

# LA ENERGÍA SOLAR

## Índice

EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA .....	2
Radiación solar sobre la superficie terrestre .....	3
SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR .....	4
BREVE HISTORIA DE LAS APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR .....	5
UTILIZACIÓN PASIVA DE LA ENERGÍA SOLAR .....	7
CONVERSIÓN TÉRMICA DE BAJA TEMPERATURA .....	10
Subsistema colector .....	11
Subsistema de almacenamiento .....	16
Subsistema de distribución .....	17
Subsistema de medida y control .....	18
Características de los equipos solares de baja temperatura .....	19
CONVERSIÓN TÉRMICA A TEMPERATURAS MEDIAS .....	20
Aplicaciones industriales: sistemas de colectores distribuidos .....	22
CONVERSIÓN TÉRMICA A ALTAS TEMPERATURAS .....	23
CONVERSIÓN ELÉCTRICA: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	27
Evolución tecnológica de las células solares .....	31

# EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA

El Sol es una estrella formada por diversos elementos en estado gaseoso (principalmente hidrógeno), con un diámetro de 1,4 millones de km. En su interior existen elevadas presiones, presentándose temperaturas de varios millones de grados que producen de forma espontánea e ininterrumpida un proceso de fusión nuclear, siendo éste el origen de la energía solar, que se disipa con una potencia de  $3,7 \cdot 10^{14}$  TW.

Pese a que el Sol lleva proporcionando esta energía durante 6.000 millones de años, aún existe suficiente cantidad de hidrógeno en su núcleo para mantener el ritmo actual de disipación energética durante otros 8.000 millones de años más, como mínimo, sin cambios significativos en su aspecto o en su comportamiento, por lo que se puede considerar como una fuente inagotable de energía.

Ahora bien, no toda la energía que emite el Sol llega a la Tierra, ya que ésta constituye sólo una superficie captadora insignificante, situada a 150 millones de km. Por ello, la potencia interceptada por la Tierra, 173.000 TW, es una parte muy pequeña de la emitida por el Sol. Aún así, esa potencia es aproximadamente 10.000 veces mayor que la que proporcionan todas las formas de energía que los seres humanos emplean en la Tierra.

Se define como *constante solar* la cantidad de energía solar recibida por unidad de superficie y unidad de tiempo sobre una superficie perpendicular al Sol situada en el límite de la atmósfera, a la distancia media anual Tierra-Sol. Su valor es de  $1.353 \text{ W/m}^2$  y representa la energía media que llega a la capa más externa de la atmósfera terrestre.

Por otro lado, esta energía corresponde a una radiación electromagnética formada por un conjunto de longitudes de onda ( $\lambda$ ), cuya velocidad de propagación es de 300.000 km/s. La descomposición de esta radiación origina el llamado espectro solar, el cual está formado por tres bandas de longitudes de onda, comprendidas entre los siguientes valores:

- Ultravioleta (UV):  $\lambda < 0,35 \mu\text{m}$
- Visible:  $0,35 < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$
- Infrarrojo (IR):  $\lambda > 0,75 \mu\text{m}$

Cada longitud de onda transporta una cantidad de energía, siendo el valor

máximo a 0,47  $\mu\text{m}$ , es decir, dentro de la zona visible del espectro solar. En conjunto, la radiación visible transporta el 47% de la energía solar, la radiación IR, el 46%, mientras que la radiación UV transporta el 7% restante.

## **Radiación solar sobre la superficie terrestre**

Toda la energía expresada por la constante solar no llega a la superficie de la Tierra; al atravesar la radiación solar la atmósfera terrestre, pierde intensidad, a la vez que se modifica su distribución espectral. Todo ello es debido a complejos fenómenos de absorción, reflexión y difusión que tienen lugar en las capas de la atmósfera por acción de los gases que la constituyen, el vapor de agua, y las partículas en suspensión. En efecto, el nitrógeno y el oxígeno del aire tienen un poder de absorción muy débil, el ozono absorbe la mayor parte de la radiación UV y tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono absorben una fracción de la radiación IR.

Además de estos factores, la disminución de la intensidad de la radiación depende del espesor de la capa de aire, de la situación geográfica del lugar, de la época del año, etc. Ello que da una idea de la gran complejidad de los elementos que influyen en la intensidad de la radiación solar en un lugar determinado.

Todo ello hace que la energía que recibe la Tierra del Sol, o *radiación global*, tenga dos componentes bien definidas: la *radiación directa*, que es la que atraviesa la atmósfera sin sufrir cambio alguno (radiación enfocable por un sistema óptico) y la *radiación dispersa* (también denominada *radiación difusa*), debida a la dispersión por parte de los componentes de la atmósfera y al *albedo* (fracción de radiación solar dispersada por el suelo). La radiación dispersa no es enfocable por ningún sistema óptico.

Con todo esto, la radiación que llega al suelo es de unos  $900 \text{ W/m}^2$ , valor que equivale a unas 2.000 veces al consumo energético mundial.

La distribución de la energía solar que llega a la Tierra no es uniforme y los factores de que depende ésta son, por un lado, la hora del día, la latitud del lugar y la orientación de la superficie receptora, y por otro, las condiciones climatológicas. Los primeros factores son perfectamente calculables, pero las condiciones climáticas sólo son predecibles en términos estadísticos.

Todo ello hace necesario determinar experimentalmente la radiación solar que

llega en cada momento a un lugar determinado, lo que se lleva a cabo mediante diferentes tipos de instrumentos. Así, los **piranómetros** miden la radiación global, los **piroheliómetros** miden la radiación directa y los **heliógrafos** miden la duración de la insolación (horas reales de sol).

Con los resultados obtenidos de los distintos métodos, tanto de medida como de cálculo, en diversos puntos, se elaboran los **mapas solares**, que permiten utilizar los datos disponibles de la forma más cómoda posible con vistas al diseño y emplazamiento de los equipos captadores de la energía solar.

## SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar presenta dos características específicas muy importantes que la diferencian de las fuentes energéticas convencionales: dispersión e intermitencia.

Evidentemente, la energía solar es una forma de energía que presenta gran **dispersión**, ya que su densidad, en condiciones muy favorables, difícilmente alcanza  $1 \text{ kW/m}^2$ , valor que queda muy por debajo de las densidades con las que se trabaja usualmente en ingeniería. Esto significa que para obtener densidades energéticas elevadas se necesitan, o bien grandes superficies de captación, o sistemas de concentración de los rayos solares.

Por otro lado, la otra característica específica de la energía solar es su **intermitencia**. Esto hace que, a la par que se desarrollan instalaciones captadoras de energía, es necesario investigar los correspondientes sistemas de almacenamiento de la energía captada.

Todo ello lleva a un replanteamiento en el aprovechamiento y distribución de la energía totalmente distinto al que hoy se considera clásico, requiriendo la consideración de estas dificultades intrínsecas (cuya solución está ligada a cada aplicación concreta) un esfuerzo de desarrollo elevado.

Así pues, el primer paso para el aprovechamiento de la energía solar es su captación, aspecto dentro del que se pueden distinguir dos sistemas de características muy diferentes: sistemas pasivos y sistemas activos.

Los **sistemas pasivos** son aquéllos que no necesitan ningún dispositivo para captar la energía solar, existiendo una íntima relación entre el Sol, el almacenamiento del calor y el espacio, relación que se logra por la aplicación de distintos elementos

arquitectónicos.

Los **sistemas activos** se basan en la captación de la radiación solar por medio de un elemento de unas determinadas características, denominado *colector*.

Según las características del colector, el aprovechamiento de la energía solar se puede acometer bajo dos puntos de vista bien diferenciados: la conversión térmica, o aprovechamiento del calor contenido en la radiación solar, y la conversión eléctrica, o aprovechamiento de la energía luminosa (fotones) de la radiación solar para generar directamente corriente eléctrica (efecto fotovoltaico).

A su vez, la conversión térmica se basa en tres técnicas que difieren entre sí en función de la temperatura que puede alcanzar la superficie captadora. Así, se habla de tecnología de baja temperatura, de temperaturas medias y de altas temperaturas, según que la captación sea directa, de bajo índice de concentración o de alto índice de concentración, respectivamente.

## BREVE HISTORIA DE LAS APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR

La idea de utilizar el calor solar es muy antigua. No se les escapó a las civilizaciones orientales, egipcia y griega que el Sol era una fuente inagotable de energía, pero el bajo nivel técnico de que disponían les impidió utilizarla.

El ejemplo histórico más insólito del uso de la energía solar, se le atribuye a Arquímedes que, según el historiador Galeno (siglo II a.C.), utilizó espejos solares para incendiar la flota romana que atacaba Siracusa en el año 212 a.C. Este episodio se considera, no obstante, una leyenda, ya que otros historiadores de la época no hacían ninguna mención de él en sus escritos.

No se registra ni se tiene conocimiento de la utilización de la energía solar en toda la Edad Media, por lo que parece que la energía calorífica solar no tuvo en el pasado otra aplicación y utilización que para el secado de productos, la evaporación natural del agua de mar para la obtención de sal y alguna otra aplicación más.

En el siglo XVII, Kircher hizo algunas experiencias para prender fuego a una pila de madera a 50 m de distancia. Un siglo más tarde, el científico francés Buffon, no sólo volvió a repetir el experimento a unos 60 m, utilizando 168 espejos de 40 cm<sup>2</sup> de

superficie, sino que también logró fundir plata y plomo a distancias de hasta 35 m. También en el siglo XVII, el fundador de la Química moderna, Lavoisier, experimentó con hornos solares porque proporcionaban la fuente de calor más pura posible, consiguiendo incluso fundir platino a 1.760 °C.

En el siglo XIX, los intentos iniciales para convertir la energía solar en otras formas de energía giraron alrededor de la generación de vapor a baja presión para hacer funcionar máquinas de vapor. Mouchot fue el pionero en este campo, construyendo y haciendo funcionar varias máquinas de vapor alimentadas con energía solar entre 1864 y 1878. Las máquinas solares construidas por Mouchot, junto al creciente interés popular por las ciencias durante las dos últimas décadas del siglo XIX, condujeron a un gran desarrollo de la actividad en este sentido, que también se comprobó por la solicitud de patentes.

A finales del siglo XIX adquirió también cierto interés la destilación de agua, y ya en 1874, Harding proyectó un sistema que fue construido en Las Salinas (desierto de Atacama, Chile). El destilador cubría 4.700 m<sup>2</sup> y producía hasta 23 m<sup>3</sup>/día de agua potable en un día claro y a una altitud de 1.300 m. Este destilador estuvo funcionando durante 40 años y sólo fue abandonado cuando se tendió una conducción de agua potable desde los Andes hasta Antofagasta.

En los inicios del siglo XX se produjeron desarrollos muy significativos, sobre todo en EE.UU., desarrollo que se estancó en los años veinte, década que fue tranquila en el frente de la energía solar, quizás debido a que todo el mundo tenía concentrada su atención en otros aspectos en unos años tan expansivos y prósperos. Por su parte, la década de los treinta vio un notable aumento en el interés por la energía solar en sus diferentes líneas de aplicación. Un país con una actividad notable fue Japón, donde se obtuvieron 39 patentes para calentadores solares de agua de *tipo tejado*, que permitían tener de 100 a 200 litros de agua muy caliente en las horas vespertinas. En la década de los cuarenta aparecieron 20 patentes más de este tipo. Japón fue un país que tuvo fe en sus calentadores solares de agua; ya en 1960 se estimaba la existencia de 250.000 unidades en funcionamiento.

A mediados de los años treinta apareció una segunda línea de notable interés, que alcanzó gran auge en la segunda mitad de los años cuarenta: la calefacción doméstica. Quizás esta nueva línea de investigación fue el resultado natural del intenso

interés en la calefacción por agua caliente, puesto que el suministro de la misma por energía solar podía alimentar al sistema de radiadores del tipo que ya se utilizaba en millones de hogares que consumían otro tipo de combustible. Desgraciadamente, las predicciones acerca de las calefacciones domésticas con energía solar no llegaron a realizarse; la dura realidad de la economía hizo fracasar este sueño.

La energía solar adquirió un relieve extraordinario inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial, alcanzando su máximo apogeo en EE.UU. entre 1950 y 1960, donde se desarrollaron desde cocinas solares a máquinas de vapor y algunos dispositivos eléctricos que utilizaban las, por entonces nuevas, células solares. Este interés decreció bruscamente en la década de los sesenta y comienzos de los setenta, justo hasta que se produjo la crisis energética, en 1973, momento en el cual casi todos los países del mundo se pusieron de nuevo a trabajar en las distintas ramas de la tecnología solar, tanto a gran escala como de aplicaciones domésticas, para intentar paliar de alguna manera el gran gasto que comenzaban a generar las facturas del petróleo.

## UTILIZACIÓN PASIVA DE LA ENERGÍA SOLAR

Un diseño pasivo es, por definición, un sistema que capta la energía solar, la almacena y la distribuye de forma natural, sin mediación de elementos mecánicos. Sus principios están basados en las características de los materiales empleados en la construcción y en la utilización de los fenómenos naturales de circulación del aire.

Los sistemas pasivos se construyen sobre la estructura de un edificio, formando parte del mismo y funcionando con la energía disponible en su entorno más inmediato. El sistema solar y el edificio son considerados como elementos independientes, pero la modificación de uno de ellos influye directamente en el diseño del otro elemento.

Los elementos básicos utilizados en la actualidad por la arquitectura solar pasiva y los efectos que producen en una vivienda, son los siguientes:

- **Acristalamiento:** capta la energía solar, reteniendo el calor por efecto invernadero (el vidrio deja pasar la radiación visible pero refleja la radiación que emite el receptor en el IR, al elevar su temperatura). Su orientación será preferentemente hacia el Sur solar, dado que de esta forma aprovechará más ventajosamente la radiación, debido a la incidencia perpendicular de los rayos

solares.

- **Masa térmica:** tiene como misión almacenar la energía y está constituida por todos los elementos estructurales de la casa o por los volúmenes específicamente destinados a tal fin y rellenos de algún material acumulador, como piedras, agua, etc.

La integración de colectores de aire en el cerramiento Sur del edificio, la utilización de paredes internas de la vivienda como muros acumuladores de calor y la aplicación de ventiladores para la impulsión del aire, aumentan la eficacia de los sistemas pasivos clásicos. A estos sistemas se les conoce como *híbridos*, ya que utilizan ciertos sistemas mecánicos activos.

Las aplicaciones más importantes que actualmente pueden proporcionar los sistemas pasivos de utilización de la energía solar son la calefacción y la refrigeración.

Para producir **calefacción**, existen varios tipos de utilización pasiva, en función de la captación, almacenamiento y distribución de la energía solar:

- **Aporte directo:** Es el método más simple y utilizado de todos. El espacio a calentar lo es directamente por el Sol a través de ventanas orientadas al Sur. El calor que atraviesa las ventanas es absorbido por el suelo y las paredes, los cuales lo vuelven a emitir por la noche para mantener caliente el espacio. De esta manera, toda la casa hace de colector solar, almacén y sistema de distribución de calor.
- **Pared acumuladora:** También conocida como *muro Trombe*, utiliza la masa térmica de la pared directamente orientada al Sur y protegida por una superficie acristalada para captar la energía solar, almacenarla y posteriormente cederla al interior de la casa en las horas nocturnas. Si se practican unas pequeñas aberturas en la parte superior e inferior de la pared se obtiene, además del efecto señalado, una termocirculación del aire a través del espacio existente entre la pared y la superficie acristalada para la calefacción directa de la vivienda, durante las horas del día.
- **Invernadero contiguo:** Es una combinación de los dos sistemas anteriores, ya que está formado por un invernadero acristalado orientado al Sur y una pared con una gran masa térmica entre el invernadero y la vivienda. La energía solar captada por el invernadero es acumulada por la pared y posteriormente emitida

al interior de la vivienda y al mismo invernadero. La pared tiene por misión amortiguar las enormes fluctuaciones de temperatura que experimenta el invernadero. La incorporación de aberturas en la pared permite generar una termocirculación del aire y calentar directamente la vivienda.

- **Techo acumulador:** Es semejante a la pared acumuladora, con la variante de estar la masa térmica situada en el techo en lugar de en la pared Sur. El calor captado por la masa térmica durante el día se transmite a la vivienda por la noche, mientras que un aislamiento móvil protege el techo acumulador de las pérdidas de calor.

La **refrigeración** de viviendas mediante la utilización pasiva de la energía solar es una técnica no del todo desarrollada y que surge más bien como una necesidad de utilizar los sistemas de calefacción de forma continuada durante todo el año, y también para evitar los sobrecalentamientos que en verano se podrían producir al tenerlos parados.

Tres son las técnicas a destacar en este tipo de aplicación de la energía solar:

- **Ventilación nocturna:** Permite disipar calor desde el interior de una vivienda y enfriar la masa térmica para el día siguiente durante las noches de verano, cuando la temperatura exterior es inferior a la de la casa. La ventilación se produce por convección natural entre dos partes de la casa, por acción del viento o por medio de un ventilador.
- **Pared acumuladora:** Produce una ventilación natural de la vivienda practicando una ventana en la parte superior de la superficie colectora, permitiendo que el aire fresco circule a través de la vivienda y penetre por la cámara de aire existente entre la pared y la superficie acristalada. De esta forma se consigue enfriar la casa mediante ventilación natural.
- **Techo acumulador:** Absorbe el calor de la vivienda durante las horas del día, cediéndolo al ambiente durante la noche. Esto se consigue mediante un aislamiento móvil que mantiene el techo protegido de los rayos solares durante el día, mientras que por la noche lo descubre, permitiendo que se enfríe. Normalmente la masa térmica es agua, colocada en un recipiente de plástico cerrado.

Finalmente, es necesario indicar que la utilización pasiva de la energía solar no siempre es comprendida correctamente, creándose una falsa imagen en cuanto a su viabilidad técnica y económica para su utilización en edificios. Sin embargo, la utilización pasiva se puede adaptar a un buen número de viviendas ya existentes y su correcto diseño produce grados de confort equiparables a los de cualquier otro sistema. Por otro lado, sus sobrecostos de instalación son bajos en comparación con otros sistemas convencionales de calefacción y su utilización no se contradice en modo alguno con el urbanismo actual.

Asimismo, en los últimos años se ha mejorado en gran medida los diseños pasivos para actividades agrícolas, fundamentalmente en el ámbito de los invernaderos, secaderos y establos, que permiten un considerable ahorro energético en las diferentes tareas agrícolas implicadas.

## CONVERSIÓN TÉRMICA DE BAJA TEMPERATURA

La tecnología de conversión térmica a bajas temperaturas comprende todo el calentamiento de agua por debajo de su punto de ebullición para posteriormente extraer su energía y utilizarla en diversas aplicaciones. Al conjunto de elementos relacionados entre sí, y que se diseña para suministrar agua caliente a baja temperatura se conoce como *sistema solar activo a baja temperatura*, dentro del cual hay que distinguir cuatro subsistemas:

- **Subsistema colector**, destinado a captar la energía solar. Lo constituye el conjunto de colectores, placas solares, captadores o paneles.
- **Subsistema de almacenamiento** o de acumulación, constituido por depósitos de dimensiones adecuadas, siendo su misión almacenar el agua caliente que viene de los paneles para su uso posterior.
- **Subsistema de distribución**, destinado a transportar el agua caliente desde el subsistema colector al de acumulación y desde aquí a los puntos de consumo. Está formado básicamente por redes de tuberías, válvulas, bombas y accesorios, que integran una instalación clásica de fontanería.
- **Subsistema de medida y control**, compuesto por un conjunto de elementos que permitan poner en servicio los distintos circuitos y los correspondientes

instrumentos de medida.

A continuación se estudiarán por separado los subsistemas citados, intentando, no obstante, dar una visión global del sistema solar en su conjunto, tanto a nivel de aplicaciones como de costes, ya que la conversión solar térmica a baja temperatura es, sin duda, la más difundida y desarrollada, lo que la hace una de las tecnologías solares más económicas a corto plazo.

## Subsistema colector

Para captar la energía radiante procedente del Sol es necesario disponer de un elemento que pueda recibirla y transferirla a un fluido que esté en contacto directo con el dispositivo captador. Esta función de captación y transferencia de calor está encomendada a los **paneles solares**, que generalmente están compuestos por los siguientes elementos:

- Una superficie captadora de la radiación solar.
- Un circuito por donde circula el fluido capaz de transferir el calor captado por la superficie colectora.
- Una cubierta transparente.
- Un aislamiento térmico.
- Una caja protectora capaz de acoplar el conjunto al resto de la instalación.

La **placa captadora** o superficie absorbente, es el elemento principal de un panel solar, ya que su misión es recoger la radiación solar y transmitir el calor que ésta transporta. Está construida normalmente por un material metálico de color negro; también se pueden utilizar materiales plásticos para temperaturas inferiores a 50 °C. Expuesta al sol, se calentará, elevándose su temperatura hasta que exista un equilibrio entre la energía captada y la cedida por conducción, convección y radiación.

La orientación de la placa colectora ha de ser siempre hacia el Sur solar, con una inclinación igual a la latitud del lugar. Esto permite captar los rayos solares de forma perpendicular, lo que aumenta notablemente el rendimiento del colector.

Los objetivos que debe cubrir la placa captadora se pueden resumir en dos puntos:

- Absorber la máxima radiación solar y convertirla en energía térmica con el

mayor rendimiento posible.

- Transferir la mayor cantidad de calor posible al fluido portador.

Para aumentar la eficacia de las placas, sus superficies expuestas al Sol se pintan de negro mate, capaz de aumentar la absorción de energía. Sin embargo, al calentarse la superficie negra, ésta también emite energía, ocasionando pérdidas. Existe una gama de sustancias como el cromo y el níquel negro, que convenientemente dosificadas, proporcionan compuestos de alta absorbanza y baja emisividad. A esta gama de productos se les conoce con el nombre de *recubrimientos selectivos*.

No obstante, los recubrimientos selectivos presentan problemas de fabricación y aplicación, no habiéndose establecido definitivamente su duración; lo que sí es cierto es que aumentan sustancialmente el coste del colector. Se ha podido observar, sin embargo, que su utilización será cada vez más rentable en el futuro, al ir aumentando la relación rendimiento/coste.

El circuito por donde circula el fluido que transporta el calor captado por la placa puede ser de dos tipos diferentes:

- Pasivo o por circulación natural (termosifón).
- Activo o por circulación forzada (bombeo).

El **circuito pasivo** exige que el tanque acumulador esté situado a un nivel superior que el colector. De este modo se establece una circulación natural por diferencia de densidad, producto de la diferencia de temperaturas entre el fluido que está en el colector y el que se encuentra en el tanque acumulador.

El **circuito activo** permite situar el tanque acumulador a cualquier nivel respecto al colector ya que, cuando el fluido en el colector alcanza una temperatura superior a la del fluido en el tanque acumulador, se pone en marcha una bomba, que hace circular el fluido más frío por el colector.

Por otro lado, el circuito de fluido que pasa por el colector puede ser abierto o cerrado.

En el **circuito abierto** utiliza como fluido el agua de la red general, que se hace pasar por el colector y una vez caliente, se almacena en el depósito correspondiente, desde donde se descarga para su uso. Sin embargo, esta forma de utilización implica graves riesgos de corrosión, deposiciones calcáreas y otras eventualidades en el interior de los colectores, debido a la baja calidad que suele tener el agua de la red

general.

Por estos motivos se suele operar en **circuito cerrado**, disponiendo entre el colector y el tanque acumulador un intercambiador de calor; de este modo queda constituido un **circuito primario** (colector-intercambiador) y un **circuito secundario** (intercambiador-acumulador). En el circuito primario, el fluido (que en el caso de ser agua se le puede añadir anticorrosivos y/o anticongelantes) circula en circuito cerrado. En el circuito secundario circula y se almacena el agua de consumo. A través del intercambiador de calor se transfiere la energía térmica desde el circuito primario al secundario.

El rendimiento del colector aumenta de manera considerable utilizando una **cubierta transparente**, capaz de ser atravesada por los rayos solares, pero que al mismo tiempo resista a la acción prolongada del Sol. Sus misiones son proteger la placa colectora de la intemperie y, fundamentalmente, inducir un *efecto invernadero*. Así, la cubierta debe ser relativamente transparente para la radiación visible y absorbente para la radiación IR emitida por la placa negra cuando ésta se calienta. La radiación IR absorbida por la cubierta es reemitida en todas direcciones: parte de ella es emitida al exterior y se pierde, y parte es reemitida hacia la placa negra, que la absorbe de nuevo.

Las cubiertas transparentes pueden ser de vidrio, plástico, fibra de vidrio o combinaciones de estos materiales.

El vidrio es resistente a los arañazos y prácticamente inalterable a los rayos UV. Resiste temperaturas muy superiores a las que normalmente está sometido un panel solar, que no alcanza los 100 °C. La transmitancia de un vidrio depende de su contenido en hierro, oscilando entre valores del 80 y el 90%, mientras que su reflectancia no sobrepasa el 5%. Las placas de vidrio con tratamientos superficiales antirreflectantes casi eliminan la radiación reflejada pero, por supuesto, son más costosas.

Por su parte, cualquier plástico no se puede emplear como cubierta transparente, debido a que no producen buen efecto invernadero, se arañan con facilidad, retienen el polvo y la suciedad y se ven muy afectados por las radiaciones UV. Hasta ahora, por tanto, los plásticos no pueden competir con las cualidades de un buen vidrio, aunque sea de esperar que las investigaciones en este campo den buenos

resultados, dado que los costes del plástico son significativamente más bajos que los del vidrio.

La elección del material de cubierta no es la única decisión que ha de tomarse; hay que determinar el número de cubiertas que hay que instalar hasta llegar a un óptimo entre el incremento del coste y las ganancias obtenidas en términos de eficiencia. Así, en función de las condiciones ambientales y de la aplicación del agua caliente se puede, o bien prescindir de la cubierta, o bien instalar una o dos. En cualquier caso, el número adecuado será aquél que produzca la energía térmica al menor coste.

El **aislamiento térmico**, al igual que la cubierta transparente, reduce las pérdidas de calor, aumentando la eficacia del colector. El aislamiento se coloca por la parte posterior de la placa absorbente y a lo largo de sus bordes para ayudar a contener las fugas de calor por esos lados. Como materiales aislantes se suelen utilizar lana de vidrio o poliestireno expandido (corcho sintético).

Finalmente, todos los elementos del colector deben ser protegidos mediante una **caja** de un material adecuado, que sirve para ensamblar los distintos componentes descritos y poderlos acoplar en el lugar más conveniente al resto de la instalación solar. Las cajas protectoras se presentan bajo variados aspectos y materiales, entre los que pueden citarse las chapas de acero, aluminio, zinc, poliéster con fibra de vidrio, madera, etc. Sus superficies se suelen tratar con pinturas resistentes, según los ambientes en que hayan de ser instaladas.

En definitiva, los elementos descritos constituyen el subsistema colector de un sistema solar activo a baja temperatura, cuyo rendimiento ha de ser siempre el mayor posible.

Finalmente, los precios con que aparecen en el mercado los sistemas colectores son muy variados, de acuerdo con los materiales, calidades y comercialización de los mismos. Estos precios probablemente tenderán a disminuir con el tiempo, en cuanto las demandas de instalaciones solares sean lo suficientemente elevadas como para justificar una gran producción en serie en las industrias del ramo.

Para mejorar el rendimiento de los colectores de placa plana se puede eliminar el aire del espacio situado entre la superficie absorbente y la cubierta transparente, ya

que de esta forma se pueden suprimir las pérdidas por convección. A este tipo de colector se le conoce con el nombre de **colector de vacío**.

Los problemas básicos que aparecen al hacer el vacío en un colector son el cierre del sistema para que funcione durante un largo período con confianza y la manera de aliviar las tensiones mecánicas que aparecen como resultado de la presión atmosférica exterior.

El colector está formado por tres tubos concéntricos, dos de vidrio y uno metálico. El tubo metálico interior, de pequeño diámetro, actúa como alimentador y conduce el fluido portador al interior del colector. Durante el recorrido por el interior de este tubo central el fluido sufre un precalentamiento antes de su salida por el extremo opuesto al de entrada.

En este extremo, el fluido cambia su sentido y regresa hacia el de entrada, discurriendo por el espacio existente entre el tubo central y el intermedio, que no es sino una placa absorbente de forma cilíndrica; a lo largo de este último recorrido es cuando tiene lugar el proceso de transferencia de calor. Posteriormente, el fluido se descarga por un tubo que lo canaliza hacia otra unidad, repitiéndose la operación. Con este procedimiento cada tubo contribuye a aumentar la temperatura del fluido.

El tubo exterior de vidrio tiene por misión la protección, acristalamiento y aislamiento térmico del colector. En el espacio existente entre este tubo exterior y el intermedio, se ha hecho el vacío, que proporciona el aislamiento térmico requerido, ya que el vacío es una gran barrera para la transmisión de calor, tanto por conducción como por convección.

A la cara exterior del tubo absorbente se le aplica un recubrimiento selectivo, que contribuye a la generación de temperaturas más elevadas (entre 90 y 115 °C, con rendimientos de hasta el 60%) que las obtenidas en los colectores planos. Los tubos se montan sobre una superficie reflectante blanca, que hace posible la captación de la energía en todo su perímetro.

El coste de estos equipos puede duplicar al de los convencionales. pero su desarrollo y aceptación por el mercado serán muy provechosos en multitud de industrias que demandan en sus procesos de fabricación temperaturas de alrededor de los 100 °C.

## Subsistema de almacenamiento

El subsistema de almacenamiento está formado por los depósitos que acumulan el agua caliente procedente de los paneles, para ser usada posteriormente, cuando las condiciones de la demanda así lo requieran. A causa de ser la intensidad de la radiación solar tan variable a lo largo del día, es totalmente imprescindible la instalación de este sistema, ya que el calor captado por el subsistema colector no tiene por qué coincidir en el tiempo con las necesidades térmicas de las viviendas.

Por regla general, los acumuladores se dimensionan con una capacidad de 50 a 100 litros de agua por metro cuadrado de superficie captadora, lo que implica tener una reserva de agua caliente (55 a 60 °C) para uno o dos días de consumo, utilizando superficies captadoras de dimensiones normales. El aumentar el volumen de almacenamiento no siempre será posible, ya que existen factores de tipo económico y técnico que lo limitan.

En primer lugar, un aumento del volumen del tanque acumulador significa un mayor coste, no sólo por el propio depósito, sino porque la superficie del mismo es mayor, lo que significa un incremento de las pérdidas de calor, exigiendo por consiguiente, un aumento del coste del aislamiento térmico.

Por otro lado, el flujo de calor procedente del colector es independiente del volumen de acumulación. Un aumento de éste significará una menor temperatura del agua acumulada, que será tanto menor cuanto mayor sea el acumulador.

Los depósitos suelen ser de acero, por lo que deben protegerse contra la corrosión mediante un tratamiento adecuado (galvanizado, esmalte vitrificado o pintura tipo epoxi) que no influya negativamente en la calidad del agua de consumo. También se pueden construir con otros materiales, tales como fibrocemento (uralita) o poliéster reforzado con fibra de vidrio. Estos últimos presentan menor peso, menor coste y ausencia de corrosión.

Cuando se opera en circuito cerrado, se dispone de un elemento más, el intercambiador de calor, que tiene por misión hacer la transferencia de calor entre el agua caliente procedente de los paneles y la contenida en el acumulador para uso de la vivienda. Los intercambiadores de calor pueden disponerse en el mismo depósito acumulador (serpentín o encamisado) o situarse separadamente del tanque de almacenamiento.

Muy importante resulta también el aislamiento del tanque acumulador. Dicho aislamiento debe calcularse para pérdidas de energía térmica a un máximo del 3 al 5% en 24 horas. Normalmente suelen realizarse a base de mantas de fibra de vidrio aplicado en varias capas o con planchas de caucho microporoso de baja conductividad térmica. En los tanques de pequeño volumen, el aislamiento puede ser también a base de poliestireno expandido.

## **Subsistema de distribución**

El subsistema de distribución está constituido por las redes de tuberías y los accesorios correspondientes que realizarán el transporte del fluido portador de calor entre los colectores y el sistema de almacenamiento, y desde éste a los puntos de consumo.

La conexión de los subsistemas colector y acumulador se realiza mediante dos líneas: la de alimentación o impulsión y la de salida o retorno. La primera une la zona inferior del acumulador con la entrada a los colectores y la segunda pone en comunicación la salida de los colectores con la parte más alta del acumulador.

Para la elección de la tubería hay que tener en cuenta el uso y la temperatura del fluido que transporta. Para eliminar riesgos de corrosión galvánica se procura no emplear conducciones de metales diferentes y, en todo caso, se evitará el contacto directo entre las tuberías, mediante manguitos de caucho o teflón, en los circuitos de circulación del fluido.

Para los circuitos cerrados puede usarse tubería de acero negro; en aquéllos por donde circule agua caliente sanitaria, se emplearán de acero galvanizado o cobre.

Otro aspecto importante de las tuberías conductoras de fluido caliente es su aislamiento térmico. Al igual que en los depósitos, el espesor del aislamiento deberá calcularse en función de la pérdida admisible, que no deberá sobrepasar el valor del 3 al 5% de la energía térmica transportada.

Uno de los elementos más importantes del subsistema de distribución es el equipo de bombas que hay que instalar para provocar la circulación del líquido portador del calor a través de una parte del circuito hidráulico. Las bombas suelen ser de tipo centrífugo, análogas a las empleadas en las instalaciones convencionales de calefacción por agua caliente. Por tanto, deben ser capaces de funcionar a temperatu-

ras algo superiores a los 100 °C y ser resistentes a la corrosión. Otra característica estimable es la ausencia de ruidos, lo que lleva aparejado el que operen con pocas vibraciones.

La potencia de diseño de la bomba dependerá del caudal impulsado y de la caída de presión (pérdida de carga) que debe vencer.

Cuando el agua se calienta en el circuito primario, aumenta su volumen al producirse una dilatación de la misma, y si no se coloca un dispositivo adecuado para absorber la expansión pueden originarse presiones peligrosas y provocar la rotura de la instalación en algún punto. Los dispositivos empleados a tal efecto son los llamados *vasos de expansión*, que pueden ser de tipo abierto o cerrado.

El primero es simplemente un pequeño depósito sin cubrir que, a manera de cisterna, se coloca por encima del punto más alto de la instalación y que recogerá el exceso de volumen de agua producido por la dilatación.

El vaso de expansión cerrado es el de mayor empleo en los sistemas solares, y consiste en un pequeño recipiente cerrado, dividido interiormente por medio de una membrana de caucho elástico. La zona superior del vaso se llena con aire; la otra zona se conecta al circuito primario. La dilatación del agua queda absorbida por la cámara de gas al abombarse la membrana, lo que produce un aumento de presión en la cámara superior.

El mayor uso de los vasos cerrados es debido a que no exigen prácticamente ningún tipo de mantenimiento, no se producen pérdidas por evaporación ni existe la posibilidad de entrada de aire a la instalación a través del mismo.

Finalmente, serán necesarios elementos accesorios en el sistema distribuidor, entre los que se citarán básicamente las válvulas, purgadores, filtros y todos aquellos elementos empleados en las instalaciones convencionales de fontanería.

## **Subsistema de medida y control**

El sistema solar a baja temperatura se completa con el subsistema de medida y control. Dentro de los instrumentos de medida imprescindibles es necesario destacar los termómetros y los manómetros, mientras que el control generalmente se referirá al funcionamiento de la bomba de circulación y, en su caso, a actuaciones sobre válvulas automáticas situadas en el circuito.

El mecanismo de control puede ser accionado por medio de termostatos, montados directamente sobre los colectores solares, células fotoeléctricas que se excitan por encima de una potencia preestablecida o sensores térmicos, sumergidos en el circuito primario. Estos elementos ponen en servicio la bomba o las válvulas automáticas.

Las señales originadas en estos elementos son comparadas con unos valores de referencia y en función de la diferencia de señal registrada (control diferencial) se envía un impulso a los contactores de la bomba o hacia los electroimanes de las válvulas solenoides, según sea el tipo de montaje efectuado.

Los controles diferenciales suelen llevar acoplado un temporizador, con el objeto exclusivo de retardar durante un cierto tiempo el desconectado del sistema por entrada de agua fría procedente de los paneles en los casos de enfriamiento por nublados esporádicos, ya que ello daría lugar a que la instalación marchara a *saltos*, con la consiguiente sobrecarga en los motores de las bombas.

## **Características de los equipos solares de baja temperatura**

Los equipos solares activos presentan un comportamiento y exigen unos métodos de cálculo que los diferencia de los equipos que utilizan energía convencional. En general, los equipos solares no garantizan la totalidad de las necesidades energéticas. Contrariamente al criterio de dimensionado seguido para los equipos convencionales, los solares no se dimensionan para las condiciones extremas de necesidades energéticas, debido a la alta inversión inicial que se necesita para su instalación. Es decir, para los equipos solares no se consideran las necesidades máximas previsibles, sino que se toma en consideración el balance energético medio anual, con el fin de incrementar el factor de utilización y, consecuentemente, la rentabilidad del equipo. Por ello, es necesario un equipo convencional de apoyo que supla las necesidades energéticas no cubiertas por el equipo solar.

Los equipos convencionales de apoyo, con independencia de la existencia del equipo solar, se dimensionan en función de las necesidades energéticas máximas, previsibles para el momento más desfavorable del año. Con ello se podrá hacer frente a las necesidades energéticas, incluso en el caso más desfavorable de sucesión ininterrumpida de días nublados.

Para el máximo ahorro o sustitución energética por parte del equipo solar, es conveniente que los colectores trabajen a la menor temperatura posible. Para ello, el equipo solar se utilizará preferentemente para el precalentamiento y el equipo convencional de apoyo, conectado en serie respecto del equipo solar efectuará, en caso necesario, el recalentamiento final hasta la temperatura de utilización requerida.

Asimismo, el equipo de apoyo deberá disponer de un control termostático de modo que, con independencia del nivel de precalentamiento proporcionado por el equipo solar, el recalentamiento se efectúe de forma precisa hasta el valor requerido.

## CONVERSIÓN TÉRMICA A TEMPERATURAS MEDIAS

Se ha determinado que los colectores planos presentan una eficacia relativamente alta operando hasta cerca de los 45 °C de temperatura media. Ahora bien, cuando se requieren temperaturas más altas (superiores a los 100 °C), ya sea para calefacción con radiadores, para calor en procesos industriales, etc., es indispensable la concentración de la energía solar.

Existen diferentes sistemas para concentrar la radiación solar: combinaciones de espejos planos, espejos cilindro-parabólicos, espejos parabólicos, lentes normales y lentes de Fresnel (sucesión de anillos concéntricos formados cada uno por lentes simples de distintas curvaturas).

El empleo de lentes presenta el inconveniente de su peso y su precio en relación con los sistemas reflectantes, por lo que éstos se están desarrollando más ampliamente que los primeros, utilizándose como superficies reflectantes metales pulidos, vidrios plateados o materiales plásticos recubiertos de capas de aluminio.

Canalizando de las formas citadas la radiación captada hacia un punto o pequeña superficie, el denominado *foco* del sistema óptico, se logra que el dispositivo absorbedor eleve su temperatura muy por encima de la alcanzada en los colectores planos. La superficie que recibe los rayos concentrados puede tener cualquier forma, dependiendo de la técnica usada. El **factor de concentración** indica la cantidad de veces que es menor la superficie de absorción comparada con el área de entrada de la radiación recibida.

El inconveniente de los concentradores es que sólo trabajan con la radiación directa, no aprovechando la radiación dispersa, que no es enfocable. Otra desventaja

es que cuanto más aumenta el factor de concentración, menor es la desviación aceptada de los rayos incidentes respecto de la perpendicular de la superficie captadora, necesitando, por consiguiente, un sistema de orientación, cuya misión es mover el colector siguiendo los movimientos del Sol en su recorrido diario por el cielo.

El **colector cilindro-parabólico** es en la actualidad la solución más favorable para una concentración de tipo medio ( $2 \leq C \leq 40$ ), muy útil para una amplia gama de aplicaciones a temperaturas medias. El colector consiste en un espejo cilindro-parabólico que refleja la radiación recibida sobre un tubo de vidrio dispuesto a lo largo de la línea focal del sistema óptico. Dentro del tubo de vidrio está el absorbedor y el fluido portador del calor.

El absorbedor puede ser de varios tipos:

- Tubo absorbente negro con cubierta de vidrio transparente.
- Tubo de vidrio transparente con fluido absorbedor negro.
- Estrella hueca absorbente negra con cubierta de vidrio transparente.
- Tubo de vidrio transparente con estrella negra absorbente.

El sistema que más ventajas presenta es el citado en último lugar. La radiación solar penetra a través del tubo de vidrio calentando el absorbedor de estrella que, a su vez, transmite la energía al fluido portador de calor (según la temperatura, agua, glicol o aceite). El absorbedor de estrella es muy eficaz, debido a la múltiple reflexión de la radiación en sus elementos. El agente portador de calor que circula alrededor del absorbedor no es transparente a la radiación emitida por la superficie negra de la estrella, con lo que la energía emitida se absorbe en el fluido circundante, es decir, el fluido opera como un filtro selectivo. Por ello sólo se producen pérdidas por convección y radiación del mismo tubo de vidrio, siendo éstas muy inferiores a las ocasionadas en un colector plano.

El colector cilindro-parabólico tiene aproximadamente la misma eficacia que el colector plano a temperaturas de alrededor de 50 °C; sin embargo, se utiliza el primero, ya que su rendimiento es notablemente superior. Con este tipo de sistema se pueden obtener temperaturas de hasta 300 °C, útiles ya en sistemas industriales, con lo que se puede intuir su amplio rango de aplicabilidad.

Como ya se ha indicado, los colectores cilindro-parabólicos han de estar

orientados de tal manera, que en todo momento concentren los rayos solares sobre su línea focal. Para que ésto se cumpla, los colectores cilindro-parabólicos se montan igual que los colectores planos, es decir, mirando al Sur y formando un ángulo con la horizontal igual a la latitud del lugar, pero además necesitan un dispositivo que vaya haciendo girar los espejos sobre su eje focal de Este a Oeste a lo largo del día, en perfecto sincronismo con el movimiento aparente del Sol. Tal dispositivo puede ser un simple reloj, un motor síncrono que haga girar los espejos continuamente a razón de 15 °/h, o un servomotor que sólo actúa cuando recibe la señal de un sensor solar y los obliga a girar el ángulo necesario para que, de forma automática, se orienten de manera que el máximo de radiación se concentre sobre el eje focal.

Los colectores cilindro-parabólicos, aparte de poder operar a temperaturas superiores a las de los planos, tienen la ventaja de requerir depósitos de acumulación de calor más pequeños, de tener pérdidas térmicas menores, así como una sensibilidad al viento menor, debido al reducido tamaño del área de absorción. Sin embargo, tienen la desventaja de ser más caros que los planos, aproximadamente en un factor de 1,5 respecto a la superficie colectora, sin incluir los soportes, seguidores solares ni mano de obra de la instalación.

## **Aplicaciones industriales: sistemas de colectores distribuidos**

Aunque los colectores cilindro-parabólicos son aplicables en la misma gama de necesidades que los paneles planos, al poder desarrollar temperaturas considerablemente superiores, tienen interesantes posibilidades de utilización a nivel industrial.

Los sistemas solares de conversión a media temperatura por asociación de un cierto número de paneles cilindro-parabólicos se denominan *granjas solares* o *sistemas de colectores distribuidos*, pudiendo ser utilizados en principio para la producción de calor o electricidad, o bien como sistemas compuestos para la producción simultánea de ambas formas de energía.

En las granjas solares existen dos depósitos de acumulación, uno para el fluido caliente y otro para el frío, lo que permite el máximo aprovechamiento del sistema al producirse una acumulación de energía, que será utilizada cuando la radiación solar incidente sea mínima.

Este tipo de sistema se puede utilizar de forma óptima para la producción de

vapor o para el calentamiento de otro tipo de fluido en un rango amplio de temperaturas, pudiéndose alcanzar hasta los 300 °C.

Aplicaciones típicas de este rango de temperaturas son:

- Procesos térmicos en industrias (alimentaria, química, textil, etc.).
- Desalinización de agua de mar.
- Refrigeración y climatización.

Por otra parte, las granjas solares también pueden utilizarse para la generación de electricidad. La generación de potencias comprendidas entre 30 kW y 1 MW presenta los mejores rendimientos; la utilización de sistemas de colectores distribuidos para mayores potencias alcanza límites prácticos alrededor de los 2 MW.

Como sistema combinado se puede producir calor a la temperatura de trabajo del sistema, convertir mediante una turbina y generador este calor en electricidad, y como plantas de energía total utilizar el calor residual del condensador del circuito de conversión eléctrica para alimentar procesos térmicos de baja temperatura. Evidentemente, en este último caso el rendimiento global del sistema mejora notablemente.

## CONVERSIÓN TÉRMICA A ALTAS TEMPERATURAS

La producción de energía eléctrica a gran escala a partir de la conversión térmica de la energía solar exige temperaturas superiores a los 300 °C, por lo que será necesario obtener factores de concentración de la radiación muy superiores a los logrados con los colectores cilindro-parabólicos, lo que se consigue por medio de grandes paraboloides ( $100 \leq C \leq 10.000$ ), mediante un gran número de espejos enfocados hacia un mismo punto ( $100 \leq C \leq 2.000$ ), o bien mediante una combinación de ambos sistemas.

Los **paraboloides** reflejan la radiación solar incidente hacia un área muy reducida situada en el foco, donde se encuentra el absorbedor, una caldera de diseño especial a través de la cual circula el fluido portador de calor. En los absorbedores se originan temperaturas del orden de los 4.000 °C, siendo necesario que el sistema siempre esté perfectamente orientado hacia el Sol.

Este sistema se puede combinar con un cierto número de espejos planos en lo que se ha dado en llamar **hornos solares**. una instalación de este tipo consiste en un gran número de espejos planos que reflejan los rayos solares hacia un gran colector

parabólico, el cual a su vez concentra los rayos en su foco, donde se encuentra la caldera.

Sin embargo, el sistema de conversión térmica a altas temperaturas más extendido es el de **receptor central**, que está formado por un campo de espejos orientables (*heliostatos*) que concentran la radiación solar sobre una caldera situada en lo alto de una torre ubicada bien en el centro del campo, o bien en uno de sus extremos.

Los elementos colectores de las centrales de torre son los **heliostatos**, espejos que mantienen continuamente focalizada la radiación solar en un punto determinado.

La **superficie reflectora** es la parte más importante del heliostato, al ser la encargada de recoger, reflejar y dirigir la radiación solar. Sus parámetros más significativos son la geometría (generalmente varios espejos rectangulares planos) y su reflectancia (normalmente vidrios plateados con valores superiores al 90%).

La **estructura de soporte** de la superficie reflectora tiene como misión no sólo mantenerla y darle rigidez, sino también actuar sobre la focalización definitiva de los espejos.

Los **mecanismos de actuación** de la superficie reflectora son necesarios para el seguimiento solar en dos ejes y para realizar los movimientos inherentes al inicio o fin de operación o de emergencia.

Los **pedestales y cimentaciones** (metálicos o de cemento) aseguran la rigidez y estabilidad de la superficie reflectora a la vez que sirven de soporte de los mecanismos de actuación.

La **electrónica de control** de cada heliostato suele ir instalada en el pedestal, realizando las tareas de ejecución de órdenes y de información de su estado, gobernada por un ordenador central.

El **campo de heliostatos** está formado por el conjunto de todos ellos y constituye el elemento global de captación, dirección y concentración de la radiación solar. Su comportamiento global puede definirse a partir de su rendimiento, obtenido de los siguientes factores:

- Sombra de la torre.
- Sombra de los heliostatos.
- Atenuación atmosférica.

- Error de seguimiento.
- Limpieza y conservación de las superficies reflectoras.

La concepción de un campo de heliostatos depende de los objetivos que se quieran alcanzar en la utilización de la central; por tanto será distinto si se quiere optimizar la energía producida en invierno o en verano, por la mañana o por la tarde, o bien según la disponibilidad del suelo. Una vez definidos los objetivos, se habrá de optimizar el rendimiento del campo, teniendo en cuenta los factores antes indicados.

Los **receptores** o absorbedores, situados en lo alto de la torre, tienen como misión facilitar la transformación de la energía radiante en energía interna de un fluido de trabajo. En estos sistemas, que deben operar a muy altas temperaturas, se trata de obtener el mayor rendimiento posible en la transferencia de energía, compatibilizándola con los requerimientos de resistencia del material ante los elevados valores de intensidad de radiación incidente, del orden de  $1 \text{ MW/m}^2$ . Se han construido dos tipos fundamentales: receptores de cavidad y receptores externos o abiertos.

El receptor de cavidad consiste en un volumen con una abertura de pequeña superficie en comparación con la superficie total, con lo que se consigue disminuir las pérdidas por radiación a través de la misma. El receptor externo es simplemente una superficie absorbedora; apenas se utiliza.

El calor captado en el absorbedor es cedido a un **fluido portador** circulando en circuito cerrado que, debido a las altas temperaturas que ha de soportar (superiores a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) suele ser sodio fundido, aunque a veces también se opera con un sistema de vapor de agua a presión. Este fluido primario caliente se hace pasar a un **sistema de almacenamiento**, para luego ser utilizado como medio de calefacción de un sistema de generación de vapor. Una vez que el fluido primario ha cedido gran parte de su energía térmica retorna, a través del almacén de fluido, al sistema receptor de la torre, cerrando así el circuito. El vapor producido en el cambiador de calor alimenta una turbina convencional que actúa sobre un alternador de donde se obtiene la electricidad, que se envía a la red.

La tecnología de las centrales solares se encuentra actualmente en fase de pleno desarrollo. Las instalaciones existentes se pueden considerar como plantas piloto de experimentación, de más o menos potencia sin pretender, por tanto, que de ellas se obtenga una rentabilidad económica inmediata, aunque es evidente que se obtendrá

una rentabilidad medida en parámetros de innovación tecnológica, que se podría traducir posteriormente en rentabilidad económica.

Las posibilidades de implantación de este tipo de centrales pueden quedar restringidas a ser complementarias de las centrales actuales de combustibles convencionales, y sólo en aquellas épocas y lugares donde las condiciones solares sean muy favorables. Estas posibilidades de implantación aumentarían si se resuelven los problemas del almacenamiento de la energía térmica que hoy día existen.

Desde el punto de vista económico, el precio del heliostato se sitúa actualmente en el orden de las 50.000 ptas/m<sup>2</sup>. Dentro del capital inmovilizado de una central solar, los heliostatos representan el 50% del mismo, aunque algunas previsiones lo sitúan entre el 35 y el 40%. A título orientativo, se puede estimar el coste del kW eléctrico (kWe) instalado en centrales solares de torre en unas 500.000 ptas. Si se compara este coste con el de las centrales convencionales de fuel (60.000 ptas/kWe instalado) se ve claramente que aún resultan excesivamente caras para hacerlas competitivas económicamente.

Los rendimientos de transformación de las centrales solares oscilan en torno al 10%. Este bajo rendimiento, unido a la dispersión de la energía solar (1 kW/m<sup>2</sup>, en los casos más favorables) y a la limitación del tiempo de radiación útil (de 1.500 a 3.000 h/año), hacen pensar que tal vez la solución no consista en construir grandes centrales, que ocuparían grandes superficies de terreno, sino pequeñas unidades muy numerosas y acopladas a los mismos lugares de uso.

Otra modalidad de uso de centrales solares que se supone puede tener gran impulso en el futuro es la de plantas mixtas convencionales-solares, consistentes en adaptar plantas convencionales, que hayan dejado de ser rentables por cualquier razón, para operarlas con ayuda de energía térmica procedente de una torre solar.

Para que esta solución presente viabilidad económica es necesario que la planta convencional tenga una potencia comprendida entre 50 y 150 MWe y esté situada en una región con insolación superior a los 700 W/m<sup>2</sup>. En cualquier caso, la aportación solar para este tipo de plantas, no superaría el 50% de la potencia máxima instalada.

De lo expuesto se puede deducir que las centrales solares están aún lejos de resolver el problema energético, aunque se pueden considerar válidas como un modesto complemento de las centrales térmicas convencionales.

# CONVERSIÓN ELÉCTRICA: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Existen dos efectos físicos que permiten la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica: el termoeléctrico y el fotoeléctrico. En el primero, la corriente eléctrica se produce a partir del calor de la radiación luminosa, mientras que en el segundo, es la energía de los corpúsculos constituyentes de la luz (fotones) la que se aprovecha para producir electricidad.

El efecto termoeléctrico presenta ciertas variantes, generación termoiónica, generación termoeléctrica, en las que no se profundizará aquí por su casi nula aplicación actual, mientras que respecto al efecto fotoeléctrico se pueden contemplar la generación fotoemisiva, la fotogalvánica y la fotovoltaica. Aunque las dos primeras variantes fotoeléctricas tampoco tienen mucha aplicación, la generación fotovoltaica sí es de gran importancia, y la conversión directa de energía solar en energía eléctrica está basada casi por completo en el denominado *efecto fotovoltaico*.

El **efecto fotovoltaico** es la producción de una fuerza electromotriz en un **material semiconductor** como consecuencia de la absorción de radiación luminosa. Los semiconductores son sustancias de conductividad eléctrica intermedia entre un aislante y un conductor. Una de sus características más importantes desde el punto de vista tecnológico, es la existencia en ellos de dos tipos de portadores de corriente: unos dotados de carga eléctrica negativa, constituidos por electrones libres, y otros dotados de carga eléctrica igual en magnitud pero de signo positivo, que se denominan *huecos*. Ciertos semiconductores presentan predominantemente conducción por huecos y se denominan **semiconductores tipo p** y otros presentan predominantemente conducción por electrones y se denominan **semiconductores tipo n**.

Una cualidad extremadamente importante es que la resistividad de un semiconductor, independientemente de su naturaleza (silicio, germanio, arseniuro de galio, fosfuro de galio, sulfuro de cadmio, sulfuro de cinc, etc.), puede disminuirse añadiendo pequeñas cantidades de impurezas apropiadas, o incluso puede hacerse que un semiconductor tipo p pase a ser tipo n, o viceversa. Al proceso de adición controlada de impurezas que afectan a las propiedades eléctricas del semiconductor se denomina *dopaje* o *dopado*. En el silicio, el semiconductor más ampliamente usado

hoy día con fines electrónicos, las impurezas de fósforo o arsénico lo hacen tipo n, mientras que las impurezas de boro o galio lo hacen tipo p. El alto grado de pureza necesario para la obtención de semiconductores es el motivo fundamental de su elevado coste, como se verá más adelante.

Cuando se construye un diodo semiconductor (dispositivo electrónico de propiedades asimétricas de conducción, es decir, conduce en un solo sentido) con un semiconductor tipo p y otro tipo n, en el plano de separación entre ambos semiconductores (unión p-n) existe un elevado gradiente de ambos tipos de portadores que hace que éstos tiendan a abandonar por difusión la región en que son abundantes y vayan a la región en que son minoritarios: los electrones hacia la zona p y los huecos hacia la zona n.

Al ocurrir esto, dejan en la zona próxima a la unión las cargas fijas, positivas en la zona n y negativas en la zona p, sin la neutralización que le daban las cargas móviles, electrones y huecos, respectivamente. Todo ello induce un campo eléctrico a ambos lados de la unión p-n, dirigido de la zona n a la p y que tiende a compensar el efecto anterior para mantener el sistema en equilibrio (carga neta nula).

Cuando sobre un semiconductor incide una radiación luminosa con energía suficiente para romper los enlaces de los electrones de valencia y generar pares electrón-hueco, la existencia de una unión p-n separa dichos pares, enviando a los portadores minoritarios hacia la región donde son mayoritarios, debido a su alto campo eléctrico. Un aporte de cargas de este modo afluyendo a ambas regiones (electrones afluyendo a la zona n y huecos a la zona p) es, en resumen, una corriente eléctrica que atraviesa la unión p-n desde la zona n a la p, y que puede ser entregada a un circuito exterior, saliendo por la región p y entrando por la región n.

Así pues, una **célula solar fotovoltaica** está constituida por un disco monocristalino de silicio, dopado en su superficie superior (expuesta al Sol) hasta hacerla de tipo n en un espesor de 0,6  $\mu\text{m}$ , mientras que su parte inferior se deja de tipo p, con un espesor de hasta 0,4 mm. Así se produce una unión p-n paralela a la superficie iluminada de la célula.

Para tomar contactos eléctricos al semiconductor, se depositan dos capas metálicas sobre ambas caras de la célula, pero la de la superficie superior en forma de rejilla, ya que de lo contrario no sería posible que la luz entrase en el semiconductor.

La corriente fotovoltaica generada sale por el contacto p, atraviesa una carga externa, y vuelve a entrar por el contacto n.

En condiciones de radiación solar de  $1 \text{ kW/m}^2$ , una célula solar en condiciones óptimas de trabajo proporciona una potencia de  $14 \text{ mW/cm}^2$  ( $28 \text{ mA/cm}^2$  a una tensión de  $0,5 \text{ V}$ ), lo que supone un rendimiento del 14%. Si varía la iluminación, la corriente de la célula varía proporcionalmente, en tanto que la tensión se mantiene casi invariable. Naturalmente, estos niveles de tensión son inutilizables para la mayor parte de las aplicaciones, pero si se desea obtener mayor tensión, basta conectar un cierto número de células en serie. Así, conectando 36 de ellas (dimensiones normales,  $7,6 \text{ cm}$  de diámetro) se obtienen  $18 \text{ V}$ , tensión suficiente para hacer funcionar equipos a  $12 \text{ V}$ , incluso con iluminaciones mucho menores de  $1 \text{ kW/m}^2$ . Estas 36 células interconectadas y montadas entre dos láminas de vidrio que las protegen de la intemperie constituyen lo que se denomina un **módulo fotovoltaico**.

Una serie de módulos montados sobre un soporte mecánico constituyen un **panel fotovoltaico**. Los módulos de un panel se pueden conectar en serie o en paralelo, de modo que puede conseguirse casi cualquier valor de tensión y de corriente.

De cualquier manera, la corriente suministrada por un panel fotovoltaico es corriente continua, válida para una serie de aplicaciones, pero no para aquéllas que usan corriente alterna. Por ello puede ser necesario disponer de un equipo electrónico que convierta la corriente generada por el panel en corriente alterna o incluso en corriente continua de diferentes características que la original. Esta fase del proceso de aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica se denomina  *acondicionamiento de potencia*.

En la mayoría de las aplicaciones fotovoltaicas de baja potencia, el panel se conecta en paralelo a un acumulador electroquímico (batería) para disponer de energía eléctrica almacenada. Entre el panel y el acumulador es necesario entonces insertar un diodo en serie (diodo de bloqueo), conectado de manera que permita la salida de corriente del panel, pero que impida que el acumulador se descargue a través del panel en ausencia o deficiencia de luz. Asimismo, según el acumulador va alcanzando su máxima carga, la corriente que admite es menor, por lo que el panel tiende a aumentar la tensión de salida. Como la tensión del acumulador no debe superar su valor máximo

de carga, hay que introducir un regulador de tensión que limite la tensión máxima del panel y así evitar dañar la batería.

Finalmente, un generador fotovoltaico puede estar conectado en paralelo con la red, en cuyo caso estará previsto emplear energía procedente de ella cuando falte el Sol y cedérsela cuando la producción sea mayor que el consumo, lo que obliga a que la instalación disponga de un ondulator (dispositivo que transforma la corriente continua en corriente alterna), y de los controles electrónicos adecuados para mantener constante la calidad de la energía eléctrica procedente de la instalación solar.

Los sectores de aplicación de la energía solar fotovoltaica son diversos y claramente diferenciados; entre ellos se puede citar:

- Aplicaciones remotas.
- Usos rurales.
- Autogeneración.
- Grandes centrales.

Las **aplicaciones remotas** se refieren a aquellos casos en que es necesario el uso de electricidad en lugares no habitados donde hay que prever un pequeño consumo de electricidad. Casos típicos son los repetidores de radio y televisión, radiofaros, balizas, etc., los cuales exigen además una alta fiabilidad del sistema de alimentación. Ya hoy día es rentable disponer en estos casos de un panel fotovoltaico que, pese a su elevado coste es, sin embargo, la solución más económica. Por supuesto, en este tipo de aplicaciones es necesario prever una acumulación de energía a base de baterías.

Los **usos rurales** constituyen el siguiente mercado a cubrir con la electricidad solar fotovoltaica. En este mercado es preciso competir con el grupo electrógeno convencional, barato pero sometido a la servidumbre del transporte de combustible, que en muchos lugares del área rural puede ser caro, y cuya menor fiabilidad, ruidos, etc., hacen poco atractivo su uso.

Se trata de instalaciones aisladas de la red general y en muchos casos no requieren acumulación, como por ejemplo en aplicaciones de riego y en muchas tareas mecánicas (descascarillado, molienda, etc.) en las cuales no es imprescindible la continuidad del servicio. En los casos en que la continuidad del servicio sea crítica, se pueden obtener excelentes valores de fiabilidad mediante el uso de sistemas

acumuladores adecuadamente dimensionados, que permitan obviar el carácter aleatorio de las variables climáticas.

Otras muchas aplicaciones rurales (iluminación de viviendas, establos e invernaderos, bombeo de agua, etc.) son atendidas de forma rentable mediante sistemas fotovoltaicos, hasta el rango de varios kW a los costes actuales.

Es de esperar que la reducción de costes de la energía fotovoltaica haga rentable su empleo para la **autogeneración** de energía, ya sea en usos domésticos, ya sea en pequeñas centrales. En ambos casos los centros de consumo se supondrán conectados a la red, utilizando la energía solar como base del consumo y la de la red como complemento. En estos casos incluso se puede prever la venta del excedente de electricidad a la compañía eléctrica.

Finalmente, el uso de **grandes centrales fotovoltaicas** estará asociado a la evolución de la tecnología fotovoltaica, del coste del combustible y de las condiciones climáticas, así como a la competitividad relativa de cada solución.

## **Evolución tecnológica de las células solares**

El elevado coste de las células solares de silicio no es atribuible al coste intrínseco de las materias primas, sino al coste del proceso y de la energía necesaria para el mismo.

Tecnológicamente, la fabricación de células solares es muy compleja y no es una actividad que se desarrolla con una integración total de los diferentes procesos. Al contrario, la materia prima, arena común ( $\text{SiO}_2$ ) debe ser tratada en una planta, donde se reduce a silicio. A continuación se traslada a otra, donde sufre un complejo proceso de purificación, obteniéndose el polisilicio, en atención a su estructura cristalina. En otra fábrica se transforma éste en silicio fotovoltaico y posteriormente pasa a una cuarta, donde se efectúan las operaciones físico-químicas de formación de la unión p-n y de formación de electrodos metálicos. Por último, de ésta pasa a otra, donde la célula se suelda, se encapsula y expende en forma de módulos y paneles.

La primera etapa de obtención de silicio de grado metalúrgico, sin purificar, se basa en tecnología metalúrgica convencional. En la siguiente etapa, el silicio se transforma en un compuesto de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ), que se purifica por destilación fraccionada y se vuelve a descomponer en silicio, ya ultrapuro. Este es el punto más

caro de todo el proceso, ya que requiere un gran consumo de energía. Además, la reacción es tan lenta que es preciso disponer de un gran número de cámaras de reacción, lo que eleva muchísimo el capital inmovilizado.

Para obtener láminas fotovoltaicas se comienza por fundir el polisilicio ultrapuro, añadiéndole las impurezas de boro de forma controlada; luego se solidifica lentamente en forma de lingotes cilíndricos de gran perfección cristalográfica (monocristales), que posteriormente se cortan en láminas. Estas operaciones son muy costosas no sólo porque el proceso de crecimiento del cristal es muy lento y consume mucha energía, sino también porque la cantidad de silicio ultrapuro desperdiciada es muy elevada (del orden del 80%).

Para reducir los costes de esta etapa se están intentando desarrollar tres tipos de soluciones diferentes:

- Desarrollo de sistemas de crecimiento de lingotes en operación semicontinua de alta velocidad y de sistemas de aserrado rápido y con pocas pérdidas de silicio.
- Empleo de técnicas que produzcan directamente el silicio en forma de lámina, aprovechando los efectos de capilaridad y de tensión superficial del silicio fundido, que solidifica en láminas delgadas (crecimiento de película con borde definido).
- Crecimiento de lingotes policristalinos, en los que el requisito de perfección cristalográfica ha sido rebajado. Ello da lugar a células de menor rendimiento, lo que exige la utilización de superficies captadoras mayores.

Una vez logradas las obleas de silicio, se efectúan las operaciones pertinentes para construir la célula fotovoltaica, que pasa posteriormente a la operación de ensamblaje para producir los módulos y los paneles.

Existen **materiales semiconductores** con propiedades fotovoltaicas, cuya menor perfección cristalina puede abaratar notablemente el coste de las células solares. Así, las células de CdS/CuS<sub>2</sub> (sulfuro de cadmio/sulfuro de cobre) son mucho más baratas, aunque sus rendimientos son menores (del 4 al 6%), mientras que las células de arseniuro de galio (GaAs) son todavía muy caras, pero pueden producir un rendimiento de hasta el 25%. Asimismo, las células de silicio amorfo (no cristalino) parecen tener unas perspectivas muy esperanzadoras.

Respecto a la tecnología de **aumentar la radiación incidente** sobre la célula, se pueden contemplar dos aspectos bien diferenciados: las células bifaciales y las células de concentración.

La **célula bifacial** es capaz de recibir energía solar por ambas caras, y su funcionamiento es algo diferente al comentado para las células convencionales. Su ventaja radica en que puede aprovechar la importante cantidad de energía solar reflejada por la superficie terrestre (albedo), que en promedio es del 20% de la incidente. Si se pintan de blanco las zonas que rodean a la célula, esta cantidad puede alcanzar valores de hasta el 60%, con lo que se han obtenido rendimientos de hasta el 24% con células solares bifaciales.

Otro método de aumentar la radiación incidente sobre la célula es el de utilizar **concentración óptica**, como ya se ha visto al estudiar la conversión térmica de la energía solar. El problema básico de este sistema es la disminución del rendimiento de las células cuando aumenta su temperatura, por lo que es necesario hallar modos de reducir el calentamiento de las mismas, bien rechazando el flujo solar inutilizable o eliminando rápidamente el calor de las células.

El flujo incidente puede reducirse mediante filtros adecuados o recubrimientos elevadamente emisores en el IR, con lo que se ayuda a eliminar el calor por radiación. La extracción de calor de la célula se puede resolver conduciendo el calor de su superficie hasta un bloque de un material buen conductor del calor, de donde éste sería eliminado por un fluido refrigerante (agua). Evidentemente, estas soluciones afectan desfavorablemente a los costes.