

The background features a large, stylized sun with a thick white outline and a solid white center. Concentric white circles radiate from the sun, representing rays. A thick white vertical line and a thick white horizontal line intersect at the center of the sun. Below the sun, a dark grey silhouette of a factory with several chimneys is visible. To the right of the factory, there is a smaller circular graphic with concentric lines, possibly representing a solar collector or a lens. The overall design is minimalist and technical.

CURSO DE ENERGIA SOLAR

C.T.E. CENTRO DE TECNOLOGIA
EDUCATIVA

**CURSO
DE
ENERGIA
SOLAR**

TOMO 6

ENERGIA SOLAR

El presente Curso de Energía Solar, especialmente pensado para la enseñanza a distancia, ha sido desarrollado por el siguiente equipo de profesionales:

- **Textos:** Jaume Ribot i Martín, *Ingeniero Industrial, ex-profesor de la Universidad Politécnica de Barcelona, miembro de ISES (International Solar Energy Society).*
- **Dibujos:** Antonio Escuder Torres.
- **Ilustraciones humorísticas:** Pere Rovira Castellá.
- **Fotografías:** J. Ribot y archivo de CTE.
- **Maquetación y montaje:** Albert Rovira Sumalla.
- **Supervisión didáctica:** José L. Barón Sesé.

© CTE-Centro de Tecnología Educativa, S.A.
Via Augusta, 4, 6ª planta.
08006 Barcelona.

Segunda edición, marzo 1995.
ISBN Obra completa: 84-7608-054-9.
ISBN Tomo 6: 84-7608-091-3.
D.L.: B-8924-1995.

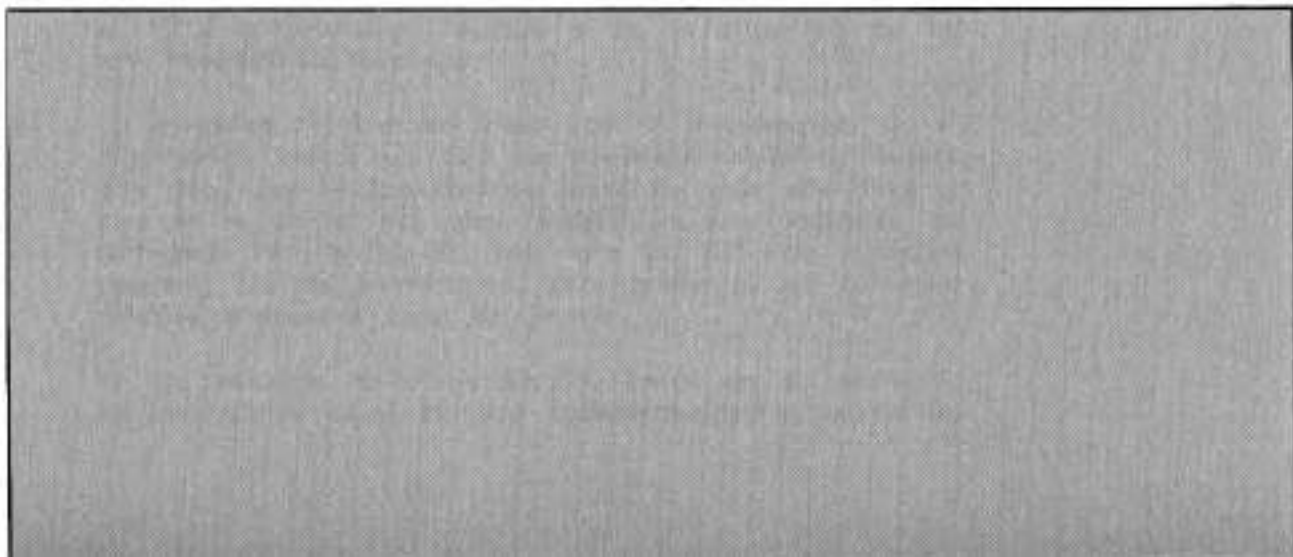
Impreso en Imprimeix, S. Coop. Ltda.
C/ Eduardo Maristany, 100. Badalona (Barcelona) ESPAÑA.

Reservados los derechos para todos los países.
Se prohíbe la reproducción total o parcial.

SUMARIO

	<u>Pag.</u>
Lección 24. Aplicaciones de climatización. Climatización solar. Invernaderos. Secaderos. Granjas. Piscicultura. Desalinización del agua del mar. Piscinas.	5
Lección 25. Colectores de concentración. Necesidad de la concentración. Tipos de colectores de concentración. Ecuaciones del balance energético en colectores de concentración. Colectores cilindro parabólicos. Colectores doble parabólicos. Helioestatos. Colectores de concentración especiales.	29
Lección 26. Aplicaciones de los colectores de concentración. Utilidad de los colectores de concentración. Calefacción. Aire caliente. Vapor. Frio. Producción de electricidad. Obtención de metales y aleaciones. Ensayos de choque térmico. Cálculo del valor de la radiación directa. Datos de interés.	55
Lección 27. Altas temperaturas. Hornos solares. Centrales solares. Altas temperaturas. Almacenamiento químico. Hornos solares. Centrales solares. Datos de interés.	79

LECCION 24





24. APLICACIONES DE CLIMATIZACION

INTRODUCCION

En esta lección trataremos de una serie de aplicaciones de climatización, tales como invernaderos, secaderos, granjas y piscinas. Todas estas aplicaciones presentan la ventaja de requerir bajas temperaturas en su funcionamiento, lo que las hace idóneas para el uso de la energía solar.

CLIMATIZACION SOLAR

El aire, como todos sabemos, contiene una cantidad variable de **vapor de agua**. La cantidad de vapor de agua se puede expresar en términos de **humedad absoluta** o **humedad relativa**.

La **humedad absoluta** es la cantidad de agua que contiene un Kg de aire seco. Como el aire seco disuelve más o menos vapor de agua según sea su temperatura, el valor de la humedad absoluta no suele resultar práctico, por lo que se prefiere la definición de humedad relativa.

La **humedad relativa** es el cociente entre la humedad absoluta existente en ese momento y la humedad absoluta **máxima** que puede contener la masa de aire a esta temperatura. La humedad máxima absoluta corresponde al 100% de humedad relativa y es la situación de un aire **saturado** de humedad.

La humedad relativa se mide con un **higrómetro**. Si el higrómetro indica un 50% de humedad relativa, quiere ello decir que la cantidad de vapor de agua que lleva el aire es la mitad del que tendría un aire saturado de humedad. Por lo tanto, este aire de 50% de humedad relativa, podría humectarse, para aumentar su humedad relativa, o secarse, para disminuirla.

En los estudios de climatización, tanto en su vertiente de calefacción como de aire acondicionado, se utiliza el

llamado **diagrama psicométrico**, que es una gráfica en la que el eje horizontal contiene los valores de la temperatura ambiente y el vertical las humedades absolutas (Fig. 1).

La humedades relativas son **líneas curvas** que atraviesan

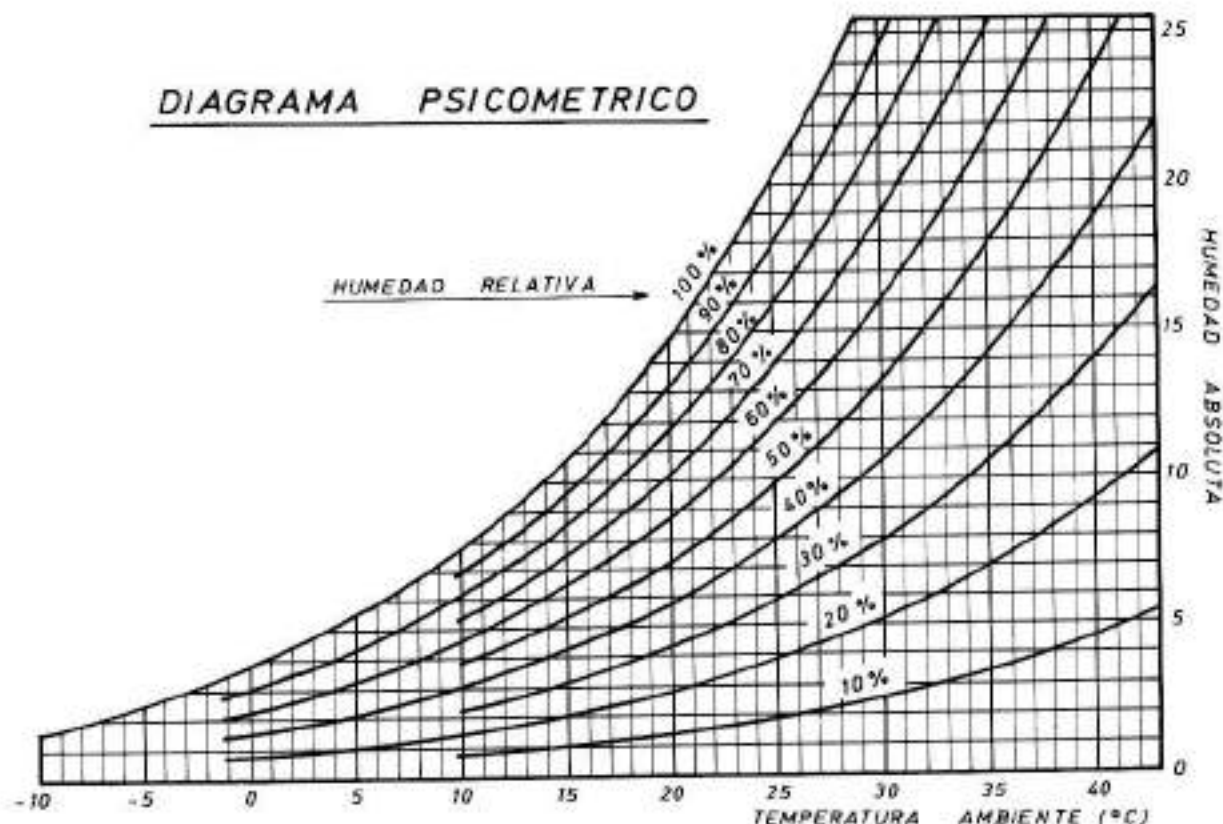


Fig. 1.- Diagrama Psicométrico co.

el diagrama. La máxima humedad relativa es la del 100%, ya que en caso de superarse este valor, el aire no disuelve la humedad y se entra en la **zona de nieblas**, en la que el agua excedente no está ya en forma de vapor de agua transparente sino en forma líquida de gotitas (nieblas).

Podemos aumentar o disminuir la temperatura de una habitación moviéndonos por el diagrama psicométrico horizontalmente.

Si aumentamos la temperatura mediante un sistema de calefacción, tal como suelo radiante, convectores, aire

caliente, resistencias eléctricas, etc., nos movemos hacia la derecha en el diagrama psicrométrico y cortamos líneas de humedad relativa decreciente: estamos **secando** el aire (Fig. 2).

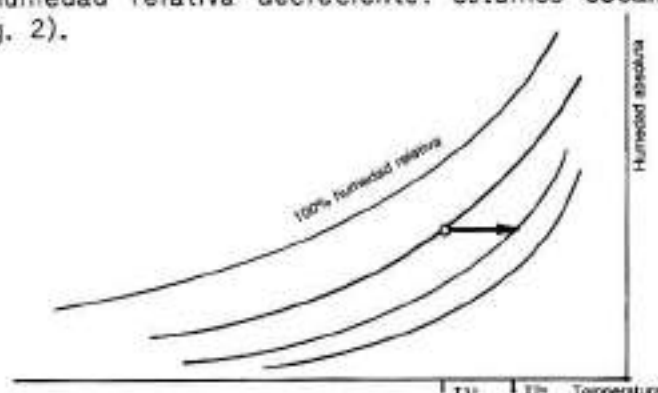


Fig. 2.- El secado del aire se realiza moviéndonos en el diagrama psicrométrico en forma horizontal y hacia la derecha; cortamos así líneas de humedad relativa decreciente.

Este aire, en realidad, contiene la misma cantidad de vapor de agua (la humedad absoluta es constante, puesto que nos movemos horizontalmente, pero la humedad relativa es menor). Al ser menor la humedad relativa, el aire es más seco y tiene propiedades diferentes, pues seca el enlucido de yeso, muebles, cortinajes, se nota sequedad en la mucosa nasal al respirar, etc.

Si enfriamos el aire, nos moveremos hacia la izquierda siguiendo una línea horizontal, pero así como en el caso de calefacción podíamos desplazarnos tanto como quisiéramos, aquí sólo podemos enfriar el aire siguiendo una línea horizontal hasta llegar a la curva de 100% de humedad relativa. Si seguimos enfriando, el aire ya no puede admitir más agua vaporizada, por lo que ésta se **condensará** en forma de **agua líquida** en el propio aparato refrigerador. Podemos seguir enfriando, pero entonces ya no seguiremos una línea horizontal sino que nos moveremos hacia la izquierda **descendiendo** por la **propia línea de humedad relativa del 100%**. La humedad absoluta disminuye, pues parte del agua se separa del aire y se recoge en forma líquida (Fig. 3).

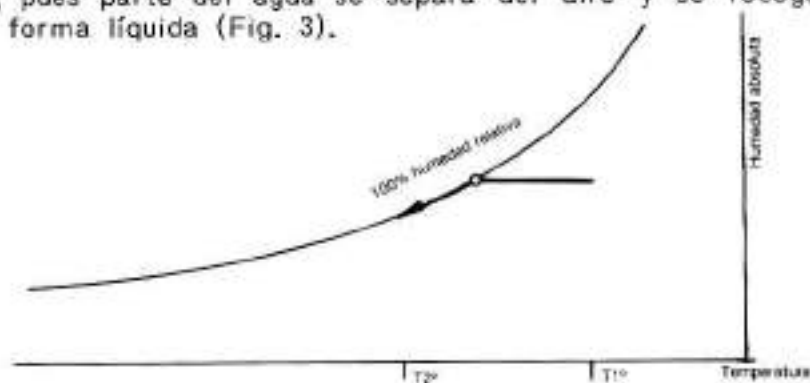


Fig. 3.- Al enfriar el aire nos movemos horizontalmente hacia la izquierda en el diagrama psicrométrico. Al alcanzar la línea del 100% de humedad relativa, tiene lugar la recogida de agua líquida.

Si se deseara aumentar la temperatura sin variar la humedad relativa, habría que **humectar**, es decir, añadir vapor de agua al ambiente mediante un humidificador. Este proceso es **delicado**, pero puede conseguirse haciendo hervir agua dentro de la habitación. En general, no se usa este sistema, pues la disminución de humedad relativa como consecuencia de la elevación de temperatura se compensa en parte por un mayor aporte de humedad procedente del yeso de las paredes, muebles, la respiración de las personas, etc.

Así, pues, salvo casos especiales, al calefactar una estancia, su humedad relativa disminuye. El proceso de refrigeración es más complejo, puesto que es **desagradable** estar con humedades relativas altas.

Mientras no alcancemos la curva del 100% de humedad relativa, podemos enfriar la habitación a costa de aumentar su humedad. Si el ambiente previo era muy seco y no se ha de enfriar excesivamente, el proceso puede resultar válido, pero en casos de ambientes húmedos y si tenemos que enfriar bastante, alcanzaremos la curva del 100% de humedad relativa (**punto de rocío**).

El **punto de rocío** es el punto donde la curva de humedad relativa del 100% corta a la de enfriamiento horizontal. Este punto indica que un cuerpo situado a esta temperatura en el seno del aire de la habitación se cubrirá de **rocío** (gotitas de agua líquida), puesto que el aire que esté en contacto con él estará saturado de humedad. Si este cuerpo es un fan-coil a la temperatura de rocío o inferior a ella, empezará a **gotear** agua de condensación.

Podemos seguir enfriando el aire y recogiendo agua líquida hasta obtener la temperatura deseada, en cuyo momento podemos considerar que el proceso de refrigeración ha terminado. Pero este aire está **saturado de humedad** y no es conveniente ni para las personas ni para las cosas (pueden aparecer manchas de humedad en las paredes, las maderas de los muebles se deforman, etc.).

Lo que se hace es **seguir enfriando** todavía más este aire con la consiguiente recogida de agua líquida, y posteriormente **calentarlo** para disminuir su humedad (Fig. 4).

Así, pues, un acondicionador de aire que trabaje enfriando realiza las siguientes operaciones en dos "fan-coils" que generalmente están juntos y son atravesados por el mismo

flujo de aire de un único ventilador:

- Enfriamiento del aire hasta llegar al punto de rocío.
- Enfriamiento del aire ya saturado de humedad con recogida de agua líquida (esta agua líquida es la que a veces se ve gotear de los aparatos de aire acondicionado).
- Calentamiento del aire saturado de humedad hasta que alcance una humedad relativa razonable.

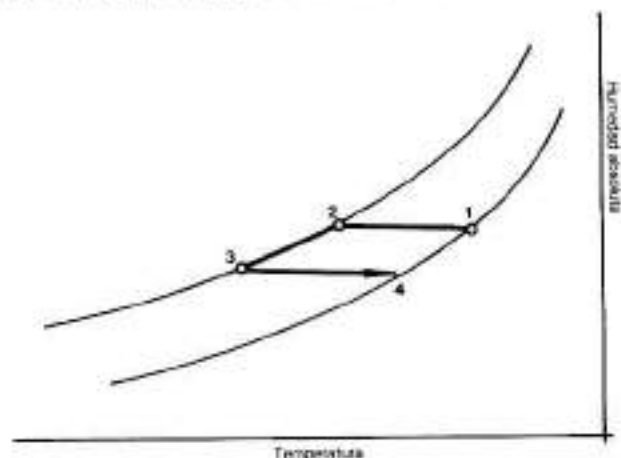


Fig. 4.- Proceso de acondicionamiento de aire. De 1 a 2 el aire se enfría y aumenta su humedad. De 2 a 3 sigue enfriándose con recogida de agua líquida. De 3 a 4 se calienta para disminuir su humedad. De esta manera podemos obtener aire frío en las mismas condiciones de humedad que el aire caliente.

Estas operaciones las puede realizar una bomba de calor sin ningún problema, puesto que el evaporador será el "fan-coil" en el que se enfriará el aire, y parte del condensador (no todo, evidentemente) será el "fan-coil" donde se calentará el aire hasta alcanzar el grado de humedad correcto.

INVERNADEROS

Los vegetales aprovechan la energía solar mediante el proceso de la fotosíntesis, que **no** es especialmente eficiente desde el punto de vista energético, pues tiene un rendimiento del 1% en los mejores casos.

Los vegetales necesitan para su desarrollo agua, luz, calor y nutrientes. Dejando aparte el tema de los nutrientes, aportados por la propia tierra o por los abonos, el crecimiento de los vegetales está influido de forma importante por la **temperatura**.

La Luz que reciben los vegetales es la del Sol, que es gratuita. Por lo tanto, resulta descabellado pensar en iluminar mediante luz artificial a los vegetales con el

fin de aumentar su productividad, sobre todo teniendo en cuenta el bajo rendimiento energético de la fotosíntesis.

El consumo de agua depende de la especie vegetal, de la temperatura ambiente y de la transpiración a través de las hojas, hecho que está relacionado con la humedad relativa. Si la humedad es muy alta, las hojas transpiran poco, si es baja transpiran mucho y pierden agua rápidamente.

La temperatura afecta mucho al rendimiento energético de la fotosíntesis. Con bajas temperaturas, la fotosíntesis se detiene y muchos vegetales pierden las hojas y cesan totalmente en su actividad. A medida que se aumenta la temperatura, la fotosíntesis se activa hasta llegar a un valor óptimo que suele estar (según las especies vegetales) a unos 25°C. Con temperaturas más elevadas, el rendimiento decae hasta llegar a anularse en temperaturas altas.

Como se deduce de lo dicho, las temperaturas requeridas son relativamente bajas, lo que es ideal para el uso de colectores solares sencillos, que funcionarán con altos rendimientos a estas temperaturas.

Los **invernaderos** son habitáculos con paredes transparentes, de forma que entre en ellos la máxima luz posible. Debido al **efecto invernadero**, la energía solar atraviesa sin dificultad las paredes y techo transparente de los invernaderos e incide sobre los vegetales, tierra, etc., calentándolos. La radiación infrarroja que emiten estos cuerpos tiene dificultades para escapar al exterior, por lo que la temperatura ambiente interior de los invernaderos es elevada (Fig. 5).

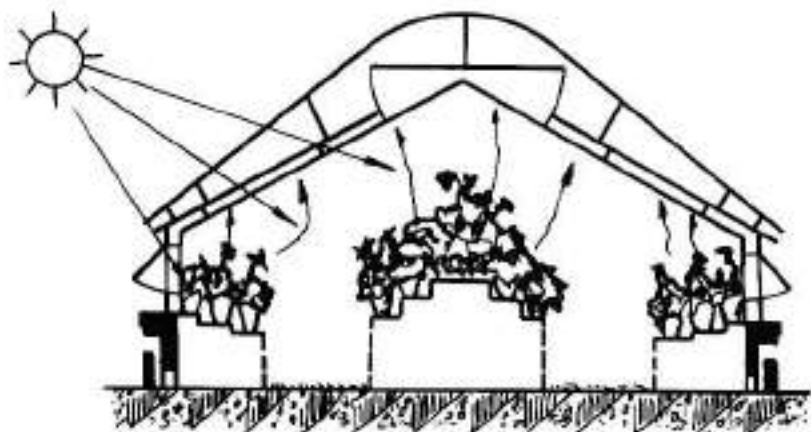


Fig. 5.- Debido al efecto invernadero, la radiación de onda corta atraviesa fácilmente las paredes del invernadero, pero la radiación infrarroja térmica de gran longitud de onda no puede salir del invernadero, debido a que el material transparente es ahora opaco.



Las ventajas de los cultivos en invernaderos son múltiples: aparte de una **mayor productividad**, se pueden realizar varias cosechas a lo largo del año, cuando lo normal es conseguir sólo una, además permiten obtener cosechas **más tempranas** y, por lo tanto, muy apetecibles por los consumidores, que las pagan a precios muy elevados (frutas y verduras fuera de temporada) con el consiguiente beneficio económico para el agricultor.

Otra ventaja reside en que, al ser el invernadero un local cerrado, se pueden controlar mucho mejor las posibles plagas o enfermedades de las plantas con daños mínimos al entorno natural o a otros cultivos, animales, peces, etc.

Los invernaderos presentan un **fuerte enfriamiento durante la noche**. A pesar de que el material transparente de que están hechos es relativamente opaco a la radiación infrarroja, el hecho de que todo él esté rodeado de una delgada película de este material transparente, hace que las pérdidas de calor por conducción a través de él sean elevadas. Esta circunstancia obliga a que, fundamentalmente, el sistema de calefacción por energía solar gaste casi toda su energía en calentar el invernadero durante la noche.

Las formas en que se puede calentar un invernadero son variadas. Sin embargo, la más interesante es la de calentar **la tierra** del mismo.

Los vegetales no sólo se componen de tallos y hojas, sino también de raíces, y el hecho de calentar las raíces a base de calentar la tierra circundante ha demostrado ser un factor fundamental para su crecimiento. Además, la tierra, gracias a su elevada inercia térmica, retiene una gran cantidad de calor, por lo que puede mantener atemperado el invernadero durante la noche.

Los colectores solares para invernaderos pueden instalarse sobre el tejado del propio invernadero, pero esta situación exige que esté sólidamente construido y hace que el invernadero reciba menos luz, debido a que parte de ella es absorbida por los paneles solares (Fig. 6).

Los colectores pueden colocarse en el exterior, junto al invernadero, si bien entonces esta ubicación presenta el problema de que parte de tierra cultivable queda desaprovechada por estar ocupado este espacio por los paneles solares (Fig. 7).

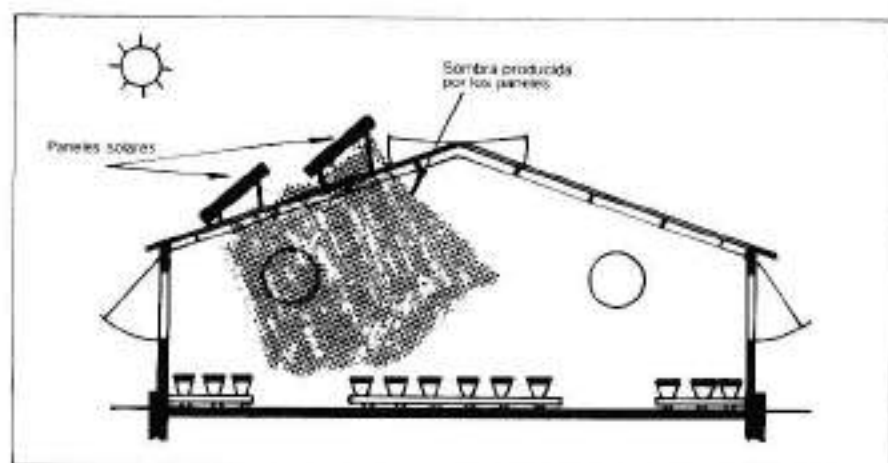


Fig. 5.- Colectores solares en el tejado del invernadero: hay menos luz dentro del invernadero.

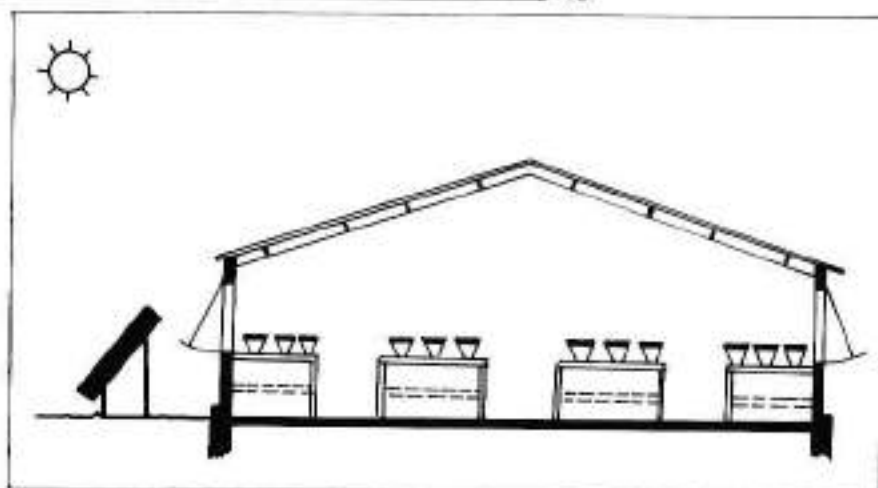


Fig. 7.- Colectores solares situados junto al invernadero: se aprovecha terreno cultivable.

Una instalación de energía solar para invernaderos consta de un campo de colectores y, según el tipo de invernadero, puede tener además uno o varios acumuladores de calor.

La calefacción de la tierra puede realizarse mediante un sistema parecido al suelo radiante, y consistente en una red de tubos enterrados a una cierta profundidad, superior por lo menos al doble de la máxima penetración del utillaje de labranza. El agua caliente puede circular por estos tubos en cualquier momento mediante una bomba, que debe estar controlada por un termostato enterrado (Fig. 8).

También puede utilizarse otro sistema más simple aún: una serie de depósitos sin aislamiento conectados en serie y enterrados o semienterrados, que proporcionen calor al espacio circundante. El sistema solar queda así

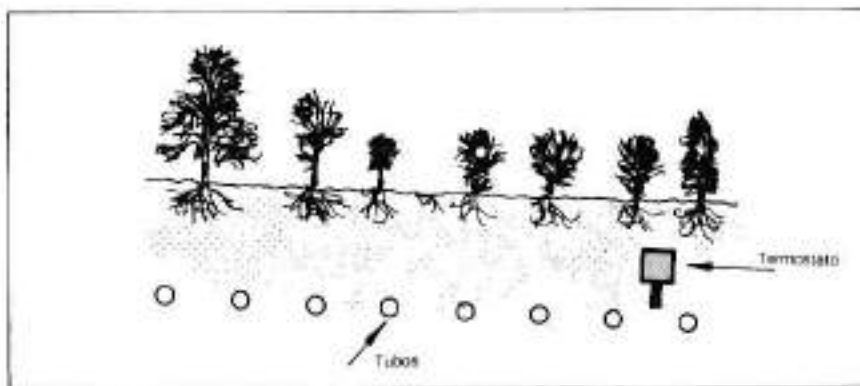


Fig. 8.- Tubos y termostatos enterrados en un invernadero.

notablemente simplificado, con una apreciable reducción de costes económicos (Fig. 9).

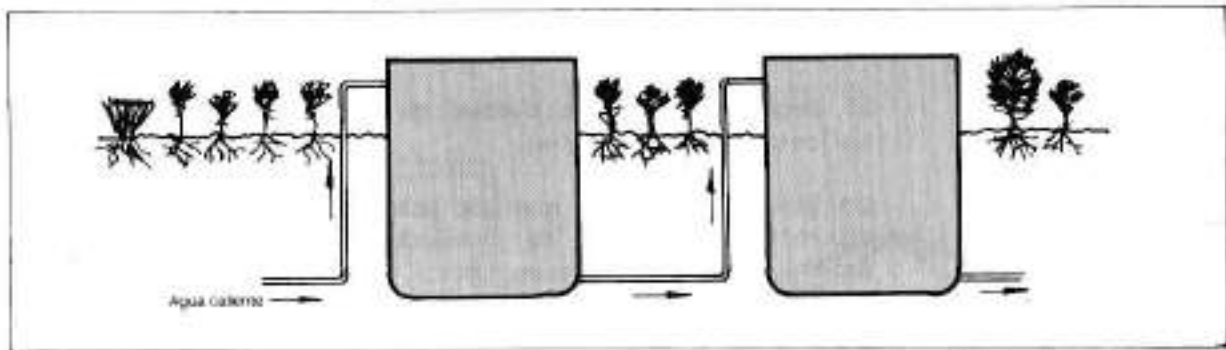


Fig. 9.- Depósitos de agua sin aislante térmico semienterrados para invernadero.

Otros sistemas pueden emplear fan-coils y calentar el aire del invernadero. Esta variante es más cara de instalación, pero tendría ventajas en el cultivo de especies vegetales de raíces muy poco profundas, como las fresas, que poseen abundantes rizomas (tallos horizontales con pequeñas raíces de tanto en tanto). En cambio, para el cultivo de especies con raíces grandes, tales como la zanahoria, sería preferible el sistema de tubos enterrados.

El cálculo de la instalación de un invernadero presenta problemas, a menudo de difícil solución, debido a que la estimación de las pérdidas de calor en él puede prestarse a **errores muy abultados** de cálculo, motivados por el reducido espesor de las paredes del invernadero, las infiltraciones de aire, la humedad de la tierra (a causa del gran calor específico del agua), etc. La instalación prevista puede, por esas razones, resultar muy infradimensionada o, al revés, excesivamente grande.

Si se precisa realizar una instalación de energía solar para un invernadero deben estudiarse las **temperaturas**



mínimas durante la noche, que será factor más importante, así como la situación del invernadero respecto a los vientos dominantes. En situaciones normales, las superficies de paneles solares pueden ser del orden del 30% de la superficie del invernadero, aunque este valor puede variar muchísimo; de hecho, no hay fórmulas mágicas que nos determinen una superficie óptima.

Si se ha de realizar un conjunto de instalaciones solares en invernaderos, lo mejor es hacer una más bien con una superficie pequeña y observar los resultados. Con la experiencia adquirida, se sabrá si para invernaderos de construcción similar, y en la misma zona, la superficie elegida es correcta, ha de ampliarse o reducirse.

SECADEROS

El **secado** es otra actividad de gran importancia, tanto agrícola como industrial.

La utilización de la energía solar se presta de un modo eficiente al secado de productos naturales, tales como grano, forraje, maderas, etc. y a procesos industriales que precisen un **secado suave**, como ocurre en naves industriales de pintado, lacado, impregnado, etc.

Para un proceso de secado se pueden utilizar colectores de aire o bien de líquido, con los correspondientes "fan-coils".

La elección de uno u otro sistema se hace comparando el ahorro solar obtenido durante la vida útil de ambos equipos, pues, como se sabe, los colectores de aire son más económicos pero, en cambio, tienen menor rendimiento. Por contra, un sistema de líquido tiene mayor rendimiento pero es más caro, debido a que los paneles son más costosos que los de aire y hay que contar, además, con el coste de los "fan-coils".

Dependiendo de diversas cuestiones económicas, puede ser preferible utilizar más paneles solares de aire (que son más baratos), a utilizar menos paneles de líquido, o viceversa.

Una ventaja fundamental de muchos procesos de secado (especialmente agrícolas, pero también industriales), es que una instalación de energía solar destinada a secado

no suele necesitar almacenamiento del calor, lo que la hace especialmente atractiva desde el punto de vista económico.

En efecto: para ciertos tipos de secado (por ejemplo grano recién recolectado), no es necesario que se realice inmediatamente el mismo día de su recolección, pues ese día puede estar nublado. Aunque no es conveniente esperar demasiado, no suele haber problemas por demorarse 2 ó 3 días hasta que haga sol. Ciertos procesos industriales también pueden tener estas características (p. ej.: secado de maderas).

Un sistema de secado puede consistir en un campo de colectores de aire, los cuales calientan el aire circundante que un ventilador empuja hacia la nave de secado (Fig. 10).

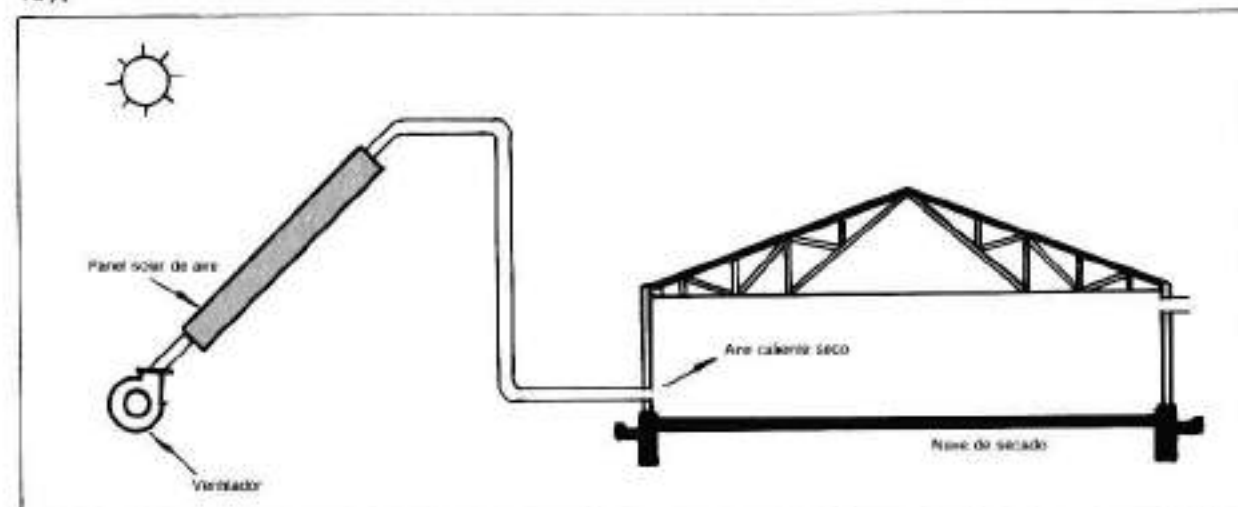


Fig. 10.- Sistema de secado sin acumulación de calor.

Recordemos que la **elevación** de temperaturas lleva consigo una **reducción** de la humedad relativa. Además, la circulación de aire por el secadero favorece una más eficiente **convección** entre el material a secar y el aire circulante, mucho más efectivo que en condiciones de velocidad del aire nula.

Como ejemplo de secadero se expone el prototipo experimental desarrollado por el autor en el año 1979, denominado SOLSEC-1, con capacidad para secar unos 10 kg de material (Fig. 11).

El SOLSEC-1 constaba de un **panel solar de aire**, formado por una placa colectora de aluminio ranurado, con una superficie de 0,7 m². Un **ventilador** integrado en la

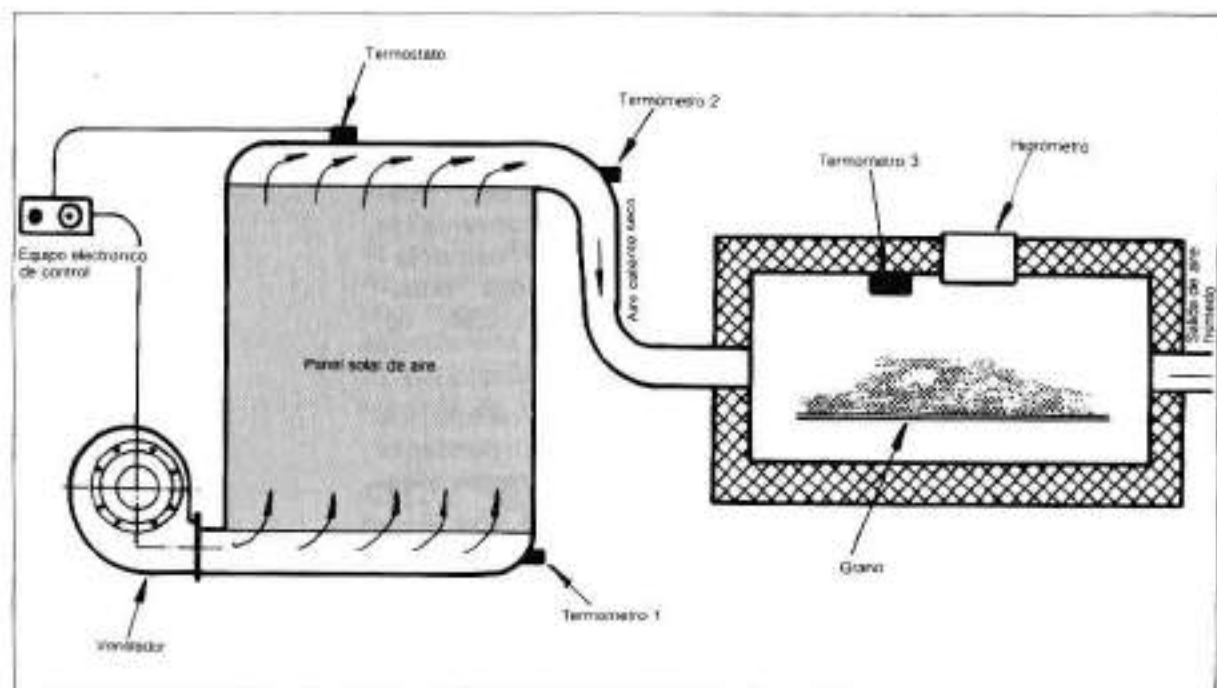


Fig. 11.- Esquema del prototipo SolSEC-1 (1979) para secado del material.

parte inferior del panel impulsaba aire a través del mismo, recogiénzose por la parte superior y trasladándose al secadero por un conducto.

El secadero consistía en una caja aislada térmicamente, en cuyo interior se colocaban las diferentes bandejas con el material a secar. El flujo de aire abandonaba el secadero por unos orificios.

En el interior del secadero se conseguían con gran facilidad, en el mes de enero y en Barcelona, condiciones ambientales de más de 40°C y de un 20% de humedad relativa.

Un punto importante de la instalación era el sistema electrónico de control del ventilador. Este constaba de dos partes: por un lado un triac electrónico, mediante el cual se podía variar a voluntad la velocidad del ventilador (y por consiguiente, el caudal del aire y la temperatura de secado) y por otro lado, un termostato inversor (se llama inversor, porque funciona al revés que un termostato de calefacción: cuando hace calor está conectado y cuando hace frío está desconectado). La misión del termostato inversor era poner en marcha o parar el ventilador, impidiendo que pudiera entrar aire frío al secadero.

El funcionamiento del SOLSEC-1, una vez seleccionada la velocidad del ventilador y el punto de disparo del termostato (ambos graduables a voluntad), era totalmente automático: el material a secar se podía instalar a primera hora de la mañana, aun cuando no incidiera el Sol sobre el panel solar de aire. Gracias al termostato, el ventilador estaba parado. Al incidir el Sol sobre el panel y calentarse el aire interior, el termostato se activaba y el ventilador se ponía en marcha, impulsando el aire caliente al secadero. Si por cualquier circunstancia dejaba de hacer Sol (nubes, caída de la tarde, etc.), el panel no producía más aire caliente, lo que hacía que el termostato se desconectase y el ventilador se parase. De esta forma, no se introducía aire frío y húmedo en el secadero.

GRANJAS

Las aplicaciones de la energía solar a **granjas** son importantes y se prevé una potenciación de ellas en el futuro.

La **cría de animales** exige ciertas condiciones ambientales. En general, una granja se puede calefactar como si fuera un edificio normal, pero deberemos destacar que los edificios destinados al ganado suelen tener **pésimas** condiciones de aislamiento térmico, lo cual hace que se tenga que aportar gran cantidad de energía de calefacción en invierno, y que en ciertos días muy calurosos de verano pueda producirse una mortandad elevada (por ejemplo en pollos) si la temperatura ambiente sobrepasa los 40°C.

Hacer una nave para el ganado a base de cuatro paredes de ladrillo único de seis agujeros y una cubierta de uralita puede resultar muy barato, pero este abaratamiento sin duda se pagará muy caro en los días fríos del invierno o en los muy calurosos del verano.

Mención especial merecen las renovaciones de aire, que en estos locales han de tener un valor elevado al objeto de llevarse los malos olores que en ellos se producen.

Asimismo, aparte de la calefacción del local, es muy conveniente disponer de **agua caliente** para el lavado de los animales y para la limpieza de equipos y naves. Debemos recordar que una granja en la que se desee que los animales no sufran enfermedades debe estar lo



más limpia posible.

Afortunadamente, la gran mayoría de animales destinados a engorde no precisan temperaturas excesivamente altas debido a la protección que supone el pelo, las plumas o las capas de grasa, etc. por lo que la temperatura de calefacción del local puede estar perfectamente a unos 15°C, para la mayor parte de animales.

Sin embargo, las crías necesitan en los primeros tiempos unas temperaturas más elevadas, si se desea que sobrevivan.

Un correcto control de estas temperaturas es importante en el rendimiento de una explotación ganadera, pues es muy conveniente que el número de defunciones sea mínimo.



Las zonas de cría deben estar a una temperatura superior al resto de la granja. El sistema óptimo para conseguirlo es mediante un **suelo radiante** especial, llamado placa radiante.

Una **placa radiante** consiste en una losa de hormigón en cuyo interior circula un haz de tuberías (Fig. 12). Las

tuberías tienen dos racords en sus extremos por los que se conectan al circuito hidráulico de calefacción. Debido a que esta losa está más caliente que el resto del pavimento, las madres colocan a sus crías sobre ellas a fin de que no se enfríen (la mayoría de muertes de crías muy jóvenes son debidas al frío). Es conveniente controlar la temperatura de la losa, de forma que al principio esté más caliente y, pasados algunos días, aquélla vaya disminuyendo progresivamente.

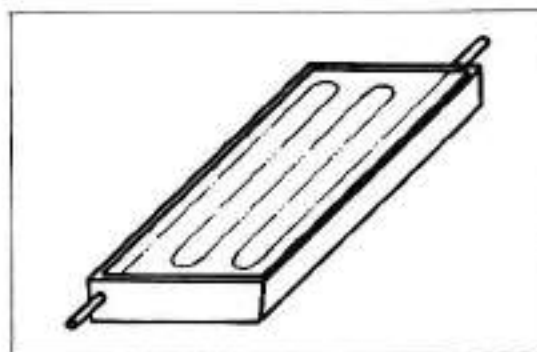


Fig. 12.- Placa radiante.

Así, pues, en una instalación ganadera la introducción de energía solar puede suponer un considerable beneficio en la explotación, al obtenerse una mejor reproducción de los animales, menor tasa de enfermedades y un desarrollo más rápido de los mismos.

Un montaje recomendable en estos casos sería un sistema de líquido mixto, para calefacción y agua caliente sanitaria. Estos sistemas mixtos tienen un único acumulador, pero disponen de dos tomas: una para calefacción y otra para el agua caliente sanitaria.

La calefacción puede, a su vez, dividirse en dos partes: una de ellas irá a unos "fan-coils" que calentarán el ambiente general del establo, mientras la segunda se dirigirá a los paneles radiantes de las zonas de cría.

Finalmente, existirán grifos y mangueras con agua caliente para la limpieza tanto del ganado como de los utensilios y de la nave ganadera.

PISCICULTURA

Las piscifactorías pueden tener un futuro importante en la alimentación humana como consecuencia de los problemas del medio ambiente y de la pesca.

Los peces son animales de **sangre fría** y, por lo tanto, su metabolismo depende de la temperatura del agua. A temperaturas bajas, su metabolismo es reducido y también lo es su actividad general. A temperaturas más altas pueden experimentar una gran actividad (lo que quiere decir que pueden crecer y reproducirse con gran rapidez). La elevación de las temperaturas comporta que la cantidad de oxígeno disuelto en el agua sea menor. En efecto, el agua disuelve el aire (y con él el oxígeno) de forma inversamente proporcional a su temperatura. Así, un agua muy fría pero convenientemente aireada tendrá mucho oxígeno disuelto, mientras que un agua más cálida tendrá menos oxígeno.

La **cantidad de oxígeno** presente en el agua es decisiva para los peces, pues un incremento de la temperatura del agua aumenta su metabolismo, lo que exige un mayor consumo de oxígeno. Llega un momento en que la cantidad de oxígeno es insuficiente para poder atender al metabolismo de los peces, por lo que una elevación posterior de temperatura sería contraproducente.

Las diferentes especies de peces se caracterizan por una **temperatura óptima** en la cual su metabolismo se ajusta a la cantidad de oxígeno que pueden extraer del agua por las branquias, existiendo peces, como la trucha, que requieren temperaturas frías y otros que están mejor con temperaturas más cálidas. Además de una temperatura adecuada y comida, los peces requieren una buena aireación del agua, y algunas especies un cierto movimiento del líquido.

Las piscifactorías suelen consistir en un conjunto de piscinas (generalmente alargadas) en las que los peces están instalados por tamaños, trasladándose de unas a otras mediante redes de distintas calidades (Fig. 13).



Fig. 13.- Energía Solar aplicada a una piscifactoría.

La energía solar se aplica a las primeras piscinas durante el proceso reproductor y en la cría de los alevines para mantener el agua a la temperatura óptima. Una vez los alevines han alcanzado un cierto tamaño, éstos pasan a las piscinas de engorde, las cuales también pueden estar atemperadas con energía solar para un mayor desarrollo de los peces.

DESALINIZACION DEL AGUA DEL MAR

La energía solar puede utilizarse para la **desalinización del agua de mar** en las zonas costeras áridas del planeta. La desalinización de agua salada, puede realizarse de dos formas:

- Mediante el empleo de **colectores de concentración**, haciendo entonces hervir este agua para recoger el vapor de agua y condensarlo, o
- De **forma pasiva**, como exponemos a continuación (Fig. 14).

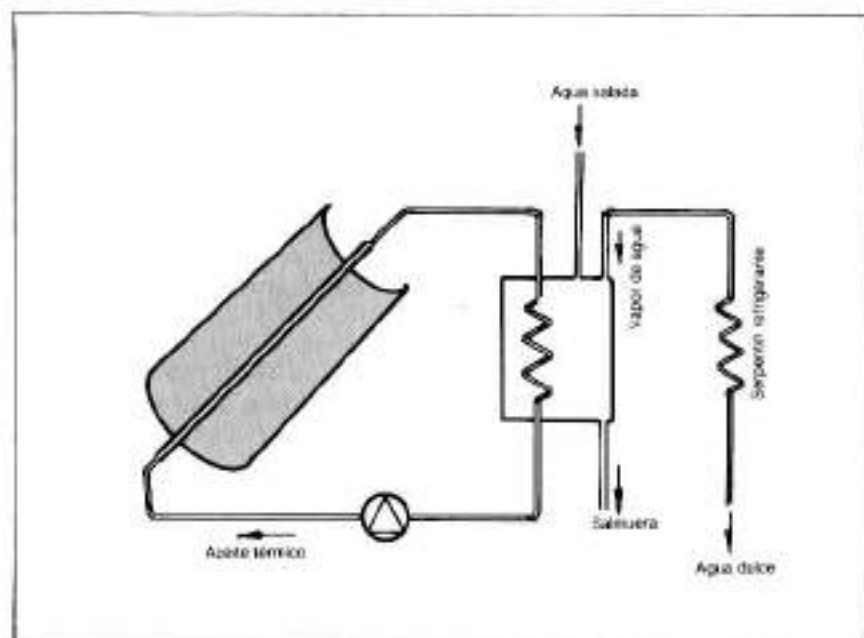


Fig. 14.- Destilador solar activo.

Un **destilador solar pasivo** consiste en una cubeta de gran superficie y poca profundidad, pintada de color negro y tapada con un cristal o plástico en forma de tejado (Fig. 15).

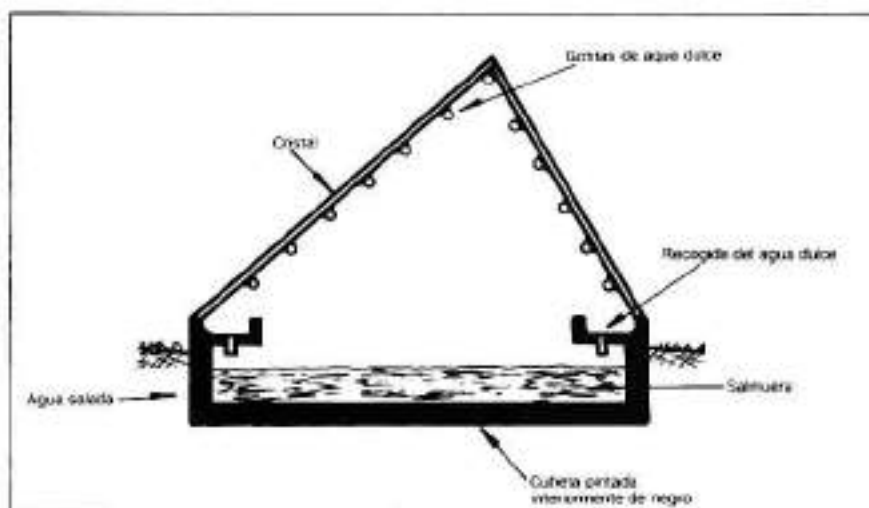


Fig. 15.- Destilador solar pasivo.

Debido a la acción de los rayos solares, el agua salada se evapora, **condensándose** en el cristal por el que escurre en forma de gotas, que se recogen por un tubo colector.

El agua salada debe **renovarse** periódicamente para evitar la formación de salmueras.

Se puede aumentar el rendimiento de estos destiladores disponiendo en el resto de las paredes de materiales especulares (plástico mylar) que reflejen hacia el agua parte de la luz solar.

El rendimiento de estos sistemas es pequeño, pudiendo destilar de 1 a 3 litros de agua por día y m^2 , lo que en determinadas zonas y con una superficie de varios metros cuadrados de destilador, puede ser suficiente.

PISCINAS

Las **piscinas descubiertas** sólo se utilizan, en España, en la temporada que comprende desde junio hasta septiembre. Con la aplicación de la energía solar se puede hacer que la temporada de utilización de las piscinas abarque de abril a octubre, lo que puede ser muy interesante desde el punto de vista económico de la explotación de las mismas.

Ya hemos visto que el calentamiento de piscinas es ideal para los paneles solares, pues éstos deben trabajar a temperaturas de unos 30° , con lo cual su rendimiento

es muy elevado.

Estas temperaturas tan bajas facilitan además el hecho de que puedan usarse paneles sin cubierta transparente, con lo que las pérdidas en la cubierta transparente se reducen a cero y el panel solar puede tener, para estas bajas temperaturas, rendimientos aún más elevados que con cubierta (Fig. 16).

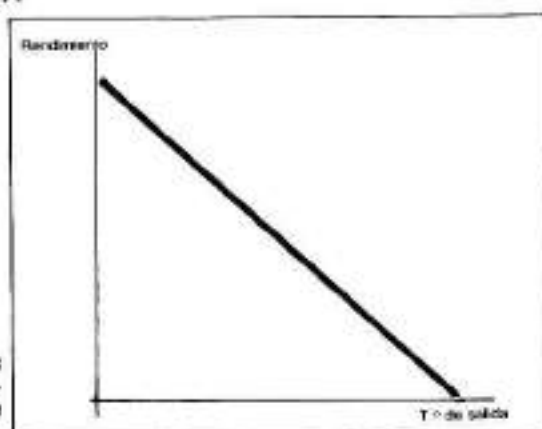


Fig. 16.- Los paneles solares sin cubierta transparente tienen rendimientos elevados para temperaturas de salida bajas.

Estos hechos hacen que los paneles solares para el calentamiento de piscinas puedan ser muy baratos, realizándose incluso de material plástico, enrollables, que se disponen como si fuera una alfombra por las inmediaciones de la piscina y que hasta se pueden pisar sin peligro.

El cálculo de la superficie de paneles necesaria para una piscina es complejo pues depende de varios factores que pueden variar mucho de una piscina a otra, tales como:

- Irradiación directa del Sol sobre la propia piscina.
- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.
- Altitud.
- Renovación continua del agua de la piscina.
- Relación superficie libre/volumen de la piscina.
- Superficie mojada y pérdidas de calor a través de ella.
- Pérdidas por radiación (que dependen de la nubosidad durante la noche) (Fig. 17).

En determinados momentos es preferible que los paneles solares no actúen, pues el agua de la piscina no debe superar los 30°, ya que temperaturas tan altas producen una sensación desagradable a los nadadores.

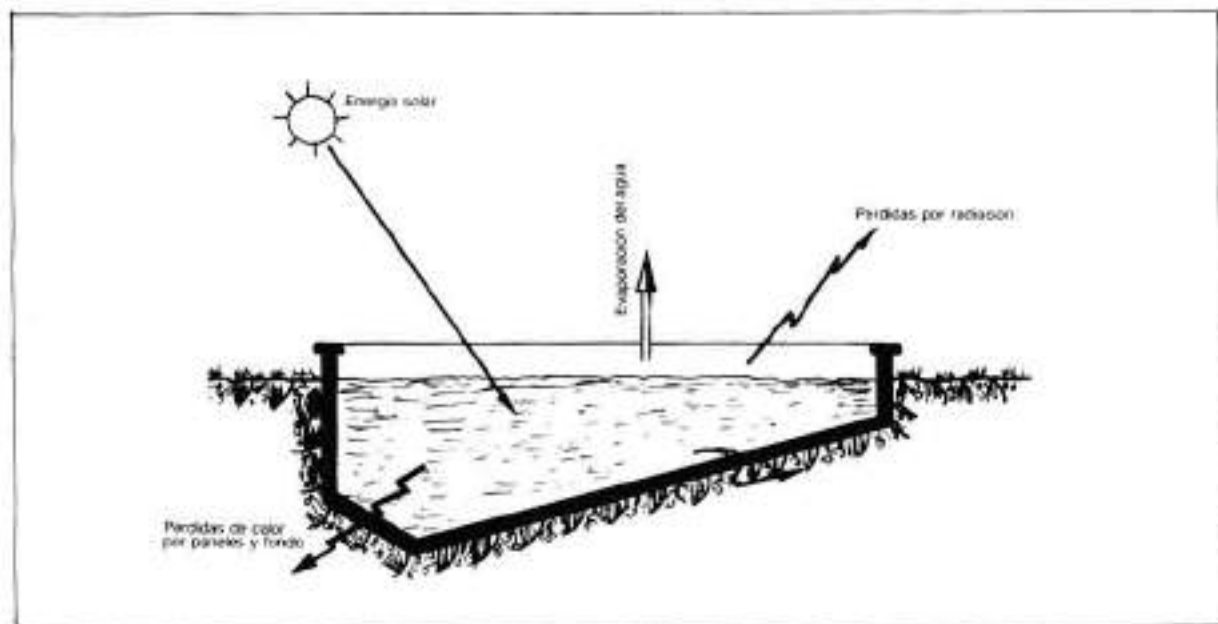


Fig. 17.- Balance de energía de una piscina.

Las pérdidas de calor más importantes de una piscina son las de **evaporación**, las cuales están relacionadas con la relación superficie libre-volumen de la piscina. Debido al elevado calor de evaporación del agua (la evaporación de 1 kg de agua de la piscina extrae 2.26 MJ), es conveniente reducir las pérdidas por evaporación al mínimo. La velocidad de evaporación aumenta al incrementarse la temperatura del agua de la piscina y, debido al enfriamiento que representa la evaporación, el enfriamiento general que experimentará una piscina está relacionado con la **superficie libre** (que es donde se efectúa la evaporación). A más superficie libre, más evaporación. También el enfriamiento dependerá del volumen de la masa de agua (a más volumen menos enfriamiento) como resultado de la inercia térmica del líquido.

Debido a estos múltiples factores, el cálculo referido a una piscina es, como en el caso de invernaderos, de **difícil estimación**. No obstante, con una superficie de paneles del 50% de la superficie libre de la piscina, se puede obtener una buena climatización de la misma en el período comprendido entre abril y octubre, aunque tal vez en los meses de julio y agosto los paneles no deben funcionar puesto que el agua de la piscina estará ya muy caliente.

Esta superficie orientativa se puede **reducir** en una proporción importante mediante el uso de una **manta térmica**.

que cubra la piscina de noche, impidiendo las pérdidas por evaporación y radiación (Fig. 18).

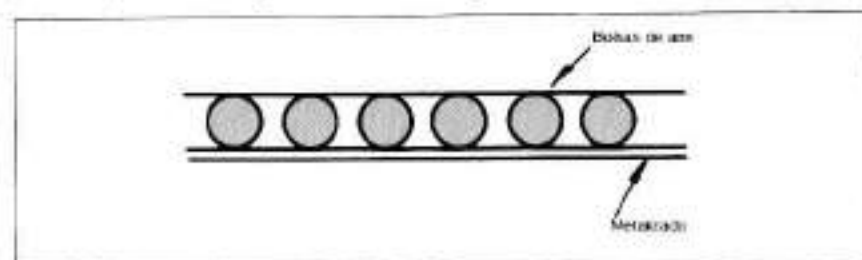
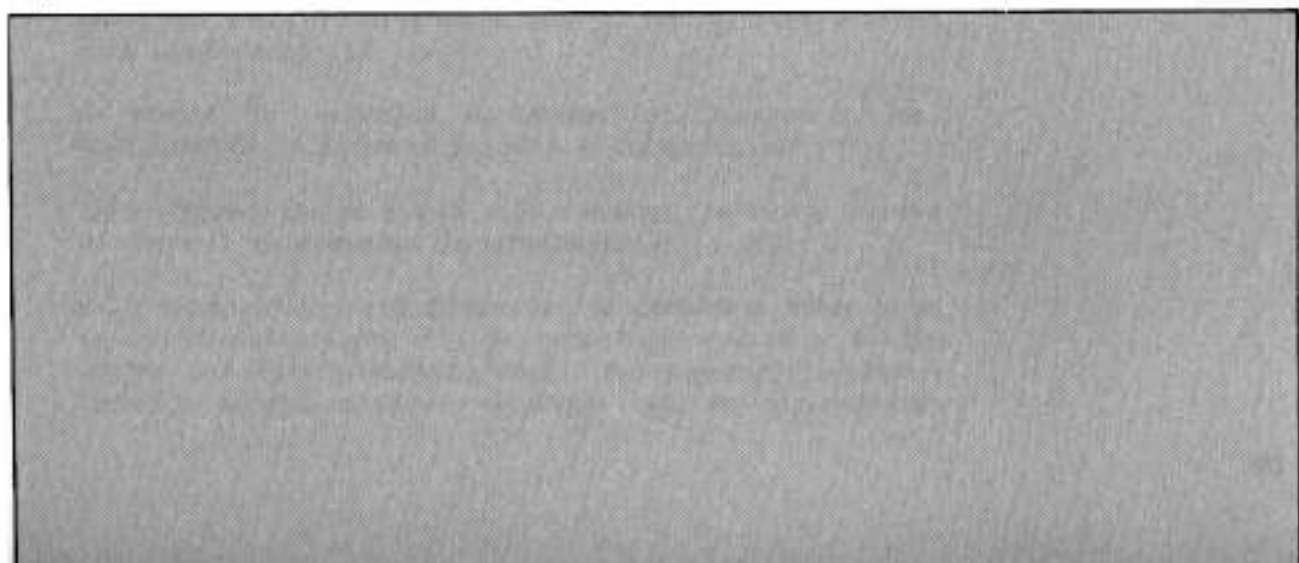


Fig. 18.- Sección de una manta térmica para piscinas.

Una manta térmica consiste en una lámina de plástico metalizado con bolsas de aire, que se desenrolla sobre la piscina al finalizar el día e impide con su metalizado la radiación del calor y la evaporación del agua. El uso de una manta metálica es muy recomendable, pues se amortiza en coste rápidamente en una sola temporada.

LECCION 25



25. COLECTORES DE CONCENTRACION

INTRODUCCION

Examinadas ya todas las posibilidades de utilización térmica de la energía solar a bajas temperaturas, se inicia con esta lección el estudio de los usos solares a altas temperaturas mediante los colectores de concentración.

NECESIDAD DE LA CONCENTRACION

Hemos visto que las máximas temperaturas que se podían obtener con el uso de paneles solares planos, en condiciones de rendimiento aceptable, difícilmente superaban los 100°C, por lo que su empleo quedaba limitado a una serie de aplicaciones ya sobradamente conocidas, que han sido objeto de exposición en los temas anteriores.

Un panel plano se caracteriza por una superficie útil de placa colectora. A este panel plano le llega una cierta irradiación I .

Si, aplicando una serie de procedimientos, impedimos al máximo que este panel plano tenga pérdidas de energía (por ejemplo, mediante aislamiento térmico, con varias cubiertas, etc.), observaremos que su temperatura máxima está limitada por I .

En efecto, si I aumenta, su temperatura máxima aumentará también, y al revés ocurrirá si I disminuye.

Si se desean temperaturas más elevadas, la única manera de lograrlo es **aumentar la irradiación I** .

La irradiación, I , está fijada por la **constante solar** y no es modificable. Cada m^2 de superficie expuesta al Sol recibe una determinada potencia. Sin embargo, mediante lentes o espejos podemos conseguir que en determinadas



zonas del espacio el valor de I sea muy superior a la constante solar (Fig. 1).

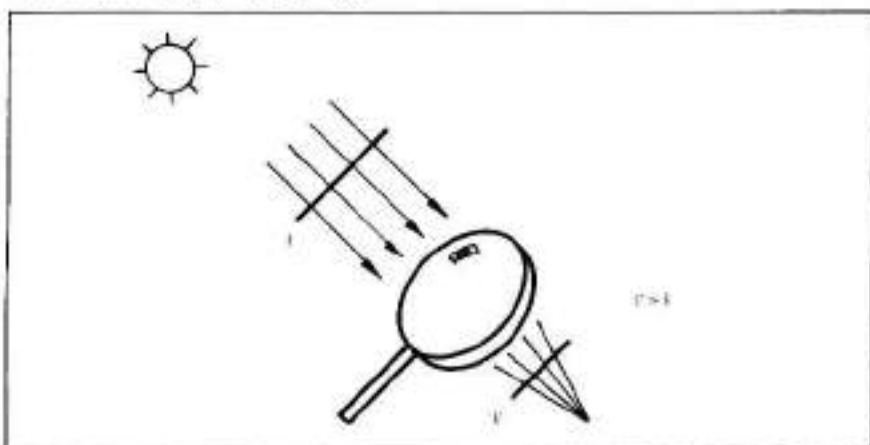


Fig. 1.— Mediante la concentración se puede aumentar el valor de la irradiación I .

Consideremos el caso de una lupa, de todos conocido. Sea, por ejemplo, una lupa de 10 cm. de diámetro, en un día en que la irradiación directa sea de 700 W/m^2 .

La superficie de esta lupa es de:

$$\left(\frac{10}{2}\right)^2 \pi = 78.54 \text{ cm}^2$$

La potencia del Sol que pasa a su través (despreciando las pérdidas por reflectancia y absorbancia) es de :

$$W = 700 \text{ W/m}^2 \times 78.54 \text{ E} - 4 \text{ m}^2 = 5.5 \text{ W}$$

En las proximidades del foco, esta lupa puede concentrar los rayos solares en un circulito de 5 mm. de diámetro. El valor de la irradiación en este circulito de 0.196 cm^2 de superficie*, será de:

$$I' = 700 \text{ W/m}^2 \times \frac{78.54 \text{ cm}^2}{0.196 \text{ cm}^2} = 280500 \text{ W/m}^2$$

es decir, el valor de la irradiación ha aumentado 400 veces.

La potencia disponible en este circulito es 5 mm de diámetro, es de:

$$W = 208500 \text{ W/m}^2 \times 0.196 \text{ E} - 4 \text{ m}^2 = 5.5 \text{ W}$$

valor exactamente igual que el anterior. Así, pues, en un sistema de concentración de la energía solar, la potencia total permanece constante y lo que se hace

* La superficie será igual a πr^2 , es decir, a $3.14 \times (0.5)^2 \text{ cm}^2 = 0.196 \text{ cm}^2$.

variar es el valor de la irradiación. Esto nos permite disponer de la **misma potencia** pero con **temperaturas diferentes**. La posibilidad de obtener distintas temperaturas hace que se puedan realizar muchos procesos que son inviables a las temperaturas de un panel plano.

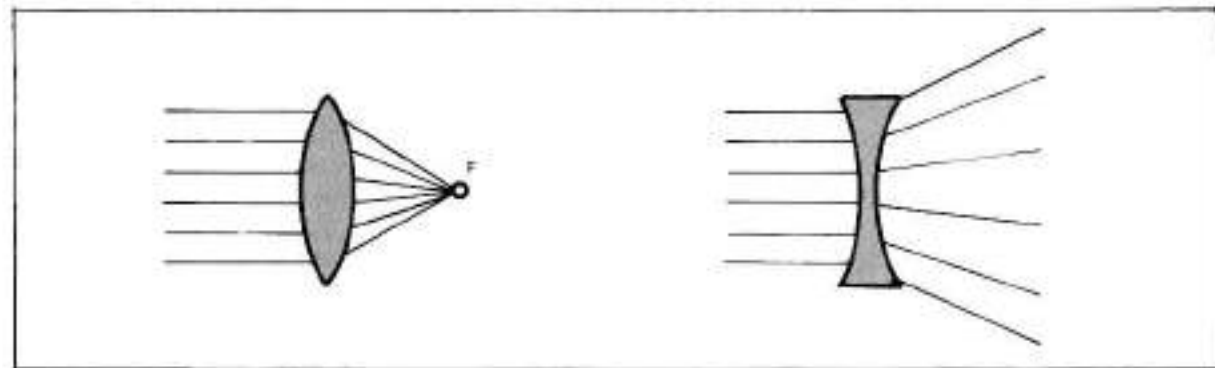
TIPOS DE COLECTORES DE CONCENTRACION

Cualquier sistema que aumente el valor de la irradiación, será adecuado para obtener temperaturas elevadas.

El aumento del valor de la irradiación se consigue por:

- Lentes convergentes.
- Espejos.
- Superposición de flujos radiantes.

El sistema de **lentes convergentes** es similar al explicado al hablar de la lupa. Las lentes se clasifican en convergentes y divergentes, según que un haz de rayos luminosos paralelos, al atravesar la lente, converjan en un punto o se separen de él. Las lentes divergentes no pueden concentrar, ya que los rayos luminosos que las atraviesan siempre se separan entre sí, por lo que no se tratarán aquí (Fig. 2).



Las lentes convergentes presentan unos parámetros de interés que son:

- Área de abertura.
- Distancia focal.

El **área de abertura** es la superficie útil a través de la cual pueden pasar libremente los rayos solares. Cuanto

Fig. 2.— Un haz de rayos luminosos paralelos converge o diverge al atravesar, respectivamente, una lente convergente o divergente.

mayor sea la superficie de abertura, mayor cantidad de energía pasará a través de la lente y, por lo tanto, dispondremos de mayor potencia. Se mide en m^2 .

La **distancia focal** es aquella distancia medida en metros desde el centro de la lente al punto (foco) en el cual convergen los rayos solares. Dependiendo de la curvatura de la lente, la distancia focal puede ser muy corta o muy larga (Fig. 3).

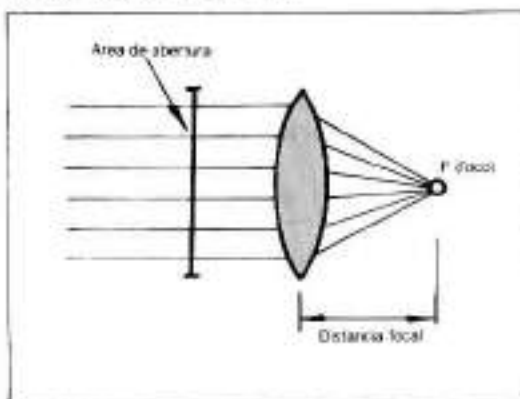


Fig. 3.— Distancia focal y área de abertura de una lente.

En el caso de que los rayos incidentes sean paralelos y la lente perfecta, el foco es el punto donde convergen los rayos solares. Estas circunstancias, como veremos, no se dan nunca y el foco siempre es una "mancha focal", en lugar de ser un punto sin dimensiones (Fig. 4). La proyección de la mancha focal sobre una superficie da lugar al área de recepción.

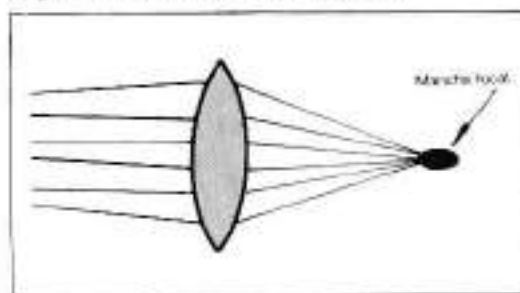


Fig. 4.— Si los rayos que inciden en una lente no son exactamente paralelos, el foco se convierte en una mancha focal.

Se llama **factor de concentración** al cociente entre el área de abertura y el área de recepción. Si las lentes fueran perfectas, el factor de concentración en el foco sería infinito.

Sin embargo, el **área de recepción** no tiene necesariamente que estar en el foco; puede estar un poco antes o un poco después de él y, en estos casos, el factor de concentración será menor que el máximo posible.

Debido a sus especiales características (elevado peso y precio, fragilidad, etc.), las lentes no suelen ser empleadas en aplicaciones de energía solar, excepto para algunos usos menores; en lugar de lentes se emplean espejos.

Los **espejos** tienen características similares a las de las lentes, pudiendo ser cóncavos, convexos y planos. Los espejos convexos se comportan de un modo parecido a las lentes divergentes y, por esta razón, no se usan en energía solar.

Los **espejos cóncavos** tienen un comportamiento similar a las lentes convergentes, pero de todos los espejos cóncavos posibles (esféricos, parabólicos, elípticos, hiperbólicos, etc.), solamente los **espejos parabólicos** tienen la propiedad de tener un **foco puntual** y de comportarse igual que una lente convergente (Fig. 5).

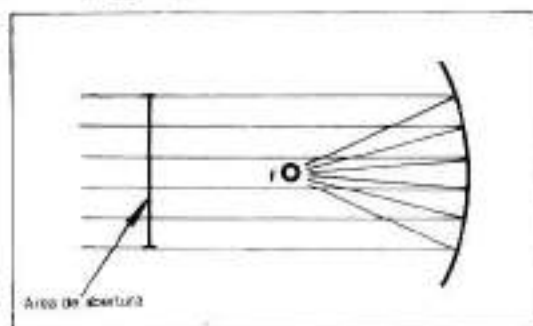


Fig. 5.- Espejo parabólico: se comporta igual que una lente convergente.

Al igual que una lente convergente, un espejo parabólico posee un **área de abertura** que es la superficie en la cual inciden los rayos solares, y un **foco** donde todos los rayos paralelos que llegan al espejo se concentran. Recordemos que un espejo actúa **reflejando** los rayos solares, al contrario que una lente refractada, dejando pasar a su través los rayos luminosos.

Los espejos presentan, sobre las lentes, ventajas importantes tales como su ligereza, poco precio, posibilidad de dotarlos de cualquier forma, etc., lo que hace que sean ampliamente utilizados en energía solar.

El aumento del valor de la irradiación también puede conseguirse mediante la **superposición** de flujos radiantes en una determinada área de recepción; esto se puede lograr con **espejos planos** convenientemente dirigidos. Los espejos planos tienen la ventaja sobre los curvados de su menor precio, por lo que son frecuentes en instalaciones grandes (Fig. 6).

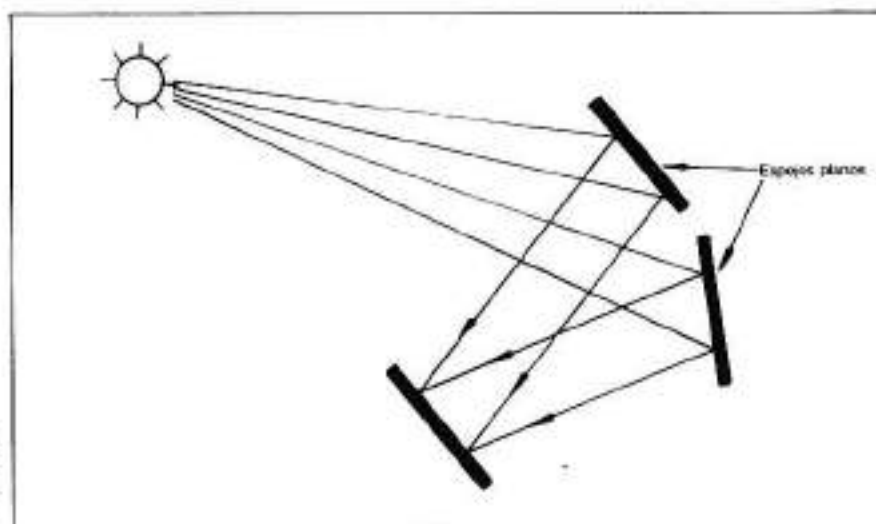


Fig. 6.- Mediante espejos planos se puede lograr que incida sobre un receptor R un valor de irradiación muy superior al normal.

De lo anteriormente visto se deduce que pueden construirse colectores solares de concentración utilizando lentes, espejos curvados o espejos planos. De hecho, las lentes son poco usadas y los colectores de concentración se realizan mediante espejos, en la mayor parte de casos.

Las formas usuales de espejos utilizados en colectores solares son las siguientes:

- Cilindro-parabólicos.
- Doble-parabólicos.
- Heliostatos.

Los colectores cilindro-parabólicos constan de un espejo que presenta curvatura parabólica en un eje y cilíndrica en otro. En tales condiciones, el foco se convierte en una línea focal (Fig. 7).

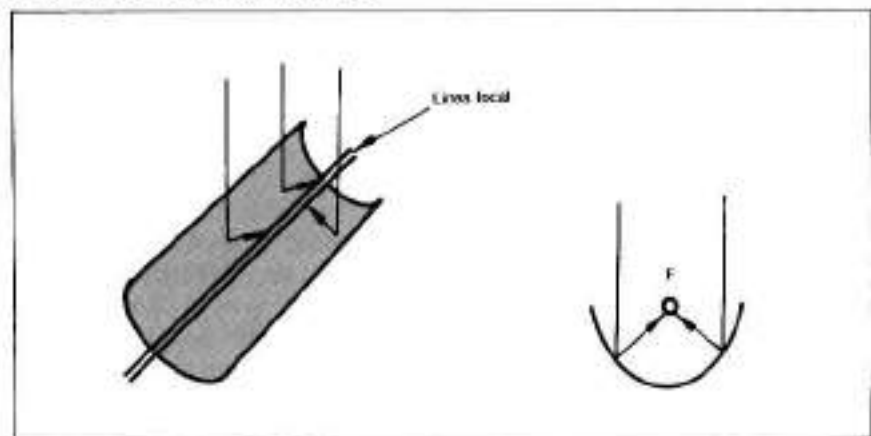


Fig. 7.- Colector cilindro-parabólico. El foco no es puntual, sino una línea focal.

Los espejos **doble-parabólicos** presentan curvatura **parabólica** en sus **dos ejes** y, por lo tanto, tienen un **foco puntual** único (Fig. 8).

Los **heliostatos** son simples **espejos planos** montados sobre un soporte, de manera que se pueden orientar en la dirección del Sol (Fig. 9).

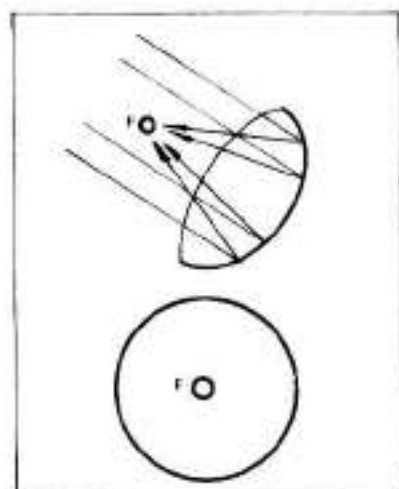


Fig. 8.- Colector doble parabólico. El foco es puntual.

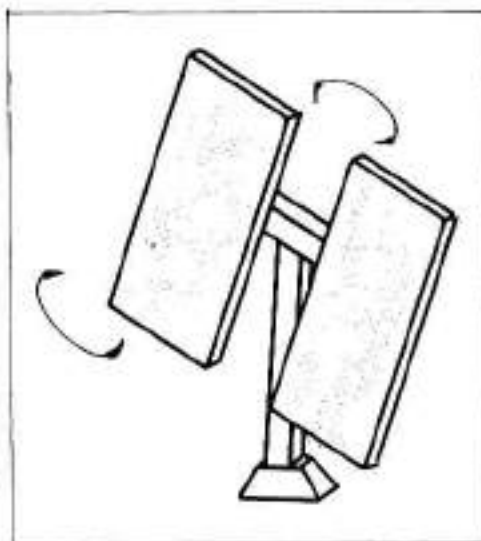


Fig. 9.- Heliostato. Consta de varios espejos planos, que pueden orientarse, y que están montados sobre un soporte.

ECUACIONES DEL BALANCE ENERGETICO EN COLECTORES DE CONCENTRACION

Los colectores de concentración presentan algunas diferencias importantes respecto a los colectores solares planos, tales como la **reducida superficie del receptor** y la usual ausencia de aislamiento térmico.

La función de la placa colectora es ahora realizada por otra superficie mucho más pequeña llamada **receptor**. El receptor está sometido a una **elevada irradiación** (muchas veces superior al valor normal), lo que hace que, dependiendo de la velocidad de extracción del calor del mismo, su temperatura puede ser muy elevada.

Este receptor a elevada temperatura perderá calor por conducción, convección y radiación.

Debido a la pequeña superficie del receptor, las pérdidas por conducción serán pequeñas, mientras que las pérdidas por convección pueden limitarse en gran parte cubriéndolo de un material transparente y haciendo el vacío en su interior.

Las pérdidas por radiación aumentan proporcionalmente a la **cuarta potencia** de la temperatura absoluta del receptor. Pero, además, el **efecto invernadero** es ahora **poco eficiente** en razón de que la temperatura del receptor es alta y la longitud de onda en la que se emite la radiación, como consecuencia de su emitancia, es corta, con lo que puede atravesar la cubierta transparente con facilidad y perderse en el espacio exterior.

Los materiales especulares pueden ser de dos tipos: con recubrimiento transparente o sin él.

Los **materiales especulares con recubrimiento transparente** son similares a los espejos ordinarios y constan de una lámina de vidrio o plástico transparente y de una capa reflectante.

En estos materiales, los rayos de luz han de atravesar **dos veces** el espesor del material transparente, lo que origina pérdidas por reflexión y por absorción (Fig. 10).

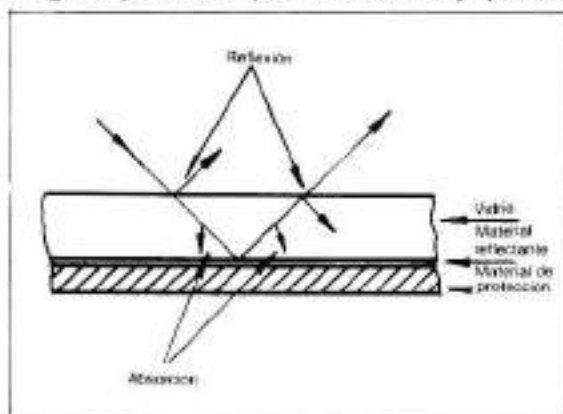


Fig. 10.- Corte de un espejo ordinario. Hay pérdidas por reflexión y absorción.

El **material reflectante** suele estar formado por vapor de aluminio vaporizado a alto vacío y condensado sobre la superficie interior de la lámina transparente. Detrás de esta capa reflectante, existe una capa de **material de protección** contra agentes atmosféricos, rayaduras, etc.

La **reflectancia** del material reflectante nunca alcanza el 100% y, por esta razón, parte de la energía se absorbe en el material reflectante, **calentándose éste ligeramente**.

Los materiales especulares sin recubrimiento transparente no suelen usarse en aplicaciones terrestres, debido a que las propiedades especulares se degradarían rápidamente con la lluvia, polvo, rayaduras, etc., reservándose su uso en aplicaciones especiales de investigación.

Los colectores de concentración presentan dos diferencias importantes respecto a los colectores planos:

- Sólo utilizan la radiación directa.
- Precisan un seguimiento del Sol.

El hecho de utilizar únicamente la radiación directa se debe a que en los espejos sólo se pueden concentrar los rayos paralelos, como los de la radiación directa. Un conjunto de rayos de diversas direcciones que incidan sobre un espejo curvado se reflejan en distintas direcciones sin converger en ningún punto (Fig. 11).

Por lo tanto, los colectores de concentración sólo funcionan en días despejados, siendo preferible su instalación en las zonas donde el porcentaje de radiación directa sobre el total sea elevado, lo que suele ocurrir en los lugares algo alejados de la costa.

El segundo requerimiento (seguimiento del Sol), es consecuencia de la necesidad de tener localizado en todo momento el colector solar, haciendo que los rayos solares converjan sobre el receptor. Debido al movimiento aparente del Sol durante el día, el punto focal se va desplazando de sitio a lo largo de la jornada, lo que hace que el colector o el receptor deban moverse para compensar este efecto (Fig. 12).



Fig. 11.- Un conjunto de rayos de diversas direcciones no convergen en ningún foco.

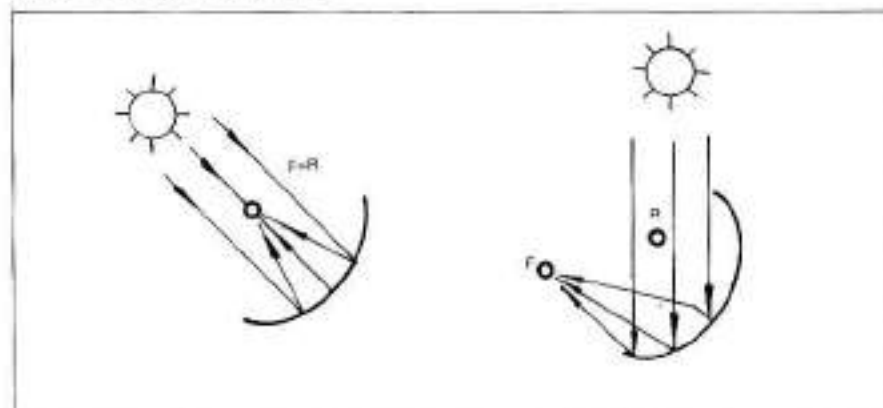


Fig. 12.- Los colectores de concentración deben seguir siempre al Sol, pues, de lo contrario se desenfocan y el foco entonces no coincide con el receptor.

Los rayos del Sol no son exactamente paralelos sino que forman un ángulo de 32' de arco (debido a que el Sol,



al igual que la Luna, presenta un diámetro aparente) (Fig. 13). Esto hace que el **factor de concentración máximo**, esté limitado en el caso de utilizar espejos curvados, y que el punto focal se convierta en una mancha focal, que es la zona de máxima densidad de energía.

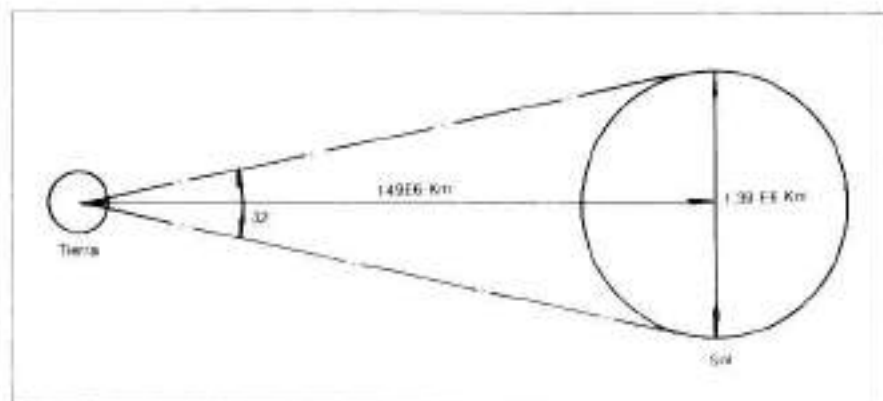


Fig. 13.- Los rayos solares presentan un ángulo de unos 32' de arco, debido a que el Sol tiene un diámetro aparente (no es puntual como una estrella del cielo nocturno).

El máximo valor del factor de concentración es igual a unos 11500, debido a que la mínima dimensión lineal de la mancha focal es de: $e_{\min} = f \times \tan 32' = 9.31 \text{ E-}3 \text{ m}$, y su área será el cuadrado de este valor = $8.67 \text{ E-}5 \text{ m}^2$. El factor de concentración, por definición, será de:

$$\frac{\text{Área de abertura}}{\text{Área mancha focal}} = \frac{1 \text{ m}^2}{8.67 \text{ E-}5 \text{ m}^2} \approx 11500$$

En realidad, el factor de concentración efectivo de la mayoría de colectores solares de concentración es menor que este valor debido a las **irregularidades** del espejo y a **fallos en el posicionamiento** correcto del foco. Como se observa, este valor máximo del factor de concentración está relacionado con el diámetro del Sol y la distancia a la Tierra. En el planeta Marte, este factor de concentración máximo será más elevado, y más reducido en Venus o Mercurio.

Si consideramos despreciables las pérdidas de energía por conducción y convección, las pérdidas de energía de un colector de concentración son sólo las de **radiación**. El balance de energía recibida por el receptor vale: (Fig. 14)

$$K \cdot \alpha \cdot X \cdot I \cdot t = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 + E$$

K = Reflectancia del espejo,
 α = Abs. del mat. del receptor,
 X = Factor de concentración,
 I = Irradiación W/m^2 ,
 t = Tiempo en s.

- ϵ = Emitancia del receptor,
 σ = Constante de Stefan = $5.67 \text{ E-}8 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{ s } ^\circ\text{K}}$
 T = Temp. abs. receptor (en $^\circ\text{Kelvin}$)
 E = Energía extraída.

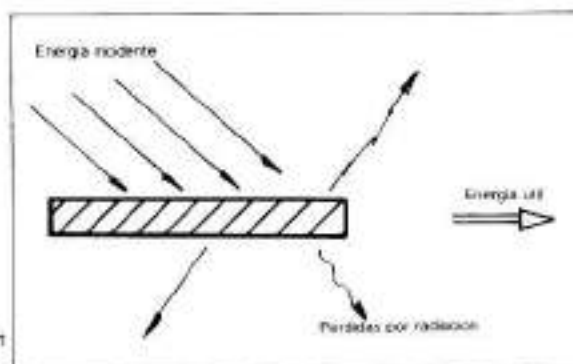


Fig. 14.- Balance de energía en un receptor de concentración.

En los colectores de concentración también pueden obtenerse temperaturas bajas. Para conseguirlo, sólo se precisa extraer la energía del receptor a ritmo elevado. Pero, debido a que los colectores de concentración únicamente emplean la radiación directa y por causa del sistema de seguimiento, para obtener bajas temperaturas es preferible usar colectores planos.

Si la energía extraída es 0, entonces podemos calcular la temperatura máxima que alcanzará al receptor simplemente despejando T° :

$$T^\circ = \left(\frac{\alpha}{\epsilon} \frac{1}{\sigma} K X I \right)^{1/4}$$

Observamos que el primer término es la **selectividad**. Esta selectividad está referida a la temperatura de trabajo (las propiedades de emisión, coeficiente de emisividad ϵ , pueden ser distintas según la temperatura). Como se observa, la selectividad -que en el caso de paneles solares planos sólo tenía incidencia en aplanar la recta de rendimiento, consiguiendo temperaturas más altas con rendimientos aceptables- aquí tiene mucha más importancia.

Haciendo variar la extracción de energía, se puede obtener toda una gama de temperaturas posibles, manteniendo constante el valor de la irradiación.

Es posible representar ésto en una gráfica en la que se expresa el **rendimiento** en función de la **temperatura del receptor** (Fig. 15). Esta gráfica es la que identifica el punto de funcionamiento de un colector de concentración

y representa su curva de rendimiento.

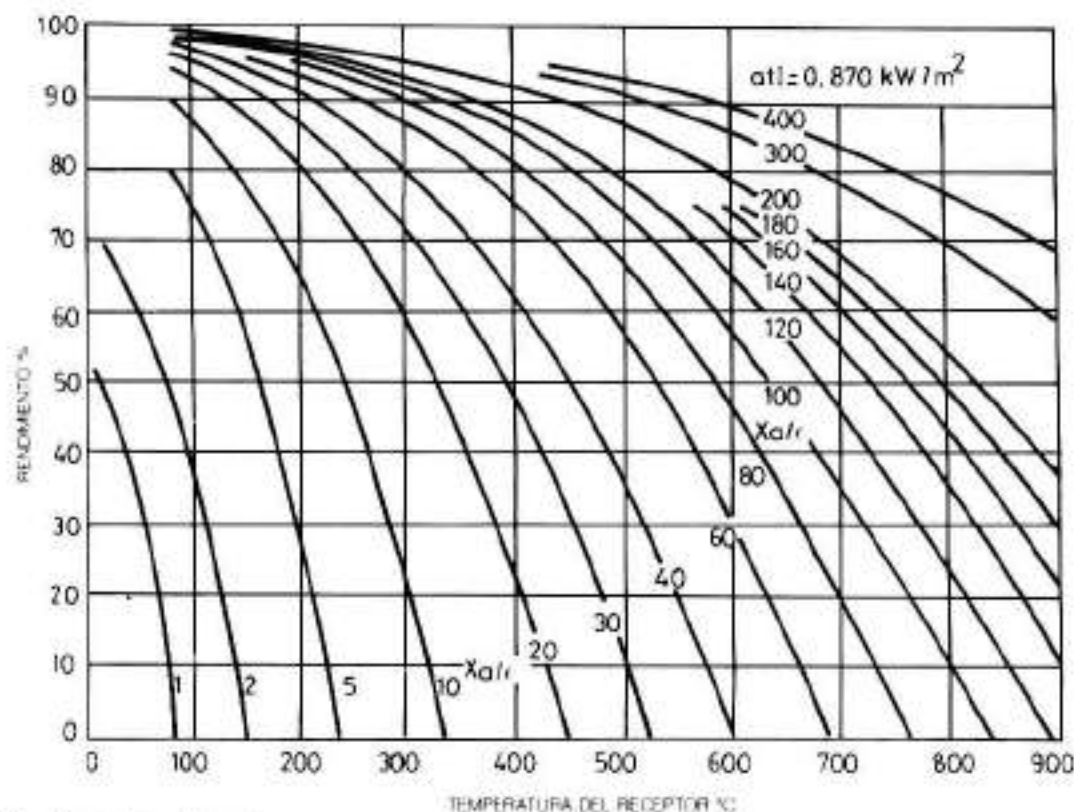


Fig. 15. - Curvas de rendimiento de un colector de concentración.

Cuando la temperatura del receptor es máxima, la extracción de energía es nula y el rendimiento es cero.

Para elegir un colector de concentración deberemos saber la temperatura de trabajo adecuada que necesitamos (por ejemplo, 200° C). Con este dato y el valor de la selectividad, encontraremos un valor del factor de concentración adecuado, que nos dé un rendimiento aceptable. En el ejemplo anterior de 200° C, si la selectividad para esta temperatura es de 3, un factor de concentración de 10 ya proporciona un gran rendimiento (más del 85%).

COLECTORES CILINDRO-PARABOLICOS

Los colectores de concentración cilindro-parabólicos son los más usados para el rango de temperaturas medias

comprendido entre 100 y 400° C. La enorme simplicidad de este tipo de colector va acompañada del hecho de que el seguimiento del Sol sólo lo ha de hacer en una dirección, lo que se presta a ser realizado por un motor eléctrico de forma sencilla.

Los colectores cilindro-parabólicos constan de un espejo cilindro-parabólico, de un tubo focal envuelto en un tubo de vidrio transparente, del soporte, y del mecanismo de seguimiento del Sol (Fig. 16).

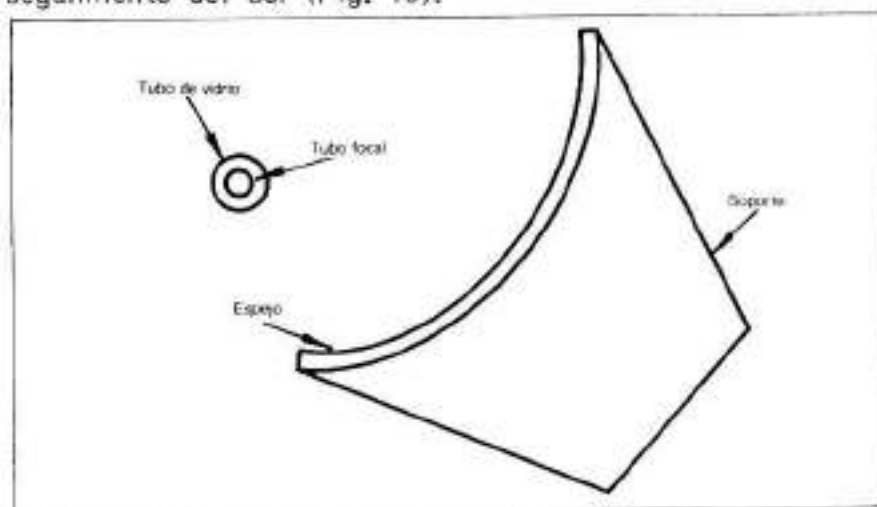


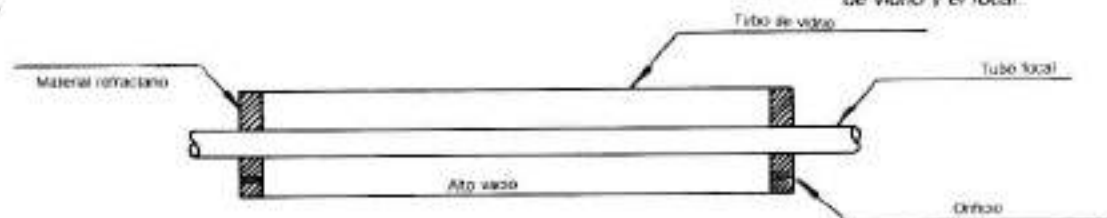
Fig. 16.- Corte transversal de un colector cilindro-parabólico. Se aprecia el tubo focal (metálico) revestido de otro de vidrio, el espejo y el soporte del espejo.

El espejo suele ser de vidrio templado, resistente a posibles impactos de granizo y vientos huracanados. En las partes exteriores se apoya en el soporte a través del cual se fija en el suelo.

El tubo focal consiste en un tubo metálico que ocupa la línea focal. Este tubo es de color negro exteriormente, a fin de tener la máxima absorbancia.

Revestiendo al tubo focal se encuentra otro tubo de vidrio (generalmente de pyrex). Este tubo transparente tiene por misión impedir las pérdidas por convección y radiación del tubo focal (las pérdidas por conducción son despreciables, pues el tubo focal sólo se apoya en los extremos del colector a través de materiales refractarios) (Fig. 17).

Fig. 17.- El tubo focal se apoya sobre el de vidrio con materiales refractarios. Los orificios en el material refractario son para poder hacer el vacío entre el tubo de vidrio y el focal.





Generalmente, se hace **el vacío** entre ambos tubos, si bien en estos casos es conveniente disponer de una línea de vacío (bomba de alto vacío y tuberías) para volver a realizar periódicamente el vacío, pues debido a las grandes dilataciones será frecuente que haya entradas de aire al interior. El vacío nos permitirá que las pérdidas por convección sean nulas.

El **mecanismo de seguimiento** sólo actúa en una dirección. En este sentido, los colectores cilindro-parabólicos pueden ser de dos tipos:

- De eje polar (inclinados).
- De eje horizontal.

La disposición de **eje polar** comporta que los colectores se coloquen de forma que el tubo focal esté inclinado un cierto ángulo respecto a la horizontal. Los colectores se dirigen hacia el Sur, y ellos mismos, mediante el mecanismo de seguimiento, se orientan hacia el Sol (Fig. 18).

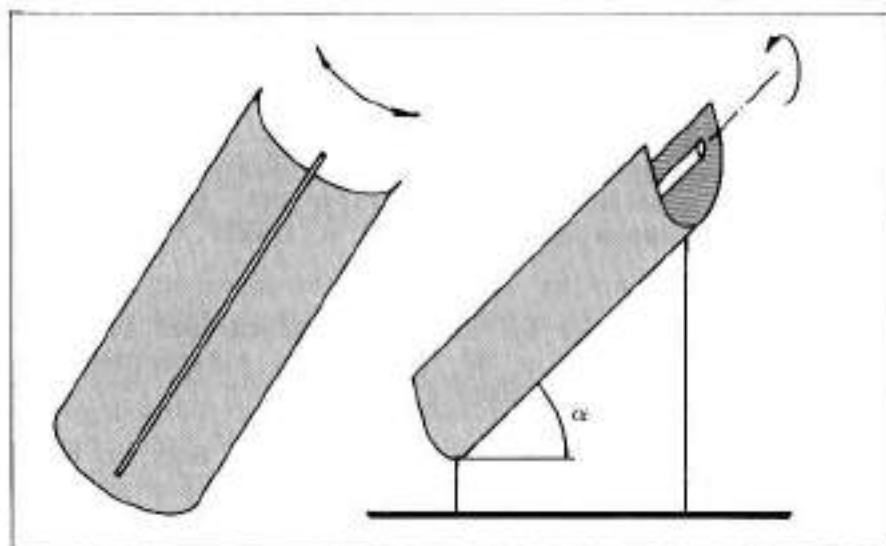


Fig. 18.- Disposición en eje polar.

La disposición de **eje horizontal** lleva consigo que los colectores se coloquen de forma que el tubo focal esté **horizontal**, y el movimiento de los colectores tiene lugar de arriba a abajo (Fig. 19).



Fig. 19.- Disposición en eje horizontal.

El movimiento necesario para efectuar el correcto seguimiento del Sol puede realizarse moviendo todo el colector, sólo el espejo o sólo el tubo focal.

A veces interesa que el **tubo focal esté fijo**, debido al hecho de que moverlo implica la presencia de conexiones flexibles y de posibles fallos en los aislamientos térmicos (los cuales, juntamente con los tubos flexibles, se mueven). En este caso, el tubo focal con su recubrimiento de vidrio permanece fijo, y el espejo se mueve.

La energía necesaria para el movimiento de los espejos es muy pequeña respecto al total de energía solar extraída. La conveniencia de disponer de colectores según el eje polar u horizontal depende de algunas cuestiones que es preciso analizar de forma detallada.

Respecto al **soporte**, es mayor o más caro el de disposición polar que el horizontal, puesto que ha de elevarse a cierta distancia del suelo para poder sujetar la parte superior del colector. Asimismo, esta disposición está más expuesta a la posible acción de vientos huracanados.

La disposición horizontal tiene unos soportes sencillos y bajos, pudiéndose colocar gran número de colectores en hileras.

Respecto al **seguimiento del Sol**, la disposición polar obliga un fuerte seguimiento de 15° por hora, lo que exige que el mecanismo de seguimiento se active con bastante frecuencia.

La disposición horizontal permite, en cambio, que el seguimiento sólo se realice en la altura solar, siendo mucho más lento a lo largo del día.

En cuanto a la **energía recibida**, ambos sistemas proporcionan a lo largo del año una energía similar, pero tienen algunas variantes.

El sistema polar proporciona, en general, una mayor cantidad de energía en verano y en las proximidades del mediodía. Es más adecuado para colectores con factores de concentración elevados (Fig. 20).

El sistema horizontal nos ofrece una mayor regularidad a lo largo del año, y a lo largo de las distintas horas del día, siendo preferible para sistemas de concentración reducida (Fig. 21).

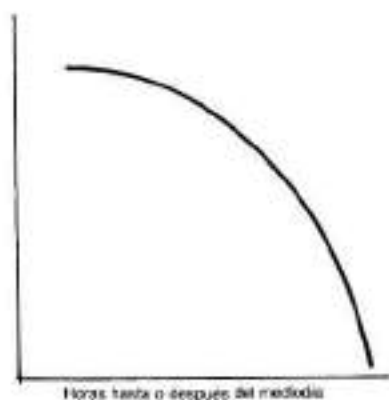
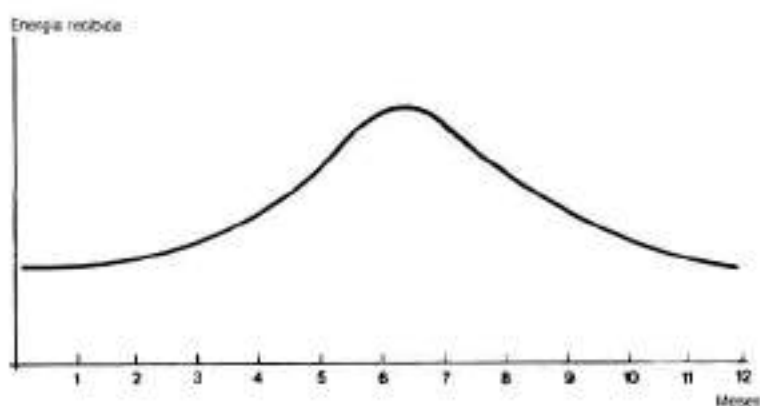


Fig. 20.- Gráficas que muestran la energía recibida por un sistema de eje polar.

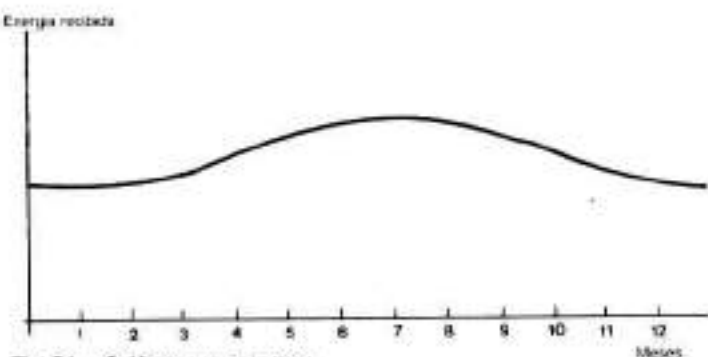


Fig. 21.- Gráficas que muestran la energía recibida por un sistema de eje horizontal.

En el sistema polar, es posible variar la **inclinación** del colector de acuerdo con los mismos criterios ya expuestos para colectores planos. El valor óptimo es igual al de la latitud menos el valor de la declinación. Si se colocan fijos, el ángulo de inclinación se selecciona igual que en un colector plano.

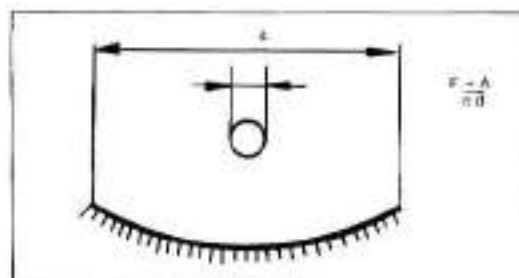
De acuerdo con lo dicho, no existen preferencias especiales respecto a la disposición en eje polar u horizontal, si bien para aplicaciones que no requieran factores de concentración excesivamente altos (hasta 20), se observa una cierta tendencia a la disposición horizontal debido a su mayor sencillez.

En estos colectores, el **cálculo del factor de concentración** puede prestarse a equívocos respecto al área del receptor. Este área es la superficie cilíndrica del tubo focal, por lo que si la abertura del espejo parabólico es A y el

diámetro del tubo focal es d , el factor de concentración valdrá: (Fig. 22):

$$f = \frac{A \times l}{\pi \times d \times l} = \frac{A}{\pi \times d} \quad (\text{expresión simplificada})$$

Fig. 22.— Factor de concentración. Es el cociente entre el área de abertura y el área del receptor. Si el espejo y el receptor tienen la misma longitud, el factor de concentración es el cociente entre el ancho del espejo y el perímetro del tubo focal.



La longitud del colector no interviene para nada en el caso de que el espejo y tubo focal tengan la misma longitud, puesto que es la misma para el área de abertura que para el tubo focal. Si el tubo focal no es redondo, entonces debe hallarse su perímetro exterior.

Recuérdese que el área del receptor es la extensión de superficie a través de la cual el receptor pierde calor por radiación.

Respecto al **seguimiento**, hay que tener en cuenta que las desviaciones de la dirección de la radiación respecto al plano perpendicular al tubo focal tienen muy poca importancia puesto que no afectan a la focalización. Tan solo desplazan la línea focal, haciendo que ésta se prolongue más allá de las propias dimensiones del colector. Esto se suele solucionar haciendo que el tubo focal sea **un poco más largo** que la longitud de los espejos en el sentido axial. En estos casos, no es válida la expresión simplificada para calcular el factor de concentración, y debe calcularse éste dividiendo el área de abertura (largo por ancho del plano del espejo) por la superficie exterior del tubo focal (Fig. 23).

El seguimiento debe realizarse mediante un sistema realimentado, nunca mediante un mecanismo de relojería.

Los **sistemas realimentados** constan de unos sensores que generalmente son alcanzados por la propia sombra del tubo focal cuando el colector está correctamente focalizado. Al irse desplazando el Sol, los sensores (generalmente fototransistores) entran en la luz, poniendo en marcha el

motor que funciona hasta que son de nuevo colocados en la sombra.

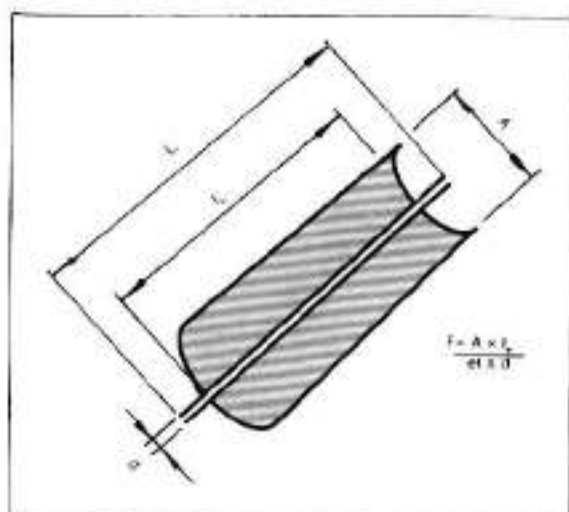


Fig. 23.- Expresión general del factor de concentración. Si el tubo focal no es redondo, se debe calcular su perímetro.

En los sistemas polares, el movimiento durante el día se realiza de Este a Oeste, mientras que en los sistemas horizontales, durante la mañana se eleva el colector y durante la tarde descende, quedando en la posición adecuada para iniciar la actividad al día siguiente. Al finalizar el día, en los sistemas polares, los colectores deben volver a la posición Este para poder iniciar la actividad al día siguiente (Fig. 24).

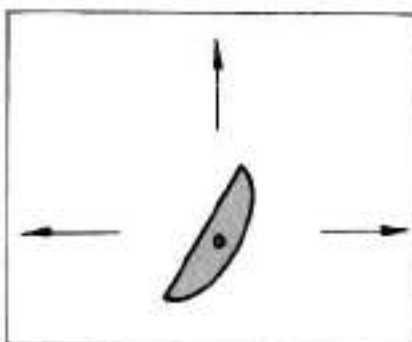


Fig. 24.- Al acabar el día, los colectores cilindro-parabólicos de eje polar deben volver a la posición Este. A la derecha campo de colectores cilindro-parabólicos.



Los sistemas de seguimiento deben estar provistos de mecanismos que permitan una **rápida desfocalización en caso de emergencia**.

El tipo de emergencia más frecuente suele ser un **sobrecalentamiento** del fluido que circula por el interior del tubo focal. En estos casos, el mecanismo de seguimiento debe actuar **desenfocando**, girando el colector preferentemente en sentido contrario al de la mancha normal. Un colector de concentración desenfocado no capta energía.

Mención especial son las situaciones climatológicas adversas, tales como lluvia, granizo, vientos huracanados o períodos de no utilización de la instalación.

En estos casos, los colectores adoptan una **posición de descanso**, generalmente invertidos mirando hacia el suelo.

Como puede apreciarse, esta posición de descanso es más fácil de conseguir en el sistema horizontal.

Cuando manejemos un colector de concentración cilindro-parabólico, **jamás** deberemos tocar con las manos el tubo de vidrio, el focal o sus inmediaciones, ya que podríamos sufrir graves quemaduras.

Los colectores de concentración cilindro-parabólicos no están totalmente comercializados pero se prevé que esto pueda suceder muy pronto. Respecto al precio de los mismos colectores de sistema horizontal, podrían venderse a **precios inferiores** a los paneles planos, debido al bajo coste del soporte y de los materiales que los componen.

La parte más cara de un colector cilindro-parabólico es el espejo, pero esta pieza una vez producida en serie (generalmente estos colectores están formados por dos espejos, ya que son simétricos) tampoco es excesivamente cara.

Se necesitará un mecanismo de seguimiento del Sol, con su correspondiente motor, para cada colector. Con un solo dispositivo se puede controlar todo un campo de colectores a la vez, y con un solo motor por hilera de colectores se pueden orientar todos ellos. De esta forma, un campo de colectores cilindro-parabólicos de eje horizontal puede ser más barato que la misma superficie de paneles planos.

COLECTORES DOBLE-PARABOLICOS

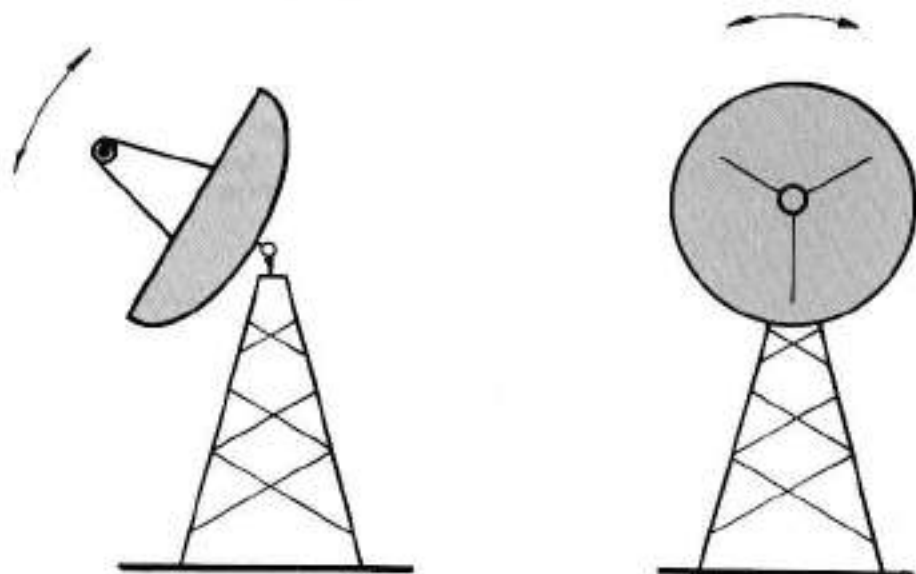
Los colectores solares **doble-parabólicos** consisten en un espejo curvado que presenta curvatura parabólica en sus dos ejes. La forma de estos colectores se asemeja a las antenas parabólicas para el seguimiento de naves espaciales.

El foco, en este caso, es un punto. Dadas estas características, el **factor de concentración** puede ser **muy elevado**, pudiéndose obtener temperaturas de hasta unos 4000° C.

El hecho de que aquí la potencia dependa del área de los colectores, hace que éstos tengan varios metros de diámetro y que generalmente no sean hechos de un único espejo sino de múltiples espejos adheridos a la superficie parabólica.

Los colectores solares doble-parabólicos permiten obtener temperaturas sumamente elevadas, pero presentan el problema de que precisan un **seguimiento del Sol muy preciso y además en dos direcciones**: de Este a Oeste y de abajo a arriba. Esto requiere un mecanismo complejo de seguimiento con dos motores, uno para efectuar el movimiento horizontal y otro para el movimiento vertical (Fig. 25).

Fig. 25.- Movimientos que ha de realizar un colector doble parabólico.





Este tipo de colectores se usa sólo con fines de experimentación y para aplicaciones especiales.

HELIOSTATOS

Los **heliostatos** son espejos planos que forman parte de un colector de concentración de gran tamaño.

El campo de heliostatos es similar a un campo de colectores. Cada heliostato consta de varios espejos planos sujetos a un soporte.

Los heliostatos han de orientarse al Sol mediante un movimiento en **dos direcciones**, de forma que los rayos solares reflejados en el heliostato incidan en un receptor.

Debido a que los diversos heliostatos estarán situados en posiciones diferentes del terreno, el **ángulo** con que deben orientarse es **distinto** para cada uno de ellos. No obstante ésto, como cada heliostato ocupa una posición fija, mediante un ordenador se puede controlar fácilmente el correcto posicionamiento de todos los heliostatos, en base a consideraciones geométricas. De esta forma, todos los heliostatos dirigirán sus rayos hacia una pequeña zona donde debido a la suma de irradiaciones se obtendrá un factor de concentración muy elevado.

COLECTORES DE CONCENTRACION ESPECIALES

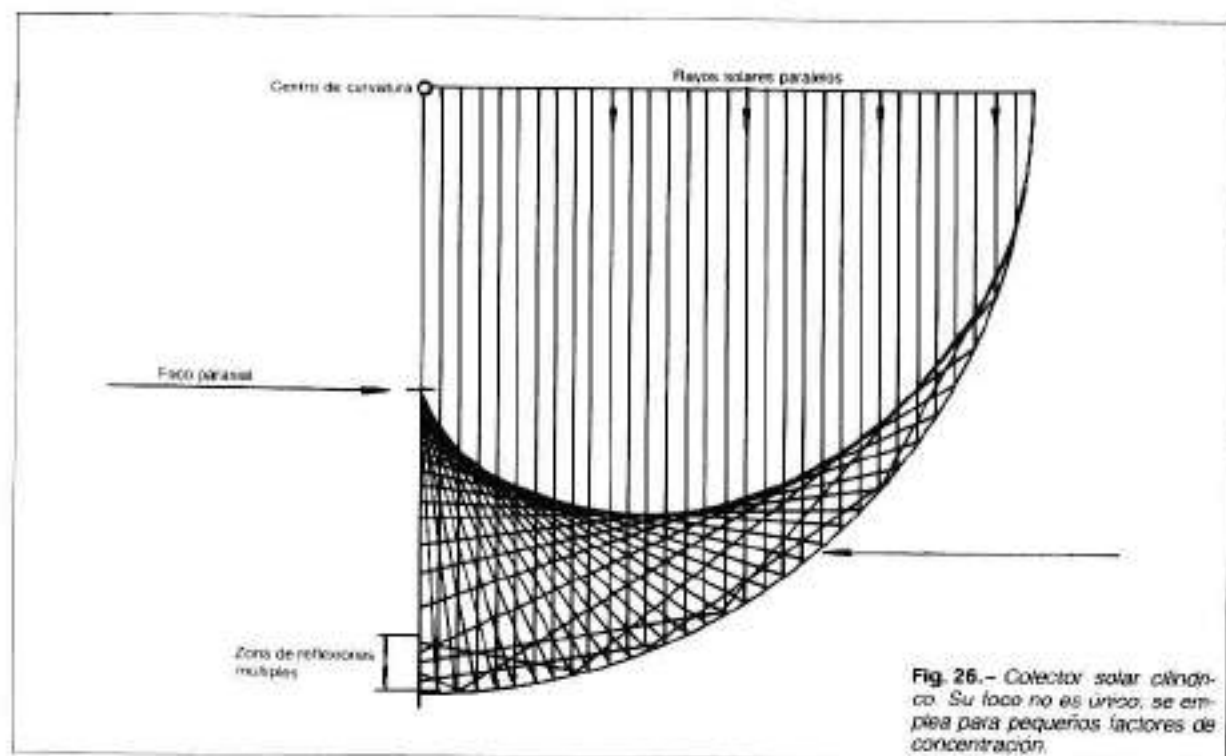
Existen diversos tipos de colectores de concentración especiales, que tienen algunas propiedades interesantes. Aquí trataremos de dos de ellos: el colector cilíndrico y el colector de Winston.

Estos colectores se caracterizan por un **bajo factor de concentración**, lo que hace que no sean útiles para obtener temperaturas muy elevadas.

El colector cilíndrico consiste en un **arco de cilindro** (generalmente medio cilindro) con el espejo en la parte interior. La ventaja, respecto al cilindro-parabólico, estriba

en su menor coste de fabricación; es más fácil realizar una forma cilíndrica que una parabólica.

Un haz de rayos paralelos que se refleje en una superficie cilíndrica no da lugar a un foco único, sino al llamado **foco paraxial**, que está situado aproximadamente a 0.5 veces el radio. Entre este foco paraxial y la superficie del espejo está la zona de concentración de los rayos solares. En las proximidades de la superficie del espejo hay una zona donde inciden los rayos solares que han sufrido varias reflexiones. (Fig. 26).



El receptor suele consistir en un tubo rectangular situado en esta zona de concentración de los rayos solares.

Estos colectores se hacen, en ocasiones, de pequeño tamaño, montándose varios de ellos, unos al lado de otros, en una caja con el aspecto exterior de un panel plano.

Dadas las características de estos colectores, su orientación no precisa ser muy exacta, pues, para un amplio margen de ángulos de incidencia, la radiación solar reflejada en el espejo siempre incidirá en el receptor.

El colector de **Winston** consiste en un colector formado



por **dos espejos cilindro-parabólicos** y una **superficie plana**, que es el receptor. Los dos espejos se disponen simétricamente respecto al eje de simetría, y dan a este tipo de colector un aspecto muy cerrado (Fig. 27).

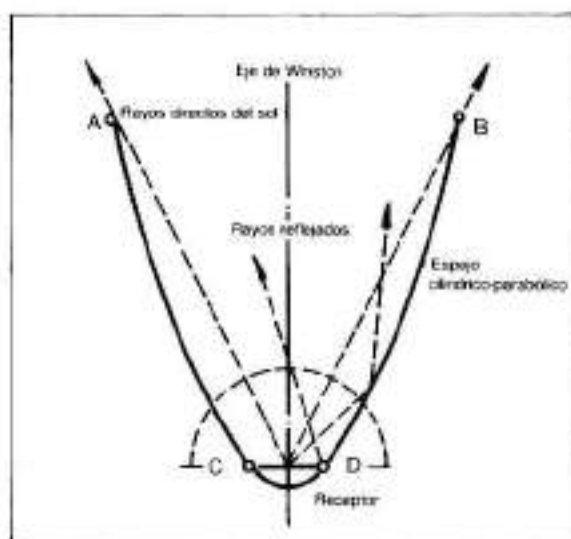
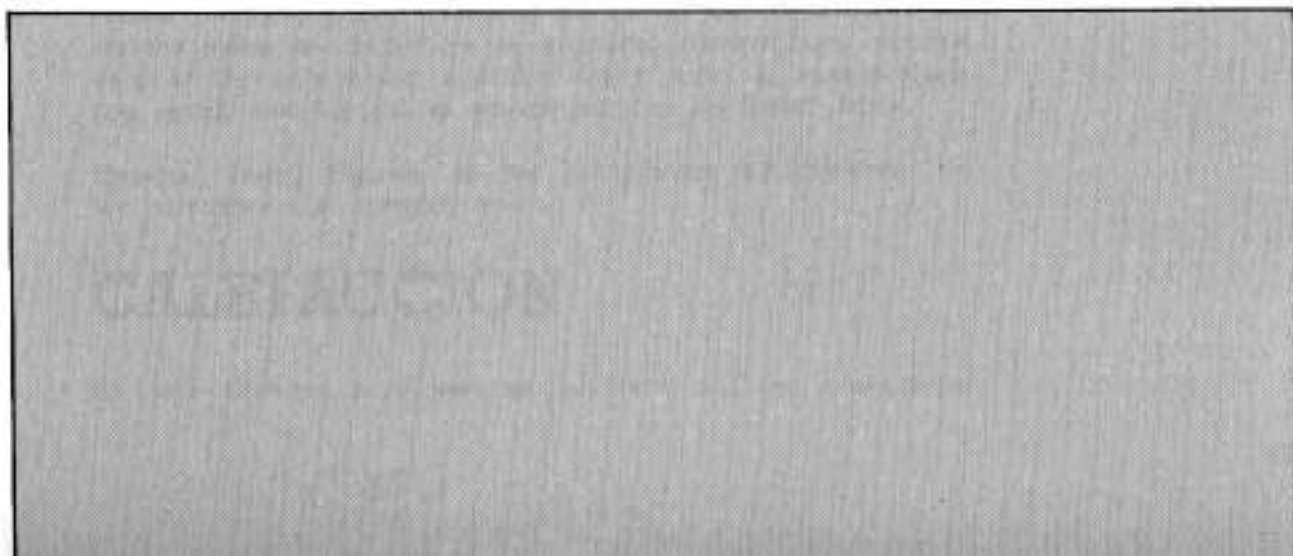


Fig. 27.- Colector de Winston.

Las características geométricas de este colector hacen que cualquier radiación que entre por el cono de apertura sea absorbida en el receptor, lo que significa que no precisa seguimiento del Sol mientras éste se encuentre dentro de los límites del cono de apertura. Puede captarse así, algo de radiación difusa.

Como inconveniente tiene su pequeño factor de concentración, el hecho de ser muy profundo y la circunstancia de que a lo largo del día hay que disponerlo en varias posiciones, puesto que el cono de apertura es pequeño.

LECCION 26





26. APLICACIONES DE LOS COLECTORES DE CONCENTRACION

INTRODUCCION

Los colectores de concentración que hemos explicado en el tema anterior, en especial los cilindro-parabólicos, presentan un elevado interés industrial, por lo que se prevé una progresiva introducción de los mismos en aplicaciones industriales. Por otra parte, los colectores doble-parabólicos pueden resultar muy convenientes en aplicaciones de alta tecnología.

UTILIDAD DE LOS COLECTORES DE CONCENTRACION

Los colectores de concentración poseen una serie de utilidades que los hacen especialmente atractivos para aplicaciones industriales en las que se precisen **temperaturas superiores a los 100° C.**

Debemos recordar que muchas de las aplicaciones a temperaturas medias (de 100 a 400° C) hacen necesario que se disponga de un sistema auxiliar de calentamiento, generalmente compuesto por calderas de gas o de fuel. Tan solo ciertos sistemas dedicados a procesos discontinuos pueden carecer de calentador auxiliar, dado que la temperatura que podría suministrar el equipo auxiliar es insuficiente.

Veamos, pues, algunas de las principales aplicaciones de los colectores de concentración.

CALEFACCION

En determinadas ocasiones se prefiere utilizar colectores



de concentración para aplicaciones de calefacción en lugar de colectores planos. Si la tendencia a la baja en el precio de los colectores cilindro-parabólicos de poca concentración y de eje horizontal se mantiene en el futuro, es bastante probable que estos colectores de concentración para aplicaciones sean preferidos a colectores planos muy sofisticados y de elevado precio.

La ventaja de los colectores de concentración se hace más patente cuanto mayor es el tamaño de la instalación, puesto que entonces los costes asociados (mecanismo de seguimiento, motores, etc.) disminuyen.

A este respecto, se observa una cierta tendencia a utilizar para calefacción colectores cilindro-parabólicos, o incluso cilíndricos de pequeñas dimensiones, formando grupos compactos que pueden instalarse fácilmente y que llevan todos los mecanismos integrados. Incluso, existen algunos modelos que pueden instalarse fácilmente en tejados.

Un aspecto importante en estas aplicaciones reside en la **distancia focal**, que es la distancia que hay desde el centro del tubo focal al vértice del espejo. La sección parabólica del colector puede ser más o menos cerrada. Una parábola muy **abierta** hace que el tubo focal esté lejos del espejo (**distancia focal elevada**), mientras que en una **parábola cerrada**, el tubo focal está próximo al espejo (**distancia focal pequeña**). Esto ocasiona problemas dimensionales, puesto que el espesor ocupado por el colector puede ser variable. En un tejado no deben instalarse colectores de elevado espesor por razones estéticas, de seguridad, y las que se derivarían de producirse vientos huracanados, (Fig. 1).

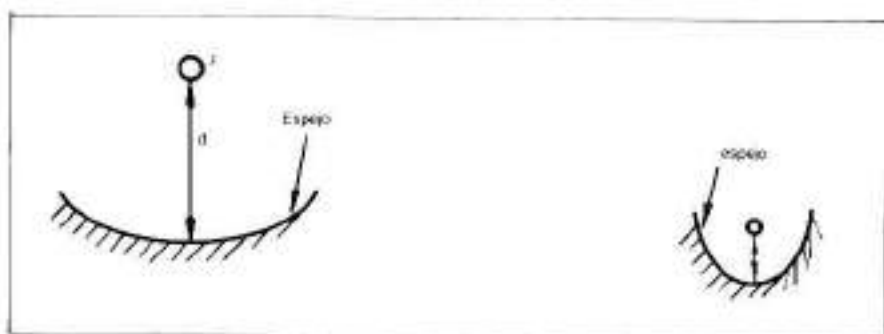


Fig. 1.- Los colectores muy abiertos tienen una distancia focal grande. Los colectores cerrados, pequeña.

Por estos motivos, los colectores de bajo factor de concentración suelen tener una distancia focal corta, no importando que la geometría del espejo sea excesivamente perfecta. Por contra, los colectores cilindro-parabólicos,

con factores de concentración elevados, suelen tener la distancia focal elevada y una perfecta geometría del espejo.

AIRE CALIENTE

Ya dijimos que una de las grandes ventajas de los colectores cilindro-parabólicos era el hecho de poseer un tubo focal que permitía hacer circular a su través un fluido.

Este fluido puede ser también aire, susceptible de ser calentado a temperaturas bastante altas que pueden ser útiles en procesos industriales.

Debido a que los colectores de aire tienen un rendimiento inferior a los de agua, este sistema no es frecuente, pero no por ello pierde su interés en procesos de secado o calentado de piezas mediante aire muy caliente (Fig. 2).

VAPOR

Las aplicaciones más importantes de los colectores de concentración cilindro-parabólicos tienen que ver con la **producción de vapor**.

El vapor de agua puede obtenerse a distintas temperaturas, que varían según el proceso industrial. Así, encontraremos desde vapor a muy baja temperatura (120°C), a vapor recalentado a 540°C como el que emplea una central térmica moderna (este límite de 540°C viene impuesto por la resistencia de los materiales a estas temperaturas).

Para la gran mayoría de industrias, las necesidades de vapor se centran en el intervalo de 120 a 250°C , temperaturas ideales para el funcionamiento de colectores solares de concentración.

En estos casos no se hace pasar el agua por el tubo focal, para que se vaporice en su interior, sino que se hace circular un **aceite térmico**, que se calienta a alta temperatura. Esto resulta del hecho de que la transmisión de calor en un líquido es muy superior a la de un gas. Si el agua hirviera en el interior del tubo focal, las burbujas harían de aislante térmico, con lo que el rendimiento del colector disminuiría (Fig. 3).

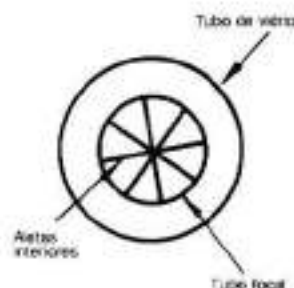


Fig. 2.- Corte de un tubo focal destinado a calentar agua a altas temperaturas. Lleva aletas en su parte interior.

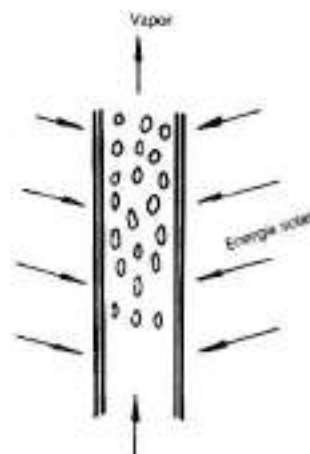


Fig. 3.- Si el agua hirviera en el tubo focal, la transmisión de calor sería poco eficiente.

El vapor obtenido puede emplearse para múltiples usos, desde la generación de potencia mecánica hasta procesos de esterilización, pasteurización, calentamiento, fabricación de tintes, artes gráficas, industria papelera, etc., etc.

La instalación de colectores solares de concentración supone para la industria contratante ahorros económicos importantes, ya que, mientras hay Sol, éste cubre total o parcialmente las necesidades térmicas.

El rendimiento global de estas instalaciones, es aún mayor en los casos en que se trate de procesos **discontinuos** de algunas horas de duración a lo largo del día. Un proceso de este tipo podría ser la pasteurización de una cierta cantidad de leche, proceso que se ha de hacer cada día. Si esta operación dura, por ejemplo 5 horas, es factible hacer coincidir estas 5 horas con las próximas al mediodía solar y utilizar el equipo de energía solar para tal fin, sin necesidad de almacenar la energía.

Los días sin Sol, el equipo auxiliar aportará la energía necesaria para este proceso.

FRIO

La obtención de **frío** mediante un sistema de absorción del tipo amoníaco-agua es una aplicación muy interesante para los colectores de concentración.

Además, dado que el sistema de absorción proporciona también calor en el foco caliente, se pueden **obtener simultáneamente calor y frío** (Fig. 4).

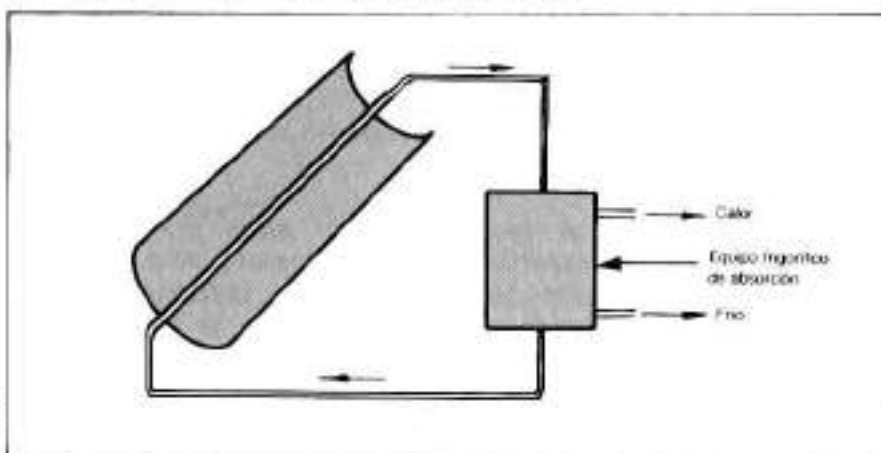


Fig. 4.- Con concentradores solares se puede obtener calor y frío simultáneamente.

Un ejemplo típico podría ser un matadero avícola, donde se precisaría agua muy caliente para el desplumado de los pollos. Esta agua a elevada temperatura se podría obtener a partir del calor desprendido en el **condensador** (foco caliente), mientras que el frío (obtenido en el evaporador) se utilizaría para la congelación de los pollos.

El sistema precisa de una caldera auxiliar, la cual proporciona el calor necesario al generador, obteniéndose así calor y frío simultáneamente. Un sistema de este tipo podría proporcionar ahorros importantes.

PRODUCCION DE ELECTRICIDAD

La **producción de electricidad** por medio de un ciclo termodinámico es factible mediante el empleo de colectores cilindro-parabólicos, si bien su rendimiento es muy bajo (del orden del 10%).

El rendimiento energético de un ciclo termodinámico depende de la diferencia de temperaturas entre la parte más caliente de la instalación (el generador de vapor) y la parte más fría (el condensador).

Por esta razón interesa que la caldera (por ejemplo, de una central térmica) produzca el vapor a la mayor temperatura posible, mientras que el condensador (refrigerado por agua o aire) debe estar a la temperatura más baja posible.

Los colectores cilindro-parabólicos se han empleado para producir electricidad, pero dado que las temperaturas máximas no son excesivamente elevadas, el rendimiento de obtención de electricidad es bajo.

La producción de electricidad de origen solar se lleva a cabo, preferentemente, mediante colectores doble-parabólicos, y, mejor aún, con **colectores de heliostatos**, los cuales, gracias a un elevado factor de concentración, pueden alcanzar temperaturas muy elevadas (Fig. 5)

En estos casos se superan fácilmente los 600° C, lo que permite obtener **vapor de alta temperatura** muy apropiado para accionar una turbina de vapor, la cual a su vez accionará un alternador eléctrico.

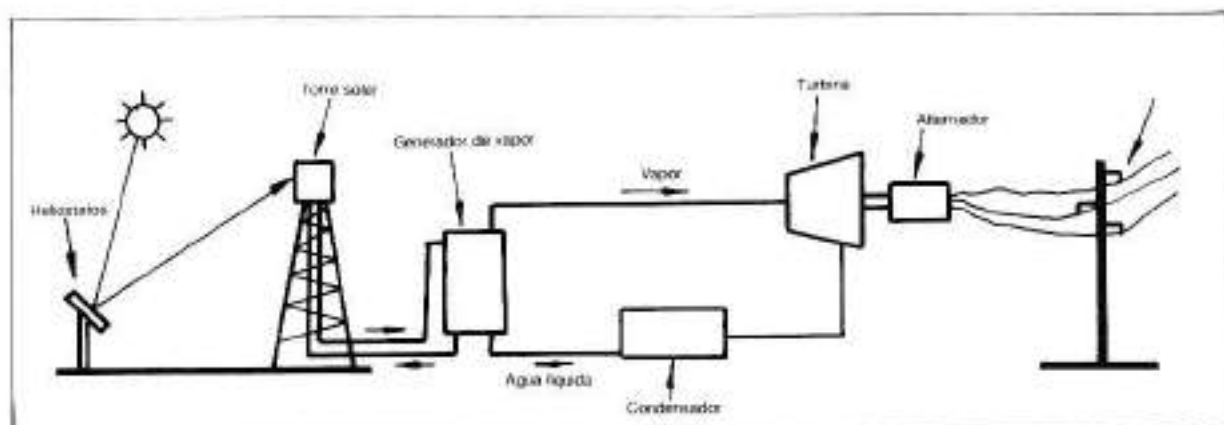


Fig. 5 - Obtención de electricidad mediante un ciclo termodinámico.

OBTENCION DE METALES Y ALEACIONES

La obtención de ciertos metales exige a su vez el uso de **temperaturas de miles de grados** y ausencia de **oxígeno** en el aire. Igualmente, algunas aleaciones especiales o compuestos refractarios tales como vanadio, titanio, niobio, óxidos de torio, etc. se pueden obtener en hornos solares con unas características de pureza inimaginables.

Un **horno solar** concentra en una zona muy pequeña una cantidad de energía enorme, que puede ser utilizada para la fusión de metales. Esta fusión puede realizarse a alto vacío debido a que se puede recubrir el receptor (el metal o metales) con una cubierta de vidrio en la que se puede hacer el vacío (Fig. 6).

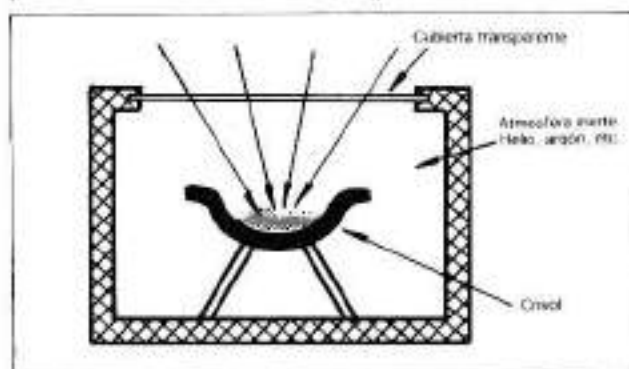


Fig. 6.- Horno solar.

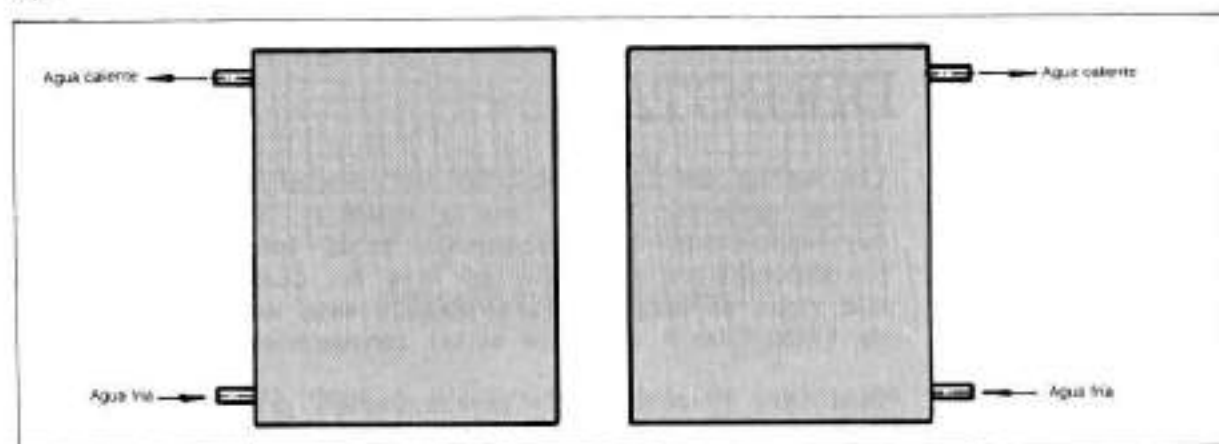
Las aplicaciones de esta técnica tienen utilidad en la obtención de compuestos de muy alta pureza destinados a la industria electrónica, espacial o aeronáutica, así como en armamento.

ENSAYOS DE CHOQUE TERMICO

Los hornos solares se prestan a realizar ensayos de **choque térmico**, es decir, a comprobar cómo resiste un material un impacto energético considerable.

Para realizar estos ensayos, el material a ensayar se coloca en el receptor, que exteriormente está **tapado** por una puerta reflectante refrigerada con agua.

Los rayos solares se hacen converger sobre el receptor; como la puerta es reflectante, los rayos se reflejan y la calientan poco (a pesar de que el coeficiente de absorción α sea muy bajo, la energía absorbida por la puerta es considerable, a causa del enorme valor de la irradiación). Por esta razón, la puerta puede ir refrigerada mediante una intensa circulación de agua fría en su interior (Fig. 7).



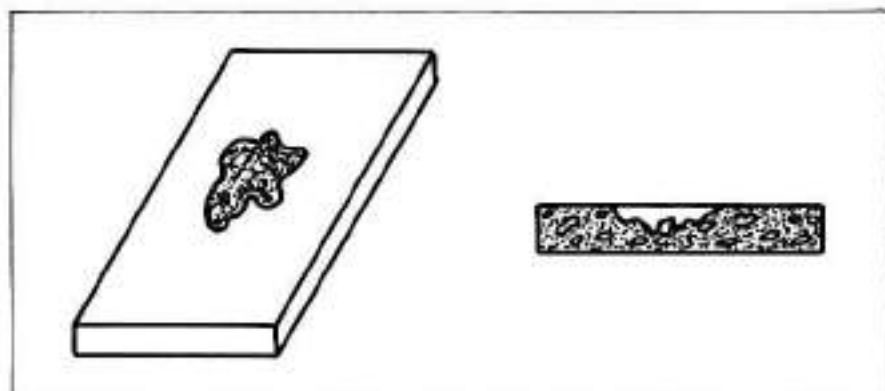
Una vez focalizado, la puerta se abre bruscamente y la intensa radiación solar altamente concentrada incide sobre el material a ensayar.

Fig. 7. — Las puertas de un horno solar deben ir altamente refrigeradas para evitar que se fundan.

Pasado el tiempo previsto, (a veces unos pocos segundos), la puerta se cierra bruscamente, se desfocaliza el horno, se deja que se enfríe, y se comprueban los resultados.

Los materiales ensayados pueden ser desde bloques de hormigón, blindajes especiales, materiales espaciales de satélites artificiales, nuevos compuestos refractarios, etc. (Fig. 8).

Fig. 8.-Bloque de hormigón sometido a un ensayo de unos segundos de choque térmico. La zona afectada ha quedado destruida.



Con este tipo de pruebas se pueden comprobar efectos de grandes explosiones, las deformaciones de los materiales, simular una explosión nuclear, etc., todas ellas condiciones extremas que no serían factibles sin la energía solar.

CALCULO DEL VALOR DE LA RADIACION DIRECTA

Las tablas de radiación sólo nos proporcionan los valores de la radiación media diaria mensual. Este valor es el correspondiente a la radiación **total** (directa + difusa), correspondiente a un día del mes en cuestión (H). En lo que sigue de lección, llamaremos a este valor TD (iniciales de Total Diaria, a fin de evitar confusiones).

Para usar colectores de concentración precisamos conocer el valor de la radiación **directa**. Este valor puede obtenerse a partir de la correlación de Liu y Jordan, y su forma de calcularla es la siguiente:

- Se obtiene el valor de la **declinación** solar mediante la fórmula de Cooper para el día en cuestión.
- Se obtiene el factor de corrección de la **excentricidad** de la órbita terrestre para el día en cuestión.
- Se calcula el valor WS (semiduración diurna del día, en grados).
- Con los valores a, b y c más el valor de la **irradiación media diaria mensual** sobre una superficie **horizontal** (inclinación = 0°), se obtiene el valor de la radiación media diaria **extraterrestre**, que es la que recibiría

una superficie horizontal si la Tierra no tuviera atmósfera.

- e) Se obtiene el factor **K**, dividiendo el valor de la irradiación media diaria mensual (que dan las tablas de radiación) por la irradiación media diaria extrarrestre.
- f) Se calcula la radiación **difusa** como una expresión polinómica de tercer grado o mediante una gráfica (Fig. 9).
- g) Se obtiene la radiación **directa** media diaria mensual, por simple resta del valor de la radiación total y la difusa (para una superficie horizontal).
- h) Si la superficie no es horizontal (que es lo más corriente), el valor de la radiación directa que recibe una superficie inclinada un cierto ángulo (α) y orientada (γ), es igual al que recibe una superficie horizontal multiplicada por un **factor de forma F**.

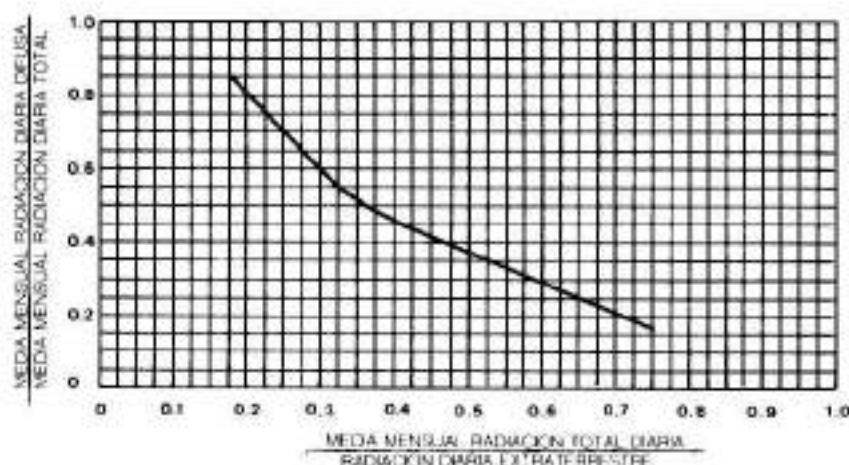


Fig. 9. - Gráfico del cálculo de la radiación difusa.

Veamos con más detalle el procedimiento de obtención del valor de la radiación media directa diaria sobre una superficie inclinada y orientada.

- a) El valor de la declinación se calcula mediante la fórmula de Cooper:

$$d = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right) \quad n = \text{día del año}$$

- b) El factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre vale:

$$r = 1 + 0,033 \left(\cos \frac{360n}{365} \right) \quad n = \text{día del año.}$$

c) El valor de ws vale:

$$WS = \cos^{-1} (-\tan L \times \tan d) \quad \begin{array}{l} L = \text{Latitud} \\ d = \text{declinación} \end{array}$$

d) El valor de H_0 (radiación media diaria extrarrestre) vale:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} r I (\cos L \times \cos d \times \sin WS + \frac{\pi WS}{180} \times \sin L \times \sin d)$$

r = excentricidad órbita terrestre.

I = Energía proporcionada por la constante solar durante 1 hora.

$$= 1353 \text{ W} \times 3600 \text{ sg} = 4,87 \text{ E6J}$$

e) El valor de K es:

$$K = \frac{TD}{H_0}$$

f) El valor de la radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal (FD) es: (Puede también calcularse con la gráfica de la fig. 9)

$$FD = (-3,11 K^2 + 5,53 K - 4,03 K + 1,39) TD$$

g) El valor de la radiación directa (RD) para una superficie horizontal es la diferencia entre la total TD y la difusa FD:

$$RD = TD - FD$$

h) El factor de forma F vale:

$$F = \frac{\cos A}{\sin h}$$

A = ángulo de incidencia de la radiación directa sobre el colector.

h = ángulo de la altura solar.

Los valores de A y de h sabemos calcularlos, según se vió en las lecciones 4 y 8 respectivamente:

$$\begin{aligned} \cos A &= \sin d \sin L \cos s \\ &- \sin d \cos L \sin s \cos g \\ &+ \cos d \cos L \cos s \cos w \\ &+ \cos d \sin L \sin s \cos w \cos g \\ &+ \cos d \sin s \sin g \sin w \end{aligned}$$

$$\sin h = \sin d \sin L + \cos d \cos L \cos w$$



En consecuencia, el valor de la radiación directa que recibe una superficie fija inclinada y orientada (RD s,g) es de:

$$RD_{s,g} = RD \times F$$

Ahora bien, los colectores de concentración **no permanecen inmóviles** como los planos, sino que **siguen el movimiento aparente del Sol**, lo que hace que los valores de inclinación (s) y de orientación (g) varíen continuamente a lo largo del día.

El valor antes obtenido en RD s,g, no es útil, pues representa el valor de la radiación directa para una superficie **fija**. En su lugar, debemos obtener una serie de valores de radiación directa de hora en hora referidos a una superficie en la que cambian continuamente los valores de inclinación, orientación y ángulo horario. Este valor suele calcularse de hora en hora, tomando como valor medio el existente entre dos horas enteras consecutivas. Así, por ejemplo, el valor de la radiación horaria entre las 11 y las 12 h, se calcula como el valor existente a las 11 h. 30 m. y se considera que de 11 a 12 h. el valor es el mismo.

Si el colector efectúa el seguimiento del Sol, ello introduce notables simplificaciones en los cálculos puesto que en estas circunstancias ocurre siempre que:

$$\cos A = 1 \quad A = 0^\circ \text{ (Por estar el colector perpendicular al sol).}$$

$$s = 90 - h \text{ (Inclinación del colector) } \quad h = \text{altura solar}$$

$$g = z \text{ (Orientación del colector) } \quad z = \text{azimut solar}$$

Gracias a esto, en un colector **doble parabólico** pueden obtenerse fácilmente los valores de inclinación y orientación con sólo calcular la altura solar y el valor de azimut, cosas que ya hemos visto en la lección 8.

Al efectuar el seguimiento del Sol, los valores de radiación horaria (de hora en hora) no presentan un máximo tan acusado hacia el mediodía solar como ocurre con los colectores fijos orientados al Sur, siendo mucho más eficaz la captación de energía solar en horas alejadas del mediodía solar.

El cálculo de la **radiación directa horaria** es complejo y queda fuera del alcance de este Curso. No obstante, a



continuación se expone un método simplificado que permite obtener resultados muy fiables, basándose en unas gráficas.

Estas gráficas permiten obtener la **radiación total horaria** y la **radiación difusa horaria** (de hora en hora) sobre una superficie horizontal. Restando de la total horaria la difusa horaria, se obtiene la directa horaria horizontal.

Estas gráficas contienen siete curvas marcadas con 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 y 6.5. Son las horas desde el mediodía solar. Así, la curva de 0.5 representa la insolación existente media hora antes o después del mediodía (las 11 h. 30 m. ó las 12 h. 30 m.). El valor de radiación del intervalo de una hora comprendido entre las 11 y 12 h. o entre las 12 y 13 h. se toma igual al valor existente a las 11 h. 30 m. o las 12 h. 30 m. (que son iguales).

Hallemos en primer lugar la **radiación total horaria** sobre una superficie horizontal. Para ello debemos calcular la duración diurna del día (numero de horas en que el Sol está sobre el horizonte). Este valor lo obtenemos fácilmente de w_s , que ya teníamos calculado:

$$D = \frac{2 W S}{15} \text{ horas}$$

con este valor D de la duración del día, nos vamos a la Fig. 10 y entramos por el eje horizontal subiendo hasta encontrar, entre las siete, la curva que nos interese, leyendo el valor obtenido en el eje vertical. El valor de la radiación total horaria es igual al producto del valor obtenido en el eje vertical por el valor de la radiación media diaria mensual (obtenido en las tablas de radiación).

Para calcular el valor de la **radiación difusa horaria** seguimos el mismo procedimiento, pero esta vez utilizando la Fig. 11.

Entramos en la tabla mediante el valor de la duración del día en horas por el eje horizontal, subimos hasta encontrar la curva que nos interese y leemos el valor obtenido en el eje vertical.

El valor de la radiación difusa horaria es igual al producto del valor obtenido en el eje vertical por el valor de la media de radiación difusa diaria mensual (calculada al principio y que sirvió para calcular la radiación directa diaria).

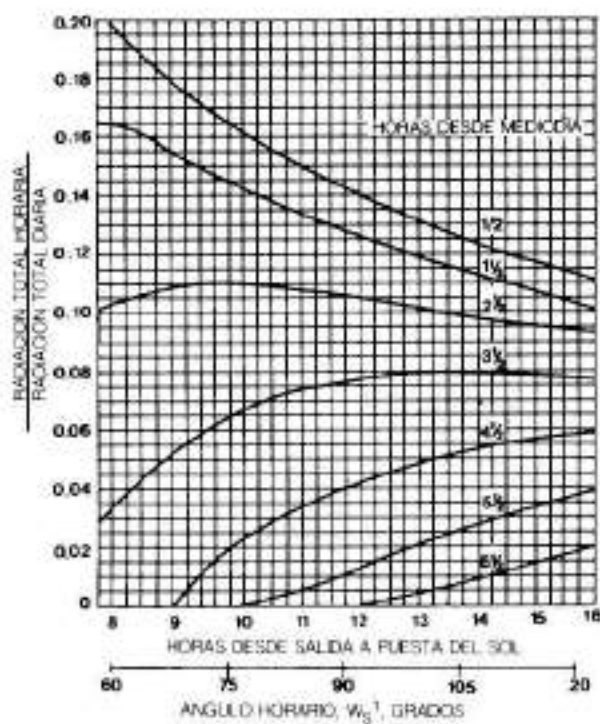


Fig. 10.- Gráfico del cálculo de la radiación total horaria.

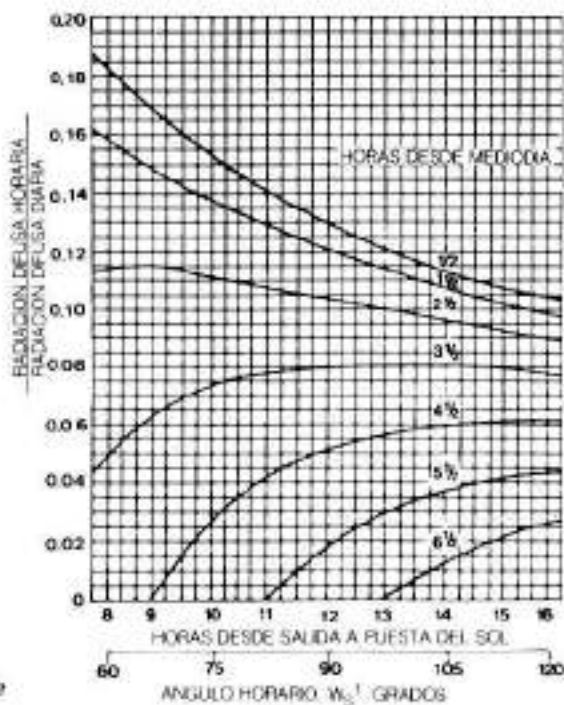


Fig. 11.- Gráfico del cálculo de la radiación difusa horaria.



Restando el valor de la radiación total horaria (para esa hora determinada) de la radiación difusa horaria (para la misma hora), se obtiene el valor de la **radiación directa horaria sobre una superficie horizontal**.

Este valor de radiación directa horaria sobre una superficie inclinada y orientada, se hallará simplemente multiplicando el valor de la radiación directa horaria sobre una superficie horizontal por el factor de forma F (obsérvese que el factor de forma no se ha tenido en cuenta para el cálculo de la radiación total y difusa diarias).

Ejemplo: Calcular la potencia que puede suministrar un colector cilindro-parabólico de 1 m. de apertura por 2 m. de largo, con un tubo focal de 30 mm. de diámetro exterior, dotado de una selectividad de 2 entre las 10 y 11 h. (hora solar verdadera) en Sevilla, inclinado y orientado perfectamente al Sol el día 15 de julio. Calcular, asimismo, la temperatura máxima que alcanzaría el tubo focal si no se extrajera energía alguna del colector. Las pérdidas de energía en el espejo, tubo transparente focal y tubo focal son del 15%.

En primer lugar, consultamos en las tablas de radiación el valor de la radiación media diaria mensual para el mes de julio, que es de 23782 KJ/m^2 , y la latitud de Sevilla, que es de $37,5^\circ \text{ N}$.

Para el cálculo tomaremos como valor medio horario las 10 h. 30 m. (1,5 horas antes del mediodía solar).

Calculamos ahora el día del año. El 15 de julio es el día 196. Aplicamos la fórmula de Cooper para hallar la declinación d :

$$d = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \times \frac{284 + 196}{365} \right) = 21,52^\circ$$

Hallamos el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre:

$$r = 1 + 0,033 \left(\cos \frac{360 \times 196}{365} \right) = 0,96789$$

El valor del semidía, ω_s , será:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\operatorname{tang} 37,5 \times \operatorname{tang} 21,52) = 107,61^\circ$$



A continuación hallaremos el valor de H_0 (radiación diaria extraterrestre):

$$H_0 = \frac{24}{\pi} r I \left(\cos 37.5 \cos 21.52 \sin 107.61 + \frac{\pi}{180} \frac{107.61}{180} \times \sin 37.5 \times \sin 21.52 \right) = 40\,434 \text{ KJ/m}^2$$

I = Energía proporcionada por la constante solar durante 1 hora = $1353 \text{ w/m}^2 \times 3600 \text{ s} = 4.87 \text{ E6 J/m}^2$

Después, calculamos el valor de K :

$$K = \frac{TD}{H_0} = \frac{23\,782 \text{ KJ/m}^2}{40\,434 \text{ KJ/m}^2} = 0.588$$

El valor de la radiación difusa será:

$FD = (-3.11 (0.588)^3 + 5.53 (0.588)^2 - 4.03 \times 0.588 + 1.39) \times 23782 \text{ KJ/m}^2 = 7136 \text{ KJ/m}^2$
de radiación difusa sobre una superficie horizontal.

La radiación directa será la diferencia entre la radiación total y la difusa:

$$RD = 23782 - 7136 \text{ KJ/m}^2 = 16646 \text{ KJ/m}^2$$

Este valor es la radiación **diaria directa** que recibiría en un día una **superficie horizontal**.

Para calcular la radiación total horaria utilizamos la Fig. 10. Previamente deberemos hallar la duración del día en horas:

$$DD = \frac{2 \times 107.61}{15} = 14.348 \text{ horas}$$

Entrando con el valor de 14,348 h, en la Fig. 10 hasta encontrar la curva de 1,5 h., obtenemos el valor en el eje vertical de 0,112,

Por lo tanto, la radiación total horaria que recibe el colector a 1.5 h. del mediodía es de:

$$TH = 0.112 \times 23782 \text{ KJ/m}^2 = 2664 \text{ KJ/m}^2$$

Para calcular la radiación difusa horaria utilizamos la Fig. 11. Entrando con el valor de 14,348 h, hasta encontrar la curva de 1,5 h., obtenemos en el eje Y el valor de 0,105.

Por lo tanto, la radiación difusa horaria vale:

$$DH = 0.105 \times 7136 \text{ KJ/m}^2 = 750 \text{ KJ/m}^2$$

En consecuencia, el valor de la radiación directa será de:

$$RH = TH - DH = 2664 - 750 \text{ KJ/m}^2 = 1914 \text{ KJ/m}^2$$

Ahora bien, ésta es la radiación directa que recibiría una superficie horizontal. Dado que el colector está **inclinado y orientado**, debemos multiplicar este valor por el **factor de forma F**:

$$F = \frac{\cos A}{\sin h}$$

Pero como el colector está inclinado y orientado perpendicularmente al Sol, el valor del $\cos A = 1$, y su orientación coincide con el azimut. Si calculamos el valor de la altura solar, según lo explicado en la lección 8, veremos que vale 64.85° , mientras que su azimut es de 56.88° . Por lo tanto:

$$s \text{ (inclinación)} = 90 - h = 25.15^\circ$$

$$g \text{ (orientación)} = z = 56.88^\circ$$

El factor de forma vale:

$$F = \frac{1}{\sin h} = \frac{1}{\sin 64.85} = 1.105$$

Y cada m^2 de colector recibirá una energía solar en forma de radiación directa de:

$$1914 \text{ KJ/m}^2 \times 1.105 = 2115 \text{ KJ/m}^2$$

Nuestro colector tiene 2 m^2 de área útil (consideramos despreciable el espacio de sombra producida por el tubo focal); por lo tanto, en la hora de 10 a 11 de la mañana, el colector recibe en total una energía en forma de radiación directa de:

$$2115 \text{ KJ/m}^2 \times 2 \text{ m}^2 = 4230 \text{ KJ}$$

NOTA: El colector recibe también los 750 KJ/m^2 en forma de radiación difusa, pero esta energía no es aprovechable.

La potencia en vatios será:

$$P = \frac{4230000 \text{ J/h}}{3600 \text{ s/h}} = 1175 \text{ W}$$



La potencia útil, si las pérdidas son del 15% (lo que supone un rendimiento del 85%) será de:

$$P = 1175 \text{ W} \times 0,85 \approx 1000 \text{ W}$$

Para hallar la temperatura máxima debemos conocer el factor de concentración de este colector, que vale:

$$X = \frac{\text{Area de abertura}}{\text{Area focal}} = \frac{1 \text{ m} \times 2 \text{ m}}{30 \text{ E-3m} \times \pi \times 2 \text{ m}} = 10,6$$

Como la selectividad del recubrimiento del tubo focal es de 2, la temperatura máxima, en el caso de extracción nula de energía, será: (véase la lección 25)

$$T_{\text{máx.}} = \left(\frac{\alpha}{\epsilon} \times \frac{1}{\sigma} \times K \times X \times I \right)^{1/4}$$

α = Selectividad

σ = Constante de Stefan

K = Rendimiento

X = Factor de concentración

I = Irradiación directa

t = Tiempo (1 segundo)

De donde podemos despejar la temperatura: (Recuérdese que una expresión elevada a 1/4 es lo mismo que extraer dos veces consecutivas la raíz cuadrada)

$$T_{\text{máx.}} = \left(2 \times \frac{1}{5,67 \text{ E-8 J/m}^2 \text{ S}^{\circ}\text{K}} \times 0,85 \times 10,6 \times 588 \text{ W/m}^2 \right)^{1/4} = 657 \text{ }^{\circ}\text{K} = 384 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

DATOS DE INTERES

A) PROGRAMA PARA CALCULAR LA RADIACION DIRECTA DIARIA SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL Y LA RADIACION DIRECTA HORARIA DE UN COLECTOR CON SEGUIMIENTO DEL SOL.



```
14 dia D(7, 17)
20 PI = 3.141516
21 r = PI / 180
30 input "DIA :", d
40 input "MES (del 1 al 12): ", m
50 input "LATITUD GEOGRAFICA ", l
60 input "VALOR DE LA RADIACION DIARIA MENSUAL (KJ/m2) :", td
70 ' Cálculo del ángulo de declinación
80 restore 740
90 x = 0
100 for n = 1 to m
110   read y
120   x = x + y
130 next n
140 u = x + d
150 d1 = 23.45 * sin(((360 * (284 + u)) / 365) * r)
159 '
160 ' Cálculo de la radiación directa diaria sobre una superficie horizontal)
161 '
170 e1 = 1 + 0.033 * (cos(r * (360 * u) / 365))
180 x = (-tan(l * r)) * tan(d1 * r) / r
181 w1 = 1.570796 - atan(x / (sqr(1 - x * x)))
190 dd = (2 * w1) / 15
200 v1 = ((24 / PI) * e1 * w1 * 4.07e3)
201 v2 = cos(l * r) * cos(d1 * r) * sin(w1 * r)
202 v3 = ((PI * w1) / 180)
203 v4 = (sin(l * r) * sin(d1 * r))
204 h0 = v1 * v2 + v3 * v4
210 i = td / h0
220 fd = (-3.11 * k^3 + 5.53 * k^2 - 4.03 * k + 1.39) * td
230 rd = td - fd
240 print "RADIACION TOTAL DIARIA SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL: "; td
241 print "RADIACION DIFUSA DIARIA SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL: "; rd
242 print
243 print "(KJ/m2.)"
250 print "SI DESEA OBTENER LA RADIACION DIRECTA HORARIA DE UN COLECTOR DE"
251 input "CONCENTRACION ENTRE UN 1 :", c
260 cls
261 if c <> 1 then goto 20
279 '
280 ' Llenado de matrices numéricas con los DATA del final del programa
291 '
290 restore 760
291 j = 1
292 k = 0
300 for m = 1 to 119
310   read y
320   k = k + 1
```



```

330   if k = 18 then k = 1: j = j + 1
340   A(j, k) = y
350 next a
360 restore Q40
361 j = 1
362 k = 0
370 for a = 1 to 119
380   read y
390   k = k + 1
400   if k = 18 then k = 1: j = j + 1
410   B(j, k) = y
420 next a
430 cis
439
440 ' Búsqueda del valor correcto de los datos numéricos del día
441 '
450 if dd < 7.5 or dd > 16.5 then goto 455
451 goto 460
455 print "LA ANORMAL DURACION DEL DIA NO PERMITE REALIZAR LOS CALCULOS"
456 stop
457 goto 10
460 if dd >= 7.5 and dd <= 8 then d5 = 1: goto 540
470 if dd >= 16 and dd <= 16.5 then d5 = 17: goto 540
480 for n = 1 to 17
490   d1 = 7.5 + (n / 2)
491   d2 = dd - d1
492   d3 = -d1 - 0.5 + dd
500   d4 = d2 + d3
510   if d2 < 0.5 then d5 = a: goto 530
520 next n
530 if sgn(d4) = 1 OR sgn(d4) = 0 then d5 = d5 + 1
539 '
540 ' Cálculo de la inclinación y orientación del colector
541 '
550 for w = 7.5 to 180 step 15
560   a = sin(d1/r) * sin(i1/r) + cos(d1/r) * cos(i1/r) * cos(w/r)
570   x = a / r
571   h = atn(x / (1 - x * x))
580   if h < 0 then goto 705
590   s = 90 - h
600   t = int((w / 15) + 12)
610   es = 11 - int(w/15)
620   b = (sin(i1/r) * sin(h/r) - sin(d1/r)) / (cos(i1/r) * cos(h/r))
630   z = b / r
631   g = 1.570796 - atn(x / sgr(1 - x * x))
640   z = int(w / 15) + 1
641   if z > 7 then stop: goto 720
650   f = 1 / z

```

```

660   tn = A(z, d5) * fd
670   dh = B(z, d5) * fd
680   D(1, z) = (th - dh) * f
690   if D(1, z) < 0 then goto 705
700   print "HORA SOLAR: "; ss; " a"; ss + 1; " o "; t; " a "; t + 1
701   print "INCLINACION: "; s
702   print "ORIENTACION: "; g
703   print "RADIACION DIRECTA HORARIA: "; D(1, z); print
705 next w
720 cls
721 goto 430
729 '
730 ' Días de cada mes
740 DATA 0, 31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30
749 '
750 ' Datos de la figura 10
760 DATA 0.198, 0.188, 0.179, 0.172, 0.165, 0.158, 0.152, 0.147, 0.142
761 DATA 0.137, 0.133, 0.129, 0.125, 0.122, 0.118, 0.115, 0.112
770 DATA 0.165, 0.160, 0.155, 0.150, 0.145, 0.140, 0.136, 0.132, 0.128
771 DATA 0.124, 0.121, 0.118, 0.115, 0.112, 0.108, 0.105, 0.102
780 DATA 0.103, 0.106, 0.108, 0.109, 0.110, 0.109, 0.108, 0.106, 0.105
781 DATA 0.103, 0.102, 0.106, 0.098, 0.097, 0.096, 0.095, 0.093
790 DATA 0.034, 0.044, 0.052, 0.059, 0.065, 0.069, 0.073, 0.075, 0.077
791 DATA 0.079, 0.079, 0.079, 0.079, 0.079, 0.079, 0.078, 0.077
800 DATA 0.009, 0.009, 0.009, 0.010, 0.029, 0.026, 0.032, 0.036, 0.040
801 DATA 0.044, 0.047, 0.050, 0.053, 0.054, 0.056, 0.057, 0.058
810 DATA 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.006, 0.003, 0.005, 0.008, 0.012
811 DATA 0.015, 0.020, 0.023, 0.026, 0.029, 0.033, 0.035, 0.038
820 DATA 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.006, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000
821 DATA 0.001, 0.003, 0.005, 0.008, 0.010, 0.013, 0.015, 0.018
829 '
830 ' Datos de la figura 11
840 DATA 0.183, 0.176, 0.169, 0.161, 0.153, 0.147, 0.140, 0.135, 0.130
841 DATA 0.125, 0.121, 0.117, 0.113, 0.110, 0.107, 0.105, 0.103
850 DATA 0.159, 0.154, 0.149, 0.143, 0.138, 0.133, 0.129, 0.125, 0.121
851 DATA 0.117, 0.114, 0.110, 0.107, 0.015, 0.102, 0.100, 0.098
860 DATA 0.113, 0.114, 0.114, 0.113, 0.112, 0.110, 0.106, 0.106, 0.104
861 DATA 0.102, 0.100, 0.098, 0.096, 0.094, 0.092, 0.090, 0.089
870 DATA 0.050, 0.057, 0.062, 0.068, 0.071, 0.076, 0.078, 0.079, 0.080
871 DATA 0.080, 0.080, 0.080, 0.080, 0.079, 0.078, 0.077, 0.076
880 DATA 0.000, 0.000, 0.000, 0.019, 0.026, 0.035, 0.042, 0.047, 0.050
881 DATA 0.055, 0.055, 0.057, 0.058, 0.059, 0.060, 0.060, 0.061
890 DATA 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.009, 0.016
891 DATA 0.024, 0.029, 0.033, 0.036, 0.039, 0.040, 0.041, 0.042
900 DATA 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000
901 DATA 0.000, 0.000, 0.006, 0.011, 0.016, 0.020, 0.023, 0.025

```

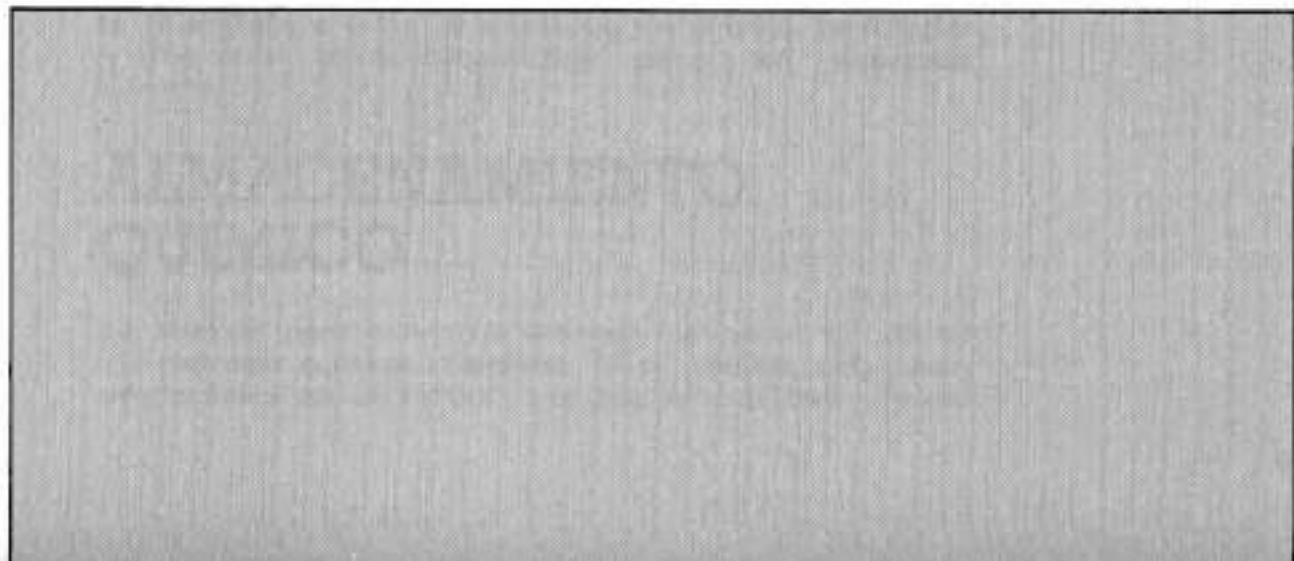
B) PROGRAMA PARA CALCULAR LOS ANGULOS DE INCLINACION Y ORIENTACION QUE ADOPTA UN COLECTOR PERPENDICULAR AL SOL.

```

10 ' CALCULO DE LOS ANGULOS DE INCLINACION Y ORIENTACION DE UN COLECTOR DE
11 ' CONCENTRACION DOBLE PARABOLICO. (C) J.Ribot
20 PI = 3.141516
21 r = PI / 180
30 input "DIA :", i
40 input "MES (del 1 al 12) :", m
50 u = 0
60 for n = 1 to m
70   read y
80   u = y + r
90 next n
100 u = u + i
110 d = 23.45 * sin((136 * (294 + u)) / 365) * r
120 input "LATITUD GEOGRAFICA :", l
130 for w = 0 to 100 step 7.5
140   a = sin(d*r) * sin(l*r) + cos(d*r) * cos(l*r) * cos(w*r)
150   x = a / r
160   h = atn(x / (sqr(1 - x * x)))
170   if h < 0 then goto 260
180   a$ = " 06"
190   t = w / 15 + 12
200   if t - int(t) < 0 then a$ = " 30"
210   s = 12 - w / 15
220   b = (sin(l*r) * sin(h*r) - sin(d*r)) / (cos(l*r) * cos(h*r))
230   b2 = b - 0.000001
240   ' 0.000001 es un valor infimo para impedir que en ciertos casos
250   ' el argumento del arcoseno sea ligeramente mayor a 1
260   z = 1.570796 - atn(x / (sqr(1 - x * x)))
270   print
280   print "HORA SOLAR: ", int(s); " "; a$; " h"; " - ";
290   print int(t); " "; s$; " h"
300   print "INCLINACION: "; 90 - h
310   print "ORIENTACION: "; z
320 next w
330 DATA 0, 31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30

```

LECCION 27



27. ALTAS TEMPERATURAS. HORNOS SOLARES. CENTRALES SOLARES.

INTRODUCCION

En esta lección veremos algunas aplicaciones concretas de la energía solar en la producción de altas temperaturas, las cuales se pueden conseguir mediante el uso de colectores de muy alta concentración.

ALTAS TEMPERATURAS

Se trataron en el tema anterior algunas aplicaciones posibles con muy altas temperaturas, tales como la fusión de metales, obtención de aleaciones y ensayos de choque térmico.

En este tema vamos a examinar, de forma más concreta, algunas aplicaciones a altas temperaturas. Todas estas aplicaciones requieren el uso de colectores de **muy alta concentración**, tales como los doble-parabólicos o heliostatos.

Veremos también los posibles sistemas de almacenamiento de la energía a estas temperaturas, y algunas tecnologías relativamente poco desarrolladas: como las reacciones químicas.

ALMACENAMIENTO QUIMICO

Un sistema para el almacenamiento de calor es utilizar una **reacción química reversible**. Si se efectúa esta reacción química en un sentido, hay que aportar calor, mien-

tras que si se hace en el otro, se desprende calor. La aportación del calor se efectúa en estos casos mediante energía solar.

Existen muchas reacciones químicas que desprenden o absorben calor, pero pocas de ellas son realmente reversibles, en el sentido de que con la misma sustancia se puedan realizar un gran número de ciclos de carga y descarga de energía sin pérdida de eficacia.

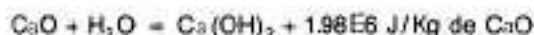
En estos casos es muy importante que las sustancias que se producen en estas reacciones químicas no se escapen del recipiente que las contenga, pues ello daría lugar a tener que reponerlas periódicamente, con los consiguientes gastos y molestias.

Además, estas sustancias pueden ser nocivas para la salud, el medio ambiente, etc. y, por lo tanto, se impone necesariamente el hecho de que no se dispersen fuera del sistema.

Entre las posibles reacciones químicas que presentan las propiedades de una buena reversibilidad y confinamiento de sus componentes, no todas producen igual cantidad de energía. Por esta razón, deberemos buscar aquellas reacciones químicas que, además de las dos propiedades anteriormente citadas, presenten un **elevado calor de reacción**.

Entre las posibles reacciones químicas que cumplen simultáneamente la reversibilidad, la ausencia de pérdidas de material y el desprendimiento de un elevado calor de reacción, están los óxidos de los metales alcalino-térreos, tales como el calcio y el magnesio.

La reacción química consiste, en este caso, en la hidratación y deshidratación del óxido, y para el caso del óxido de calcio (cal viva) la reacción de descarga de energía es:



Esta reacción nos es familiar, puesto que si ponemos un trozo de cal viva en agua, ésta entra al cabo de poco tiempo en ebullición debido al enorme calor liberado en la reacción. El producto obtenido (cal apagada) se utiliza habitualmente como material de construcción.

La reacción contraria se consigue calentando la cal apaga-

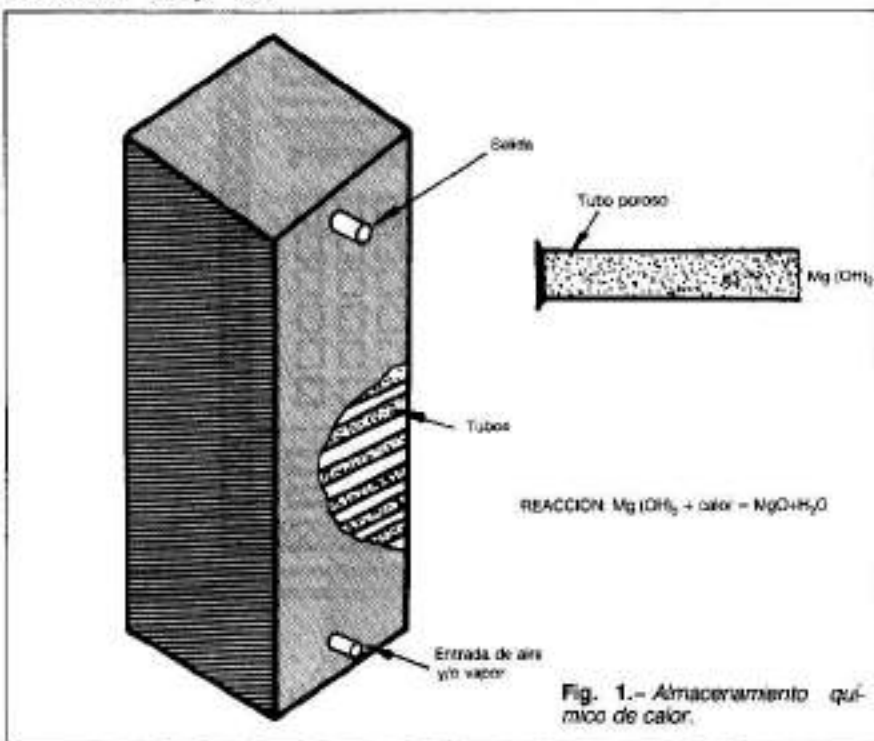
da, con lo que se obtiene cal viva y vapor de agua.

Dada la abundancia del agua y su inocuidad, este vapor de agua se puede aprovechar directamente o bien se puede desprender a la atmósfera, siendo la reacción de carga:



Para que esta reacción pueda verificarse se precisan temperaturas de 480°C , que se podrían conseguir con colectores cilindro-parabólicos especiales con un factor de concentración elevado o con colectores doble-parabólicos.

Si en lugar de utilizar el óxido de calcio se utilizase óxido de magnesio, la temperatura necesaria para la reacción química de carga sería de 260°C , mucho más asequible que los 480°C necesarios en el caso del óxido de calcio (Fig. 1).



Otros posibles sistemas son las reacciones químicas entre diversos óxidos de metales alcalinos. El óxido de potasio suele presentarse en estado de **superóxido** (KO_2), que puede pasar al estado de óxido normal desprendiendo 2.15

E6 Julios por cada Kg de óxido en un intervalo de temperatura comprendido entre 300 y 800° C.

Otro sistema más simple es disponer de una mezcla de bióxido de azufre (SO₂) y oxígeno. A bajas temperaturas, esta mezcla reacciona dando trióxido de azufre (SO₃), mientras que en un colector solar este trióxido de azufre se descompondría por la acción del calor en bióxido de azufre y oxígeno para permitirnos iniciar de nuevo el ciclo (Fig. 2). Las reacciones en este caso son:

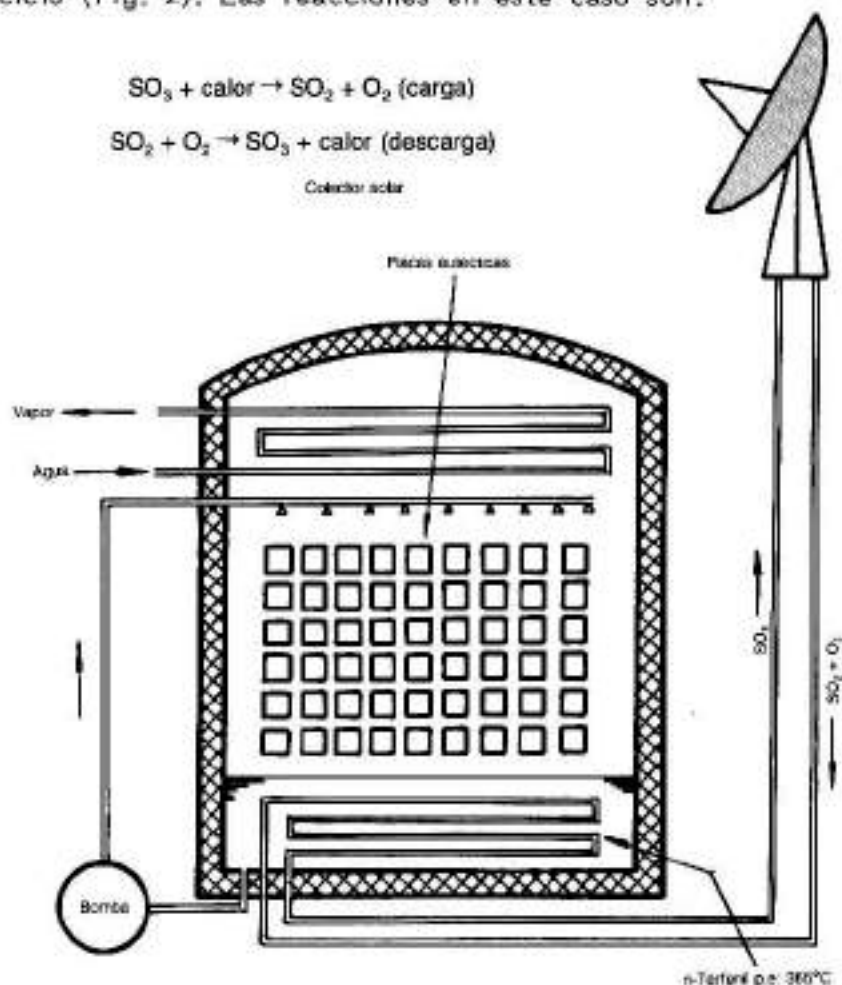
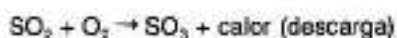
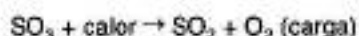


Fig. 2.- Utilización de una reacción química reversible. Eutético: MgCl₂ + NaCl + KCl Pf: 385°C

Como se observa en estos ejemplos, existen variadas alternativas al almacenamiento de energía y no todas ellas consisten en almacenar el calor.

En el caso de la cal, la energía solar proporcionaría un producto sólido que puede transportarse en sacos y que, mezclado con agua, produciría vapor y calor.

Se ha propuesto la conveniencia de almacenar calor en metales más o menos inservibles (chatarra, por ejemplo).

Los metales tienen calores específicos reducidos, por su elevada densidad hace que por unidad de volumen este efecto se vea compensado. En estos casos, el principal problema reside en los **materiales aislantes y refractarios**, que deben resistir un almacenamiento a tan alta temperatura.

HORNOS SOLARES

Los hornos solares pueden tener un interesante futuro, especialmente para la obtención de pequeñas cantidades de **materiales especiales** de muy alta pureza.

Para **pequeñas producciones** (unas decenas de Kgs al día), el sistema recomendable sería el de colectores doble-parabólicos.

En estos colectores las sustancias a fundir son colocadas en el receptor, que es un equipo instalado en las proximidades del foco del espejo con una ventana transparente.

En su interior se puede sustituir el aire por un gas inerte como el argón o el helio (la realización del vacío exigiría grandes espesores al cristal) (Fig. 3).

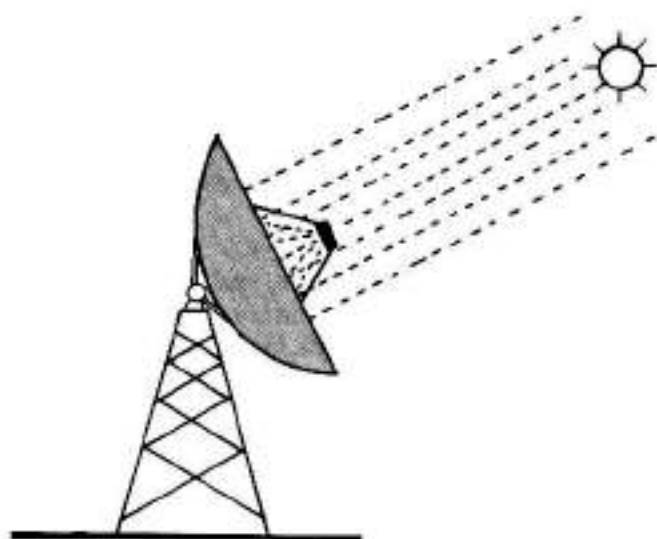


Fig. 3.- Pequeño horno solar para fundir materiales.

Una vez enfocado, se produce la fusión, pudiéndose disponer de algunos elementos tales como agitadores, vibradores e incluso un cambio de la atmósfera en que se realiza el proceso, simplemente sustituyendo un gas por otro o inyectando aditivos.

Un campo con varios colectores doble-parabólicos de este tipo podría producir diversos productos de variable índole, como silicio ultrapuro, silicio dopado, aleaciones especiales para uso aeronáutico o espacial, etc.

Para mayores producciones debe irse a un horno solar basado en heliostatos.

El receptor de un sistema de heliostatos se encuentra situado en la parte superior de una torre (metálica o de hormigón) llamada **torre solar** (Fig. 4).

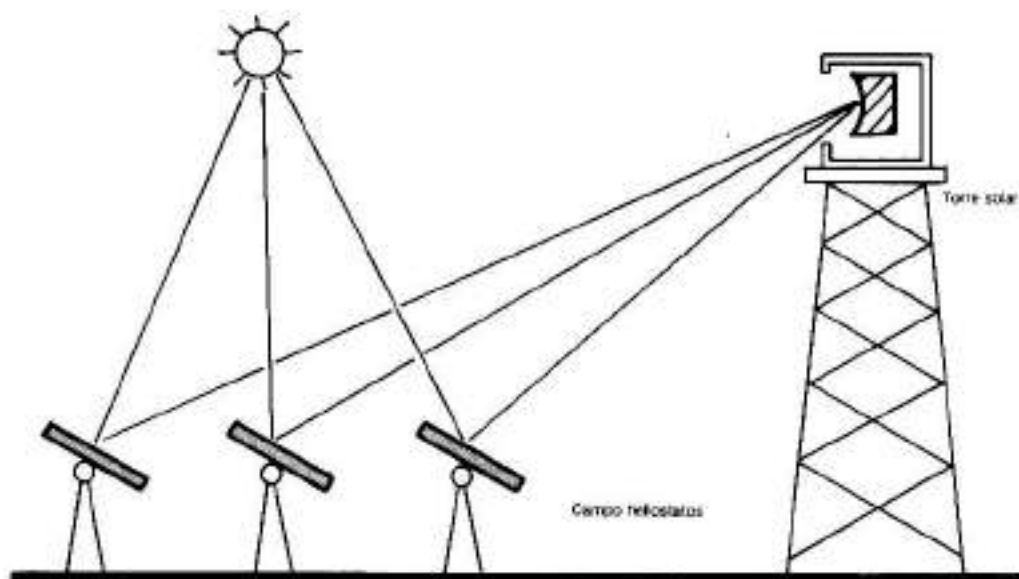


Fig. 4.- Horno solar para grandes producciones.

Cuando el horno solar funciona, todos los espejos de los heliostatos dirigen sus rayos hacia el receptor, que está situado en la parte superior de la torre.

En todas estas instalaciones, el acceso a la torre está restringido, así como lo está el acceso al campo de heliostatos, estableciéndose unas áreas de seguridad que no deben ser atravesadas bajo ningún concepto mientras el horno está en funcionamiento.

Cuando hace sol y el horno no se utiliza, los heliostatos son **desenfocados** de la torre solar y orientados hacia un punto del espacio en el cual no tengan efectos nocivos. Debido al polvo, brumas, etc. este haz se hace visible en el aire en las proximidades del foco, dando una extraña sensación de luminosidad.

Si el haz concentrado de radiación solar alcanzase un objeto orgánico tal como un pájaro, un insecto, una brizna vegetal, etc. lo **carbonizaría instantáneamente** y, por supuesto, en el caso de alcanzar a una persona le produciría la muerte instantánea. Por esta razón, el personal de mantenimiento que deba realizar trabajos en zonas peligrosas debe ir provisto de **trajes antitérmicos** completos, metalizados exteriormente, y llevar también gafas especiales muy oscuras, pues la luminosidad en las proximidades del receptor es muy superior a la de la luz del Sol.

El receptor, situado en la parte superior de la torre solar, adopta diversas formas según sea su utilidad. En el caso de hornos solares, un sistema habitualmente utilizado es el de un **cilindro hueco en rotación**, refrigerado por agua en sus paredes exteriores (Fig. 5).

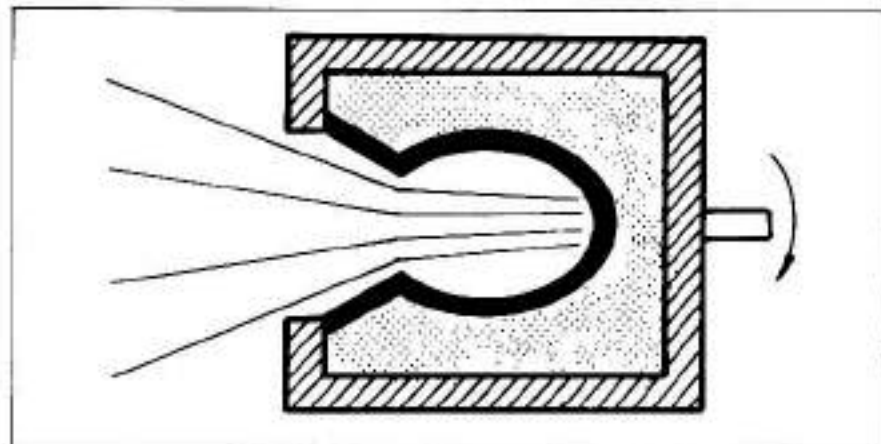


Fig. 5. - Cilindro hueco en rotación utilizado para fundir materiales.

Este cilindro se carga con el material, generalmente un polvo o granulado. La radiación solar funde el material, el cual debido a la fuerza centrífuga adopta una forma hueca con una cavidad interior.

Con un control cuidadoso de la irradiación, la velocidad de rotación y el tiempo de fusión, se consigue que sólo se funda parte del material (no interesa que se funda todo, pues entonces el material fundido podría alcanzar las paredes del cilindro en rotación y fundirlas). El propio espesor de material a fundir hace las veces de material refractario. El material fundido tiene una cierta forma



de vasija, mientras que el material no fundido se aprovecha para la próxima fusión.



CENTRALES SOLARES

La producción de electricidad es uno de los aspectos más interesantes de las grandes aplicaciones de la energía solar.

Ya dijimos que la energía eléctrica se podía obtener mediante un ciclo termodinámico o mediante fotopilas.

Las centrales solares obtienen electricidad mediante un ciclo termodinámico que emplea vapor de agua a altas temperaturas y altas presiones, al igual que una central térmica.

Un ciclo termodinámico consta (como en el caso de un ciclo frigorífico) de un circuito cerrado de tuberías por las cuales circula un fluido que pasa de estado líquido a

gaseoso, y de alta a baja presión.

Este fluido de circulación es siempre **agua**, debido a su abundancia y buenas propiedades (si bien podrían emplearse otros fluidos).

El ciclo termodinámico de una central térmica es el llamado ciclo de Rankine y consta de las siguientes partes: una caldera, una turbina, un condensador y una bomba (Fig. 6).

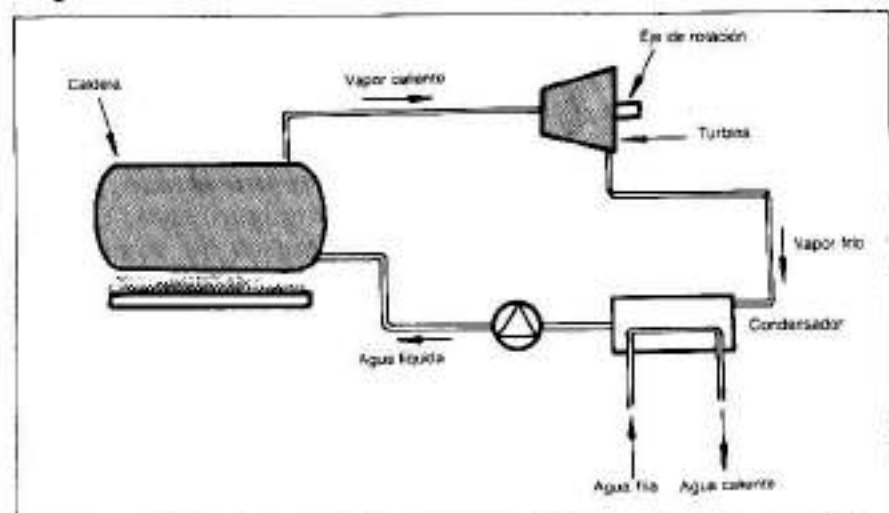


Fig. 6.- Componentes de un ciclo de Rankine.

La **caldera** tiene por misión hacer hervir el agua. El agua se hace hervir a **presión**, por lo que la temperatura de ebullición puede ser notablemente superior a 100°C y la presión de hasta 2,000 MP. En las centrales solares construídas hasta la fecha estos valores tan elevados no se obtienen, siendo normales temperaturas de vapor de 300°C y 500 MP de presión.

Este vapor de agua a alta temperatura y alta presión suele sufrir un **recalentamiento** posterior, obteniéndose **vapor recalentado**; su temperatura es algo superior y la presión la misma. El recalentamiento del vapor tiene por objeto evitar la presencia de agua líquida, puesto que el vapor que se obtiene en la caldera (a la presión de funcionamiento) está **saturado** de humedad y cualquier enfriamiento (como el resultante al atravesar unas tuberías) provoca que se condense parte de él en forma de **gotas de agua líquida**.

El vapor así recalentado se dirige a una **turbina de vapor**, que es el dispositivo destinado a extraer la **energía mecánica**. La turbina de vapor consiste en un cuerpo trococcóni-

co en el cual el vapor entra en su parte más pequeña y sale por la parte mayor.

En el interior de la turbina hay un eje provisto de numerosas coronas de álabes* cada vez de mayor diámetro (Fig. 7).

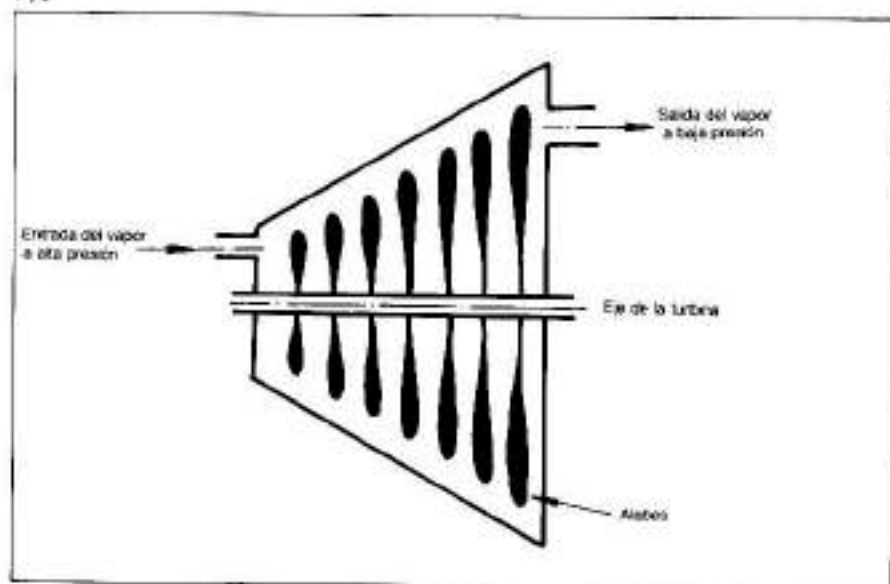


Fig. 7.- Corte de una turbina de vapor.

El vapor entra, como ya hemos dicho, por la parte más pequeña del tróncicocono y al pasar acciona la primera corona de álabes (que es la más pequeña). Como consecuencia del trabajo mecánico realizado, el vapor pierde temperatura y presión. Al perder presión, este vapor necesita mayor volumen, siendo ésta la razón por la cual la turbina de vapor va aumentando sus dimensiones.

El vapor, cada vez más frío y a menos presión, va atravesando las diversas coronas de álabes proporcionando energía mecánica hasta que abandona la turbina de vapor.

El siguiente paso es convertir este vapor en líquido. Esto se consigue en el **condensador**, que aquí -al revés que en un ciclo frigorífico- es el foco frío. Al licuarse el vapor, éste desprende gran cantidad de calor que ha de ser evacuado, bien sea por el agua de un río, por el mar o por aire.

El agua ya condensada (a baja presión) se **bombee** a la caldera, y, para lograrlo, la bomba ha de suministrar la presión de la caldera.

* Se denomina *álabe* a cada una de las paletas curvas de la rueda hidráulica.



El **rendimiento energético** de un ciclo termodinámico vale:

$$\zeta = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

T_c = Temperatura del foco caliente (caldera).

T_f = Temperatura del foco frío (condensador) (°Kelvin).

El rendimiento es tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el foco frío.

El foco frío suele estar a temperaturas próximas a la ambiente; esto provoca que el rendimiento energético sea ligeramente superior en invierno que en verano. Por otro lado, cuanto mayor temperatura exista en el foco caliente, tanto más rendimiento tendremos (la energía gastada en la bomba es despreciable).

La turbina de vapor se acopla mecánicamente a un alternador, que produce la electricidad.

El rendimiento total, referido a la energía eléctrica, es el producto del rendimiento del ciclo termodinámico (que es del orden del 35 al 45%) por el rendimiento del alternador (que es del orden del 90%). Esto produce un rendimiento global comprendido entre el 30 y 40%.

Pero una central solar no es una central térmica que consuma carbón, fuel o gas natural. Una central solar no funciona las 24 horas del día, ni los días nublados, por lo que el rendimiento energético global, referido a períodos de tiempo grandes como por ejemplo un mes, es mucho más bajo, concretamente del orden de la tercera parte del obtenido en una central térmica que funcione ininterrumpidamente, si bien el rendimiento instantáneo puede ser tan elevado como el de una central térmica normal.

Una central solar consta de los siguientes elementos:

- Campo de heliostatos.
- Torre solar.
- Acumulador de calor (a veces puede no existir).
- Equipo de generación de vapor.
- Turbo-alternador.
- Condensador y bomba.
- Equipo de control.

El campo de heliostatos suele disponerse en una zona

llana y estos se instalan en un terreno de forma elíptica, orientados hacia el Sur (Fig. 8).

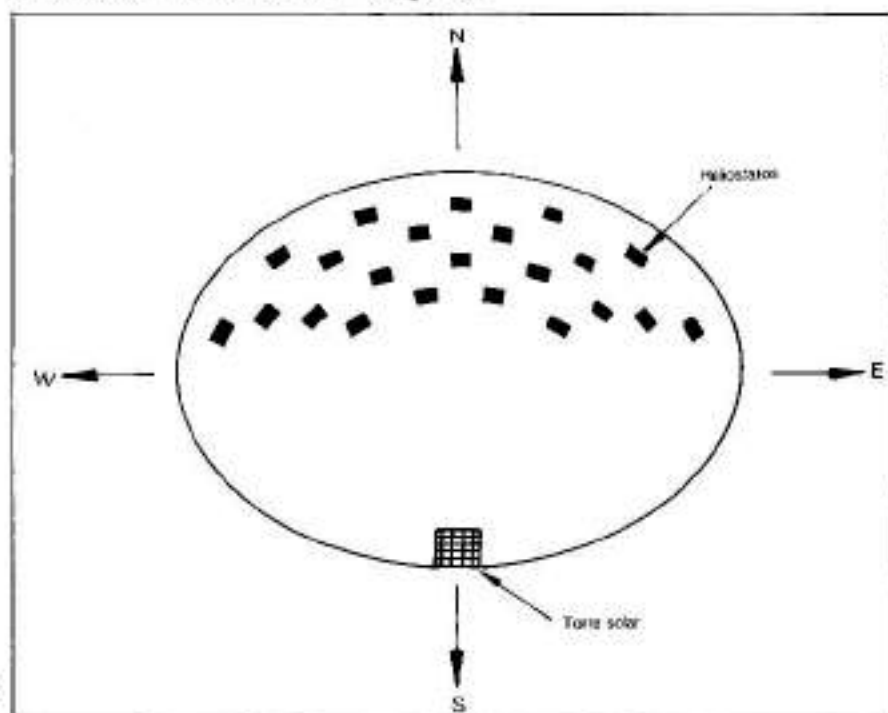


Fig. 8.- Plano de un campo de heliostatos.

El terreno suele llenarse de **balastro** (piedra triturada de ferrocarril) para impedir que crezcan plantas y que se produzca polvo. En las inmediaciones del campo suelen plantarse árboles en un cierto espesor, de forma que impidan en lo posible la llegada de polvo exterior y protejan de vientos huracanados.

Cada uno de los heliostatos dispone de **dos motores** para su movimiento de arriba a abajo y de Este a Oeste. Tiene además un **sensor**, convenientemente situado, para el control del posicionamiento. Estos sensores suelen funcionar con la luz de un **láser**, cuyo rayo debe coincidir en una pequeña zona situada en la torre solar (más abajo del receptor). Aparte de esto, los heliostatos se controlan con ordenador, verificándose su correcta orientación, y con la posibilidad de anular alguno de ellos, haciendo que adopte una posición invertida con el espejo dirigido hacia el suelo.

Es importante que los heliostatos dispongan de **topes mecánicos** que limiten sus movimientos a la zona de trabajo y **bajo ningún concepto** puedan enviar los rayos del Sol a zonas de vegetación, edificios, carreteras, etc. ya que ello podría ser alternativamente peligroso.

La **torre solar** se sitúa en el centro del lado sur del campo de heliostatos.

En la parte superior de la misma se encuentra el **receptor** que, en este tipo de centrales de producción electricidad, consta de un entramado de tubos de acero soldados entre sí unos a otros y con una forma parecida a una silla de montar a caballo. Todos estos tubos van a parar a otros tubos colectores situados en los extremos. Los tubos están ennegrecidos exteriormente (Fig. 9).

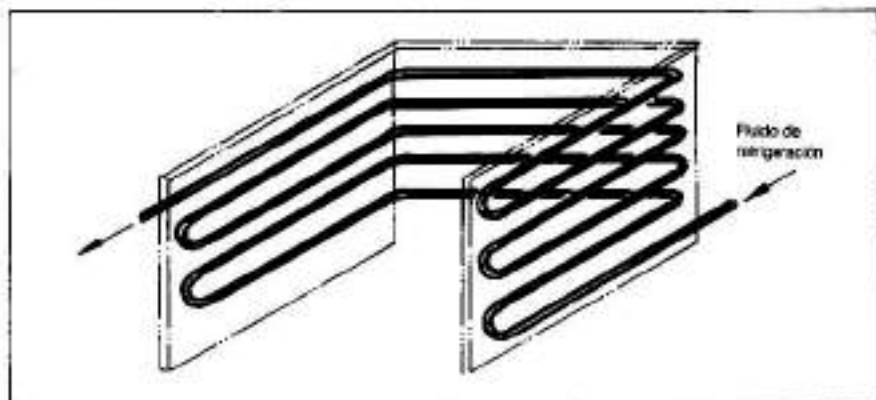


Fig. 9.- Receptor de una central solar.

Por el interior de estos tubos pueden hacerse pasar diferentes tipos de flujos: aceites térmicos, nitrato potásico fundido, sodio metálico líquido, nitrógeno, etc. En general, no se hace pasar agua para que hierva en su interior, debido a que las altas presiones que produciría su ebullición a elevadas temperaturas exigirían hacer que las tuberías del receptor fueran de gran espesor, lo que dificultaría la transmisión de calor.

Este fluido calentado en el receptor es impulsado por una bomba, que bombea fluido frío hacia la parte superior de la torre y lo reconduce hacia abajo caliente.

Una vez en el suelo, el fluido caliente puede ser utilizado para calentar un **acumulador de calor**, o bien directamente pasar a un **generador de vapor**.

La conveniencia o no de almacenar el calor debe considerarse en función de diversos criterios, tales como las temperaturas de almacenamiento, el líquido de almacenamiento, etc. En general, se prefiere disponer de un acumulador pequeño, que se carga con el sobrante de energía solar producido en las horas centrales del día, lo que permite atender la demanda de energía eléctrica que alcanza un máximo en las últimas horas de la tarde.

El **generador de vapor** realiza las funciones de la caldera y consiste en un **intercambiador de calor** en el que, por un lado, circula el fluido calentado en la torre solar (o procedente del acumulador) y, por otro, hay agua, hirviendo. El diseño de los generadores de vapor suele consistir en un haz de muchos **tubos de pequeño diámetro** por los que circula el fluido solar, estando bañados en agua (Fig. 10).

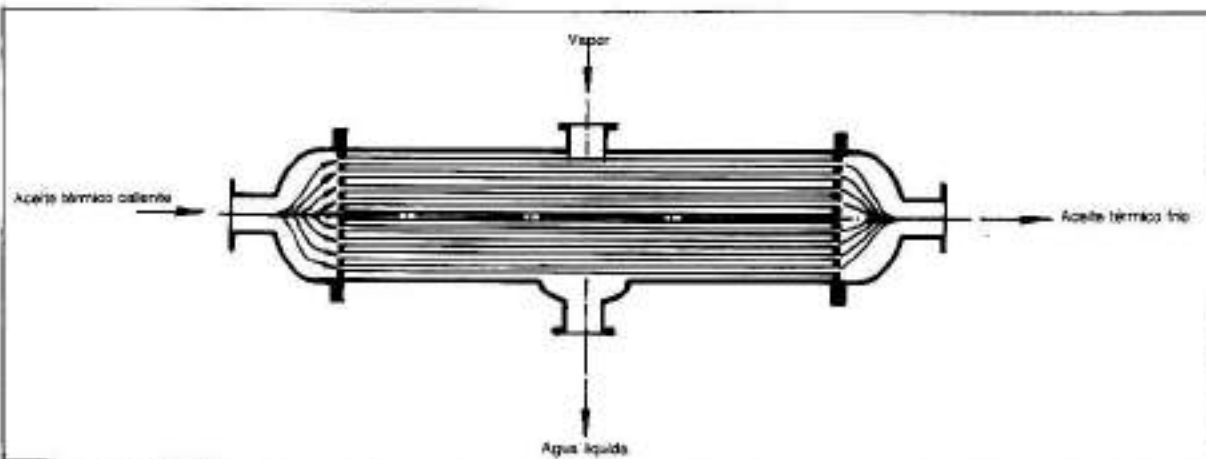


Fig. 10.—Generador de vapor.

El fluido solar se mantiene a **baja presión**, mientras que el agua que hierve está a una **presión elevada**. Debido al reducido diámetro de los tubos por los que circula el fluido solar, éstos resisten perfectamente la diferencia de presiones, aun con un espesor pequeño, y, por lo tanto, pueden intercambiar calor con gran eficacia.

La turbina y el alternador están acoplados por el mismo eje de rotación y se suelen fabricar en forma de un grupo compacto llamado **turbo-alternador**, el cual además de la turbina y el alternador lleva acoplada una pequeña **dinamo** llamada **excitatriz**, la cual suministra la corriente continua que necesita el alternador para la imantación de sus electroimanes (Fig. 11).

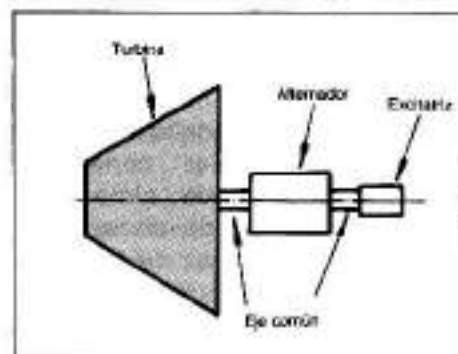


Fig. 11.—Acoplamiento de la turbina, alternador y excitatriz.



El condensador es otro intercambiador de calor, que tiene por misión volver al estado líquido el vapor que ha salido de la turbina. Esto lo realiza mediante un agente refrigerante, que puede ser agua de río o del mar, o bien aire. Como consecuencia de esto, el agua o el aire después de atravesar el condensador son devueltos algo más calientes, lo que en caso de agua puede originar una mayor afluencia de peces de ciertas especies o la desaparición de otras en las zonas próximas a la salida del líquido, que está, como hemos dicho, ligeramente más caliente que el agua de admisión al condensador.

El equipo de control debe atender todos los requerimientos de la central solar, bien sea del campo de heliostatos, torre solar, turbina, alternador, etc. Es un equipo **altamente complejo** que exige la presencia de ordenadores para realizar un control correcto de la marcha de la instalación y de sus posibles emergencias. Usualmente consta de una parte solar que controla el campo de heliostatos, la torre solar, etc. y de una parte convencional que controla la producción de energía en la central.

DATOS DE INTERES

FLUIDOS APROPIADOS PARA ALTAS TEMPERATURAS

Material	T* max.	T* autoignición	Calor específico Kj/Kg°C
Terminal - 55	310	358	1,67 a 2,83
Terminal - 60	340	375	1,46 a 2,51
Caloria HT - 43	310	404	1,7
HITEC	425	-	1,8
Na - K	860	-	1,05