

***UFo150: Replanteo y funcionamiento de las
instalaciones solares fotovoltaicas***

Elaborado por:
Antonio Martínez Fernández

Edición 5.0

EDITORIAL ELEARNING

ISBN: 978-84-17446-31-4 • Depósito legal: MA 1757-2012

No está permitida la reproducción total o parcial de esta obra bajo cualquiera de sus formas gráficas o audiovisuales sin la autorización previa y por escrito de los titulares del depósito legal.

Impreso en España - Printed in Spain

Índice

Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas

UD1

Funcionamiento general de las instalaciones solares fotovoltaicas

1.1. La energía solar	9
1.2. Transmisión de la energía	11
1.3. Datos de radiación solar	19
1.4. Tipos y usos de instalaciones fotovoltaicas	27
<i>Lo más importante</i>	<i>31</i>
<i>Autoevaluación UD1.....</i>	<i>33</i>

UD2

Componentes que conforman las instalaciones solares fotovoltaicas

2.1. Componentes que conforman las instalaciones solares fotovoltaicas	37
2.2. Generador fotovoltaico	46
2.3. Estructuras y soportes	56
2.4. Acumuladores. Acumuladores electroquímicos	56
2.5. Reguladores	68
2.6. Inversores. El convertidor CC-CC	73
2.7. Inversores conectados a red y autónomos	78
2.8. Otros componentes.....	79
2.9. Aparatos de medida y protección	81
<i>Lo más importante</i>	<i>87</i>
<i>Autoevaluación UD2.....</i>	<i>89</i>

UD3

Emplazamientos y dimensionado de una instalación solar fotovoltaica

3.1. Optimización y elección de emplazamientos	93
3.2. Dimensionado de los emplazamientos por utilización y aplicación.....	106
3.2.1. Cálculo de sobrecargas	116
3.2.2. Estructuras y soportes para instalaciones fotovoltaicas	120
3.3. Cálculo de consumos	130
3.4. Dimensionado de una instalación con apoyo de aerogenerador y/o grupo electrógeno	133
3.5. Cálculo y dimensionado de una instalación fotovoltaica	136
<i>Lo más importante</i>	<i>177</i>
<i>Autoevaluación UD3.....</i>	<i>179</i>

UD4

Representación simbólica de instalaciones solares fotovoltaicas

4.1. Sistema diédrico y croquizado	183
4.2. Representación en perspectiva de instalaciones	184
4.3. Simbología eléctrica	186
4.4. Representación gráfica de circuitos eléctricos.....	203
<i>Lo más importante</i>	<i>205</i>
<i>Autoevaluación UD4.....</i>	<i>207</i>

UD5

Proyectos y memorias técnicas de instalaciones solares fotovoltaicas

5.1. Conceptos y tipos de proyectos fotovoltaicos	211
5.2. Análisis de viabilidad económica y Documento básico H5 del Código Técnico de Edificación	212
5.3. Presentación de Presupuestos	223
<i>Lo más importante</i>	231
<i>Autoevaluación UD5</i>	233



fotovoltaica

Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas

UD1

Funcionamiento general de las instalaciones solares fotovoltaicas

- 1.1. La energía solar
- 1.2. Transmisión de la energía
- 1.3. Datos de radiación solar
- 1.4. Tipos y usos de instalaciones fotovoltaicas



fotovoltaica

1.1. La energía solar

La vida en la Tierra no sería posible sin la existencia del Sol. Una estrella de tamaño pequeño, si la comparamos con otros soles cercanos, pero clave desde un punto de vista energético ya que no sólo nos suministra energía diariamente sino que ha sido capaz de acumular en la Tierra, mediante la generación de carbón, petróleo, gas natural y otros combustibles fósiles, energía suficiente durante millones de años en cada una de estas formas.

La estructura del Sol es compleja y no ha sido, sino en las últimas décadas, cuando se ha conocido con mayor precisión su verdadera composición. Las distintas capas de las que se compone el Sol tienen la característica de producir distinto tipo de energía. Además, la energía se transporta de forma distinta de una capa a otra. La energía solar se produce en el núcleo del Sol y tiene una extensión de sólo el 10% del volumen total del astro; recibe el nombre de núcleo. Rodeando al núcleo se encuentra la zona radiactiva donde la energía generada se transporta por radiación (mediante fotones).

A partir del 62% del radio nos encontramos la zona convectiva del Sol. En esta región se produce un transporte de energía por convección. Una vez que la energía llega a la superficie del Sol se vuelve a establecer el transporte por radiación. Recordemos que la energía se puede transmitir por conducción, convección o radiación.

La primera forma de transmisión del calor es la conducción. En este caso la transferencia de calor se realiza por contacto directo entre dos cuerpos. Los dos cuerpos deben encontrarse a temperaturas diferentes para que se produzca esta transmisión de calor. La cantidad de calor que atraviesa una superficie será directamente proporcional a esta superficie y a la diferencia de temperaturas, e inversamente proporcional a su espesor. La constante de proporcionalidad será el coeficiente de conductividad térmica. Está claro que a mayor conductividad térmica mayor será la cantidad de calor que pasa por unidad de tiempo entre los dos cuerpos.

La segunda forma de transmisión del calor es por convección. En este caso es el movimiento del aire el que se encarga de transmitir el calor. Suele ocurrir en sentido ascendente aunque la transferencia se puede realizar en múltiples direcciones.

La tercera forma de transmisión del calor es la producida por la emisión de ondas electromagnéticas. Estas ondas se pueden mover a través del espacio o de los materiales a velocidad de la luz. Una vez que la onda impacta contra cualquier cuerpo es absorbida. La radiación solar es el ejemplo más evidente de esta forma de transmisión de calor.

La clave para entender la producción de energía en el Sol está en los procesos radiactivos basados en la energía nuclear. La transformación de hidrógeno en helio

en el interior del Sol da lugar a una pérdida de masa que se transforma en energía según la fórmula:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Como resultado del proceso de generación de energía se producen rayos gamma y neutrinos. Según el proceso de combustión que se desarrolla dentro del núcleo solar la vida del Sol puede extenderse durante 10.000 millones de años. Al encontrarse a la mitad de su vida el 50% de esta combustión ya se ha producido.

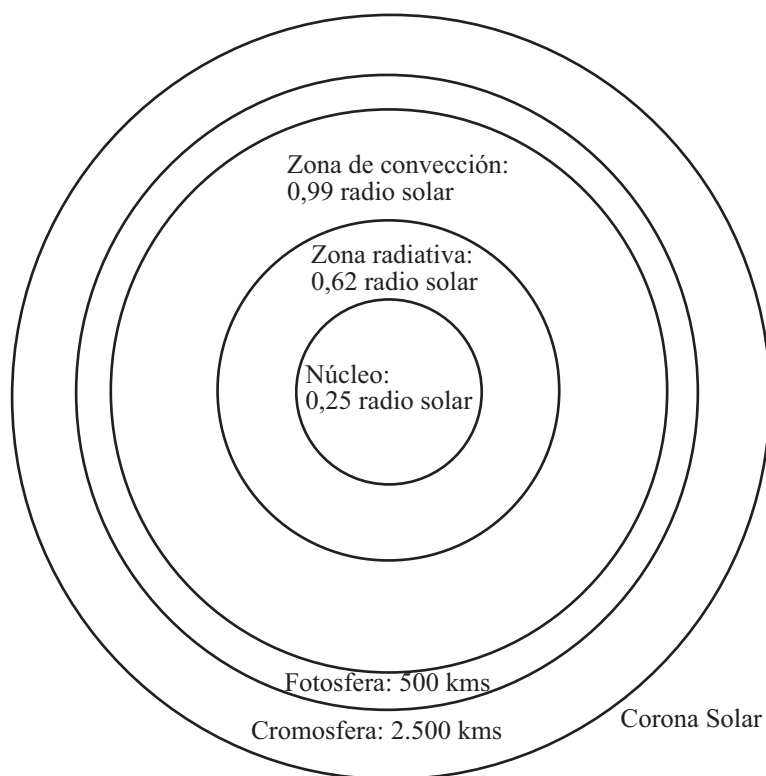


Figura 1.1. Distintas capas del Sol

Agotadas las reservas de hidrógeno comenzará el principio de su fin como fuente estable de generación de energía. La falta de combustible originará una contracción del Sol que originará un incremento de la temperatura del núcleo. Esta disminución del tamaño se producirá hasta que alcance un diámetro similar al de la Tierra, enfriándose lentamente hasta convertirse en una enana blanca. Esta última fase implicará unos pocos millones de años durante los cuales también irá desapareciendo la vida en la Tierra.

No obstante, el proceso de contracción solar puede originar grandes convulsiones solares que podrían hacer que la Tierra se volatilizara antes de que la vida del Sol llegara totalmente a su ocaso.

La energía solar que se produce en el núcleo solar realiza un largo viaje hacia la superficie del Sol. Al principio, como hemos indicado, la transmisión de la energía se realiza por radiación mediante fotones que van actuando con la materia en procesos de absorción y emisión. Además este será el sistema de transporte que utilizarán los fotones para atravesar el espacio y llegar hasta nuestro planeta y las placas solares fotovoltaicas. Sin embargo, esta forma de transporte no es el adecuado dentro del Sol ya que allí la materia resulta muy densa. El transporte de la energía en esta parte del Sol, por lo tanto, se realizará por convección.

Cuando se calienta un fluido desde abajo se producen corrientes ascendentes que transportan energía hasta las capas superiores, descendiendo a capas inferiores la materia más fría que tendrá una mayor densidad. Por lo tanto, para que exista convección deben existir dos fluidos en contacto, uno más frío y otro más caliente. Pero además es muy importante la densidad del fluido, ya que si este es muy denso la viscosidad del mismo impedirá la conductividad térmica. Grandes diferencias de temperatura entre distintas partes del fluido y baja viscosidad hará que la conductividad sea mayor y baja diferencia de temperatura y alta viscosidad originarán una conductividad baja.

Cuanto más fría sea una estrella la zona de convección será mayor, llegando a cubrir prácticamente toda la estrella. En el Sol esta zona se sitúa en la parte externa del astro.

La energía magnética que posee el Sol también es muy importante. A principios del siglo pasado se demostró que el astro dispone de un campo magnético que presumiblemente se originó durante su génesis. Este campo magnético es variable como consecuencia de un movimiento mecánico.

La variación temporal de la energía solar, por lo tanto, tendrá relación con las variaciones de energía nuclear, convectiva y magnética que se producen en el propio Sol. Estas variaciones originarán cambios en las formas de energía que se liberan al espacio, provocando viento solar, diferencias en la radiación visible y radiación de alta energía o ionizante.

1.2. Transmisión de la energía

En este apartado se tratarán de explicar o definir de forma muy sencilla distintas magnitudes y conceptos físicos que se manejan habitualmente en el cálculo de la radiación solar, entendiendo que una definición científicamente más exacta requeriría cierta precisión suplementaria, que se ha omitido intencionadamente por no considerarse de interés desde el punto de vista del técnico.

La radiación visible proviene directamente de los fotones que se escapan de la superficie solar. Viajan sin ninguna alteración por el espacio interplanetario hasta

que llegan a las capas más altas de la atmósfera terrestre. La capa de la que se escapan estos fotones desde el Sol, recibe el nombre de fotosfera o esfera de luz. Tiene 500 kms de espesor y una alta temperatura que provocan que la radiación emitida desde ella esté en la región visible del espectro electromagnético. Los ojos de los seres humanos son sensibles a este tipo de radiación. La radiación visible que emite el Sol no es uniforme en toda su superficie.

La evidencia de que el Sol emite un flujo continuo de materia en forma de viento provino de la observación de la cola de los cometas que se disponía en una dirección contraria al Sol. Después de comprobar que la temperatura en la superficie del Sol supera el millón de grados, parece lógico pensar que el gas proveniente de estas capas se puede expandir hacia el medio interplanetario.

Este viento está compuesto por protones, electrones y núcleos de helios que son expelidos al espacio a grandes velocidades. Si la estructura del campo magnético se ve alterada, cosa que ocurre con bastante frecuencia, se verterán grandes cantidades de materia al espacio interplanetario. La llegada de estas partículas a la superficie terrestre originaría graves consecuencias para los seres vivos. Afortunadamente el campo magnético de la Tierra actúa como auténtico escudo protegiendo la vida terrestre, cuando este fenómeno se produce.

En cuanto a la radiación de alta energía, esta recorre el camino hasta la Tierra a la velocidad de la luz, alcanzándola en sólo ocho minutos. Al contactar con las capas altas de la atmósfera las calienta expandiéndolas y provocando un aumento de su densidad. La radiación energética, junto a las partículas de alta energía contribuye a la formación de la ionosfera que es una capa situada entre los 60 y 200 kilómetros de altura que permite la reflexión de las ondas de radio. El paso de esta radiación, al igual que ocurre con las partículas, tendría efectos nefastos sobre los organismos vivos de la Tierra. En este caso la capa de ozono se encarga de protegernos de su acción.

A todos los efectos prácticos, es válido y resulta útil imaginar que el Sol describe cada día un arco sobre la bóveda celeste, desde el amanecer hasta el atardecer, cuya longitud, elevación y duración en el tiempo son distintas cada día y en cada latitud geográfica del planeta ya que la Tierra gira alrededor del Sol describiendo un movimiento de traslación que dura un año, 365 días. Además, la Tierra tiene un movimiento de rotación, girando sobre si misma, con una duración de un día. **(Ver imagen en la página siguiente):**

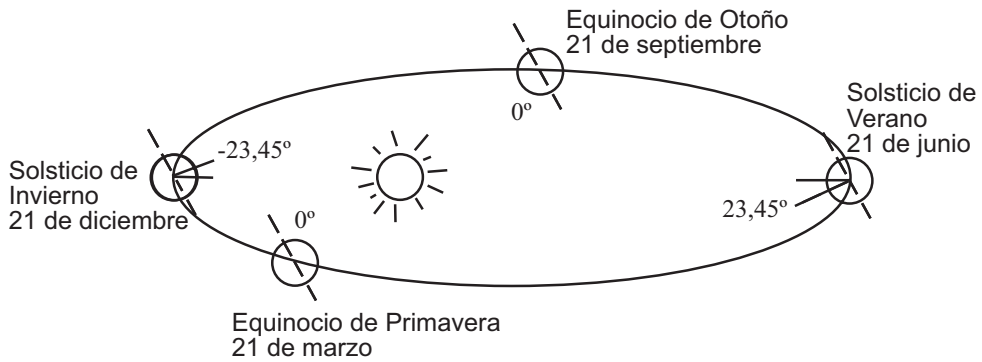


Figura 2.1. Inclinación del eje terrestre a lo largo de un año

El eje de rotación tiene un ángulo llamado de declinación que es el responsable de las estaciones y el clima en la Tierra. El *ángulo de declinación* es, por tanto, el que forma el plano del ecuador con la trayectoria solar. Este ángulo β oscila entre $-23,45^\circ$ y $23,45^\circ$ a lo largo del año según se indica en la figura 2.2.

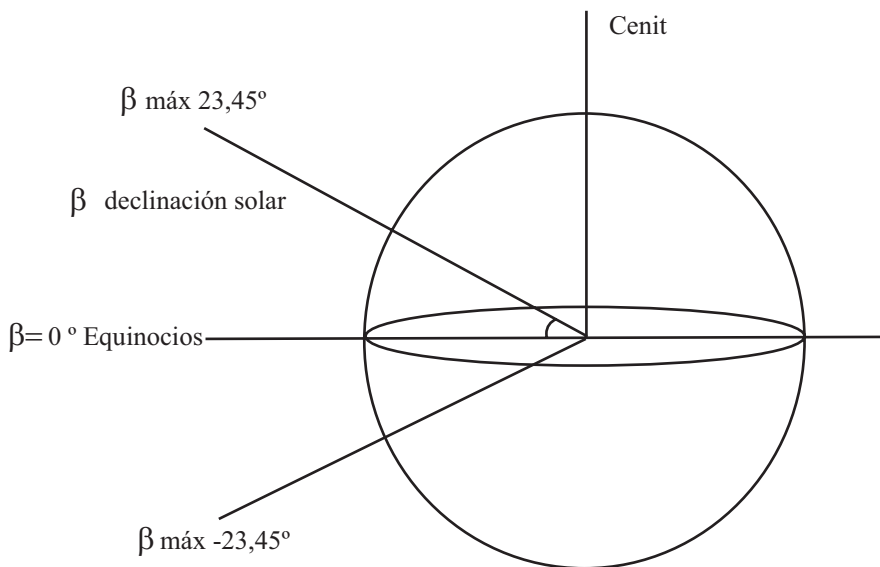


Figura 2.2. Distintos valores de los ángulos de la declinación solar

El ángulo de la declinación puede obtenerse por la fórmula de Cooper siguiente:

$$\beta = 23,45^\circ \operatorname{seno} \left[\frac{284 + n}{365} \cdot 360 \right]$$

Siendo “n” el día del año del 1 al 365.

A modo de ejemplo calcularemos el ángulo de declinación de la Tierra el día 6 de enero.

$$\beta = 23,45^\circ \operatorname{seno} \left[\frac{284 + 6}{365} \cdot 360 \right] = -22,54^\circ$$

Aparte de esta declinación debemos tener en cuenta que existen otros ángulos relacionados con la posición del Sol en cada instante. Como hemos visto anteriormente, el plano del ecuador oscilará dependiendo del momento en el año en el que nos encontremos. Supongamos, ahora, que estamos en uno de los dos equinoccios del año. Por lo tanto, la superficie del ecuador estará totalmente horizontal en relación a la radiación solar recibida. Esta representación puede verse en la figura 2.2.

En este caso tendremos una *altura solar* α que variará a lo largo de todo el día y un *ángulo cenital* que completará la altura solar tal y como queda representado en la figura 2.2.

Podemos, por lo tanto, definir el ángulo cenital θ como el ángulo que forma el Sol con el cenit que es el punto superior del hemisferio celeste que corresponde a un lugar de la Tierra.

La altura solar será el ángulo que forman los rayos del Sol con la superficie de la Tierra.

Esta altura también dependerá de la *latitud* Φ desde la que se esté realizando la observación, definiéndose esta, como el ángulo que forma la vertical del punto geográfico que se considere y el ecuador.

Otro importante ángulo que deberemos tener en cuenta a la hora de realizar una medición solar será el *ángulo azimutal* (azimut) ψ que es el ángulo entre el plano normal, a la superficie del captador desde el meridiano del lugar. Se toma como origen el Sur. Por lo tanto, el ángulo azimutal de 0° corresponderá con la orientación Sur.

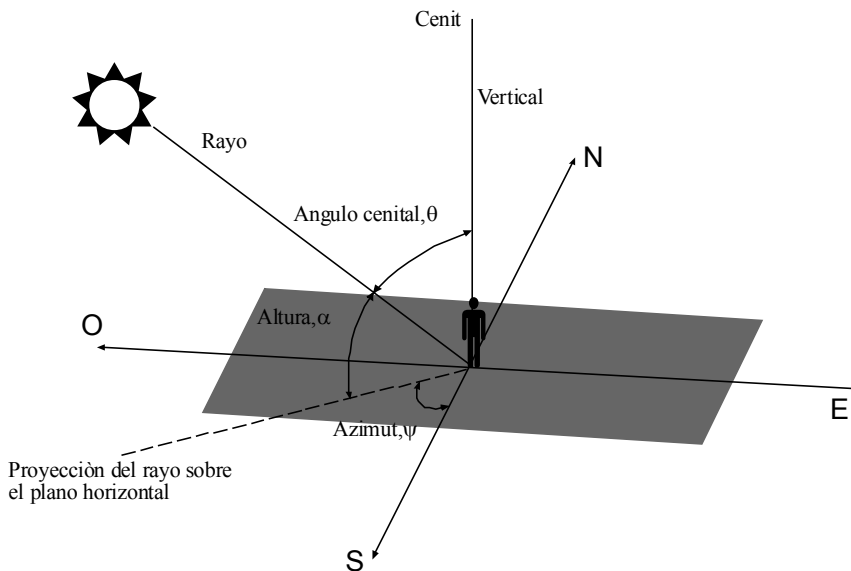


Figura 2.3. Ángulos que definen la posición del Sol en cada instante.

En la tabla 3.2 se resumen las principales definiciones en relación con la radiación solar y los distintos ángulos utilizables a la hora de realizar un cálculo solar.

El interés de conocer la posición relativa de la recta que une el Sol con el punto en la superficie terrestre desde el que se efectúa la observación, se debe a que las ondas energéticas provenientes directamente del Sol viajan hasta la superficie terrestre según la dirección de dicha recta y, por tanto, inciden sobre el suelo (o sobre otra superficie plana arbitrariamente posicionada como, por ejemplo, un panel solar) formando un ángulo cuyo valor afectará al valor de la intensidad de la radiación solar sobre la superficie.

La posición de un panel solar queda perfectamente determinada con otros dos valores angulares:

- ↻ El azimut del colector “ γ ” (ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del panel con el meridiano del lugar). El azimut del panel determina su orientación, siendo su valor cero si está orientado hacia el ecuador, que es lo ideal en el caso de sistemas estáticos.
- ↻ La inclinación del panel “ ϵ ” con respecto al plano horizontal.

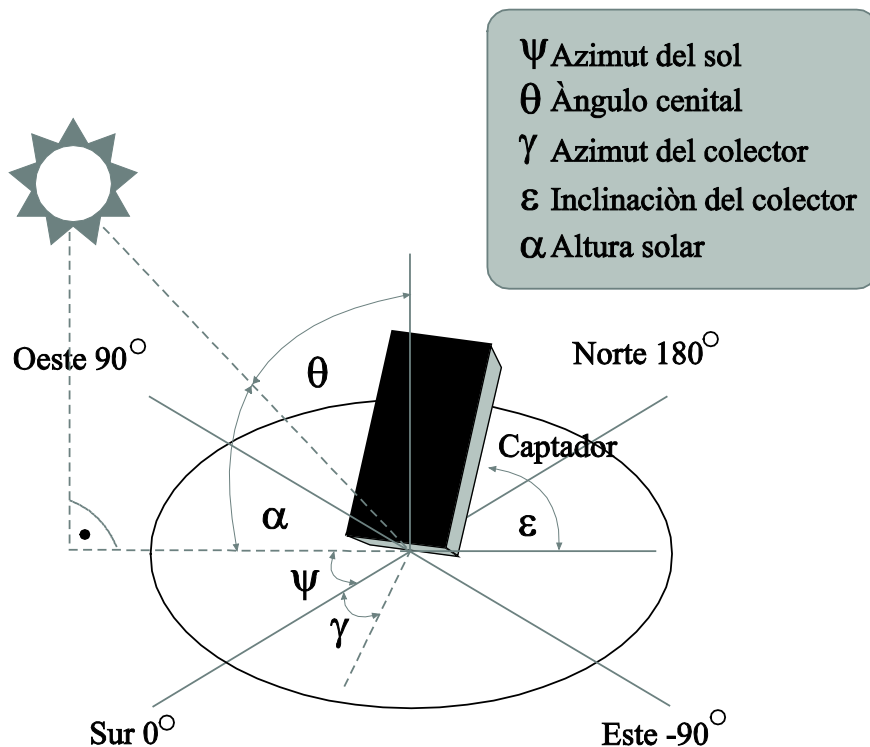


Figura 2.4. Ángulos que describen la posición del panel.

La altura solar máxima que puede alcanzar el Sol un día determinado dependerá, por tanto, de la latitud del emplazamiento y de la declinación solar. Por este motivo, empleando la siguiente expresión podremos calcular esta altura:

$$\alpha_{\text{máxima}} = 90^\circ - \text{latitud}(\phi) + \text{declinación solar}(\beta)$$

Como puede comprobarse empezamos suponiendo que ese día el Sol alcanzará su máxima altura posible, cenit. Después se corregirá este valor con la latitud del emplazamiento y la declinación solar que corresponda al día en el que se quiera realizar el cálculo.

Para verlo más claro vamos a calcular la altura máxima que alcanzará el Sol en la provincia de Lugo el día 2 de febrero. En primer lugar tendremos que calcular la declinación solar de la Tierra ese día:

$$\beta = 23,45^\circ \text{ seno} \left[\frac{284 + 33}{365} \cdot 360 \right] = -17,25^\circ$$

La latitud de la provincia de Lugo es $43,0^\circ$ N, por lo que la altura solar máxima ese día en Lugo será:

$$\alpha_{\text{máxima}} = 90^\circ - 43,0^\circ - 17,25^\circ = 29,75^\circ$$

Para conseguir que en ese momento un panel solar fotovoltaico se encuentre perpendicular a la radiación solar recibida deberá colocarse con la inclinación ε .

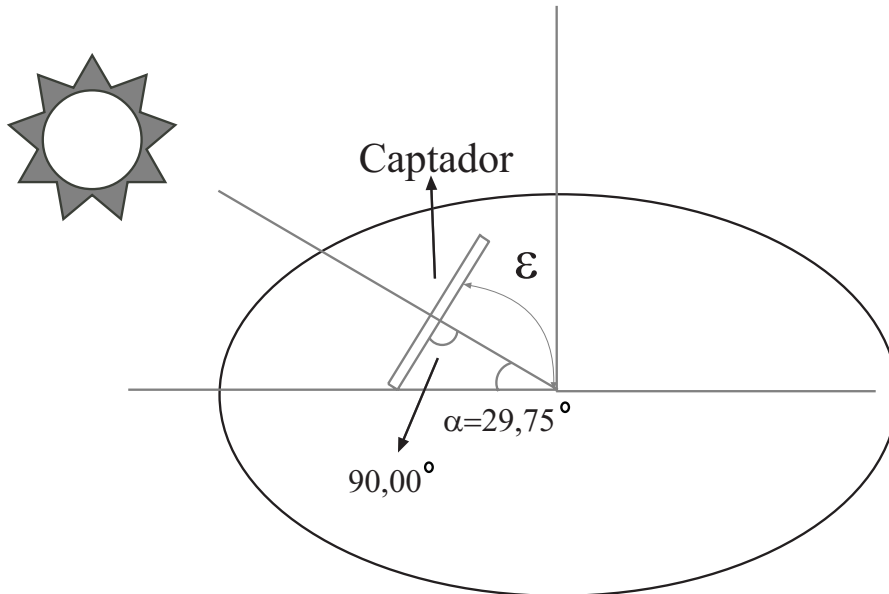


Figura 2.5. Cálculo inclinación óptima panel solar

La suma de los tres ángulos de un triángulo suman 180° . Dos de estos ángulos ya los tenemos determinados porque sabemos que la inclinación óptima del panel se consigue cuando la incidencia de la radiación solar es perpendicular al objeto interpuesto a esta radiación. Por lo tanto, sólo tendremos que sustituir en la siguiente expresión:

$$\varepsilon = 180^\circ - 90^\circ - 29,75^\circ = 60,25^\circ$$

La energía por unidad de tiempo proveniente de la radiación solar directa que puede recibir un panel es directamente proporcional al coseno del ángulo θ que forma el rayo con la normal a dicho panel. Por lo tanto, el caso más favorable se daría cuando en todo momento θ fuese igual a cero o un valor muy pequeño. Esto solamente puede conseguirse con sistemas de seguimiento total del Sol (esto solo ocurre para las instalaciones fotovoltaicas con sistemas de seguimiento donde el

panel mira constantemente al Sol desde el amanecer hasta el atardecer), mientras que en los sistemas estáticos (que corresponden a la mayoría de las instalaciones tanto térmica como fotovoltaica) se procura dotar a los paneles, siempre que sea posible, de una orientación e inclinación tales que, al menos en las horas centrales del día (que es cuando más energía se puede aprovechar), el ángulo θ sea lo más pequeño posible a lo largo de todo el año. Esto conduce a adoptar una orientación del panel hacia el ecuador y una inclinación cercana a la latitud del lugar, con algunas matizaciones que se verán más adelante.

Existen muchas situaciones, como cuando los paneles se integran en el mismo plano que la fachada de los edificios o cuando se disponen horizontalmente en la cubierta de los mismos, en que en la mayor parte del año el ángulo Φ se mantiene siempre mayor que un cierto valor " θ_{\min} ", esto suele conducir a un aumento de las pérdidas muy notable.

Otro factor que influye apreciablemente en la intensidad radiante directa que alcanza la superficie del panel es la absorción atmosférica.

Dicha absorción es mayor cuanto mayor sea el camino recorrido por el rayo desde que penetra en las capas superiores de la atmósfera hasta que llega al suelo. Cuando el Sol está bajo sobre el horizonte, los rayos inciden con mucha oblicuidad y la distancia recorrida, y consecuentemente también la absorción, será mayor que cuando la trayectoria sea vertical, siendo este último caso la mínima absorción posible, también denominada absorción a masa de aire unidad.

El concepto de masa de aire "AM" se introduce para comparar la cantidad de aire atmosférico que tienen que atravesar los rayos cuando inciden oblicuamente con la que atraviesan cuando inciden verticalmente ($AM = 1$).

La absorción atmosférica será AM veces mayor en el caso de incidencia oblicua en comparación con una incidencia vertical del rayo, disminuyendo la irradiancia sobre el suelo en la misma proporción.

Dado que cada tramo de recorrido oblicuo es $1/\cos\theta$ veces mayor que la longitud del correspondiente tramo de trayectoria vertical entre dos capas atmosféricas situadas a diferentes alturas, la Masa de Aire para un ángulo de incidencia θ será igual a $1/\cos\theta$.

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} = \frac{1}{\text{sen} \alpha}$$

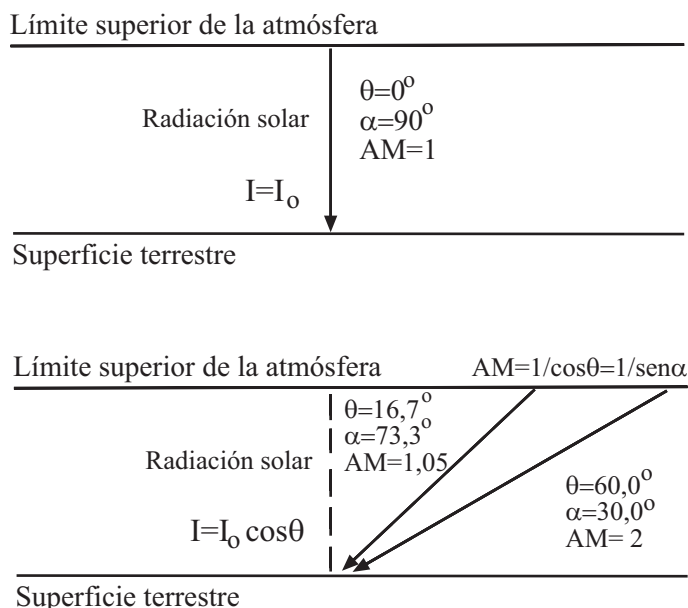


Figura 2.6. Ejemplos de cálculo de Masa de Aire

A diferencia de la orientación e inclinación del panel, las cuales se pueden intentar adecuar en lo posible (teniendo en cuenta limitaciones prácticas o de tipo arquitectónico) para conseguir que la irradiancia recibida por el panel sea máxima, el efecto de la absorción atmosférica (al igual que el de otras variables meteorológicas como, por ejemplo, la nubosidad) escapa por completo a nuestro control, por lo que la cantidad de energía solar que se recibe realmente en la superficie terrestre es siempre inferior a la que se recibiría justo por encima de la atmósfera.

1.3. Datos de radiación solar

Para entender el fenómeno de captación de la radiación solar por los sistemas solares fotovoltaicos se deberán conocer aspectos básicos relacionados con el trabajo, la energía y la potencia.

Para que se produzca un trabajo debe realizarse una transferencia de energía de una entidad a otra a través de una fuerza aplicada sobre una distancia. La unidad de fuerza en el sistema internacional de medida es el Newton (N), obteniéndose como el producto de la masa por la aceleración. Por lo tanto, la **fuerza** se define:

$$F(\text{Newton}) = m(\text{kg}) \cdot a(\text{m/s}^2) = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

La unidad de **trabajo**, en el sistema internacional, es el Julio (J) que se define como el trabajo realizado por una fuerza de un Newton cuando el objeto se desplaza un metro.

$$T(Julio) = F(Newton) \cdot s(m) = kg \cdot m / s^2 \cdot m = kg \cdot m^2 / s^2$$

$$1J(Julio) = 1N(Newton) \cdot m(kg)$$

La **energía** de un cuerpo es su capacidad para efectuar trabajo. Por lo tanto, los conceptos de trabajo y energía están estrechamente relacionados ya que la energía de un cuerpo se mide en función del trabajo que pueda desarrollar. La unidad de medida de trabajo es la misma que la de energía, el Julio.

El concepto de **potencia** es la rapidez con la que se desarrolla el trabajo. La unidad empleada para su medición es el Watio (W).

$$P(Watio) = \frac{T(Julio)}{t(s)} = \frac{kg \cdot m^2 / s^2}{s} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$$

La unidad de tiempo es inversamente proporcional al concepto de potencia. Por lo tanto, mientras más tiempo dediquemos a la realización de un trabajo, menor será la potencia de este. Otras medidas de potencia son el caballo de vapor CV que equivale a 736 W y el horse power HP cuya equivalencia con la unidad del sistema internacional es 746 W (esta unidad se utiliza en el Reino Unido). Además se pueden utilizar otra multitud de unidades equivalentes entre las que se encuentran la cal/s, la kcal/h, el kJ/h, el MJ/h.

La **radiación** será la forma en la que se traslada la energía térmica o calorífica a través del vacío y el espacio libre entre moléculas.

Si el cuerpo es negro, absorberá toda la energía radiante sobre él. Cuando existe equilibrio térmico un cuerpo emite una cantidad de energía igual a la que absorbe, por este motivo un buen captador de radiación es también un buen emisor de radiación. Por lo tanto, los colectores solares térmicos deben recubrirse con un cristal que provoque un efecto invernadero en el interior del mismo.

La unidad de medición de la radiación solar en los paneles fotovoltaicos es el W/m².

La energía solar llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas que son capaces de desplazarse por el espacio en cualquier dirección y sin ningún tipo de soporte. La radiación puede descomponerse en rayos infrarrojos, la luz y los rayos ultravioletas, que viajan en el espacio en las proporciones que figuran en la tabla 3.1.

Rayos gamma		Rayos ultravioletas		Luz visible		Rayos Infrarrojos	
W/m²	%	W/m²	%	W/m²	%	W/m²	%
14	1	54	4	662	49	620	46

Tabla 3.1. Radiación solar extraterrestre