
Aprovechamiento del sol para producir energía

**unidad
didáctica 1**

1. Introducción

La energía solar es en la actualidad uno de los métodos más limpios de producción de energía conocidos. Los paneles solares constituyen uno de los métodos más simples que se pueden usar para convertir la energía del sol en energía eléctrica aprovechable, sin que en esta transformación se produzcan subproductos peligrosos para el medio ambiente. Parten de una fuente de energía que para nosotros va a resultar inacabable: la energía que emite el sol, y de la que nos llega una cantidad tal, que si toda ella pudiera ser aprovechada, bastaría media hora de un día para satisfacer la demanda energética mundial durante todo un año. Aunque esto, como ya sabemos, no pasa del plano teórico y es imposible de realizar de forma práctica.

Aún así, cada vez es mayor el número de actividades en las que la energía solar resulta aplicable, abarcando diseños tan diferentes como pueden ser un coche solar o los satélites.

La principal desventaja que presenta la energía solar es su coste. Los paneles solares no son baratos (aunque la materia prima, silicio, sea muy abundante), y además están contruidos con materiales frágiles y sensibles (semiconductores, cristal, etc.), que requieren mantenimiento constante y a menudo, ser reemplazados.

Además, cada panel no rinde más de un 40%, por lo que un panel solar aislado no produce suficiente potencia. No obstante, este problema se soluciona agrupando mayor número de paneles que funcionen conjuntamente para producir energía. Aunque este sistema ocupa mucho más espacio, genera mucha más potencia. Actualmente se tiende a una mejora de los rendimientos de las células energéticas, lo que se traduce en una creciente disminución de los costes por lo que resulta una alternativa viable a otras fuentes de energía.

Energía solar fotovoltaica

Aprovechamiento del sol para producir energía

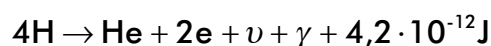
Es previsible un aumento a nivel mundial de este tipo de energía por sus demostradas ventajas a todos los niveles.

2. El sol como fuente energética

El sol es la estrella más próxima a la Tierra. Tiene un radio de unos 700.000 km y una masa de $2 \cdot 10^{30}$ 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 $1,41 \cdot 10^3$ kg/m³. 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.

La ecuación de la reacción nuclear simplificada es la siguiente:



Energía solar fotovoltaica

Aprovechamiento del sol para producir energía

donde

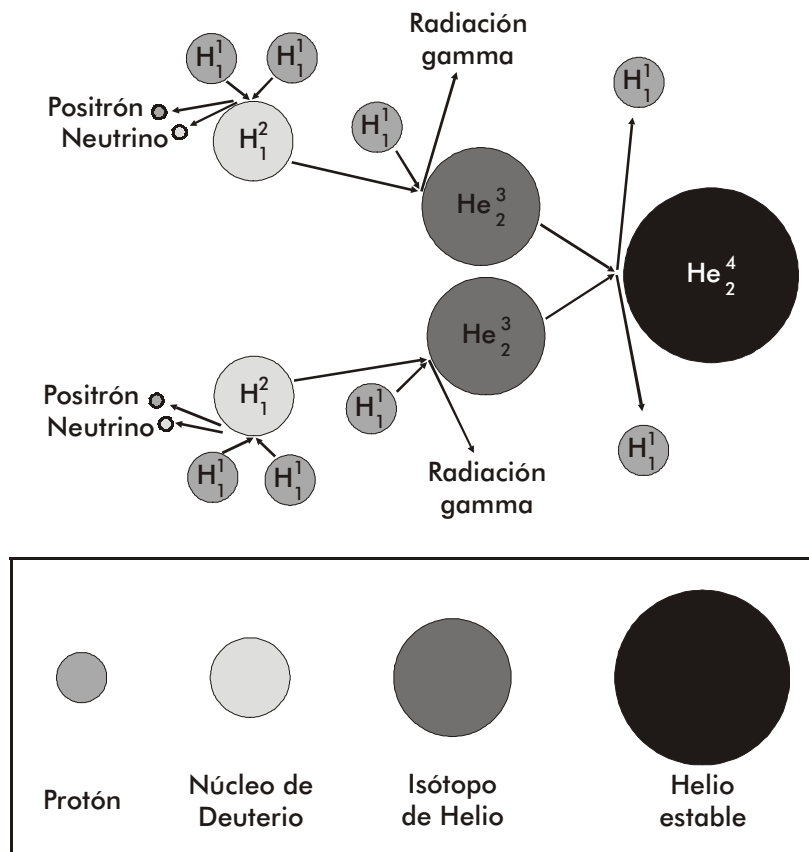
H = átomo de hidrógeno.

He = átomo de helio.

ν = frecuencia característica de la onda electromagnética.

γ = longitud de onda.

FUSIÓN NUCLEAR DEL HIDROGENO EN EL SOL



La reacción nuclear en realidad son dos, dando lugar cada una de ellas a un isótopo de helio. Se puede detallar todo en tres pasos:

- **Primero:** dos átomos de hidrógeno reaccionan formando un átomo de deuterio (isótopo del hidrógeno formado por dos protones y un electrón) perdiéndose un electrón en forma de neutrino y positrón.

- **Segundo:** el átomo de deuterio reacciona con un tercer átomo de hidrógeno formándose un isótopo de helio y liberando gran cantidad de energía en forma de radiación gamma.

- **Tercero:** dos isótopos de helio, de los generados anteriormente, reaccionan, dando lugar a un átomo de helio estable y a dos átomos de hidrógeno.

Como en el primer paso intervienen dos átomos de hidrógeno, y en el segundo uno, en total, en las dos reacciones de obtención de los dos isótopos de helio han intervenido 6 átomos de hidrógeno, de los cuales se recuperan dos, por lo que en el cómputo total de las reacciones, resulta que han intervenido 4 átomos de hidrógeno para obtener un átomo de helio, con generación de neutrinos positrónicos y de energía en forma de radiación gamma.

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 consumir 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 en forma de ondas electromagnéticas, que se desplazan por el espacio en todas las direcciones, ya que éstas no necesitan un medio físico para su propagación. Este efecto se denomina radiación y hace referencia a un fenómeno físico vibratorio que se representa en forma de ondas.

2.1. Radiación solar disponible

La energía contenida en los rayos del sol se calcula a partir de la fórmula de Planck,

$$E = hv$$

donde

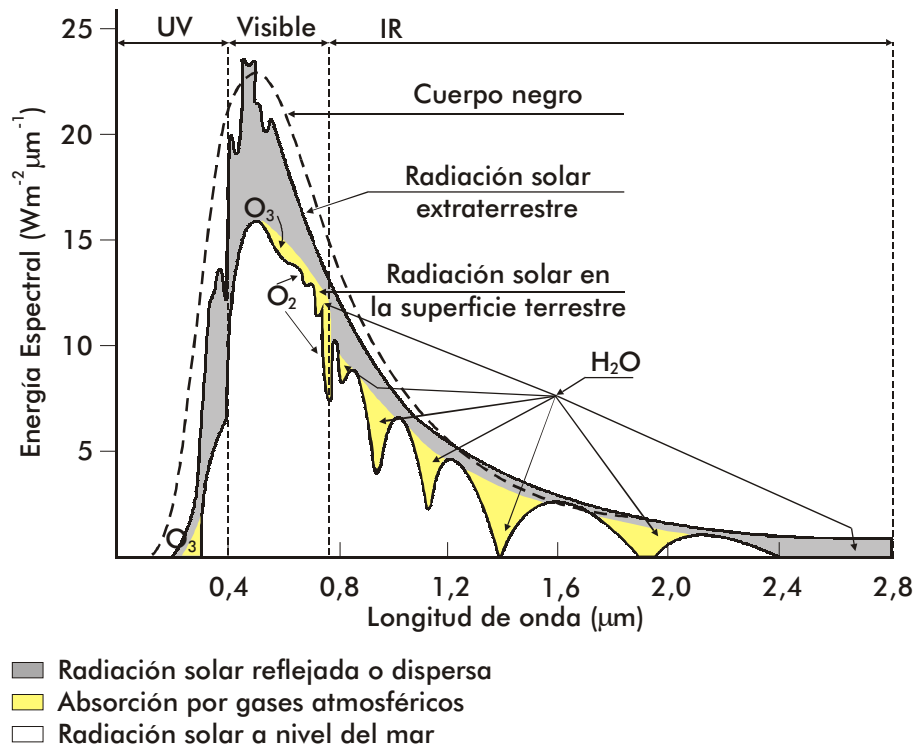
E = energía de los fotones.

h = constante de Planck, que equivale a $6,625 \cdot 10^{-34}$ Js.

v = frecuencia a la que oscilan los fotones o la frecuencia de las ondas de luz.

De esta fórmula se desprende que hay fotones que poseen gran cantidad de energía (como los rayos gamma) y otros que son menos energéticos (los rayos infrarrojos, por ejemplo). Esto se traduce en que hay fotones que ni siquiera pueden atravesar la atmósfera terrestre, mientras que otros cruzan los tejidos blandos del cuerpo y chocan únicamente con los huesos (rayos X).

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.



La longitud de onda (λ) 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 .

Tenemos, por tanto, que el sol emite constantemente cantidades enormes de energía, en forma de ondas. 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 $3,8 \cdot 10^{23}$ (o sea, 380.000 millones de millones 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.

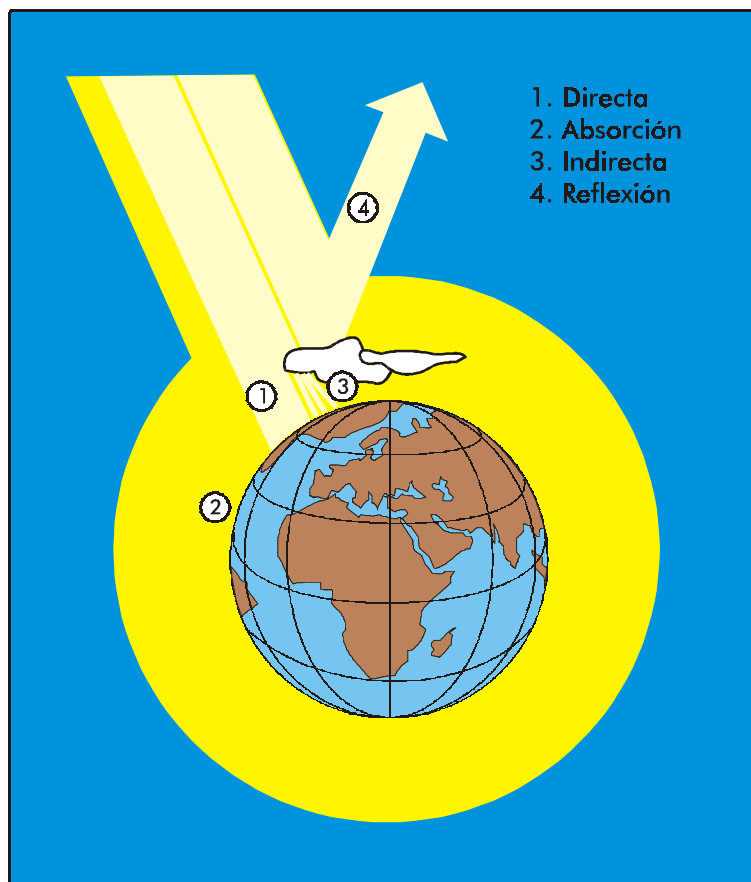
Nota:

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.

2.2. Constante solar

Para medir la cantidad de energía solar que llega a la frontera exterior que delimita la atmósfera, se establece la **constante solar**. Es la misma cantidad de energía que recibiría la superficie de la Tierra si no tuviera atmósfera.

La constante solar nos sirve para establecer el valor correspondiente a la energía que incide perpendicularmente en 1m^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. Su valor es de 1.353 W/m^2 , y varía $\pm 3\%$ 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, las tres cuartas partes de la energía que llega del exterior, como mucho, 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.

A partir de los fenómenos de reflexión, difusión y absorción, podemos deducir que la radiación que incide en la atmósfera no coincide con la disponible al nivel del mar, con lo que 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 m^2 perpendicular al sol, la luz solar plena registra un valor de 1.000 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. Hay que tener esto en cuenta cuando la instalación solar prevé hacerse a gran altitud, por ejemplo en refugios de montaña o repetidores de comunicación, ya que a mayor altitud menor es el espesor de atmósfera que debe atravesar la radiación y, por tanto, aumenta la energía disponible. En las siguientes tablas podemos ver ejemplos de cómo varía la intensidad de la radiación en función de la altitud sobre el nivel del mar, y cómo influyen las condiciones climatológicas.

Energía solar fotovoltaica

Aprovechamiento del sol para producir energía

VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE CON LA ALTITUD					
Altitud sobre el nivel del mar (m)	0	900	1.500	2.250	3.000
Intensidad de la radiación (W/m²)	950	1.050	1.100	1.150	1.190

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS EN LA RADIACIÓN INCIDENTE		
Condiciones climatológicas	Radiación global (W/m²)	Porcentaje de difusa (%)
Cielo despejado	750-1.000	10-20
Cielo parcialmente nuboso	200-500	20-90

3. Componentes de la radiación solar

Como ya hemos referido el sol es una poderosa fuente de energía. Esa energía solar que nos llega a la tierra puede ser transformada en energía eléctrica en un proceso denominado **efecto fotovoltaico (FV)** en células o celdas solares que se montan en paneles, como veremos a continuación.

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 que 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 las 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.

Energía solar fotovoltaica

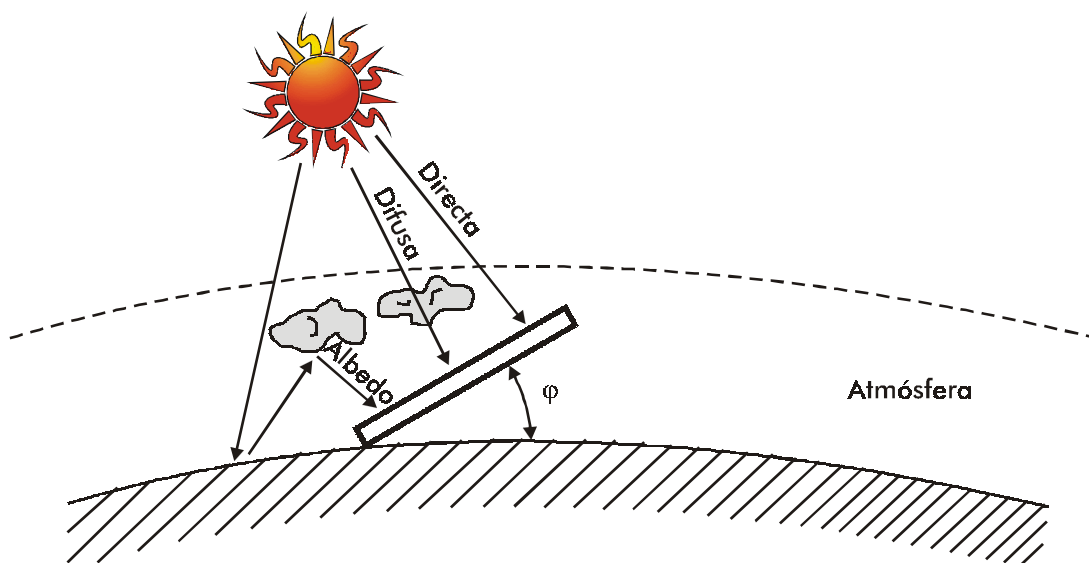
Aprovechamiento del sol para producir energía

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.
- 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:

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



4. Variaciones de la radiación solar

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. En realidad, es la Tierra la que cada día hace una rotación completa alrededor de su eje, y eso crea en el observador la sensación de permanecer estático, mientras que el universo gira a su alrededor. Por tanto, aunque es la Tierra la que gira, nos hemos acostumbrado a decir que es el sol el que cada día realiza este recorrido, aunque este es, como sabemos, un movimiento aparente.

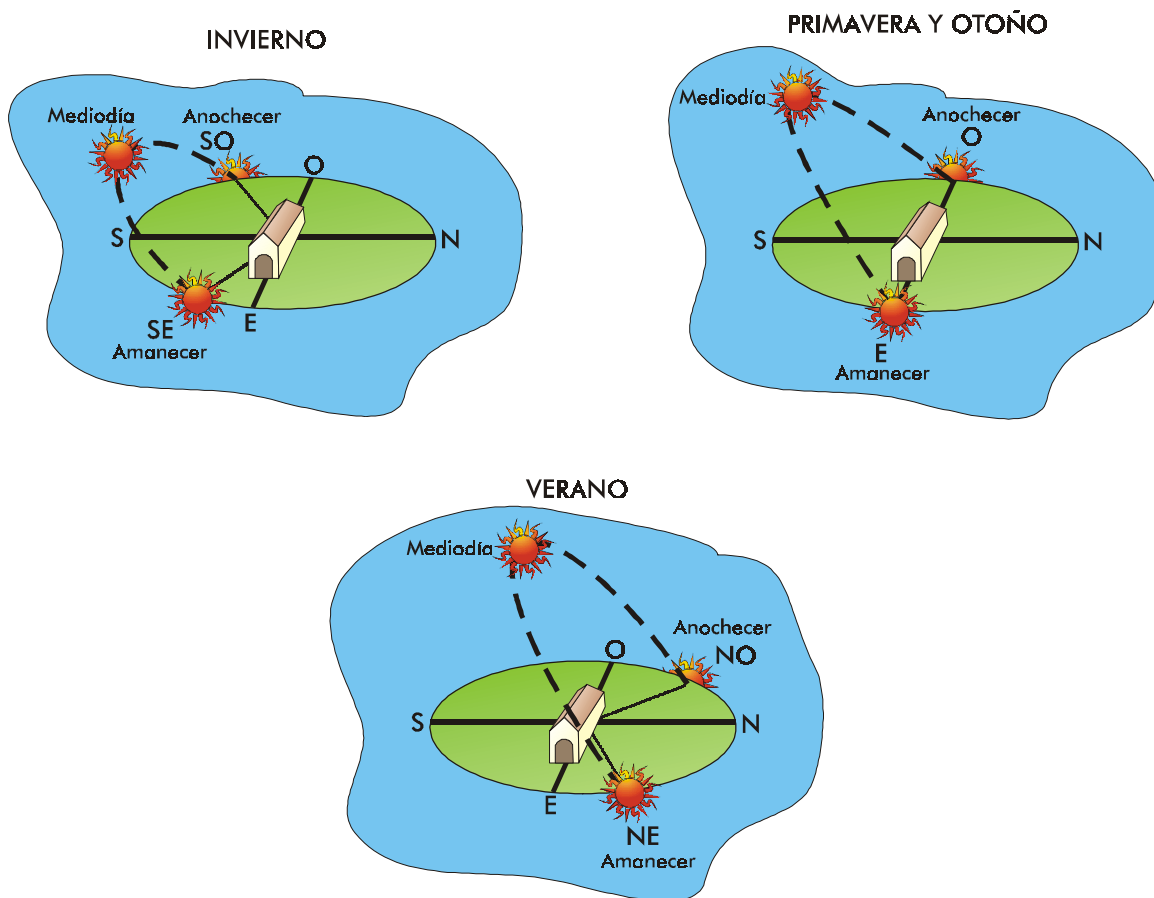
La Tierra tiene dos tipos de movimientos: el de rotación que ya hemos visto, y el de traslación alrededor del sol, siguiendo una trayectoria elíptica, que da lugar a las estaciones del año.

Las condiciones óptimas de operación implican la presencia de luz solar plena y un panel orientado lo mejor posible hacia el sol, con el fin de aprovechar al máximo la luz directa. Para aprovechar al máximo esa radiación solar, la orientación de los paneles 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.

La insolación, parámetro clave en el diseño de sistemas solares, también es distinta según la estación del año: el sol no se encuentra a la misma altura sobre el horizonte en invierno que en verano, lo que significa que la inclinación de los paneles 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 paneles 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.

Energía solar fotovoltaica

Aprovechamiento del sol para producir energía



Por lo visto en este punto, podemos decir que para que un captador solar pudiera estar en todo momento correctamente orientado, debería estar dispuesto sobre un mecanismo de anclaje que le permitiera girar sobre su eje horizontal y sobre el vertical.

La inclinación de los captadores se establece en función de la latitud y de la aplicación. Así pueden darse diferentes casos:

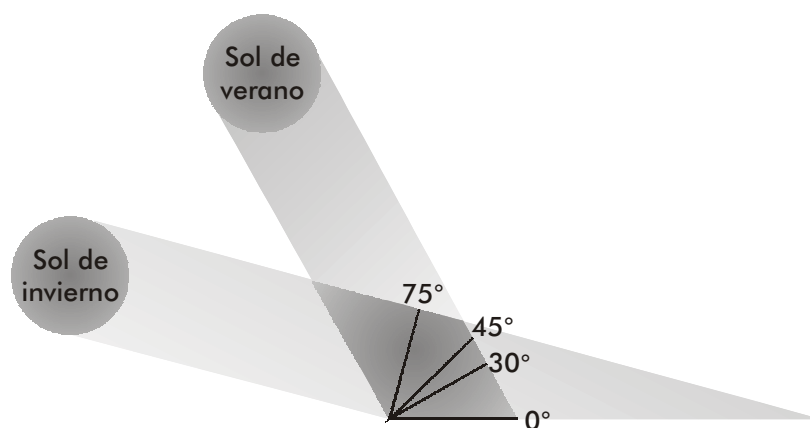
- Para la utilización principalmente en invierno: 20° mayor que la latitud.
- Para la utilización principalmente en primavera y verano: 10° menor que la latitud.
- Para una utilización uniforme a lo largo de todo el año: 10° mayor que la latitud.

Ligeras variaciones respecto al ángulo de inclinación óptimo no afectan prácticamente al rendimiento energético del sistema captador.

En nuestras latitudes (la latitud de España es aproximadamente 40°), la orientación óptima de los módulos fotovoltaicos es hacia el sur. Sin embargo lo que se deja de generar por estar orientados hacia el sureste o suroeste representa sólo un 0,2% por cada grado de desviación respecto al sur (en un entorno de $\pm 25^\circ$ respecto al sur).

Del mismo modo, la inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos depende de la latitud del lugar donde se van a instalar (lo que implica una inclinación entre 5° y 10° menos que la latitud; por ejemplo resultarían unos 35° en el centro de la península) y de la época del año en la que se quiere maximizar la producción (lo normal es colocarlos para que capten el máximo de irradiación anual); aunque lo que se deja de generar por estar inclinados por encima o por debajo de este óptimo representa sólo un 0,08% por cada grado de desviación respecto a la inclinación óptima.

En cualquier caso, es recomendable una inclinación superior a los 15° , para permitir que el agua de la lluvia se escurra; y donde nieva con cierta frecuencia es recomendable una inclinación a partir de los 45° , para favorecer el deslizamiento de la nieve.



Ángulo de inclinación óptimo en invierno y verano

Energía solar fotovoltaica

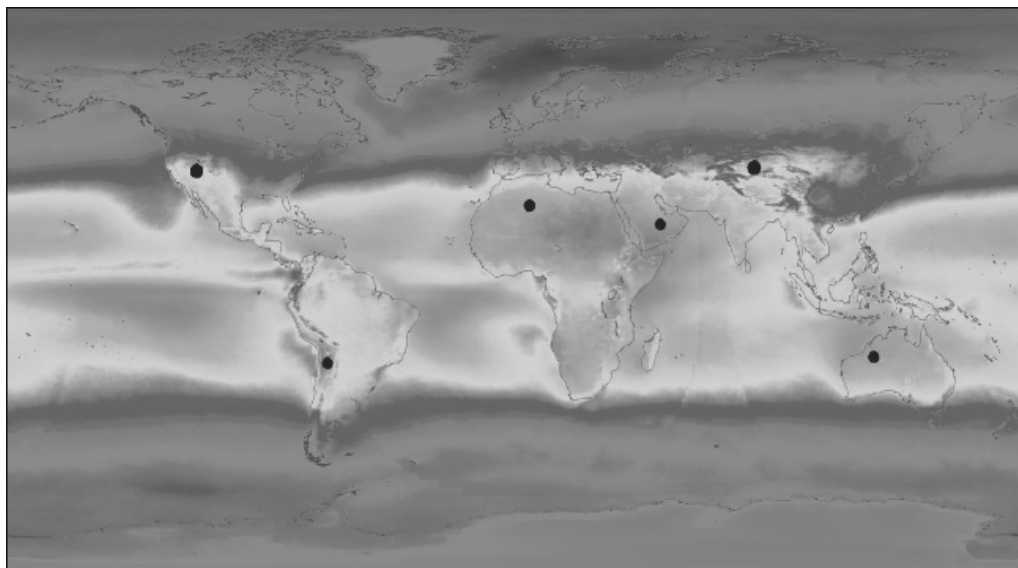
Aprovechamiento del sol para producir energía

En definitiva, asumiendo "pérdidas" (lo que se deja de generar) de hasta un 5-10% se tiene un gran abanico de posibilidades de orientación e inclinación, y se facilita la instalación de generadores fotovoltaicos en diferentes circunstancias. Pero siempre hay que procurar acercarse lo más posible a las condiciones óptimas de instalación: orientación sur e inclinación entre 5° y 10° menos que la latitud.

4.1. Horas de pico solar

Es un parámetro fundamental para el dimensionado de los sistemas fotovoltaicos. Corresponde al número de horas en las que cada metro cuadrado de superficie captadora, obtiene de modo constante 1.000 W de energía. Los módulos fotovoltaicos se caracterizan bajo unas condiciones determinadas que son tomadas como referencia y que se denominan *Condiciones Estándar de Medida*. Éstas son:

- 1 kW/m² de radiación solar.
- 25 °C de temperatura de las células fotovoltaicas.
- Incidencia normal.



0 50 100 150 200 250 300 350 W/m²

Mapa de radiación solar

Si se quiere evaluar la energía que el panel fotovoltaico puede producir diariamente, habría que conocer cuántas horas diarias con una radiación de 1.000 W/m^2 equivalen a la radiación total diaria (la correspondiente a la inclinación del panel fotovoltaico). Este concepto se denomina **Horas pico solar**.

La máxima potencia generada en estas condiciones por cada módulo fotovoltaico se mide en Wp (vatios pico). A esta potencia se le denomina potencia nominal del módulo.

La energía producida por los sistemas fotovoltaicos es el resultado de multiplicar su potencia nominal por el nº de horas pico, dado que no todas las horas de sol son horas de intensidad considerada como pico (esto es 1.000 W/m^2). El número de horas pico de un día concreto se obtendrá dividiendo toda la energía producida en ese día entre 1.000 W/m^2 . En España, la media de horas solares pico es de 3 a 6, aunque varía entre el norte y el sur, y de invierno a verano.