

ANEXO V.4 FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR

1. Movimiento relativo entre Sol y Tierra

Nuestro planeta describe una órbita elíptica poco acusada¹¹⁸ en su traslación alrededor de su estrella, e invierte unos 365 días en completar un ciclo que llamamos año¹¹⁹. Esta trayectoria es la denominada *eclíptica*, que se eleva sobre el horizonte terrestre, y está comprendida en el plano homónimo común al sol y a la tierra. Además, el mundo, idealizado como una esfera, gira en torno a una

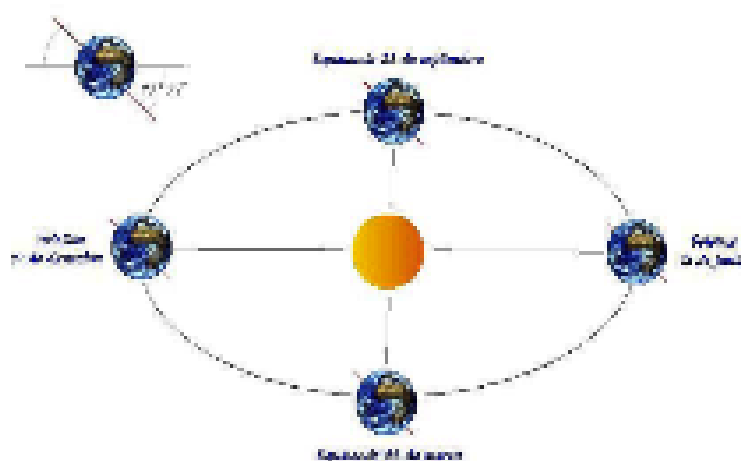


Figura V.4.1.1. Eclíptica. Fuente: al pié*

recta que lo atravesaría de norte a sur por su centro¹²⁰. Prescindiendo de sus movimientos giroscópicos de precesión (anticipación de los equinoccios a una velocidad de 50,25" al año debido al cambio de orientación) y de nutación (oscilación de los polos 9,2" al año por la atracción lunar), podemos afirmar que este eje rotacional se mantiene constantemente inclinado $23^{\circ} 27'$ respecto del plano eclíptico, pues apunta a la lejana estrella polar. Consecuentemente, el plano ecuatorial, al ser perpendicular al eje por su centro, conserva idéntica amplitud. La traslación circunsolar y la rotación inclinada, y no la mayor o menor cercanía al foco ardiente, dan lugar a las estaciones, pues los rayos

¹¹⁸ Con un radio medio de 149.504.201 Km (147 MKm en el perihelio y 152 MKm en el afelio). Como el sol arrastra consigo a la tierra hacia la estrella Vega, se origina un movimiento espiral de la órbita, imperceptible desde el globo.

¹¹⁹ Diferenciamos el *Año trópico* (el que transcurre entre dos pasos consecutivos aparentes del sol por los equinoccios), de 365 días, 5 horas, 48' y 48", del *Año civil*, de 365 ó 366 días.

¹²⁰ En realidad, el centro de gravedad no coincide con el geométrico, por la interacción del campo magnético lunar

* Fundamentos de energía solar. David Cabó González

solares, prácticamente paralelos cuando llegan a la tierra, inciden con distinta inclinación¹²² sobre un plano (que llamamos *horizontal*) tangente a la superficie por cada punto del planeta, dependiendo de la fecha.

Ello hace posible que el sol aparezca más alto en el verano austral y más bajo en el invierno boreal, y a la inversa, o que en los veranos polares no se ponga, pero no salga durante el invierno. En definitiva, el desplazamiento espacial del orbe aparenta ser, desde el punto de vista topocéntrico, el de su principal fuente radiante. Las leyes mecánicas que lo rigen quedan expresadas en grados sexagesimales gracias a la trigonometría esférica, cuyas variables, medidas desde el centro de la esfera terrestre, que hacemos coincidir con el de la celeste, son tres: la latitud, la declinación y el ángulo horario de cada momento.

1.1. Coordenadas ecuatoriales _____

La **latitud** (LAT) es el arco de meridiano que se extiende desde el ecuador hasta el paralelo local, con lo que aumenta de 0 a 90°. Como aparece en cualquier mapa, es fácil conocerlo directamente por la situación geográfica de un lugar. Por convención, se toman valores positivos para el hemisferio norte y negativos para el sur: LAT(N+, S-)

La **declinación solar** (DEC) es el ángulo comprendido entre el plano ecuatorial y el plano orbital terrestre. Se debe a la inclinación de 23° 27' que el eje rotacional del globo forma con la eclíptica. Varía según la fecha, de manera que se anula en los equinoccios de primavera y de otoño (el 22 de marzo, 81er día del año, y alrededor del 22 de septiembre, 284º día), y alcanza su cúspide en los solsticios, el 21 de junio (+23° 27') y el 21 de diciembre (-23° 27')¹²³. Recordemos que las estaciones son inversas en los hemisferios; así,

¹²² *Klima*, en griego antiguo, origen de la voz castellana *clima*.

¹²³ Las fechas pueden diferir según los años, ya que el calendario civil no se ajusta al solar.

el 22 de marzo se producen el otoño austral y la primavera boreal. La declinación solsticial a lo largo del día dibuja los trópicos de Cáncer en la bóveda septentrional, y de Capricornio en la meridional¹²⁴. Ello significa que la ocasión de encontrar el sol perpendicularmente sobre el suelo sólo es posible en la franja intertropical al mediodía: en los trópicos se da durante el solsticio estival (el 21 de junio a 23° 27' N y el 21 de diciembre a 23° 27' S); en el ecuador, durante los equinoccios (el 22 de marzo y el 22 de septiembre a una latitud 0°).

Spencer propone un complejo método de cálculo basado en la distancia entre ambos astros, pero para el estudio que nos ocupa se puede estimar aproximadamente con la fórmula de Cooper, en función del ordinal del día (DÍA) dentro del año civil, desde el 1º, el 1 de enero, hasta el 365º, el 31 de diciembre:

$$DEC = 23,45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360}{365} \cdot (DIA - 81) \right]$$

$$DEC = 23,45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360}{365} \cdot (DIA + 284) \right]$$

El **ángulo horario** (HOR) representa el arco orbital instantáneo del sol respecto del mediodía local (su localización a las 12:00 hora solar local, cuando se encuentra en el cenit). Como a lo largo del día recorre los 360° de la esfera celeste, corresponden 15° por cada hora transcurrida. El criterio internacional más extendido toma signo positivo para la mañana y negativo para la tarde, y lo refiere a la hora solar local (HSL), de manera que el ángulo horario para el mediodía (12:00 hsl) es nulo, para las 6:00 hsl vale +90°, a las 18:00 hsl, -90° y a la medianoche (0:00 hsl) alcanza ±180°:

$$\boxed{HOR = 180 - 15 \cdot HSL}$$

¹²⁴ Las denominaciones *boreal*, *septentrional*, *norte*; *austral*, *meridional*, *sur*, así como *ártico*; *antártico*, son herencias de las civilizaciones clásicas mediterráneas, cuyo concepto cosmográfico era el mundo entonces conocido. Aunque generalmente exponemos las orientaciones para un habitante de nuestra mitad boreal, reconozcamos los vocablos *polar* como *norte* en Europa y *sur* en Australia, y *ecuatorial* como *sur* en Europa y *norte* en Australia

Para mayor comodidad, todos estos ángulos, y los que aparezcan en adelante, irán referidos a la unidad sexagesimal, con lo que los minutos y segundos se indicarán como fracciones de grado ($1' = 0,0167^\circ$).

1.2. Coordenadas solares

El Hombre, en su calidad de observador del firmamento desde el globo, concibe la tierra que pisa como un plano horizontal tangente respecto del que refiere las posiciones de los distintos cuerpos celestes. Sobre su cabeza erige el cenit y, bajo sus pies, establece el nadir. Si está en una latitud norte y mira perpendicularmente a la línea del ecuador, encuentra de cara el sur o mediodía; a sus espaldas deja el norte o septentrión; su costado izquierdo saluda al este o levante, y con el derecho apunta al oeste o poniente. En derredor, el suelo se pierde en el horizonte infinito. Con tales señas, es capaz de fijar el emplazamiento del divino Ra con el fin de conocer la inclinación con que llegan sus rayos a cualquier superficie. Basta un gnomon. Son dos las coordenadas helioscópicas: el ángulo de elevación sobre el horizonte, o altura solar, y el recorrido horizontal, o acimut solar. Ambos están en función del tiempo y del lugar en que se definen, pues se subordinan a los ángulos topocéntricos anteriormente definidos.

La **altura solar** (ALT) comienza en 0° al amanecer, culmina al mediodía con el valor $90^\circ - \text{LAT} + \text{DEC}$ y termina en 0° al atardecer. Por su expresión mediante el teorema del seno se infiere que su signo es positivo durante el día y negativo para la noche:

$$\boxed{\text{ALT} = \arcsen(\text{senLAT} * \text{senDEC} + \text{cosLAT} * \text{cosDEC} * \text{cosHOR})}$$

Es posible tomar como índice el **ángulo cenital** (ZEN), complementario de la altura:

$$\text{ZEN} = 90^\circ - \text{ALT} \quad \text{senALT} = \text{cosZEN} \quad \text{cosALT} = \text{senZEN} \quad \text{tanALT} = \text{cotanZEN}$$

$$\boxed{\text{ZEN} = \arccos(\text{senLAT} * \text{senDEC} + \text{cosLAT} * \text{cosDEC} * \text{cosHOR})}$$

El **acimut solar** (AZI) marca como origen el mediodía, cuando HOR = 0°, a las 12:00 hora solar. Existen varias ecuaciones para su cálculo, pero hay que elegir una que discrimine un ángulo mayor que 90°. Aun así, para la integración en programas informáticos sencillos es necesario aplicar el criterio de signos en relación con los del ángulo horario (positivo al levante y negativo al poniente):

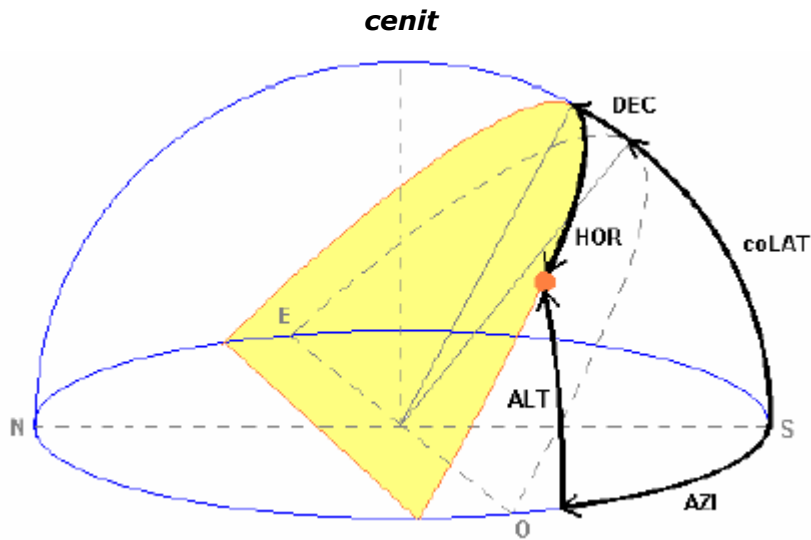


Figura V.4.1.2. Altura solar. Fuente: al pié*

$$AZI = \arcsen\left(\frac{\cos DEC \cdot \sen HOR}{\cos ALT}\right)$$

$$AZI = \arccos\left(\frac{\sen LAT \cdot \sen ALT - \sen DEC}{\cos LAT \cdot \cos ALT}\right) \cdot (\pm 1)$$

$$AZI = \arccos\left(\frac{\sen LAT \cdot \sen ZEN - \sen DEC}{\cos LAT \cdot \cos ZEN}\right) \cdot (\pm 1)$$

* Fundamentos de energía solar. David Cabó González

1.3. Coordenadas horarias _____

Es muy útil para el estudio de la insolación determinar las horas de salida y de puesta del sol por el horizonte, o la duración del día que media entre ambas, pues supondrán un registro básico de deducciones. Su cómputo es independiente de que se utilice la hora solar o la hora oficial.

Los ángulos horarios del orto y del ocaso sobre un plano horizontal (HOR_{orto} y HOR_{ocaso}) puntualizan la localización de Febo en dichos instantes:

$$HOR_{orto} = \arccos(-\tan LAT \cdot \tan DEC) \quad HOR_{ocaso} = -\arccos(-\tan LAT \cdot \tan DEC)$$

El momento del amanecer u **hora del orto** (HSL_{orto}) concuerda con una altura solar nula por el este. El momento del atardecer u **hora del ocaso** (HSL_{ocaso}) coincide con una altura solar nula por el oeste. Las **horas teóricas de sol** (HTS)¹²⁶ comprenden la suma de las horas transcurridas con Apolo en la bóveda celeste, entre el amanecer y el atardecer del día considerado:

$$HSL_{orto} = 12 - \frac{HOR_{orto}}{15} \quad HSL_{ocaso} = 24 -$$

$$HSL_{orto}$$

$$HTS = 2 \cdot \frac{HOR_{orto}}{15} \quad HTS = HSL_{ocaso} -$$

$$HSL_{orto}$$

Calculamos el acimut al orto y al ocaso sabiendo que $ALT = 0^\circ$:

$$AZI_{orto} = \arccos\left(\frac{-\sin DEC}{\cos LAT}\right) \quad AZI_{ocaso} = -\arccos\left(\frac{-\sin DEC}{\cos LAT}\right)$$

¹²⁶ Cuantía comúnmente denominada *N*.

1.4. Coordenadas topográficas _____

Dado que al horizonte aparecen, normalmente, relieves geográficos, figuras geométricas espaciales y elementos arbóreos o arbustivos que ocultan el disco solar, el amanecer puede postergarse, el atardecer, anticiparse, o el apogeo, obstaculizarse en alguna época del año. La acotación de toda prominencia, por radiación de haces proyectivos desde un teodolito estacionado en el lugar estudiado, describirá la sección invisible de la cúpula astral y posibilitará su representación en un georama.

Para ello disponemos de dos rangos de datos medidos directamente sobre el terreno: el **acimut topográfico** (ACI), cuyo origen se sitúa preferiblemente en el sur, con condiciones idénticas a las del acimut solar, y el **cenit topográfico** (CEN), que arranca de la vertical local. Ahora bien, como los teodolitos mensuran las distancias esféricas en grados centesimales¹²⁷, será imprescindible convertir sus resultados en grados sexagesimales para trabajar con mayor desahogo. Si 100^g equivalen a 90° , 1^g comprenderá $54'$.

$$D[^\circ] = 0,9 \cdot G[g]$$

Además es recomendable, en caso de utilizar el ángulo de altura solar (ALT), tomar en correlación el arco complementario del cenit topográfico, que llamamos **elevación topográfica** (ELE), y que vale $90 - \text{CEN}$. Igualmente, deberemos trabajar con los ángulos acimutales suplementarios $\text{ACI} - 180^\circ$ si el aparato los calibra desde el norte y en aumento hacia el este.

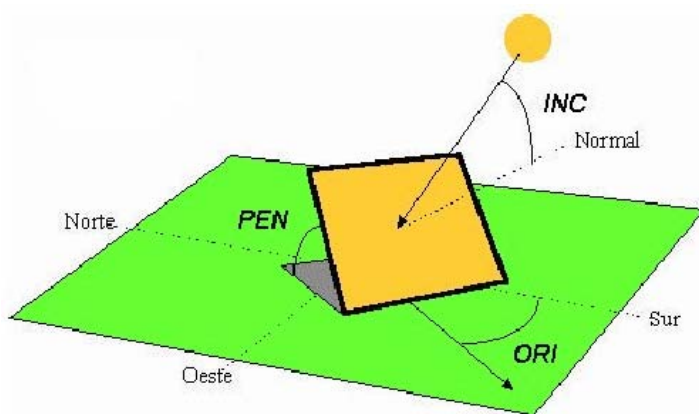
 ACI_{este}^-
 ACI_{oeste}^+
 CEN_{htal}^0
 CEN_{vcal}^{90}

¹²⁷ Entre técnicos se impone la denominación *gradianes*

1.5. Coordenadas relativas

Dado que analizaremos el alcance de los rayos solares sobre las distintas superficies de la tierra, es imprescindible conocer la posición de éstas respecto del sistema de coordenadas solares que hemos establecido. La **orientación** (ORI) define el rumbo acimutal que una superficie se separa del sur. Nulo en el mediodía exacto y creciente, por tanto, a medida que se acerca al norte (180°). Mantendremos el régimen de signos del acimut solar y del ángulo horario: negativo al este y positivo al oeste.

La **pendiente** (PEN) precisa el levantamiento angular de dicha superficie respecto del plano horizontal, tangente a la tierra, sobre el que se apoya. Será, consecuentemente, de 0° si reposa tendida, a



90° cuando permanezca erguida. El **ángulo de la normal a la superficie** (NOR), que se alza perpendicularmente sobre ella, es aquél en

Figura V.4.1.3. Coordenadas relativas. Fuente: al pié* que la incidencia solar sería mayor. Colocada horizontalmente, la normal apunta al cenit local (90°), sea cual sea la orientación: $NOR = 90^\circ + PEN$

El **ángulo de incidencia solar** (INC) especifica la divergencia entre los rayos solares y la Normal a la cara estudiada. Cuanto más se aproximen aquéllos a la perpendicular, menor incidencia resultará, de manera que si caen formando 90° contra la superficie, la divergencia será 0°. Este arco se interpreta en coordenadas esféricas, en función de la altura y el acimut solares y de la pendiente y la orientación de la superficie:

$$INC = \arcsin[\sin ALT \cdot \cos PEN + \cos ALT \cdot \sin PEN \cdot \cos(AZI - ORI)]$$

* Fundamentos de energía solar. David Cabó González

$$INC = \arccos[\cos ZEN \cdot \cos PEN + \sin ZEN \cdot \sin PEN \cdot \cos(AZI - ORI)]$$

2. Representación gráfica de la posición solar

Es posible escenificar en gráficos la posición solar variable a lo largo del tiempo y para cada latitud mediante varios tipos de diagramas. Normalmente, reducimos el trabajo a unas fechas útiles y relevantes: los solsticios y equinoccios, pues reproducirán la banda de incidencia

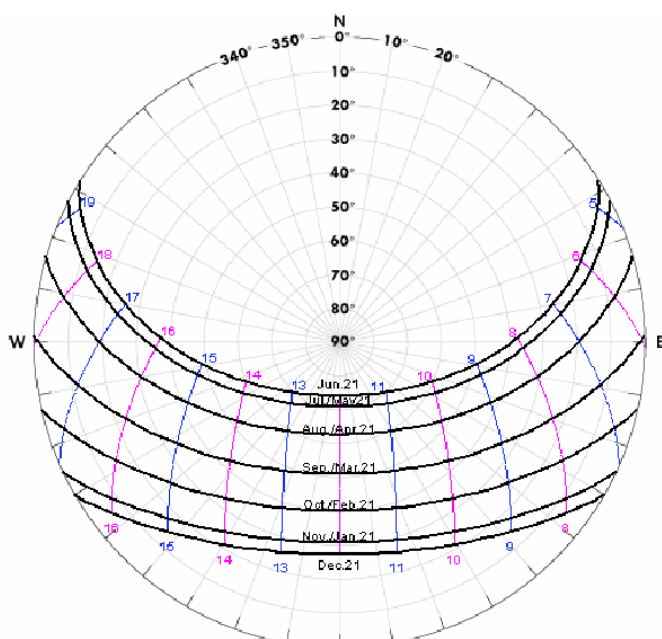


Figura V.4.2.1. Carta solar estereográfica. Fuente: Satel Light

solar, un área clave para el aprovechamiento de la radiación. Los más utilizados son el estereográfico y el cilíndrico, sobre los que podemos dibujar también el relieve de los obstáculos circundantes:

La **carta solar estereográfica** se levanta a partir de la proyección cónica de las

posiciones solares. La intersección entre la línea sol-nadir y el plano horizontal local a lo largo de un día va trazando un recorrido segmentado en hitos horarios. En la práctica, basta con dividir el radio de un círculo en intervalos iguales de suerte que la circunferencia exterior reproduzca el horizonte (ALT=0° o ZEN=90°) y el centro, el cenit (ALT=90° o ZEN=0°).

En la Fig. V.4.2.1. se muestra la Carta solar estereográfica, con origen acimutal en el norte, para la zona central de la Península Ibérica. Y en la Fig. V.4.2.2. la Carta solar cilíndrica para la misma zona, con origen acimutal en el norte.

En el estereograma iremos marcando por cada hora solar, y con el criterio direccional descrito, el acimut (angularmente) y la altura (radialmente) que correspondan al emplazamiento de nuestra estrella.

La **carta solar cilíndrica** muestra el recorrido aparente del sol en un cilindro alrededor del observador (proyección cilíndrica), que luego se despliega en el plano. En este caso, el acimut y la altura solares se describen rectangularmente en la malla. En el eje de abscisas figura la orientación angular horizontal, y en el de ordenadas, la levación angular.

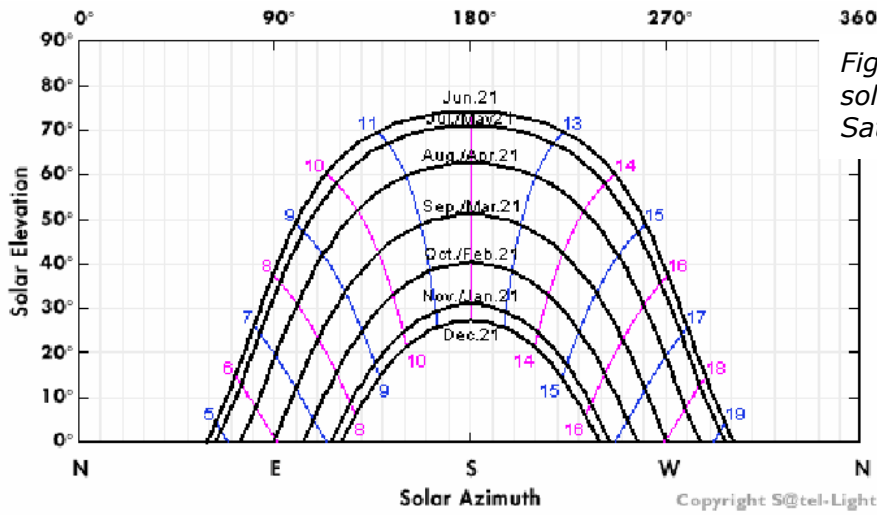


Figura V.4.2.2. Carta solar cilíndrica. Fuente: Satel Light.

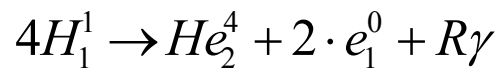
3. La Radiación Solar



Fuente: Al pié

3.1. Análisis físico

El sol se compone, principalmente, de hidrógeno (90%) y helio (7%), los elementos primigenios de la materia. En él se producen fusiones nucleares en que el primero de ellos se transforma en el segundo; por este proceso, el 0,73% de la materia se convierte en energía, que se manifiesta en forma de rayos gamma:



Estas ondas, similares a la de los rayos X, pero de menor longitud, interactúan con la materia solar en su desplazamiento hacia la cromosfera y se van tornando en radiaciones de variada amplitud: ultravioleta (UV), visible (V) e infrarroja (IR), un espectro que alcanza su máxima intensidad en la luz amarilla verde, con una longitud de onda de 0,55 μm . La región espectral IR cercana, extendida entre 0,70 y 3,5 μm , contiene el 53% de la radiación emitida por el sol. La luz visible (de 0,40 a 0,70 μm) transmite el 38%, y la UV (0,29 a 0,40 μm), el 9% restante. La energía que el sol emite al espacio no es sino radiación electromagnética, capaz de desplazarse en ausencia de materia, en el vacío. Y llega perpendicularmente a la superficie exterior de la atmósfera con una intensidad media de 1353 w/m². Es lo que llamamos **intensidad constante solar** (I_{CS}), poco variable estacionalmente y que aumenta sensiblemente en períodos de manchas solares:

$$I_{CS}=1.353 \text{ w/m}^2$$

* Fundamentos de energía solar. David Cabó González

La **intensidad de la radiación solar extraterrestre** (I_{EH}) varía entre 1.398 w/m² en el perihelio (3 de enero) y 1.310 w/m² en el afelio (6 de julio). Esta oscilación anual de ±3,35% se representa como una función sinusoidal estimable para cualquier día del año mediante la siguiente expresión, que se puede simplificar tomando como variable la declinación:

$$I_{EH} = I_{CS} \cdot \left[1 - 0,0335 \cdot \text{sen} \left(\frac{360}{365} (DÍA - 95) \right) \right] \qquad I_{EH} = I_{CS} - 1,93 \cdot DEC$$

Pero la energía que alcanza la superficie terrestre es de unos 1.000 w/m², por el efecto de reflexión, difusión y absorción de la materia atmosférica (nubes, polvo, vapor de agua, polución,

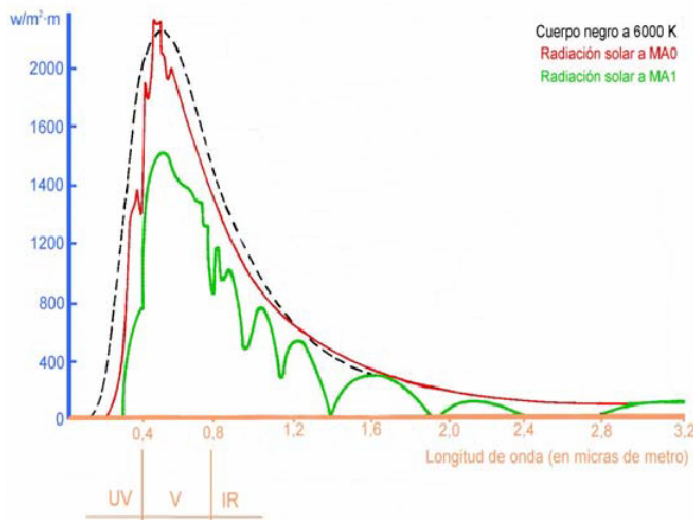


Figura V.4.2.3. Intensidad radiación solar extraterrestre. Fuente: Nota al pie.

aerosoles, dióxido de carbono y otros gases). Ya la deteriorada capa de ozono estratosférico rechaza la mayor cantidad de los penetrantes rayos ultravioleta, nocivos para los tejidos de los seres vivos. La presencia de vapor de agua y, en menor medida, de

anhídrido carbónico en las capas bajas de la atmósfera explica las franjas de absorción del infrarrojo cercano.

Una parte de la radiación extraterrestre se devuelve al espacio, y la que logra atravesar los gases retenidos por la gravedad terrestre queda reducida, en su tropiezo con partículas y moléculas, a unos 900 w/m², de los que sólo el 3% es ultravioleta, el 57%, visible y el 40% restante, infrarrojo.

* Fundamentos de energía solar. David Cabó González

La radiación final depende de la composición de la atmósfera y de la longitud del camino recorrido por los rayos del sol, que medimos en masa atmosférica. La *masa de aire* (MA) es la razón de cantidad de masa gaseosa que la radiación solar atraviesa hasta llegar al suelo, respecto de la que recorren cenitalmente los rayos solares en el nivel del mar a una presión inicial (P_0) de 1 bar, que es la menor trayectoria posible (MA_1). En el límite de la atmósfera será, evidentemente, cero (MA_0). Aumenta cuando disminuye la altura del sol y decrece en cuanto la presión es menor:

$$MA_n = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\text{sen}ALT}$$

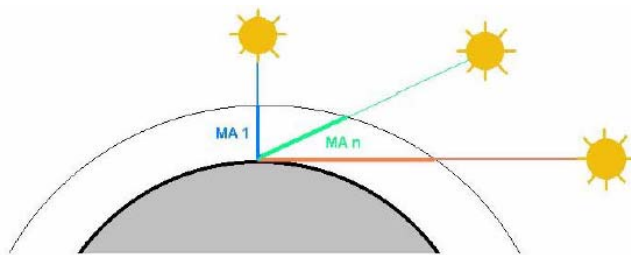


Figura V.4.2.4. Error por la curvatura de la atmósfera. Fuente: Nota al pie.

Esta fórmula, que nos basta para aproximaciones, adolece de un ligero error a alturas solares bajo los 5° ,

debido a la curvatura de la atmósfera. Por otro lado,

como la presión atmosférica disminuye con la altitud de un lugar, Bliss presenta una expresión que corrige la anterior, válida hasta 4000m de altitud (COT):

$$\frac{P}{P_0} = e^{-0,00012 \cdot COT}$$

Cuando los rayos solares cruzan la atmósfera, su espectro se modifica no sólo porque la capa de ozono absorba la mayoría de la radiación ultravioleta, sino porque, además, las moléculas de aire, especialmente oxígeno y nitrógeno, difunden la región visible de onda corta cuyo tono característico perceptible por el ojo humano es el azul.

* Fundamentos de energía solar. David Cabó González

El fenómeno se conoce como *difusión de Rayleigh* y es el motivo por el que vemos el cielo de ese color. El matiz rojizo en las salidas y puestas de sol y luna se debe a que, al ser el recorrido mayor, la luz pierde casi todo su azul. Tal cantidad de masa de aire causa, además, el efecto óptico de agrandamiento de los astros.

3.2. Estimación _____

Primero, diferenciamos dos conceptos técnicos esenciales en este estudio:

La **irradiancia solar** (I) es la potencia irradiada por el astro incidente sobre una superficie plana. Denota la intensidad de las radiaciones solares que la tierra recibe en un instante. Suele medirse en w/m^2 ; recordemos que $1 w/m^2$ corresponde a $3,6 KJ/h \cdot m^2$ o a $0,86 Kcal/h \cdot m^2$.

La **irradiación solar** (R) expresa la energía procedente del sol que una superficie plana capta durante de un determinado período. Esto es, la irradiancia solar integrada desde el orto hasta el ocaso. Su unidad más común es el $w \cdot h/m^2$, equivalente a $3,6 KJ/m^2$ o a $0,86 Kcal/m^2$.

3.2.1. Bases de datos meteorológicas

Como hemos visto, dos tercios de la radiación global (I_G) que alcanza la tierra son ondas que el ojo humano puede captar. Ha llegado bien directamente (sin cambios de dirección), bien por difusión a lo largo del aire, o por reflexión en otras superficies. Como es lógico, en un día soleado predominará la radiación directa (I_N) y en uno nublado, la difusa (I_D), mientras que la reflejada (I_R) depende siempre del albedo¹³² del entorno, y es muy importante en zonas nevadas y desérticas:

$$I_G = I_N + I_D + I_R$$

¹³² Porción de energía incidente difundida por un cuerpo. La tierra, en conjunto, tiene un albedo del 30%.

Dado que de ella dependen los sistemas de aprovechamiento solar, recurrimos a medirla con heliógrafos¹³³, piranómetros¹³⁴ y pirheliómetros¹³⁵.

Las estaciones de medida se distribuyen para realizar, a partir de sus datos, mapas generales de insolación y de radiación solar. Sin embargo, su número es insuficiente para conformar una deseable cartografía microclimática. La variación en el régimen de nubosidad, la exposición a los vientos, los saltos térmicos, la altitud... singularizan la climatología.

El modo habitual de reseñar la radiación es referirla a un plano horizontal, pues tal es la posición normal de los instrumentos de valoración, salvo en estaciones importantes, donde ya se comienza a computar también la captación inclinada. La particularidad de esta superficie tendida es que no recibe rayos reflejados:

$$I_{GH} = I_{NH} + I_{DH}$$

Desafortunadamente, los registros radiométricos solares en suelo no están disponibles para cualquier lugar y las interpolaciones isométricas pueden acarrear numerosos errores al no tener en cuenta el microclima.

Desde hace pocos años, especialmente desde que el Instituto Nacional de Meteorología exige un desembolso por sus informaciones a los usuarios y reclama la autoría de cualquier publicación que las incluya, la medición por satélite es una alternativa fiable y cómoda para conseguir los datos. Con esta técnica operan la institución europea Satel-Light y la estadounidense NASA, cuya red controla todo el orbe y ofrece informes a cambio de archivarnos en sus ficheros.

¹³³ Aparato para mensurar la duración de la insolación en horas efectivas de sol.

¹³⁴ Radiómetros que evalúan la radiación hemisférica solar total, tanto en componente directa como difusa.

¹³⁵ Instrumentos para registrar la intensidad de la radiación directa que llega del sol.

3.2.2. Método directo de estimación

La diversidad de procedimientos para cifrar aproximadamente las **irradiancias sobre planos horizontales** (I_{GH} , I_{NH} , I_{DH}), es considerable. Incluso la iluminancia¹³⁶ y la insolación¹³⁷ son valores alternativos muy útiles que pueden servir en caso de necesitar tanteos.

Pero en este caso, reuniendo las referencias precisas, suministradas por los servicios SSED (Surface Solar Energy Data¹³⁸), de la NASA, y *Satel-Light Method*¹³⁹, vinculado a la Unión Europea, nos limitaríamos a valuar las intensidades solares instantánea y diferida en el tiempo, incidentes sobre una superficie con una orientación y una inclinación determinadas, en porciones directa, difusa y reflejada.

a) Calcularemos la **irradiancia directa inclinada** (I_{NI}) a partir de los valores de la horizontal, en función de los arcos de altura e incidencia solares, razonados en [1.2] y [1.5]:

$$I_{NI} = I_{NH} \cdot \frac{\cos INC}{\sin ALT}$$

Si se diera un ángulo de elevación del terreno o de otro obstáculo mayor que la altura solar ($ELE > ALT$), no habría incidencia directa de los rayos, es decir, el sol quedaría eclipsado.

b) La **irradiancia difusa inclinada** (I_{DI}) aplica a la horizontal el valor de la pendiente de la superficie [1.5]:

$$I_{DI} = I_{DH} \cdot \frac{1 + \cos PEN}{2}$$

En el caso de encontrar frontalmente una pantalla, la fracción difusa quedará reducida al presentarse una menor bóveda celeste:

¹³⁶ Intensidad lumínica sobre una superficie, medida en Klux/m².

¹³⁷ Tiempo en que luce el sol con más del 90% del cielo despejado, medido en horas.

¹³⁸ <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

¹³⁹ <http://www.satel-light.com/indexs.htm>

$$I_{DI} = I_{DH} \cdot \frac{1 + \cos(PEN + ELE)}{2}$$

c) Para estimar la **irradiancia reflejada inclinada** (I_{RI}) nos referiremos a la global horizontal (I_{GH}) afectada por la pendiente del plano y por el albedo coeficiente de reflexión (ρ):

$$I_{RI} = \rho \cdot I_{GH} \cdot \frac{1 - \cos PEN}{2}$$

En esta ocasión, si aparece un obstáculo más elevado que el sol, solamente se reflejan los rayos indirectos de una bóveda menguada:

$$I_{RI} = \rho \cdot I_{DH} \cdot \frac{1 - \cos(PEN + ELE)}{2}$$

d) Recopilando las tres ecuaciones reunimos la **irradiancia global inclinada** (I_{GI}):

$$[w/m^2] \quad \boxed{I_{GI} = I_{NI} + I_{DI} + I_{RI}}$$

e) La **irradiación** se hallará fácilmente con la media integrada de las irradiancias elaboradas por intervalos de tiempo. Así, todo un día se habrá ido dividiendo en tramos de una hora, y en cada uno se habrá ido anotando en w/m2 la pertinente intensidad solar media. Al cabo de las 24 horas sumaremos todos los registros horarios y dividiremos entre dos:

$$R = \int_{t=HSS}^{t=HPS} I \cdot dt$$

$$\boxed{R = \frac{\sum_{00h}^{24h} I \cdot t}{2}}$$

Necesitaremos, pues, conocer las intensidades solares horarias (I_{NH} , I_{DH}) al cabo de un día representativo, que se ofrecen en las citadas tablas.

Al igual que la irradiancia, se compone de tres partes:

$$R_{GI} = R_{NI} + R_{DI} + R_{RI}$$

f) La **irradiación directa horizontal** (R_{NH}) y la **irradiación directa inclinada** (R_{NI}) quedarán determinadas por sus respectivas medias integradas de la irradiancias directas:

$$\boxed{R_{NH} = \frac{\sum_{00h}^{24h} I_{NH} \cdot t}{2}}$$

$$\boxed{R_{NI} = \frac{\sum_{00h}^{24h} I_{NI} \cdot t}{2}}$$

g) La **irradiación difusa horizontal** (R_{DH}) y la **irradiación directa inclinada** (R_{DI}) se hallan a partir de las intensidades homónimas:

$$R_{DH} = \frac{\sum_{00h}^{24h} I_{DH} \cdot t}{2}$$

$$R_{DI} = \frac{\sum_{00h}^{24h} I_{DI} \cdot t}{2}$$

h) La **irradiación reflejada inclinada** (R_{RI}) se obtiene con la irradiancia reflejada inclinada:

$$R_{RI} = \frac{\sum_{00h}^{24h} I_{RI} \cdot t}{2}$$

i) En fin, la **irradiación global horizontal** (R_{GH}) y la **irradiación global inclinada** (R_{GI}) se calculan bien por integración de las irradiancias globales, bien por suma de las anteriores porciones:

$$R_{GH} = \frac{\sum_{00h}^{24h} I_{GH} \cdot t}{2}$$

$$R_{GI} = \frac{\sum_{00h}^{24h} I_{GI} \cdot t}{2}$$

$$[w \cdot h / m^2] \quad R_{DH} + R_{NH} = R_{GH} \quad R_{RI} + R_{DI} + R_{NI} = R_{GI}$$

3.2.3. Método empírico de estimación

Si, como ocurre a menudo, el único dato facilitado fuera la **irradiación global sobre superficies horizontales** (R_{GH}), podríamos emplear el método de Liu y Jordan actualizado, basado en hallar los factores directo y difuso a partir de una fórmula aproximada para nuestras latitudes, aunque no juzga las condiciones climáticas particulares.

a) Calculamos la **Irradiación Extraterrestre Horizontal** (R_{EH}) integrando entre la salida y la puesta del sol la irradiancia solar extraterrestre horizontal (I_{EH}) expuesta en [3.1]:

$$R_{EH} = I_{EH} \cdot \frac{24}{\pi} \cdot \left(\cos LAT \cdot \cos DEC + \frac{\pi}{180} \cdot HOR_{orto} \cdot \text{sen}LAT \cdot \text{sen}DEC \right)$$

b) De la relación entre la energía solar que recibe un plano tendido en el suelo y la que captaría en los límites de la exosfera, inferimos el **índice de claridad atmosférica** (k), cociente restante una vez que los rayos han atravesado las masas de aire:

$$k = \frac{R_{GH}}{R_{EH}}$$

c) Si este coeficiente se encuentra entre 0,3 y 0,7 valoramos la **irradiación difusa horizontal** (R_{NH}) con la función:

$$R_{DH} = R_{GH} \cdot (1,3903 - 4,0273 \cdot k + 5,5315 \cdot k^2 - 3,108 \cdot k^3)$$

d) A continuación, obtenemos la **irradiación directa horizontal** (R_{NH}) deduciéndola de la global:

$$R_{GH} - R_{DH} = R_{NH}$$

e) Adaptamos tales cantidades a un plano oblicuo orientado al ecuador. Ahora bien, es preciso primero referir a éste el ángulo horario del amanecer:

$$HOR_{orto}^{ecu} = \arccos \left[-\tan(LAT - PEN) \cdot \tan DEC \right]$$

$$R_{NI}^{ecu} = R_{NH} \cdot \frac{\cos(LAT - PEN) \cdot \cos DEC \cdot \text{sen}HOR_{orto}^{ecu} + \frac{\pi}{180} \cdot HOR_{orto}^{ecu} \cdot \text{sen}(LAT - PEN) \cdot \text{sen}DEC}{\cos LAT \cdot \cos DEC + \frac{\pi}{180} \cdot HOR_{orto} \cdot \text{sen}LAT \cdot \text{sen}DEC}$$

f) La fracción difusa depende directamente de la pendiente de la superficie. Y lo mismo ocurre con la reflejada, que tiene en consideración la irradiación global y el albedo circundante:

$$R_{DI} = R_{DH} \cdot \frac{1 + \cos PEN}{2} \qquad R_{RI} = \rho \cdot R_{GH} \cdot \frac{1 - \cos PEN}{2}$$

g) Los tres sumandos forman la **irradiación global sobre una superficie inclinada** orientada al mediodía:

$$[w \cdot h/m^2] \qquad R_{GI}^{ecu} = R_{NI}^{ecu} + R_{DI} + R_{RI}$$

3.2.4. Método indirecto de estimación

Si el proyectista decide no recurrir a las tablas de radiación o no posee datos de centros meteorológicos, pero conoce la insolación real de la zona (HRS), puede recurrir a la fórmula de Glover y McCulloch para la media de la irradiación global horizontal:

$$[w \cdot h/m^2] \quad R_{GH} = 9830 \cdot (0,29 \cdot \cos LAT) + 0,52 \cdot \frac{HRS}{HTS}$$

4. El Efecto Fotovoltaico

La conversión directa de la energía solar en energía eléctrica se debe al fenómeno físico de la interacción de la radiación luminosa con los electrones en los materiales semiconductores, fenómeno conocido como **efecto fotovoltaico**.

El objeto físico en el que este fenómeno tiene lugar es la célula solar, que no es otra cosa que un diodo con la característica esencial de tener una superficie muy amplia (unas decenas de cm^2).

Para analizar de forma más minuciosa el efecto fotovoltaico es necesario, por tanto, describir, por lo menos conceptualmente, el funcionamiento del diodo (**unión p-n**). Además, ya que hasta hoy el material más utilizado para la realización de las células solares es el silicio cristalino, se tomará en consideración el **diodo de silicio**.

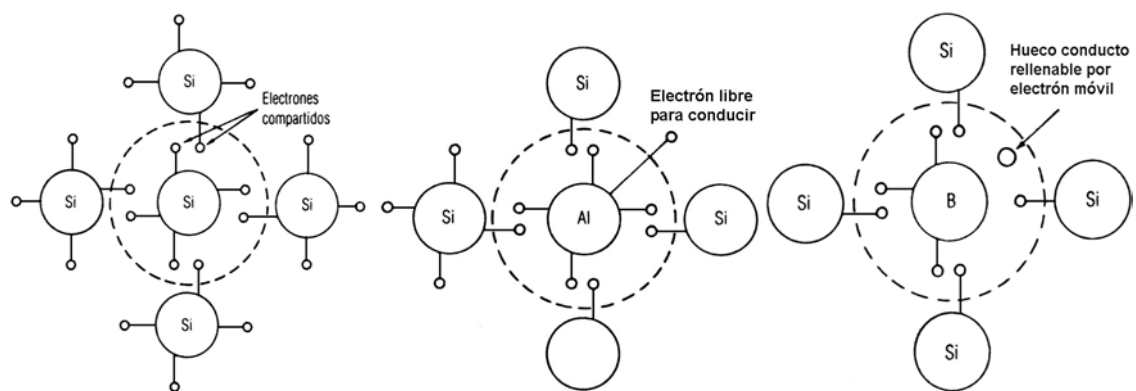
El silicio tiene 14 electrones de los que 4 son de valencia, lo que quiere decir que están disponibles para unirse con electrones de valencia de otros átomos. En un cristal de silicio químicamente puro, cada átomo está unido de forma covalente con otros 4 átomos así que dentro del cristal no hay, como consecuencia del enlace químico, electrones libres. (figura V.4.4.1.a)

Si el silicio se encuentra con que el átomo vecino es un átomo de arsénico que tiene cinco electrones en su última órbita (**figura b**), en el material habrán unos cuantos billones de electrones desaparejados y no ligados a los átomos de silicio y arsénico, tantos como átomos de arsénico se hayan añadido al silicio. Este material resultante de un silicio impurificado con arsénico se llamará **semiconductor de tipo N**, porque tiene electrones libres capaces de

transportar la electricidad a lo largo del material, tantos como átomos de arsénico.

Del modo opuesto, si el silicio se encuentra con que su átomo vecino sólo tiene tres electrones en su última órbita (por ejemplo, un átomo de boro, **figura c**), resultará que en el material habrá unos cuantos billones de plazas vacías disponibles para electrones y que pueden conducir la electricidad de una forma indirecta. A estas plazas vacías las llamamos huecos , actúan como si fueran un electrón 'positivo' y al material resultante lo llamamos **semiconductor de tipo P**.

Las siguiente figuras, muestran gráficamente la situación descrita; en la primera imagen se ve la estructura del retículo cristalino del silicio, en la segunda la variación de la estructura cuando se realiza una combinación con átomos de arsénico y, finalmente, en la última situación, se muestra el retículo cristalino en el caso de enlace con átomos de boro.



a) b) c)
 Figura V.4.4.1. Representación del funcionamiento de un diodo. Fuente: CQ Radio Amateur, "Del diodo al transistor (I)" Luis A. del Molino, EA3OG

La **unión p-n (diodo)** se realiza uniendo una barra de material de **tipo n** con una barra de material de **tipo p**.

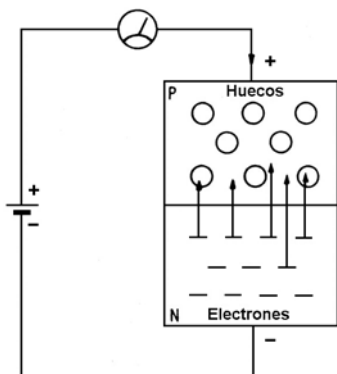


Figura V.4.4.2. Representación del funcionamiento de un diodo. Fte: al pié*

Los electrones libres en el material 'n' verán a la izquierda una región en la que no existen electrones libres y, por tanto, habrá un flujo de estos portadores hacia la izquierda en el intento de restablecer el equilibrio. De forma análoga, los huecos verán a su derecha una región en la que no hay huecos y habrá, por tanto, un flujo de cargas positivas hacia la derecha. Con el avance de este proceso de difusión, en el lado izquierdo se tendrá un exceso de cargas negativas mientras en el lado derecho habrá un exceso de cargas positivas.

Por consiguiente, en la región de unión de los dos materiales se ha creado un campo eléctrico que se hace cada vez más grande a medida que los huecos y los electrones continúan difundiéndose hacia lados opuestos. El proceso continúa hasta que el potencial eléctrico alcanza un tamaño que impide la posterior difusión de electrones y huecos. Cuando se alcanza este equilibrio se habrá creado un campo eléctrico permanente en un material sin la ayuda de campos eléctricos externos.

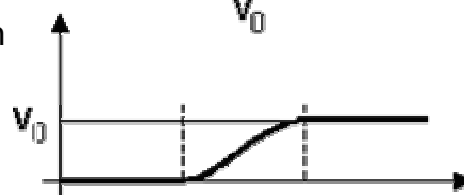
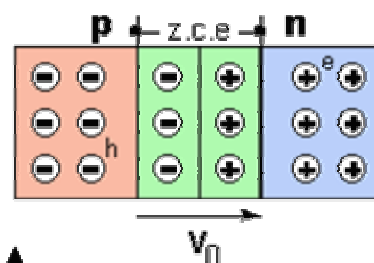
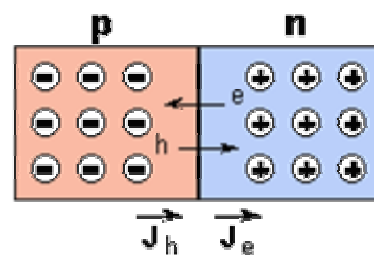


Figura V.4.4.3. Diodo pn. Zona de carga espacial (z.c.e.). Difusión de huecos y electrones (J_h , J_e). Fte: Enciclopedia Libre Universal

* CQ Radio Amateur, "Del diodo al transistor (I)" Luis A. del Molino, EA30G

4.1. Tecnología Fotovoltaica

4.1.1 La célula fotovoltaica

La conversión de la radiación solar en una corriente eléctrica tiene lugar en la **célula fotovoltaica**. La célula fotovoltaica es un dispositivo formado por una delgada lámina de un material semi-

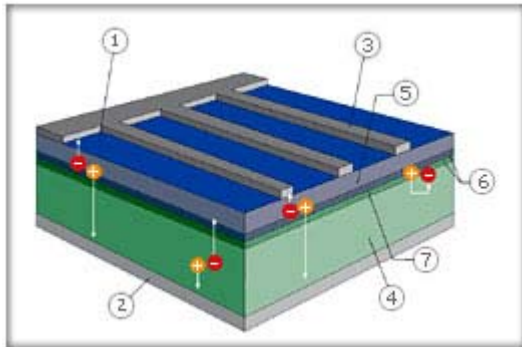


Figura V.4.4.4. Sección de célula fotovoltaica. Fuente SunTechnics

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 - Capa anti-reflexión | 4 - Silicio con carga positiva |
| 2 - Superficie de contacto de la cara posterior (electrodo positivo) | 5 - Silicio con carga negativa |
| 3 - Rejilla de contacto de la cara anterior (electrodo negativo) | 6 - Zona de carga espacial |
| | 7 - Capa intermedia |

conductor, frecuentemente de silicio. Generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0,25 y los 0,35 mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 cm².

Para la realización de las células, el material actualmente más utilizado es el mismo silicio utilizado por la industria electrónica, cuyo proceso de fabricación presenta costes

muy altos, no justificados por el grado de pureza requerido para la fotovoltaica, que son inferiores a los necesarios en electrónica. Otros materiales para la realización de las células solares son:

- **Silicio Mono-cristalino:** rendimiento energético hasta 15-17 %;
- **Silicio Poli-cristalino:** de rendimiento energético hasta 12 - 14 %;
- **Silicio Amorfo:** con rendimiento energético menor del 10 %;
- **Otros materiales:** Arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio;

Actualmente, el material más utilizado es el **silicio mono-cristalino** que presenta prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin.

4.2 Módulos fotovoltaicos

Las células solares constituyen un producto intermedio de la industria fotovoltaica: proporcionan valores de tensión y corriente

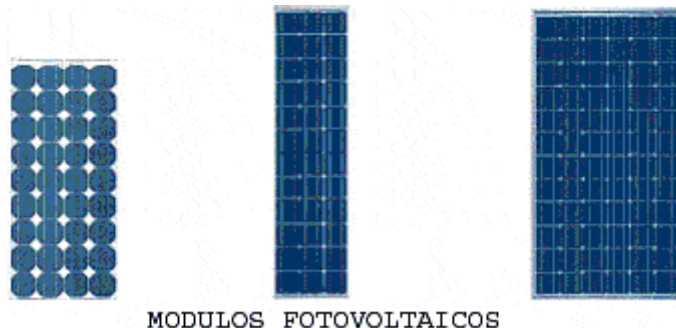


Figura V.4.4.5. Algunos módulos F.V. presentes en el mercado. Fuente: Energía Solar Fotovoltaica. Proyecto RES & RUE Dissemination. CECU (Confederación de consumidores y usuarios)

limitados, en comparación a los requeridos normalmente por los aparatos convencionales, son extremadamente frágiles, eléctricamente no

aisladas y sin un soporte mecánico. Después, son ensambladas de la

manera adecuada para constituir una única estructura: los **módulos fotovoltaicos**.

El módulo fotovoltaico es una estructura robusta y manejable sobre la que se colocan las células fotovoltaicas. Los módulos pueden tener diferentes tamaños (los más utilizados tienen superficies que van de los 0,5 m² a los 1,3 m²) y constan normalmente de 36 células conectadas eléctricamente en serie. Los módulos formados tienen una potencia que varía entre los 50Wp y los 150Wp, según el tipo y la eficiencia de las células que lo componen.

Las características eléctricas principales de un módulo fotovoltaico se pueden resumir en las siguientes:

- Potencia de Pico (Wp): potencia suministrada por el módulo en condiciones estándar STC (Radiación solar = 1000 W/m²; Temperatura = 25 °C; A.M. = 1,5).
- **Corriente nominal (A)**: corriente suministrada por el módulo en el punto de trabajo.
- **Tensión nominal (V)**: tensión de trabajo del módulo.

4.3 Generador fotovoltaico

Está formado por el conjunto de los módulos fotovoltaicos, adecuadamente conectados en serie y en paralelo, con la combinación adecuada para obtener la corriente y el voltaje necesarios para una determinada aplicación. El elemento base es el módulo fotovoltaico.

Varios módulos ensamblados mecánicamente entre ellos forman el **panel**, mientras que módulos o paneles conectados eléctricamente en serie, para obtener la tensión nominal de generación, forman la **rama**. Finalmente, la conexión eléctrica en paralelo de muchas ramas constituye el **campo**.

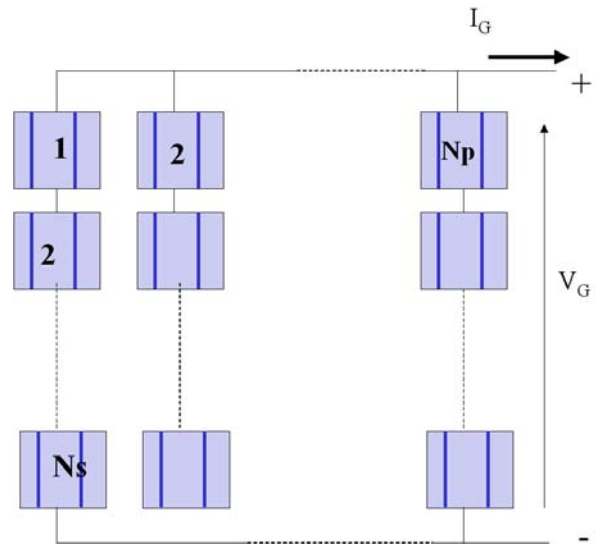


Figura V.4.4.6. Conjunto de células constituyendo un generador F.V.
Fuente: Enciclopedia Libre Universal.

Los módulos fotovoltaicos que forman el **generador**, están montados sobre una estructura mecánica capaz de sujetarlos y que está orientada para optimizar la radiación solar. La cantidad de energía producida por un generador fotovoltaico varía durante el año en función de la insolación de la localidad y de la latitud de la misma.

Para cada aplicación, el generador tendrá que ser dimensionado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- carga eléctrica,
- potencia de pico,
- posibilidad de conexión a la red eléctrica,
- latitud del lugar y radiación solar media anual del mismo,
- características arquitectónicas específicas del edificio,
- características eléctricas específicas de la carga.

A título indicativo, aunque existen diferencias regionales y estacionales significativas, en España se recibe de media una insolación de 1.600 kWh/m²-año; lo que la sitúa, junto con Portugal, a la cabeza de Europa. Esto se traduce en un enorme potencial de los tejados fotovoltaicos, evaluado para España en 31.885 MWp para 1990, lo que podría proporcionar el 24,2% de la electricidad consumida y ahorrar de 17.5 a 50 millones de toneladas de CO₂, con lo que nuestro país podría reducir estas emisiones en un 9-20%.

4.4 Sistemas fotovoltaicos _____

Se define como **sistema fotovoltaico** el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, transformándola en utilizable como energía eléctrica.

Estos sistemas, independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:

- **aislados (stand alone)**
- **conectados a la red (grid connected)**

Los sistemas aislados, por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, normalmente están equipados con sistemas de acumulación de la energía producida. La acumulación es necesaria porque el campo fotovoltaico puede proporcionar energía sólo en las horas diurnas, mientras que a menudo la mayor demanda por parte del usuario se concentra en las horas de la tarde y de la noche. Durante la fase de insolación es, por tanto, necesario prever una acumulación de la energía no inmediatamente utilizada, que es proporcionada a la carga cuando la energía disponible es reducida e incluso nula.

Una configuración de este tipo implica que el campo fotovoltaico debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de insolación, la alimentación de la carga y de la recarga de las baterías de acumulación.

Los sistemas conectados en red, en cambio, normalmente no tienen sistemas de acumulación, ya que la energía producida durante las horas de insolación es canalizada a la red eléctrica; al contrario, durante las horas de insolación escasa o nula, la carga viene alimentada por la red. Un sistema de este tipo, desde el punto de vista de la continuidad de servicio, resulta más fiable que uno no conectado a la red que, en caso de avería, no tiene posibilidad de alimentación alternativa.

En este caso, se pueden obtener sistemas de alta fiabilidad integrando el sistema aislado con una fuente energética tradicional, por ejemplo, diesel (sistema híbrido diesel-fotovoltaico).

La tarea de los sistemas conectados a la red es, por tanto, la de introducir en la red la mayor cantidad posible de energía.

La estructura física de un sistema fotovoltaico (aislado o conectado a la red) puede ser muy diferente, pero normalmente se pueden distinguir tres elementos fundamentales:

- **el campo fotovoltaico**
- **sistema de acondicionamiento de la potencia**
- **sistema de adquisición de datos.**

Es necesario tener en cuenta que en el caso especial de sistemas sin acumulación conectados en red, es la red misma la que desempeña la tarea de acumulador, de capacidad infinita. La **carga** la representa, en cambio, el usuario conectado a la red, como sucede en cualquier otro sistema "grid connected".

4.5 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red _____

Los principales componentes que forman un sistema fotovoltaico "grid connected" son:

- **Módulos fotovoltaicos**
- **Inversor para la conexión a red**
- **Dispositivo de intercambio con la red eléctrica**
- **Contador de energía bidireccional**

El **inversor** es uno de los componentes más importantes en los sistemas conectados a red, ya que maximiza la producción de

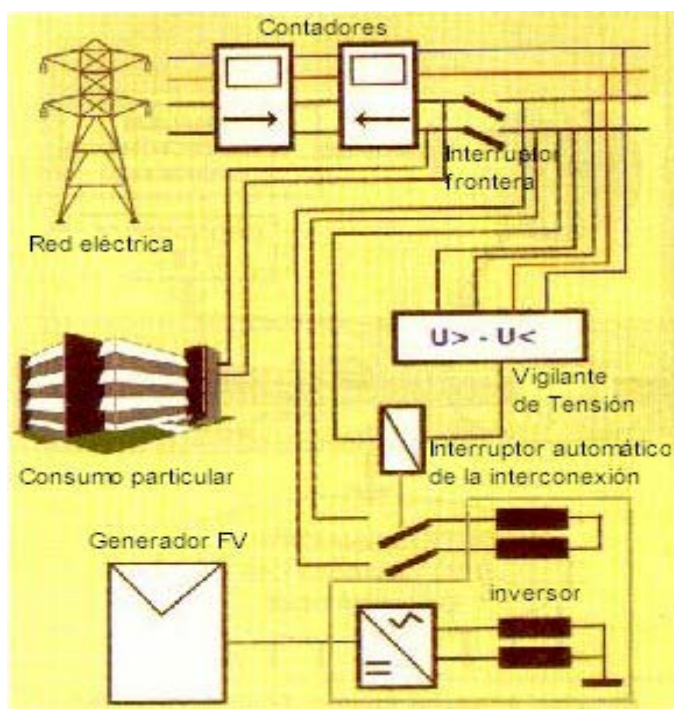


Figura V.4.4.7. Diagrama de un edificio fotovoltaico conectado a la red mostrando los elementos básicos de un SFCR. Aplicaciones fotovoltaicas en edificios. J.Domingo Aguilar Peña, Alfonso Gómez Segura

corriente del dispositivo fotovoltaico y optimiza el paso de energía entre el módulo y la carga. Es un dispositivo que transforma la energía continua producida por los módulos (12V, 24V, 48V, ..) en energía alterna (generalmente 220V), para alimentar el sistema y/o introducirla en la red, con la que trabaja en régimen de intercambio.

Los inversores para la conexión a la red eléctrica están equipados generalmente con un dispositivo electrónico que permite extraer la máxima potencia, paso por paso, del generador fotovoltaico. Este dispositivo sigue el punto de máxima potencia (MPPT) y tiene justamente la función de adaptar

las características de producción del campo fotovoltaico a las exigencias de la carga.

El **dispositivo de intercambio con la red** sirve para que la energía eléctrica introducida en la red tenga todas las características requeridas por la misma.

Finalmente, el **contador de energía** mide la energía producida por el sistema fotovoltaico durante su periodo de funcionamiento.