 y 4.** Campo de captación solar (izq.) y bombas de calor por absorción (dcha.).



### 2.3. Sistemas pasivos de enfriamiento

Además del sistema solar de refrigeración descrito anteriormente, se integran en el edificio otros sistemas de refrigeración pasiva, como un sistema de preenfriamiento del aire exterior mediante un intercambiador aire-tierra cuya salida está directamente conectada a las unidades de tratamiento de aire (UTAs).

Para el enfriamiento nocturno, la ventilación natural trabaja en combinación con ventilación radiativa. Dicho sistema consiste en una serie de paneles de radiación colocados en la cubierta y conectados a sistemas de suelo radiante en todas las zonas de oficinas, de modo que se disipan las ganancias internas de calor durante la noche.

### 2.4. Sistemas activos de enfriamiento

Por último, el sistema de climatización se completa con una bomba de calor de ciclo de compresión, con sistema aire-agua, de 100 kW de potencia [térmica] para garantizar el confort interior cuando los sistemas no convencionales anteriormente descritos no están disponibles.

La variedad de sistemas integrados en el edificio permitirá a los investigadores estudiar diferentes combinaciones de sistemas pasivos y activos y buscar las mejores estrategias para lograr el objetivo marcado en cuanto a ahorro de energía.

## 3. ESTRATEGIAS DE CONTROL

La dificultad a la hora de diseñar las estrategias de control reside en la implementación de algoritmos de control que gestionen de forma óptima los diferentes sistemas de refrigeración, (los convencionales y los no convencionales) y en su conjunto, con el objetivo de minimizar el consumo total de energía del edificio, garantizando al mismo tiempo un adecuado confort térmico.

Se ha implementado un sistema de control, supervisión y adquisición de datos (SCADA) con más de 700 puntos de monitorización y control para que el sistema HVAC, así como los parámetros de confort térmico puedan ser controlados y supervisados de forma precisa en todo



## Guía del Frío Solar

el edificio. Para el diseño de dicho sistema de control se ha tenido en cuenta que el edificio será una plataforma de investigación en el futuro y que debe ser monitorizado el mayor número posible de parámetros.

### 3.1. Enfriamiento nocturno

Se ha mencionado que para lograr el enfriamiento nocturno se sigue una estrategia basada en la combinación de enfriamiento radiativo y ventilación natural.

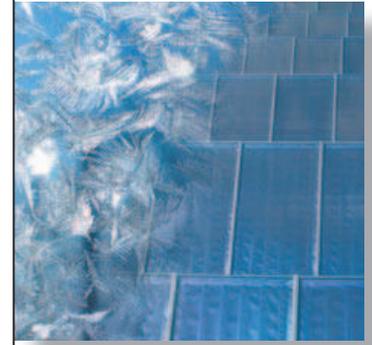
Por la noche, cuando las condiciones climáticas son favorables (es decir, cuando la temperatura ambiente es lo suficientemente baja como para proporcionar un efecto de enfriamiento en el interior), el agua se distribuye a fin de intercambiar energía entre el suelo radiante y los paneles radioconvectivos de la cubierta de modo que la temperatura del suelo puede ser disminuida y las ganancias térmicas de los espacios interiores disipadas. A su vez, las compuertas monitorizadas de las oficinas se abren, de modo que se produce ventilación natural cruzada impulsada por un conjunto de chimeneas solares ubicadas en la cubierta.

En modo automático, ambos sistemas pueden trabajar conjuntamente en función de horarios y de temperaturas de consigna, pero los usuarios con privilegios de administrador en el sistema SCADA pueden activar o desactivar manualmente cualquiera de los sistemas.

Estas técnicas de enfriamiento nocturno funcionan normalmente en horas nocturnas y mientras que la temperatura ambiente y la radiación solar son aún lo suficientemente bajas para usar la ventilación natural y radiante sin la necesidad de arrancar el sistema activo de refrigeración.

Sin embargo, debido a las condiciones climáticas en Almería, es posible que sea necesario arrancar el sistema activo de producción de frío en horas anteriores a lo habitual en otras regiones para poder mantener las condiciones interiores de confort.

Por último, es importante mencionar que técnicas de enfriamiento pasivo siempre tienen prioridad frente a otras técnicas de refrigeración y se utilizan siempre que sea posible con el fin de minimizar el consumo



de energía asociada a la operación de los sistemas de aire acondicionado del edificio.

### 3.2. Sistema de absorción solar

Se ha mencionado que la tecnología utilizada para el sistema de refrigeración solar hace que sea posible producir energía frigorífica a pesar de las variaciones de temperatura en el circuito de captación solar, siempre y cuando la diferencia de temperatura entre el fluido de entrada a las bombas de absorción de calor y la temperatura de entrada del circuito de la torre de refrigeración permanezca por encima de 50 °C.

Por esta razón, el sistema de control se programa para proporcionar agua caliente a las bombas de absorción de calor cuando la temperatura a la salida del campo de captación solar llega a 60 °C. Esto permite iniciar la carga del barril de la bomba de calor de absorción, aunque a un ritmo lento, aprovechando la mayor parte de la energía solar disponible.

Seguidamente, cuando la temperatura del fluido [del campo solar] alcanza entre 80 y 90 °C, y considerando que el agua de refrigeración se mantiene por debajo de 30 °C, la máquina de absorción puede cargar normalmente. Una vez que al menos una de las cuatro bombas de calor de absorción instaladas está plenamente cargada, puede empezar a entregar agua fría a los circuitos de distribución de frío.

En realidad, a diferencia de otros enfriadores de absorción, el sistema utilizado aquí es discontinuo. Es decir, la primera máquina debe cargarse antes de poder entregar el primer kWh de refrigeración. Cuando la carga del primer ciclo se ha completado y las máquinas comienzan a dar energía de enfriamiento, un segundo barril comienza a cargarse. De esta manera, cuando el primer barril se vacía, el segundo barril cargado asume el control y el primer barril se puede cargar de nuevo. Esto permite un funcionamiento continuo, siempre y cuando la tasa de carga sea superior a la tasa de consumo.

Así, el sistema fue diseñado para comenzar a cargar tan pronto como sea posible por la mañana, de modo que los barriles de las bombas de calor de absorción estén totalmente cargados al final de la mañana (entre las 11 y las 12 h) cuando el enfriamiento activo se con-



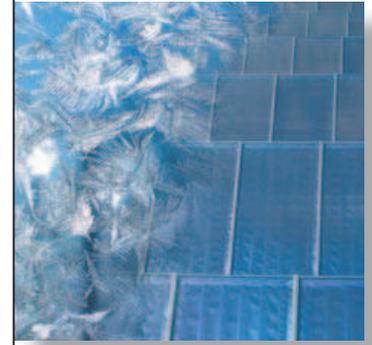
### Guía del Frío Solar

vierte en necesario para mantener el adecuado confort térmico en el edificio. Por otro lado, el campo de captación solar fue diseñado de modo que la tasa de carga siempre es suficiente para asegurar la operación continua de las bombas de absorción.

## 4. CONCLUSIONES

El sistema de refrigeración solar presentado en este artículo es uno de los primeros intentos de integración de un sistema solar de refrigeración en un edificio de oficinas actualmente en uso en España. El edificio se encuentra en su fase de lanzamiento, por lo que no están disponibles aún los datos sobre si el sistema es capaz de cumplir los objetivos planteados respecto a la eficiencia energética del mismo. Sin embargo, la fase de optimización será decisiva para conseguir que el sistema funcione a su máximo potencial y lograr el objetivo en términos de ahorro de energía.

## BANCO DE PRUEBAS DE FRÍO SOLAR DE GIJÓN (BPFSG)



### 1. ANTECEDENTES

#### 1.1. ARFRISOL

En el marco del **Proyecto Singular Estratégico ARFRISOL** (PS-120000-2005-1, **Arquitectura bioclimática y frío solar**) y en particular en su subproyecto 8 (I+D de Sistemas<sup>1</sup>) se decide construir un banco de ensayos que permita analizar las variables de funcionamiento de una instalación de frío solar, sin las servidumbres que impone la necesidad de climatizar un edificio. El GIT se hace cargo del diseño y ejecución del BPFSG, con la colaboración de los demás socios de ARFRISOL, y destacadamente de CIEMAT, CLIMATEWELL y UNISOLAR.

#### 1.2. Ubicación de la instalación

En el Edificio Energía del *campus* universitario de Gijón, Escuela Politécnica de Ingeniería, Universidad de Oviedo.

### 2. OBJETIVOS Y GUÍAS DE DISEÑO

#### 2.1. Objetivos

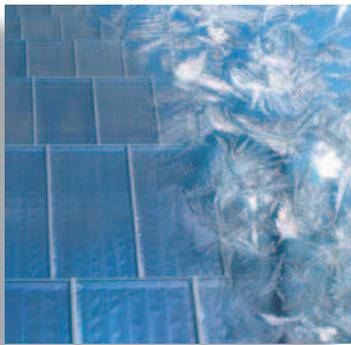
En una instalación de frío solar, como las de los cinco contenedores-demostradores de ARFRISOL<sup>2</sup>, el objetivo es normalmente la climatización de algunas zonas o de todo el edificio; la singularidad del BPFSG es que se dedicará a realizar ensayos para investigar determinadas variables y el comportamiento de los equipos sometidos a condiciones incluso extremas y transitorias; se desea especialmente comparar distintos sistemas de aportación y de evacuación de energía térmica.

#### 2.2. Guías de diseño

Para alcanzar los fines indicados se plantearon algunos criterios de diseño:

---

1 <http://www.arfrisol.es/ARFRISOLportal/portal.do?IDM=18&NM=2>  
2 <http://www.arfrisol.es/ARFRISOLportal/portal.do?TR=C&IDR=72>



## Guía del Frío Solar

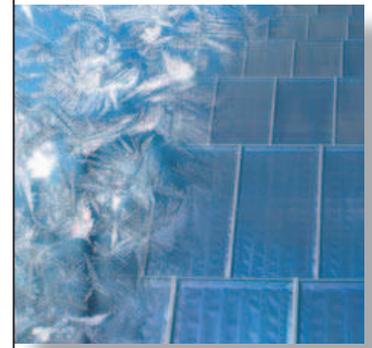
- Facilidad en la sustitución y adición de equipos.
- Medición y control precisos de las variables.
- Posibilidad de ensayos en cualquier momento.
- Flexibilidad de configuración del campo solar.
- Análisis comparativo de métodos de evacuación energética.
- Total seguridad para equipos y personal.

Con la estrecha colaboración de la ingeniería contratista principal, ANSOLTEC, se ha llegado a la instalación que se describe resumidamente a continuación.

### 3. EQUIPOS

**Tabla 1.** Datos de los equipos principales de la instalación. Fuente: ARFRISOL.

INSTALACIÓN BPFSG			
CIRCUITO	Equipo	Marca y modelo	Pot. Nominal (kW)
BOMBA DE CALOR	Máquina de absorción	Climatewell 10	10 (Refrig.)
APORTE TÉRMICO	Conductos	Tubo de cobre 28/26 mm	—
	Aislamiento de conductos	K-FLEX ST (espesor = 25 mm)	—
	Grupo de bombeo	Grundfos 32-180/2 AFA BUBE	0,55
	Campo de captadores	Unisol 90ClimaTIM	30 (20 Uds.)
	Caldera eléctrica	ETE GP 46/2 ECO	54
DISIPACIÓN DE ENERGÍA	Conductos	Tubo de cobre 28/26 mm	—
	Aislamiento de conductos	K-FLEX ST (espesor = 25 mm)	—
	Grupo de bombeo	Grundfos MAGNA UPE 32-120	0,43 (máx.)
	Torre de enfriamiento	Sulzer EWK 036	46
	Aerotermino	BTU EA66-024007.46/H	30
	Piscina	Depósito (3x3x10m)	—
	Tubos enterrados	Horizontales y verticales	—
FRÍO	Conductos	Tubo de cobre 28/26 mm	—
	Aislamiento de conductos	K-FLEX ST (espesor = 25 mm)	—
	Grupo de bombeo	Grundfos MAGNA 25-100 180	0,19 (máx.)
	Fancoils	BTU VVC-85 (x2)	5,5 (x2)
SIMULACIÓN	Depósitos de agua	Lapesa MV1500I_01 (x4)	—
CONTROL	Sist. adqui. y control	NI FieldPoint (x3)	—



#### 4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

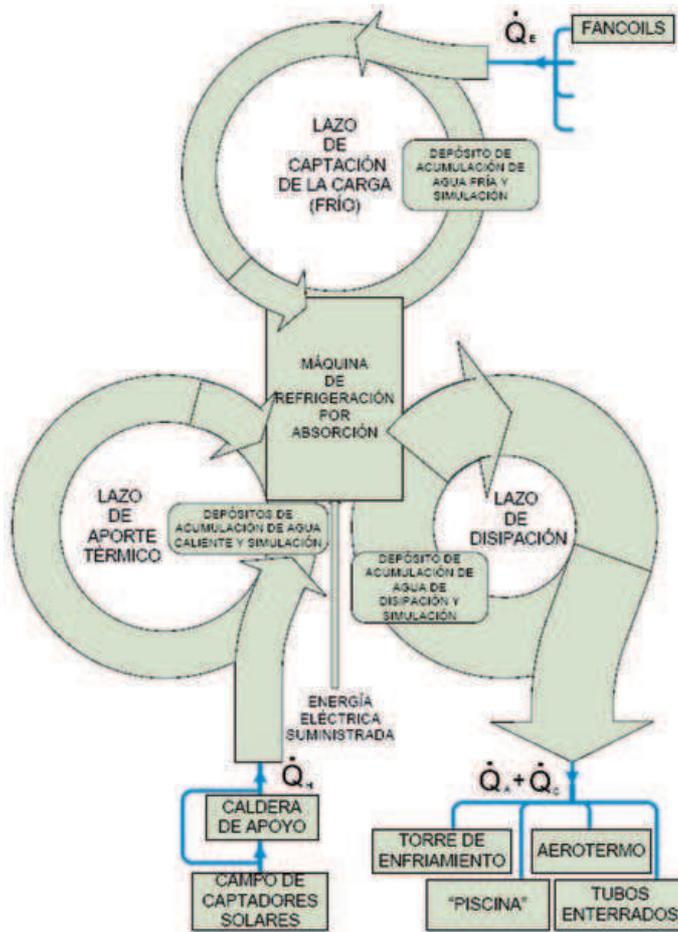


Figura 1. Esquema de la instalación del BPFSG. Fuente: ARFRISOL.

La instalación tiene tres circuitos principales, que se corresponden con los flujos energéticos que la máquina de refrigeración por absorción intercambia con su entorno:

- de aporte energético,
- de disipación,
- de captación de la carga térmica.

Cada uno de ellos es un lazo cerrado al que se pueden conectar y desconectar equipos sustitutos o complementarios.

El agua a la temperatura correspondiente a cada uno de los tres flujos se acumula en 4 depósitos de 1,5 m<sup>3</sup> cada uno. La temperatura



## Guía del Frío Solar

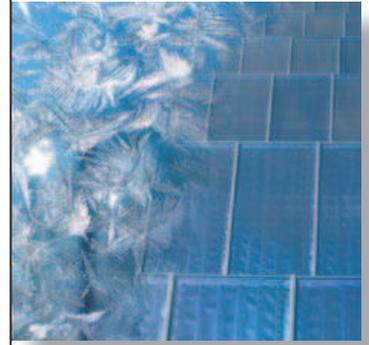
de estos depósitos puede ser regulada para simular las condiciones de funcionamiento que se desee analizar. Además, un cuarto circuito permite la interconexión de los depósitos para facilitar la variación de las temperaturas.

El aporte de energía solar es por medio de un campo de 20 captadores de 2 m<sup>2</sup> cada uno orientado al sur en la cubierta del edificio. La disposición, con retorno invertido y válvulas de tres vías permite una amplia variedad de configuraciones en serie y paral-elo; un piranómetro, colocado en el mismo plano que la superficie irradiada de los captadores proporciona la energía solar recibida; se monitorean las temperaturas a la entrada y salida de cada captador, y los caudales de agua glicolada; los circuitos posibles están aproximadamente equilibrados; todo ello permite analizar el comportamiento (rendimiento, temperatura máxima, flujo energético,...) para tratar de optimizar la configuración en función de condiciones meteorológicas y de demanda.



**Foto 1.** Campo de captadores solares de la instalación. Fuente: ARFRISOL.

Además, el campo solar cuenta con un sistema de disipación propio, gestionado electrónicamente, para el caso de que no sea usado o la temperatura del fluido alcance valores excesivamente elevados, y un sistema de vaciado de emergencia para los casos más extremos.

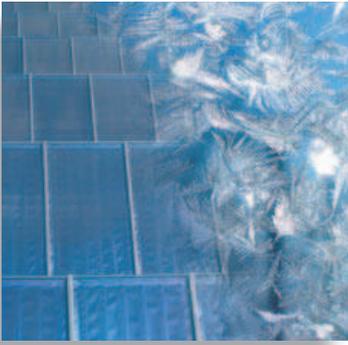


**Foto 2.** Sala de máquinas del BPFSG. Fuente: ARFRISOL.

Una caldera eléctrica sirve para complementar o sustituir con fines de ensayos la energía solar (para conseguir mayores temperaturas en el agua que va al hervidor o para poder hacer pruebas en momentos en que no haya sol). Los depósitos acumuladores de agua caliente permiten conseguir una temperatura estable de aportación; análogamente, se puede fijar una temperatura estable en el circuito de frío y en el de evacuación. Con una de las tres temperaturas fijadas se pueden variar paramétricamente las otras dos obteniendo la evolución de la eficiencia del sistema.

La disipación de energía al entorno, se realiza alternativa o combinadamente por medio de:

- intercambio directo con el aire (aerotermino),
- torre de enfriamiento evaporativo,
- gran masa de agua (simulando un lago o piscina),
- tubos enterrados horizontales,
- tubos enterrados verticales.

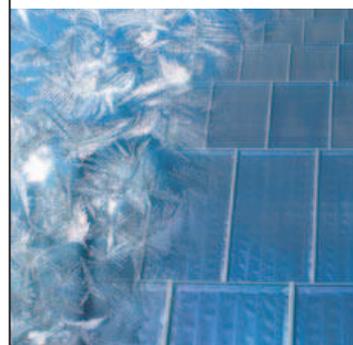


**Foto 3.** Sistemas de disipación. Fuente:ARFRISOL.

Las mediciones permitirán comparar estos métodos de evacuación de calor en cuanto a la adecuación a condiciones climáticas y circunstancias ambientales diversas, estableciendo guías de diseño para distintas zonas geográficas y geológicas.

## **5. AGRADECIMIENTOS**

El PSE-ARFRISOL, referencia PS-120000-2005-1, es un proyecto científico-tecnológico singular de carácter estratégico aceptado por el Plan Nacional de I+D+i 2004-2007, cofinanciado con fondos FEDER y subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia (en la actualidad MICINN). Se agradece a todos los miembros del Consorcio de PSE-ARFRISOL su colaboración. El banco de pruebas descrito ha sido también subvencionado por el Principado de Asturias, a través de su Consejería de Industria y Empleo (refs. PER 57-2007 y PER 209-2007) y de la Consejería de Educación y Ciencia (ref. PC 07-2007).



## EDIFICIO DE PRODUCCIÓN VEGETAL REFRIGERADO CON PLANTAS ENFRIADORAS DE AGUA POR CICLO DE ABSORCIÓN

DATOS INSTALACIÓN	
Nombre de la instalación	Edificio de Producción Vegetal Fitotécnica
Dirección	C/ Senda del Rey, s/n
CP y Localidad	28040 - Madrid
Año de puesta en marcha	2009

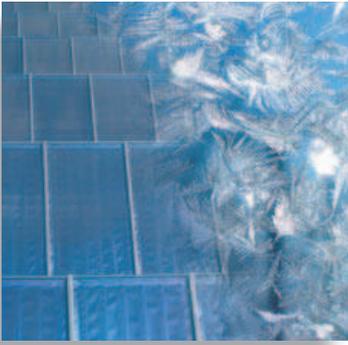
GENERACIÓN DE FRÍO	
Modelo y cantidad	WFC SC05 - 1 unidad
Capacidad frigorífica nominal unitaria	17,6 kW
Capacidad frigorífica total instalada	17,6 kW
Ciclo frigorífico	Absorción LiBr/H <sub>2</sub> O - Simple efecto
Temperatura salida agua refrigerada	7°C
Caudal agua refrigerada y $\Delta t$	2.770 l/h - 5,5°C

CAMPO DE CAPTACIÓN SOLAR	
Marca captador	KAYSUN
Tipo y modelo	Planos CO 2570 S
Superficie unitaria	2,78 m <sup>2</sup>
Número de captadores	30
Superficie total de captación	83,4 m <sup>2</sup>

### 1. DESCRIPCIÓN

La planta enfriadora de agua por ciclo de absorción, está conectada en serie al retorno del agua refrigerada de la instalación general de acondicionamiento de aire que dispone de otras plantas convencionales, por ciclo de compresión cuyos compresores consumen energía eléctrica.

La reducida capacidad frigorífica de la planta accionada por energía solar, está algo por debajo de la demanda frigorífica mínima de la instalación, de modo que puede funcionar permanentemente mientras se disponga de suficiente energía térmica procedente del campo de captadores solares. Su misión es aprovechar al máximo la capacidad de captar calor del campo solar ya que durante el verano, la transformación de esta en capacidad frigorífica siempre es necesaria, traduciéndose en una forma de ahorrar energía y reducir la demanda eléctrica y las emisiones de CO<sub>2</sub>.



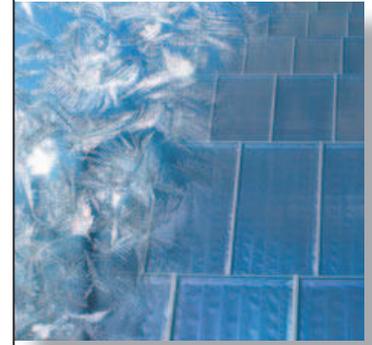
**Foto 1.** Planta enfriadora Yazaki, torre de enfriamiento y tuberías del circuito hidráulico.

## 2. LA INSTALACIÓN

La planta enfriadora YAZAKI funcionando con el calor solar, está conectada en serie sobre el circuito de retorno general del agua refrigerada devolviendo el agua refrigerada aguas abajo en el mismo circuito antes de la entrada a la planta eléctrica de refrigeración convencional. De esta forma, se asegura la prioridad absoluta de la refrigeración solar sobre la convencional, cubriendo esta la diferencia hasta la totalidad de la demanda en cada momento del día.



**Foto 2.** Planta enfriadora de agua por ciclo de absorción YAZAKI modelo WFC SC05.



Para aprovechar el exceso de calor captado durante las horas centrales del día respecto a la demanda de la máquina de absorción y poder así utilizarlo a lo largo de las horas con insuficiente captación, se ha instalado un depósito acumulador con una capacidad de 3.000 litros que permite aumentar el tiempo de funcionamiento.



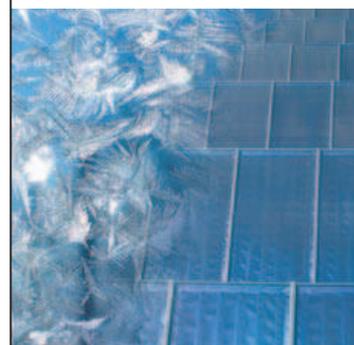
**Foto 3.** Campo de captadores solares térmicos.

La disipación del calor utilizado como energía de trabajo del ciclo frigorífico y también la robada al circuito que refrigera, se disipa en una torre de enfriamiento evaporativo de la marca INDUMEC modelo TC – 020 PFV.

### **3. VENTAJAS DEL SISTEMA**

En esta instalación, con la máquina funcionando con energía solar se obtienen alrededor de 17.300 kWh de refrigeración cada verano, lo que significa aproximadamente una reducción en el consumo eléctrico de unos 6.200 kWh eléctricos. Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes a la generación de la electricidad ahorrada, tomando como base los ratios publicados por el IDAE para la producción eléctrica en el territorio español peninsular, son equivalentes a más de 4.000 kg/CO<sub>2</sub> al año. Ambas cualidades hacen que la instalación sea un ejemplo de aprovechamiento energético y de respeto al medio ambiente.





## HOTEL REFRIGERADO CON PLANTAS ENFRIADORAS DE AGUA POR CICLO DE ABSORCIÓN

Tabla 1. Ficha de la instalación.

<b>Nombre de la instalación</b>	HOTEL IFA CONTINENTAL
<b>Dirección</b>	Avda. de Italia, 2
<b>CP y Localidad</b>	35100 - Playa del Inglés - Las Palmas (Canarias)
<b>Unidades instaladas</b>	1 unidad YAZAKI modelo WFC-SC20 1 unidad YAZAKI modelo WFC-SC30
<b>Potencia frigorífica instalada</b>	175,8 kW
<b>Instalador</b>	Elca Fricalan, S.L.
<b>Fecha de puesta en marcha</b>	Septiembre 2007

### 1. DESCRIPCIÓN

Lopesan Hotel Group, es un importante grupo hotelero situado en las Islas Canarias, del cual se debe destacar el Hotel IFA CONTINENTAL, ver Foto 1, situado en la Avenida de Italia, 2 en Playa del Inglés de Las Palmas.



Foto 1. Hotel IFA Continental. Fuente: IFA Continental.

El hotel dispone de una superficie solar de 2.700 m<sup>2</sup> de colectores de alto rendimiento, siendo una de las mayores instaladas hasta el momento en la Comunidad Autónoma de Canarias y la primera de sus características realizada por una empresa turística en España.

La instalación solar, diseñada e instalada por la empresa Elca Fricalan, cubre una parte de la demanda anual de climatización de piscinas, SPA, lavandería y climatización del hotel mediante enfriadoras de absorción de simple efecto.

## 2. LA INSTALACIÓN

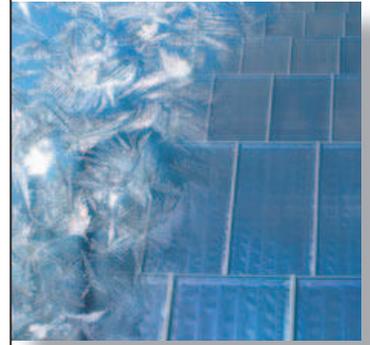
Esta instalación de refrigeración solar, está provista de dos plantas enfriadoras de agua Yazaki, modelos *WFC SC20* y *WFC SC30*, con una capacidad frigorífica total de 175,8 kW.

Las plantas enfriadoras de agua, ver Foto 2, se sirven del agua calentada con energía solar térmica para accionar el ciclo frigorífico de absorción de simple efecto, que utiliza como fluido una solución de agua con bromuro de litio, que permite refrigerar a 7 °C el agua del circuito cerrado para la climatización de las dependencias del hotel.



**Foto 2.** Las dos plantas enfriadoras Yazaki situadas en la sala de máquinas.  
Fuente: Absorsistem

El campo de captación solar, Foto 3, está formado por 104 paneles planos que dan servicio, además de las máquinas de absorción, al calentamiento del agua para usos sanitarios con acumulación de 45.000 litros y de una piscina exterior de 800 m<sup>3</sup>.

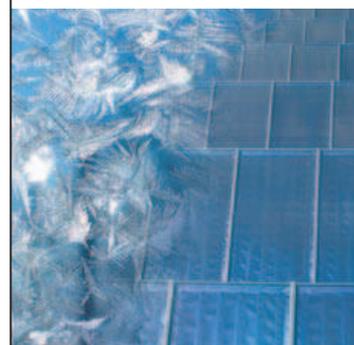


**Foto 3.** Colectores solares de alto rendimiento. Fuente: Absorsistem.

### 3. VENTAJAS

La instalación produce una media anual de 1 MW/h de potencia, lo que evita la emisión a la atmósfera de 625 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.





## INDUSTRIA EMBOTELLADORA DE AGUA, REFRIGERADA CON PLANTAS ENFRIADORAS DE AGUA POR CICLO DE ABSORCIÓN

Tabla 1. Ficha de la instalación.

Nombre de la instalación	FONTE DOSO, S.L.
Dirección	Carretera Sanchidrian - Salamanca, km 17
CP y Localidad	05164 - El Oso (Avila)
Unidades instaladas	1 modelo WFC SC10 1 modelo WFC SC20
Potencia frigorífica instalada	35,2 + 70,3 = 105,5 kW en total
Instalador	Grupo Unisolar, S.A.
Fecha de puesta en marcha	Agosto 2003

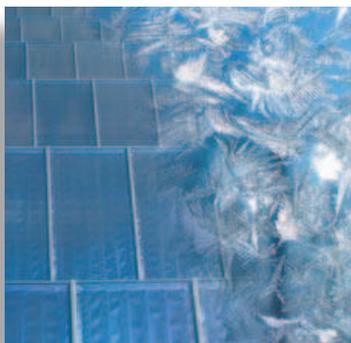
### 1. DESCRIPCIÓN

La empresa FONTE DOSO, S.L. es una industria dedicada al proceso de embotellado de agua mineral para uso humano. Dentro de su proceso de producción se distinguen diferentes necesidades energéticas:

- Producción de agua caliente a 85 °C para lavado, enjuague y desinfección del circuito de embotellado, con demanda constante de 4.000 l/día a lo largo de todo el año.
- Refrigeración de las máquinas dedicadas al proceso de fabricación de las botellas de plástico, con una demanda total de 64.161 frig/h durante 8 horas al día.
- Calefacción o refrigeración del edificio de oficinas con una superficie de 140 m<sup>2</sup>. La refrigeración es necesaria desde el mes de mayo al mes de septiembre ambos incluidos, y la calefacción el resto del año.

Para cubrir las necesidades energéticas de estas tres aplicaciones el Grupo Unisolar proyecta tres instalaciones independientes:

- Instalación solar térmica que aporta un 65% de la demanda anual para el proceso de lavado, enjuague y desinfección del circuito de embotellado y la calefacción de la zona de oficinas.



## Guía del Frío Solar

- Instalación de refrigeración por absorción para abastecer el proceso de fabricación de botellas y la climatización de las oficinas.
- Instalación convencional, formada por un grupo térmico de gasóleo para aportar la energía complementaria en momentos de consumo elevado o falta de radiación solar.

## 2. LA INSTALACIÓN

La configuración básica seleccionada es por circulación forzada indirecta con intercambiador de calor independiente para cada una de las tres aplicaciones. Esta configuración se completa con un circuito primario cerrado y un sistema de energía auxiliar diseñado para tal efecto (instalación convencional).

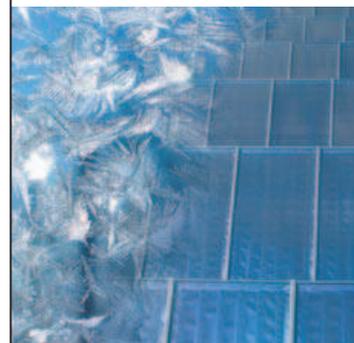
La instalación solar consta de 240 colectores solares sobre la marquesina del aparcamiento, en la parte delantera del edificio principal, libre de sombras. Los colectores están inclinados a  $30^\circ$  y disponen de una superficie útil de captación de  $2,1 \text{ m}^2$  cada uno, conectados en serie – paralelo, formando 80 baterías de 3 colectores cada una, totalizando una superficie de captación de  $504 \text{ m}^2$ .

En la Foto 1 se muestra el diseño de las superficies donde están instalados los paneles de captación de energía solar. Su colocación permite utilizar su proyección de sombra como zona de aparcamiento de vehículos.



**Foto 1.** Distribución de paneles solares. Fuente: Absorsistem.

La instalación consta de tres depósitos de acumulación, de 10.000, 15.000 y 5.000 litros, para agua caliente industrial, refrigeración por absorción y calefacción respectivamente.



Los dos más grandes son de acero inoxidable, ya que intervienen en el proceso de fabricación de botellas para consumo humano y deben ser aptos para su uso en la industria alimentaria. Están aislados térmicamente mediante poliuretano inyectado de 100 mm de espesor.

Para la refrigeración del proceso industrial y cubrir las necesidades de climatización, la instalación dispone de dos unidades enfriadoras por ciclo frigorífico de absorción de simple efecto utilizando una solución de agua con bromuro de litio, totalmente inocua para el medio ambiente, de la marca Yazaki, modelos *WFC SC20* y *WFC SC10*, con capacidades frigoríficas de 70,3 kW y 35,2 kW respectivamente, Foto 2. Su misión es enfriar a 7 °C el agua de un circuito cerrado para enfriar los moldes de la cadena de embotellado y también para la climatización mediante unidades terminales de tipo *fan-coil*.



**Foto 2.** Torre de refrigeración y a la derecha las unidades Yazaki de refrigeración por absorción. Fuente: Absorsistem.

La instalación se completa con el sistema hidráulico, formado por las tuberías, bombas, sistemas de seguridad, llenado, purga, valvulería y accesorios.

El sistema de regulación y control realiza el control continuo del funcionamiento y protección de la instalación, así como la evacuación de las prestaciones de la instalación mediante la medición de caudal y energía térmica.

El control del funcionamiento se desarrolla de la siguiente manera, las bombas de circulación arrancan cuando la temperatura de captadores es superior a la de acumulación en más de 6 °C y para cuando la diferencia es inferior a 2 °C. Además, se regula la preferencia para abastecer agua caliente de lavado industrial, refrigeración por absorción o calefacción según los parámetros programados.



### Guía del Frío Solar

El sistema de control también vigila las condiciones de la instalación para proteger contra heladas, altas temperaturas y fallos en bombas, válvulas motorizadas o los producidos por pérdida de presión. En todos los casos emite la alarma correspondiente para avisar del peligro correspondiente.

De esta manera, este interesante proyecto resulta viable para una empresa privada como Fontedoso, S.L. que puede amortizar la instalación solar térmica para sus diferentes necesidades de energía en un plazo de tiempo razonable.







