

---

# **La energía del sol**

---

**unidad  
didáctica 1**



## 1. La radiación solar. Conceptos sobre energía solar

---

El sol es la estrella más próxima a la Tierra. Tiene un radio de unos 700.000 km y una masa de  $2 \times 10^{30}$  kg, unas 330.000 veces la de la Tierra. A su alrededor giran los planetas del sistema solar, aunque él concentra el 99% de la masa del mismo. Su densidad es  $1,41 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. La temperatura de su superficie ronda los 6.000 °C, aunque es algo menor en las manchas solares (alrededor de los 4.800 °C). Las manchas solares tienen una gran influencia en nuestro clima. Cerca del centro la temperatura es de más de 15.000.000 °C y la densidad es unas 120 veces mayor que en la superficie. En esta zona se alcanzan presiones de 250.000 millones de atmósferas. Los gases del núcleo están comprimidos hasta una densidad 150 veces la del agua.

La fuente de toda la energía del sol se encuentra en el núcleo. Debido las condiciones extremas de presión y temperatura en su interior, tienen lugar reacciones nucleares de **fusión**. En éstas, cuatro átomos de hidrógeno se combinan para convertirse en un átomo de helio. La masa del átomo de helio es 0,7% menor que la masa de los cuatro átomos de hidrógeno. Esa masa que falta es lo que se convierte en energía que, en forma de rayos gamma se expande desde el núcleo hacia la superficie en los primeros 500.000 km de espesor de la esfera solar por radiación, ahí alcanza la zona en que el transporte es ya por convección y que permite a los fotones, después de un largo viaje de miles de años alcanzar la superficie solar.

Se calcula que en la parte interna del sol se fusionan 700 millones de toneladas de hidrógeno cada segundo, y la pérdida de masa, que se transforma en energía solar, se cifra en 4,3 millones de toneladas por segundo. La estabilidad del sol como estrella se consigue por el equilibrio entre las fuerzas interiores que tienden a expandirla y las fuerzas de gravitación que tienden a comprimirla. A ese ritmo de transformación, el sol necesitará más de 6.000 millones de años para consu-

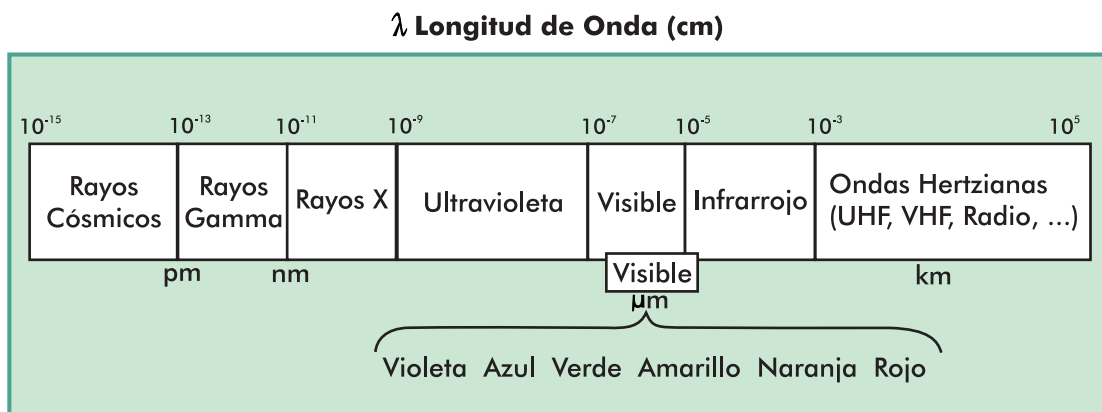
## Energía solar térmica

### La energía del sol

---

mir el 10% del hidrógeno que posee. Cuando, en un futuro, esto se produzca (significará que el hidrógeno del sol comienza a escasear, las fuerzas de gravitación serán más importantes que las fuerzas interiores, por lo que el sol se colapsará y empezará a morir.

El sol se encuentra a 149,5 millones de kilómetros y su luz tarda 8,3 minutos en llegar a la superficie terrestre, a una velocidad de 300.000 km/s. La radiación solar llega a la Tierra como ondas electromagnéticas en forma de fotones, que no necesitan un medio físico para su propagación, y se desplazan por el espacio en todas las direcciones.



La cantidad de energía que transporta cualquier onda es proporcional a la **frecuencia**. La frecuencia es el nº de veces que se repite una onda completa por unidad de tiempo. La unidad de medida de la frecuencia es el hercio (Hz), o también el  $\text{s}^{-1}$ . Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la energía que la onda transporta, y por tanto, mayor el efecto cuanto impacta sobre un cuerpo.

Otro parámetro característico de las radiaciones es la **longitud de onda**, se define como la distancia, medida en la dirección de propagación de la onda, entre dos puntos de ésta cuyo estado de movimiento es idéntico, como por ejemplo crestas o valles adyacentes.

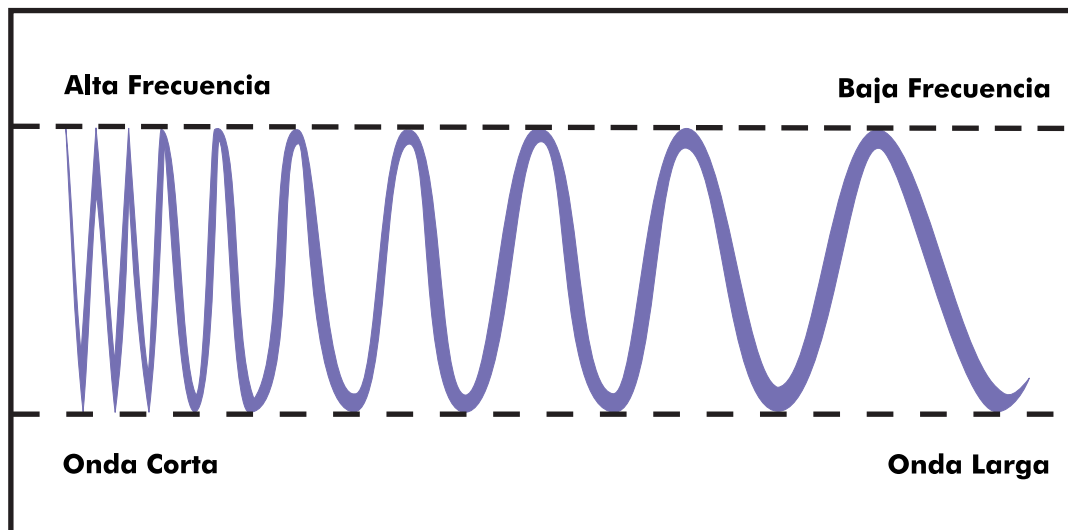
La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, por tanto, cuanto más pequeña sea la longitud de onda, más grande será la frecuencia, es decir, más veces se repite la onda en el tiempo, y por tanto, puede ser transportada

mayor energía. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia (f) de las ondas electromagnéticas se relacionan mediante la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz, c.

En función de la frecuencia, las radiaciones tienen más o menos capacidad de penetración en los materiales: mientras más corta sea la longitud de onda, más facilidad para hacerlo.



## 1.1. Constante solar

El sol emite constantemente cantidades enormes de energía. Un cálculo teórico basado en la Ley de Planck (que nos permite calcular la intensidad de la radiación emitida por un *cuerpo negro* para una determinada temperatura y longitud de onda), permite afirmar que el flujo total de energía emitido por el sol en todo el rango de frecuencias equivale a  $3,8 \times 10^{23}$  (o sea, 380.000 millones de millones

## Energía solar térmica

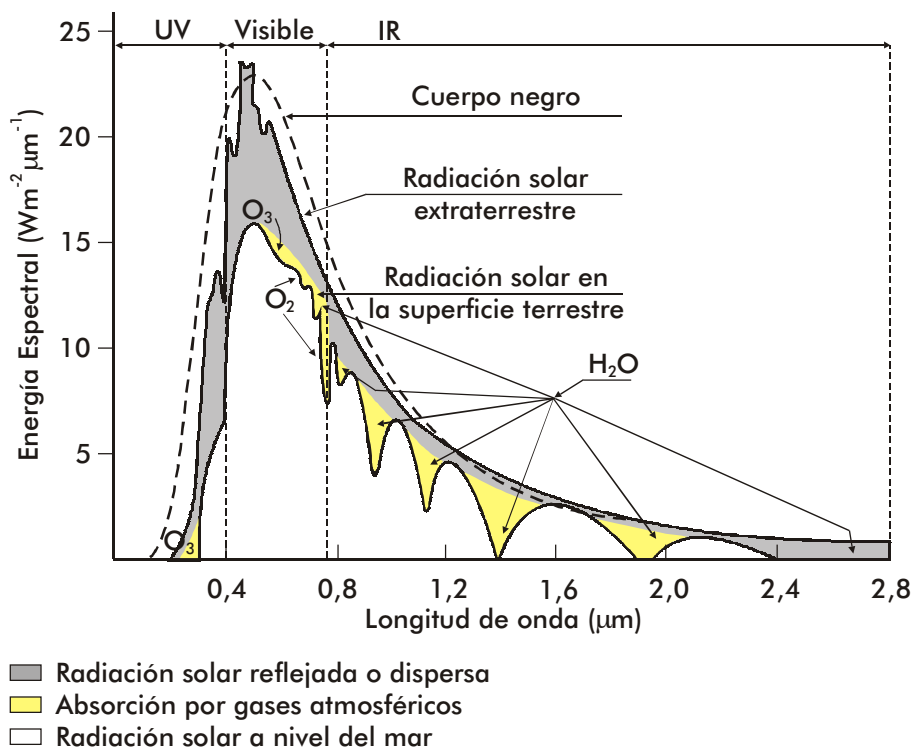
### La energía del sol

de millones de kW). De esa energía emitida por el sol, sólo una pequeña parte llega a la tierra, aunque esa pequeña cantidad sería más que suficiente para cubrir la demanda mundial de todo un año. De la energía que llega, la atmósfera, afortunadamente, absorbe una gran parte.

### Nota

Un *cuerpo negro* es un objeto ideal, que no existe en la naturaleza, que absorbe toda la energía que incide en él y no refleja ninguna.

La energía que llega a la parte alta de la atmósfera es una mezcla de radiaciones de longitudes de onda, formada por radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja. Éstas constituyen el espectro solar terrestre que podemos ver en la siguiente imagen.



Para medir la cantidad de energía solar que llega a la frontera exterior que delimita la atmósfera, se establece la **constante solar**.

La constante solar nos sirve para establecer el valor correspondiente a la energía que incide perpendicularmente sobre  $1\text{ m}^2$  de la parte exterior de la atmósfera.

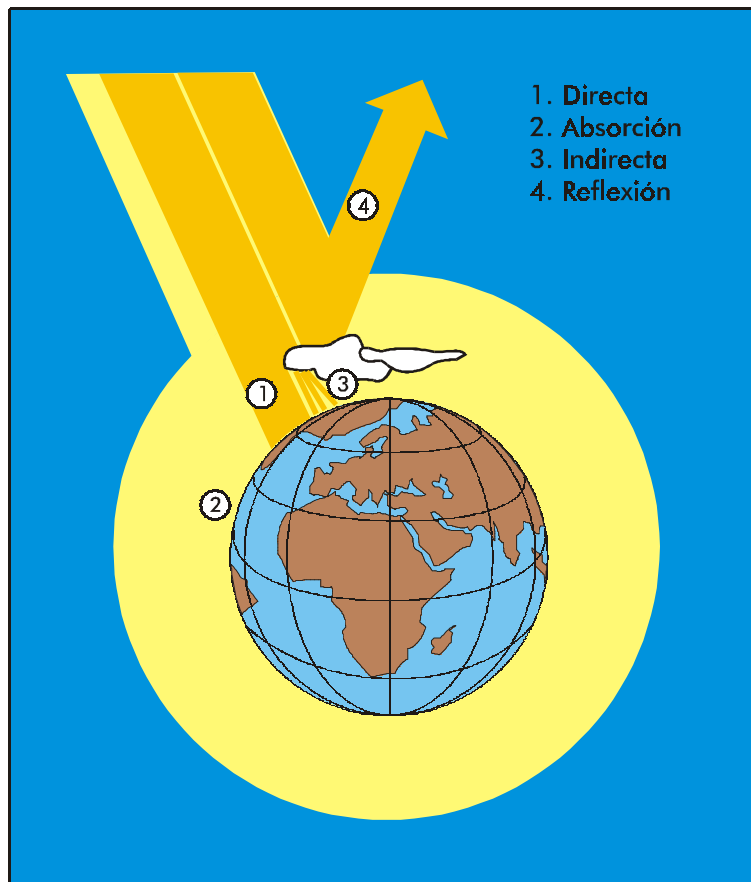
Se llama constante solar, a la radiación solar (flujo o densidad de potencia de la radiación solar) recogida fuera de la atmósfera sobre una superficie perpendicular a los rayos solares. No es un valor constante puesto que la distancia entre el sol y la Tierra tampoco lo es, y ésta depende de la distancia. Oscila en valores entre  $1.400$  y  $1.310\text{ W/m}^2$ , tomándose como valor establecido  $1.353\text{ W/m}^2$ , variando en un  $\pm 3\%$  durante el año por ser la órbita terrestre elíptica.

La radiación solar incide sobre la superficie de la tierra después de atravesar la atmósfera, en la que se debilita por efecto de reflexión, difusión y absorción de la materia atmosférica. La atmósfera absorbe parte de la radiación solar. En unas condiciones óptimas con un día perfectamente claro y con los rayos del sol cayendo casi perpendiculares, como mucho, las tres cuartas partes de la energía que llega del exterior alcanzan la superficie. El resto se refleja en la atmósfera y se dirige al espacio exterior. Las nubes son en gran parte las responsables de ello. Casi toda la radiación ultravioleta y gran parte de la infrarroja son absorbidas por el ozono y otros gases en la parte alta de la atmósfera. El vapor de agua y otros componentes atmosféricos absorben en mayor o menor medida la luz visible e infrarroja.

## Energía solar térmica

### La energía del sol

---



La constante solar anterior ya no es válida en la superficie de la tierra. Aquí, en condiciones atmosféricas óptimas: día soleado de verano, cielo totalmente despejado, en una superficie de  $1\text{ m}^2$  perpendicular al sol, la luz solar plena registra un valor de  $1.000\text{ W/m}^2$ .

Sin embargo, pueden darse otras situaciones en las que la radiación solar tenga valores distintos: varía según el momento del día, también varía considerablemente de un lugar a otro, especialmente en regiones montañosas, y a la diferencia con respecto a la posición relativa del sol en el cielo (elevación solar), la cual depende de la latitud de cada lugar.

## 1.2. Componentes de la radiación solar

Según cómo llegue la luz solar a la superficie de la tierra, podemos clasificar la radiación en tres tipos diferentes: **directa**, **dispersa o difusa** y **albedo**.

La **radiación solar directa** es la que incide sobre cualquier superficie con un ángulo único y preciso. La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. Esto explica como un área con sombra o pieza sin luz solar esté iluminada: le llega luz difusa o radiación difusa.

Los gases de la atmósfera **dispersan** más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer. Cuando amanece o anochece, la radiación solar recorre un mayor espesor de atmósfera y la luz azul y violeta es dispersada hacia el espacio exterior, pasando mayor cantidad de luz roja y naranja hacia la Tierra, lo que da el color del cielo a esas horas.

Se llama **albedo** a la fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie. El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, por ejemplo, para un cuerpo negro, su valor es igual a cero, pero para la nieve es de 0,9, para un suelo mojado es 0,18, etc.

Las proporciones de radiación directa, dispersa y albedo recibida por una superficie dependen:

- De las condiciones meteorológicas: en un día nublado la radiación es prácticamente dispersa en su totalidad mientras que en un día despejado con clima seco predomina, en cambio, la componente directa, que puede llegar hasta el 90% de la radiación total.
- De la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal: una superficie horizontal recibe la máxima radiación dispersa -si no hay alrededor objetos a una altura superior a la de la superficie- y la mínima reflejada. Al aumentar la inclinación de la superficie de captación disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada.

## Energía solar térmica

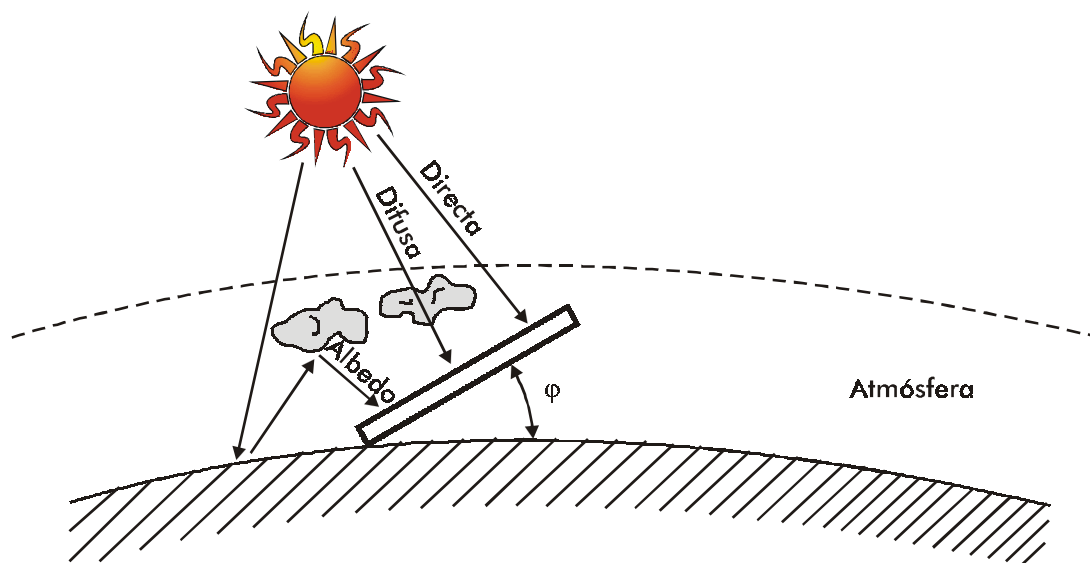
### La energía del sol

---

- De la presencia de superficies reflectantes (debido a que las superficies claras son las más reflectantes, la radiación reflejada aumenta en invierno por efecto de la nieve y disminuye en verano por efecto de la absorción de la hierba o del terreno).

Para concretar, decir que la radiación total que incide sobre una superficie inclinada corresponde a la suma de las tres componentes de la radiación:

$$I_{\text{Total}} = I_{\text{Directa}} + I_{\text{Difusa}} + I_{\text{Albedo}}$$

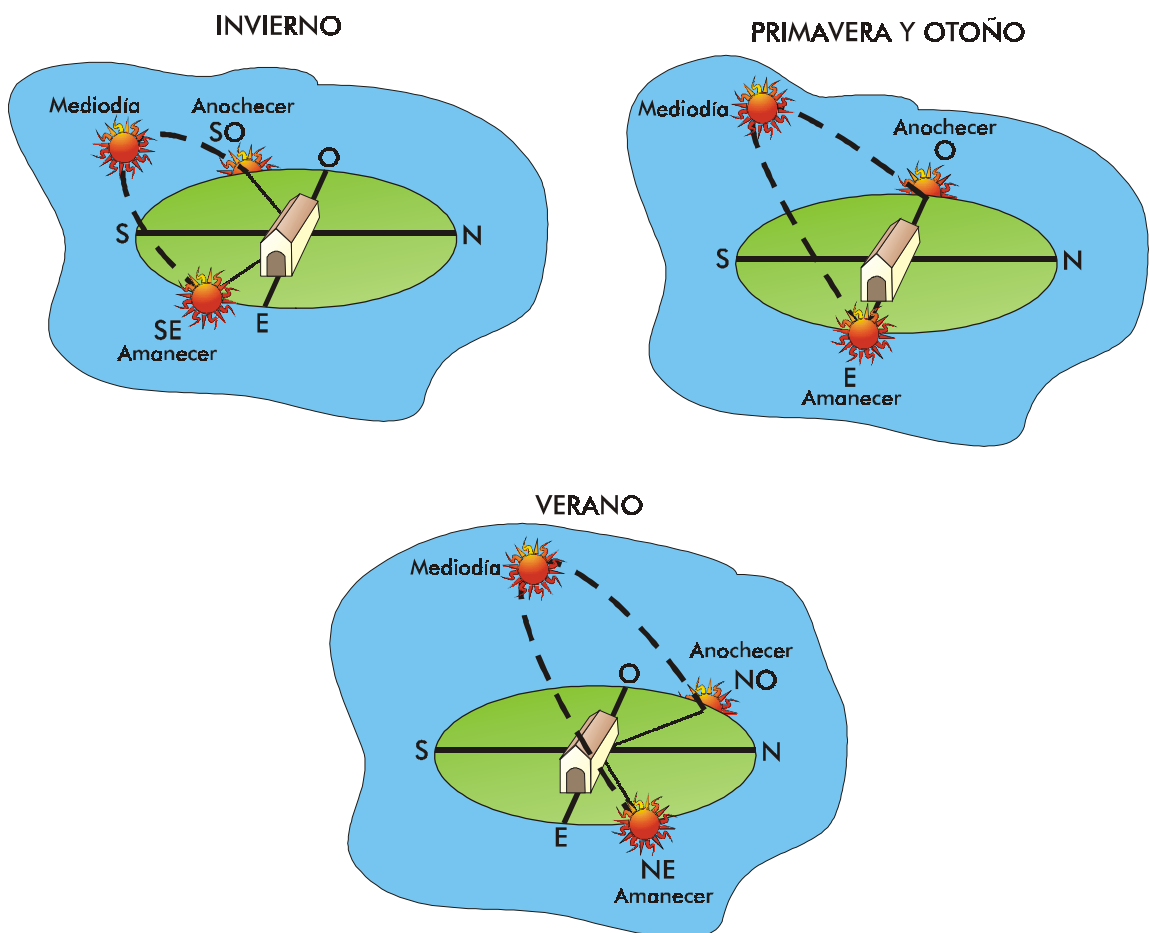


### 1.3. Variaciones de la radiación solar

La radiación solar es bastante constante antes de llegar a la atmósfera; sin embargo, una vez que entra en ella, se produce una importante disminución.

La posición del sol varía diariamente desde el amanecer hasta el ocaso. Si se observan las posiciones del sol al amanecer, mediodía y atardecer en cualquier lugar del hemisferio norte, se verá como el sol sale por el este, se desplaza en dirección sur y se pone por el oeste.

También es distinta según la estación del año: no se encuentra a la misma altura sobre el horizonte en invierno que en verano, lo que significa que la inclinación de los captadores no debería ser fija si se quiere que en todo momento estén orientados perpendicularmente al sol. En invierno, el sol no alcanzará el mismo ángulo que en verano. Idealmente, en verano los captadores solares deberían ser colocados en posición ligeramente más horizontal para aprovechar al máximo la luz solar. Pero si se mantuviera esa posición en invierno, los mismos paneles no estarían, entonces, en posición óptima para el sol del invierno.



Para aprovechar al máximo esa radiación solar, la orientación de los captadores se hace hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur, es decir, siempre se instalarán mirando al Ecuador.

Conocer la posición que ocupa el sol en cualquier momento del día es importante porque así se puede conocer cuál es el ángulo de incidencia de la radiación, y por tanto el comportamiento de las sombras proyectadas por los objetos, lo que junto con las medidas de la radiación realizadas, son la base de los cálculos solares.

### **1.3.1. Parámetros principales de la posición del sol**

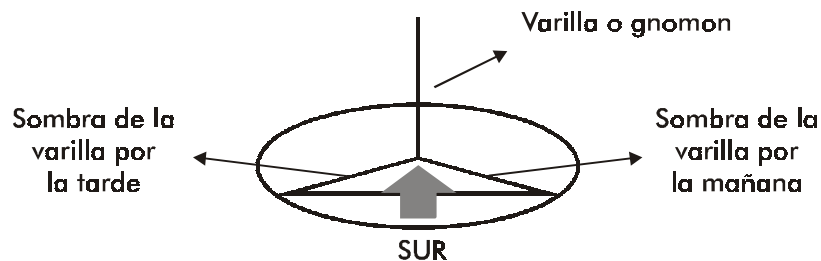
Los principales parámetros que definen la posición del sol son:

- Azimut (A): es el ángulo que forman la proyección de los rayos solares sobre un plano tangente a la superficie terrestre y el sur geográfico. Cuando el sol se encuentra exactamente sobre el sur geográfico (mediodía solar), el azimut tiene valor 0.
- Altura solar (h): es el ángulo que forman los rayos solares con la horizontal cuando llegan a la superficie de la tierra.

## Nota

Cuando para averiguar dónde está el sur se emplea una brújula, lo que se obtiene con ella es el sur magnético, no el sur verdadero (el geográfico). La localización del sur geográfico puede realizarse de la siguiente forma:

- 2 ó 3 horas antes del mediodía, se coloca en el suelo una varilla vertical (gnomon), se mide su sombra y se hace una señal.
- Con la medida de la sombra, se traza en el suelo un círculo.
- Cuando por la tarde la sombra de la varilla vuelva a tener la medida del círculo, se hace otra señal.
- Se unen ambas señales con una recta. Mirando desde ella hacia la varilla, tenemos el sur geográfico.



Determinación práctica del sur geográfico

Estos valores son calculables, pero es más frecuente tomarlos de tablas en las se recogen los valores correspondientes a un determinado lugar.

En la *tabla de coordenadas solares* aparecen los datos de altura y azimut para el día 1 de cada mes del año y a diferentes horas del día. Hay que tener en cuenta que la órbita descrita diariamente por el sol en el cielo es simétrica (en estas tablas, al mediodía solar se le asigna el valor 0) y que la alzada solar máxima coincide con el mediodía solar. Esto hace que los datos de altura sean iguales para los intervalos de tiempo que transcurren anteriores y posteriores al mediodía. Lo mismo ocurre con el azimut, pero para distinguirlos, se coloca delante el signo negativo (-) si es antes del mediodía (dirección este) y positivo (+) si es después del mediodía (dirección oeste).

### 1.3.2. Descripción de la evolución de las sombras

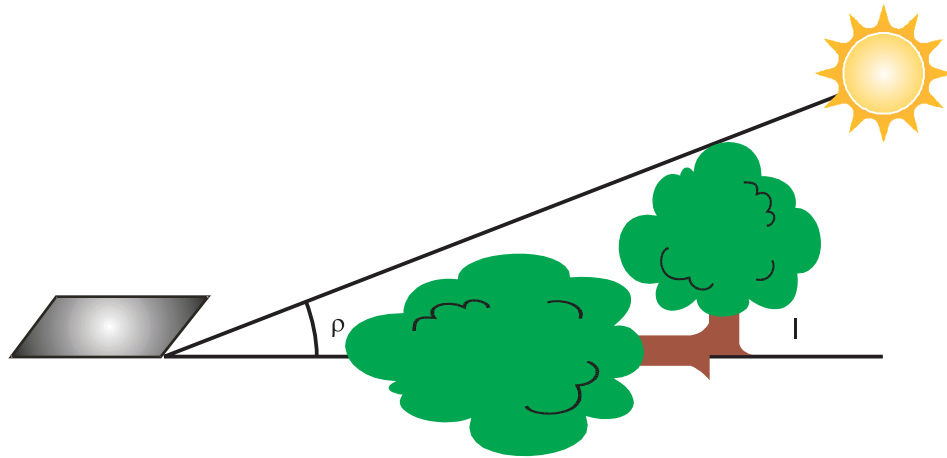
Para lograr el máximo aprovechamiento de un sistema de energía solar térmica, habrá de tenerse en cuenta la presencia de posibles sombras sobre los captadores.

Aun cuando los captadores térmicos no son especialmente sensibles a las sombras y por regla general no dejan de funcionar cuando son parcialmente sombreados hasta en un 15-30% de su superficie; esto reduce evidentemente su producción, sobre todo si las sombras se producen durante las horas centrales del día, en las cuales la insolación es máxima.

Como no siempre es posible evitarlas, para el estudio de sombras proyectadas sobre captadores debe tenerse en cuenta que el día más desfavorable es el solsticio de invierno. Así se garantiza que durante el periodo de la vida de la instalación, éstas no se produzcan.

Una determinación exacta de las posibles sombras se puede realizar conociendo la altura solar y el azimut durante todo el año y así comprobar si algún obstáculo puede en algún momento, llegar a ocultar el sol e impedir que llegue la radiación solar al captador.

Una vez que se conocen la altura solar y el azimut correspondientes a la fecha y hora de cálculo, solo nos queda saber la altura del objeto para poder calcular la longitud de la sombra que proyecta. Para ello nos serviremos del siguiente gráfico,



y de la siguiente expresión:

$$\text{sombra proyectada} = \frac{l}{\text{tg } \rho}$$

donde

$l$  = altura del objeto a partir de la cota donde se colocan los módulos.

$r$  = altura solar (ángulo) a partir de las tablas de coordenadas.

### 1.3.3. Diagrama de sombras

El diagrama de sombras es una representación gráfica del área sombreada por un objeto en el transcurso de las horas centrales del día (horas de mayor radiación). La importancia de este diagrama radica en que nos permite tomar una decisión sobre la ubicación de los módulos sin sorpresas posteriores (módulos a la sombra) o bien evaluar la energía disponible en caso de que no sea posible encontrar una localización sin sombras.

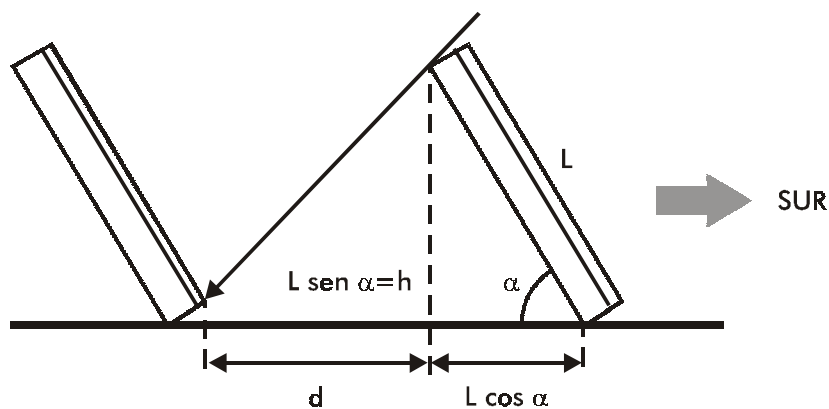
El primer paso para representar el diagrama en planta es dibujar el objeto de estudio. A continuación se trazan unos ejes de coordenadas que coincidan con los puntos cardinales y se determina la escala del dibujo.

A partir de las tablas solares y de la expresión matemática del cálculo de sombras, se hacen los cálculos relativos a las horas centrales del día (de 9 a 15 hora solar). Con el resultado de estos cálculos se confecciona una tabla de datos que nos ayudará a hacer el dibujo.

Comenzamos a dibujar los datos referentes al mediodía (12 hora solar), que será una proyección de los vértices del objeto en dirección paralela al norte (dado que el sol está al sur). A partir de esta proyección, se traza el resto teniendo en cuenta la desviación al sur según los datos de azimut.

### 1.3.4. Separación entre captadores

Una de las principales aplicaciones del cálculo de sombras que proyecta un objeto es la de conocer si una línea de captadores solares hará o no sombra a otra que se encuentre detrás, o dicho de otra forma, calcular la distancia mínima de colocación entre baterías de captadores para evitar que los de delante tapen a los de atrás.



Distancia mínima entre módulos

donde

$L$  = longitud del captador.

$\alpha$  = ángulo de inclinación del captador.

$d_{\min}$  = distancia mínima entre los captadores para evitar sombras.

Tal y como muestra la figura anterior, la distancia mínima entre dos filas de captadores es la suma de dos longitudes: una que corresponde a la ocupación del primer captador ( $b$ ) y otra que corresponde a la sombra que proyecta ( $a$ ).

La ocupación del primer captador se obtiene por trigonometría, a partir del triángulo que forma el captador con la horizontal y sería:

$$b = L \cos \alpha$$

Para calcular el valor de la sombra se necesita conocer el valor de la altura de la parte posterior del captador solar.

$$c = L \sin \alpha$$

entonces

$$a = \frac{c}{\operatorname{tg} \rho}$$

Agrupando las dos expresiones anteriores obtenemos

$$d_{\min} = L \cos \alpha + \frac{L \sin \alpha}{\operatorname{tg} \rho} = L \left( \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \rho} \right)$$

Para hacer una estimación en planta de la superficie necesaria para la ubicación de los captadores, incluyendo a éstos y la separación entre ellos, bastará con multiplicar el número de captadores por el valor de  $(a + b)$  y por la anchura de cada captador.

## 2. El sol y la energía solar térmica

---

La energía solar térmica (EST), es un método de aprovechamiento en el que se transforma la energía radiante del sol en calor, que sirve para la producción de agua caliente destinada al consumo doméstico, agua caliente sanitaria, calefacción, etc., o para producción de energía mecánica y a partir de ella, de electricidad.

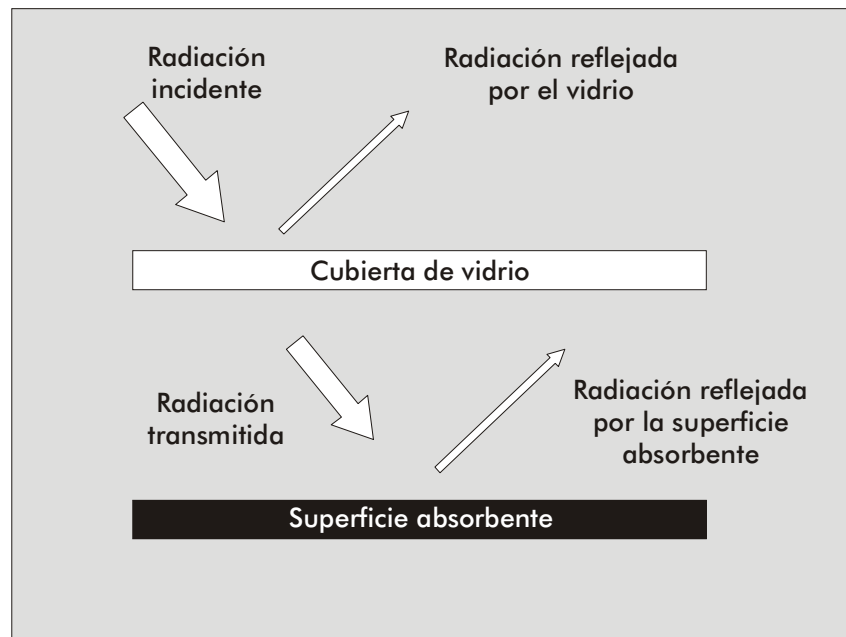
El lugar en el que tiene lugar la transformación de la energía radiante en calor recibe el nombre de **captador solar**.

### 2.1. Principio de funcionamiento

La EST aprovecha la componente directa y difusa de la radiación total. La conversión de energía radiante en calor, se realiza por los mecanismos de **conducción**, **convección** y **radiación**.

Por **conducción** se produce la transferencia de calor desde una región que está a una temperatura hasta otra que está a una temperatura inferior en el mismo medio o entre diferentes medios que se encuentran en contacto. Si la transferencia de calor se produce por el desplazamiento de materia entre regiones con diferentes temperaturas, entonces se trata de **convección**. La convección se produce únicamente en materiales fluidos (líquido o gas). Al hablar de **radiación**, hacemos referencia al flujo de calor entre dos cuerpos que están a distinta temperatura, sin que en este caso se requiera ningún medio material.

La radiación solar que llega a un colector lo hace sobre la cubierta transparente. Una parte será reflejada, volviendo al exterior y otra se transmitirá, y de ésta que se transmite, la cubierta absorberá una parte.



## 2.2. Efecto invernadero en los captadores

El proceso de captación se basa en el **efecto invernadero**. De las diferentes longitudes de onda que componen la radiación solar, son las radiaciones de longitud de onda corta (menores de  $3 \mu\text{m}$ ), las que atraviesan una cubierta e inciden sobre el absorbedor del captador, donde parte es transferida al fluido portador de calor en forma de energía térmica. La cubierta es transparente a la radiación solar pero es opaca a la radiación infrarroja: el absorbedor al calentarse emite una radiación de mayor longitud de onda (entre  $4,5$  y  $7,2 \mu\text{m}$ ) que no puede escapar por ella y es reflejada al interior otra vez, minimizándose las pérdidas tanto por conducción como por convección.

De esta forma se produce una "trampa energética de radiaciones" que impide que la energía radiante que ha atravesado la cubierta vuelva a salir; esta trampa constituye el efecto invernadero. La cubierta también evita el contacto directo de la placa con el aire ambiente con lo que, además, se evitarán pérdidas por convección antes referidas.

El absorbedor está formado por un conjunto de tuberías por las cuales circula el fluido de trabajo, el cual una vez ha captado la energía se dirige hacia el elemen-

to de acumulación o bien directamente al consumo. Una vez cede su energía, disminuye, su temperatura y se dirige de nuevo al captador solar comenzando de nuevo el ciclo.

La combinación del efecto invernadero, la absorción de radiación de los objetos negros y el aislamiento para evitar las pérdidas de calor constituyen los principios físicos fundamentales para comprender el funcionamiento de un colector plano o tubular.

### 2.3. Rendimiento de los captadores

La energía útil que se obtiene de un captador  $Q_{\text{útil}}$  (en W) puede determinarse mediante la fórmula que calcula el calor que extrae el fluido caloportador (de calor específico  $C_p$  en J/kg°C) en función del caudal másico  $m$  (en kg/h) y la diferencia de temperaturas entre la entrada  $T_e$  y la salida  $T_s$ :

$$Q_{\text{útil}} = 1,16 \cdot m \cdot C_p (T_s - T_e)$$

El rendimiento del captador es la relación entre la energía útil y la radiación solar total que incide sobre el mismo:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{I \cdot A}$$

donde

$I$  = irradiancia incidente sobre el captador, en W/m<sup>2</sup>.

$A$  = superficie útil del mismo, en m<sup>2</sup>.

Por otro lado, la energía útil puede calcularse también como la diferencia entre la energía que se capta y la energía que se pierde: No toda la radiación solar que incide en el captador es realmente captada por el absorbedor ya que depende de lo que transmite el vidrio y de lo que absorbe la placa absorbidora. Por tanto puede expresarse la energía absorbida por:

$$Q_{\text{abs}} = a \cdot I \cdot A$$

Las pérdidas térmicas del captador son proporcionales a su superficie y a la diferencia de temperatura del absorbedor  $T_e$  con la temperatura ambiente  $T_a$  por la expresión:

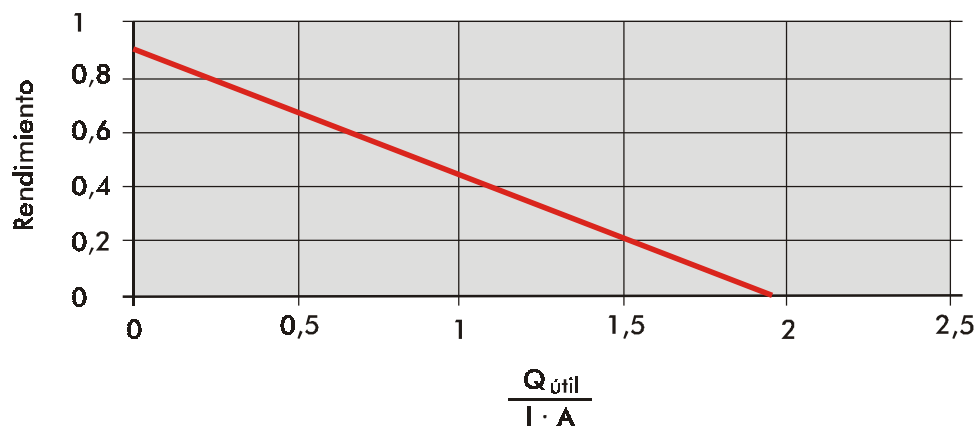
$$Q_{\text{per}} = b (T_e - T_a) \cdot A$$

El rendimiento del captador puede expresarse por tanto:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{I \cdot A} = \frac{Q_{\text{abs}} - Q_{\text{per}}}{I \cdot A} = a - b \frac{(T_e - T_a)}{I}$$

Donde **a** y **b** son coeficientes globales de pérdidas.

El rendimiento se representa gráficamente en unos ejes de coordenadas. En el eje horizontal se representan los valores a la derecha de la igualdad y en el vertical, el rendimiento. La gráfica debe ser una recta, ya que la anterior es una ecuación lineal. La recta de rendimiento del captador plano puede determinarse experimentalmente realizando medidas de prestaciones reales y ajustando una recta a los valores obtenidos.



Con la función de rendimiento se determina la parte de la radiación incidente que el captador transforma en energía térmica en función de la diferencia de temperaturas y de la irradiancia.

La función de rendimiento permite conocer el rendimiento máximo del captador que se obtiene para  $T_e = T_a$  y vale  $\eta_{\text{máx}} = a$ .

## Energía solar térmica

### La energía del sol

---

También se puede determinar la temperatura máxima  $T_{cm}$  que puede alcanzar un captador, que se obtiene cuando  $\eta = 0$  y vale:

$$T_{cm} = T_a + \frac{a}{b} \cdot I$$