

ANEXO I

Energía Solar

Marco Teórico - Energía solar

La energía solar se origina mediante reacciones nucleares dentro del sol. Se propaga en el espacio como ondas electromagnéticas (radiación solar).

Se estima que un 40% de la misma es aprovechable, lo que equivale a cientos de veces el consumo mundial.

De los **174000** [TW] interceptados por la tierra:

- 23% se refleja y se dispersa, principalmente por las nubes.
- 8% se refleja por la superficie de la tierra.
- 47% es convertido en calor de baja temperatura y re irradiada al espacio.
- 20% brinda energía al ciclo de evaporación y precipitación de la biósfera.
- Menos del 0,5% se transforma en energía cinética del viento, las olas y en almacenamiento fotosintético en las plantas verdes.
- La radiación absorbida aporta energía a la biósfera hasta transformarse en radiación infrarroja (calor), que termina por ser re emitida al espacio.

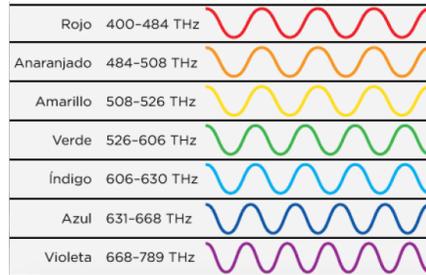
Esto permite mantener un equilibrio energético y una temperatura media de 15 °C en la biósfera, que es compatible con las formas de vida que conocemos.

Esta radiación puede convertirse de manera directa en electricidad mediante paneles fotovoltaicos, o de manera indirecta mediante concentradores solares.

Espectro Solar

La radiación emitida por el sol produce un espectro electromagnético llamado espectro solar. La intensidad de la radiación no es igual para todas las frecuencias.

Ilustración 1 - Espectro solar



El pico de emisión de la radiación solar se encuentra dentro del espectro visible y corresponde a un tono amarillo verdoso.

Las ondas de baja frecuencia del espectro solar (infrarrojo) proporcionan calor, las de alta frecuencia (ultravioleta) hacen posible el proceso de fotosíntesis o el bronceado de la piel.

La luz está formada por un conjunto de radiaciones electromagnéticas de distintas frecuencias agrupadas dentro de un cierto rango del espectro solar, llamado espectro luminoso o visible.

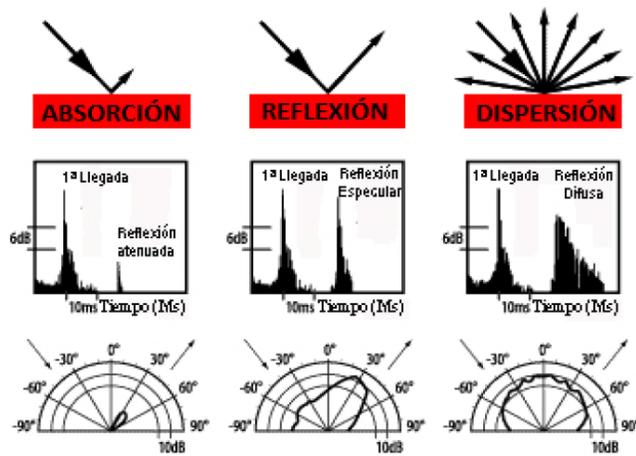
El espectro luminoso generado por el sol sufre alteraciones cuando la luz atraviesa la atmósfera (absorción, reflexión y dispersión).

Esto se debe principalmente a:

- Gases, partículas en suspensión y vapor de agua presentes en la atmósfera que filtran frecuencias como las UV e IF.
- Las nubes filtran la radiación solar atenuando o absorbiendo algunas frecuencias, lo que disminuye su energía. A su vez, reflejan al espacio gran parte de la radiación.

- Estos mecanismos se intensifican cuando los rayos solares deben atravesar mayores distancias dentro de la atmósfera como ocurre en las estaciones del año y durante distintos momentos del día.
- Dependiendo de las condiciones climáticas, un día claro, la superficie de la tierra puede recibir alrededor de un 85% de la radiación extraterrestre del sol y hasta un 5% en un día muy nublado.

Ilustración 2 - Absorción, Reflexión y Dispersión Solar

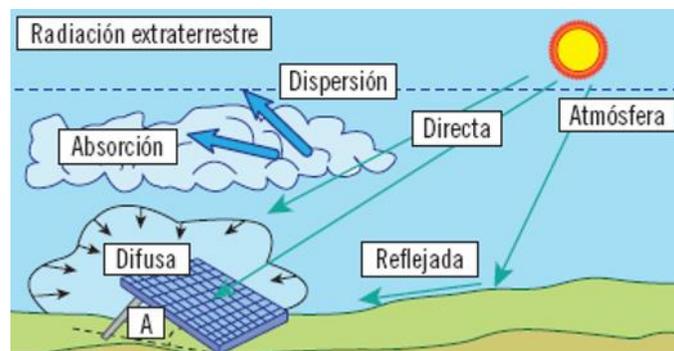


Luego de los procesos de absorción, reflexión y dispersión al atravesar la atmósfera, la radiación que llega a la superficie terrestre se conoce como **radiación global** y está compuesta por la suma de:

- *Radiación directa:* Es la recibida en la superficie terrestre sin haber sufrido ningún cambio de dirección por absorción, reflexión o dispersión. Es la mayor y las más importante en las aplicaciones fotovoltaicas.

- *Radiación difusa*: Es la que se recibe después de haber cambiado su dirección por los procesos de dispersión y reflexión que ocurren en la atmósfera. En un día nublado, sólo se percibe esta radiación.
- *Relación de albedo*: Es el porcentaje de radiación directa y difusa que se refleja por una superficie. Este porcentaje es recibido por superficies próximas o reflejada al espacio.

Ilustración 3 - Radiación Solar



Irradiancia

La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética.

Cuando la radiación proviene del sol, esta definición representa el valor de la potencia lumínica por unidad de superficie [W/m^2].

La radiación solar es casi constante en el exterior de la atmósfera. Este valor se conoce como constante solar y tiene un valor medio aproximado de $1367 \text{ [W}/\text{m}^2]$.

La descomposición en frecuencia de esta radiación origina el espectro solar. El 50% de esta energía se ubica en el espectro visible, un 3% en ultravioleta y 47% en infrarrojo.

Tabla 1 - Tipos de Radiación

<i>Tipo de radiación</i>	λ	$[W/m^2]$
Ultravioleta	$\lambda < 0,38 \text{ mm}$	95
Visible	$0,38 < \lambda < 0,78 \text{ mm}$	640
Infrarroja	$\lambda > 0,78 \text{ mm}$	618

Debido a la absorción, reflexión y dispersión que sufren los rayos solares al atravesar la atmósfera, la radiación solar extraterrestre puede reducirse un 30% en buenas condiciones atmosféricas.

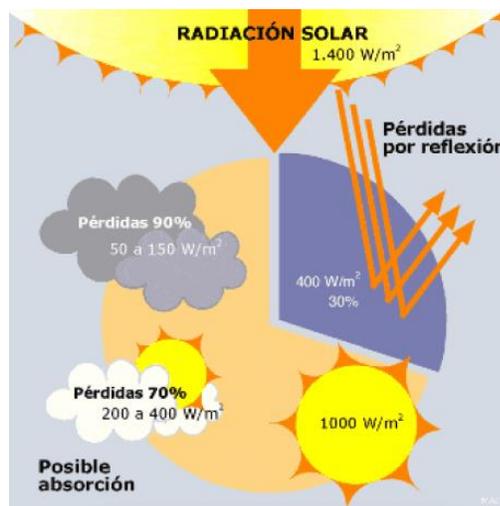
La irradiancia global al medio día sobre el ecuador es de aproximadamente 1000 $[W/m^2]$ para una superficie perpendicular a los rayos del sol en el nivel del mar en un día claro.

Tabla 2 - Condiciones Climáticas

<i>Condiciones Climatológicas</i>	<i>Irradiancia $[W/m^2]$</i>	<i>Componente difusa [%]</i>
Cielo claro	750 - 1000	10 - 20
Parcialmente nublado	200 - 500	20 - 90
Totalmente nublado	50 - 150	90 - 100

Es posible calcular teóricamente la irradiancia en un punto del planeta mediante fórmulas astronómicas y suponiendo un cielo despejado. Sin embargo, para corregir el valor obtenido se deben emplear las medidas reales de radiación captadas en ese lugar, ya que los fenómenos meteorológicos (nubes, nieblas) modifican en gran medida ese valor.

Ilustración 4 - Pérdidas de radiación Solar



La irradiancia posee un valor distinto para cada época del año y para cada momento del día. Esto no solo depende de la atenuación debido al espesor de la capa atmosférica sino también al ángulo de la superficie colectora de medición.

Puesto que el sol se encuentra a diferente altura sobre el horizonte según la época del año (traslación), su radiación calienta la superficie con más o menos efectividad debido a que la potencia de la radiación incidente debe distribuirse sobre una mayor superficie.

La irradiancia posee un valor distinto para cada instante del día (rotación). El sol del mediodía será más intenso que a la mañana o a la tarde debido a la incidencia de sus rayos. A la noche, la irradiancia es de $0 \text{ [W/m}^2\text{]}$, debido a que el sol no incide sobre esa parte de la tierra.

Insolación

La insolación o irradiación es la cantidad de radiación global recibida en un punto geográfico dado, durante un tiempo determinado y sobre una superficie colectora conocida.

Es la energía radiante sobre una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado como ser hora, día, año, etc.

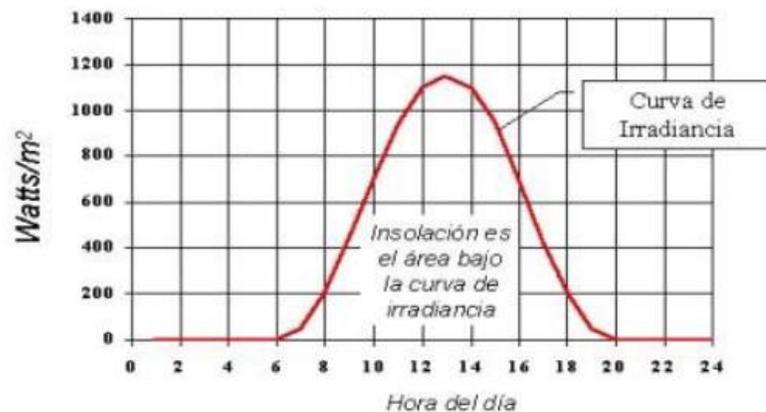
Geoméricamente corresponde al área bajo la curva de irradiancia.

El período de tiempo que se utiliza para los datos suelen ser días, meses y años.

Se necesita tener en cuenta las variaciones cíclicas estacionales, conduciendo mediciones de la radiación solar diaria durante 10 o más años.

Las unidades más convenientes para medir la insolación de un lugar para sistemas fotovoltaicos son [kWh/m²].

Ilustración 5 - Curva de Irradiancia



Hora solar pico (HSP)

La insolación (energía recibida por unidad de superficie) es representada por el área bajo la curva de irradiancia.

La potencia nominal de los paneles fotovoltaicos se especifica como estándar en Watt pico [Wp], lo cual representa la potencia eléctrica que entrega el panel cuando:

- La irradiancia sobre él es de 1000 [W/m²].
- El espectro de la fuente lumínica equivale a la de una Masa de Aire = 1,5.
- La temperatura de trabajo es de 25°C (aproximadamente 0°C de temperatura ambiente).

Con el objetivo de facilitar los cálculos a la hora de dimensionar los paneles fotovoltaicos, se define la HSP como el número de horas de un día con una irradiancia de 1000 [W/m²] que tendría la misma insolación total que la real de ese día.

De esta manera, conociendo la insolación de un determinado lugar, puede calcularse de manera sencilla la energía generada por un determinado panel fotovoltaico.

Ángulo de azimut y elevación

Un arreglo fotovoltaico recibe la máxima radiación cuando se mantiene “apuntando” directamente al sol. Esto requiere el ajuste de dos ángulos del arreglo:

- Azimut (orientación): Para seguir el movimiento diario del sol de este a oeste.
- Elevación (inclinación): Para seguir el movimiento anual de la trayectoria solar en la dirección norte -sur.

Orientación e inclinación fija

El ángulo de azimut se orienta hacia el *Norte* en el hemisferio Sur y hacia el Sur en el hemisferio Norte.

El ángulo de elevación(inclinación) se ajusta en base a la latitud del lugar.

Con orientaciones dentro de $\pm 20^\circ$ respecto al Norte (hemisferio Sur) permiten captar alrededor del 95% de la energía captada con orientación Sur o Norte.

Orientación e inclinación fijas - Sistema conectado a red

Si para la instalación se cuenta con un lugar abierto y despejado, la orientación del arreglo fotovoltaico deberá elegirse mirando al Norte.

La inclinación deberá ser la que maximice la insolación anual.

Determinación de la inclinación - Sistema autónomo

El ángulo de inclinación β suele fijarse para que maximice el ajuste entre la captación y la demanda de energía. Este criterio se traduce en:

- Para instalaciones con consumos constantes o similares a lo largo del año, es preferible optimizar la instalación para captar máxima radiación durante los meses invernales.
- Para instalaciones con consumos inferiores en invierno puede utilizarse como inclinación el valor de la latitud del lugar. Se optimiza así para los meses de primavera y otoño.

- Para instalaciones que sólo se usan en verano (por ejemplo, riego) conviene optimizar la instalación para captar máxima radiación durante los meses estivales.

Es importante destacar que la inclinación mínima que debería tener un panel fotovoltaico para que el mismo pueda auto limpiarse es de 15°.

Sistema conectado a red

Un sistema fotovoltaico *ON GRID* consiste básicamente en que la generación que se logra a través de la instalación, se conecta a la red eléctrica pública.

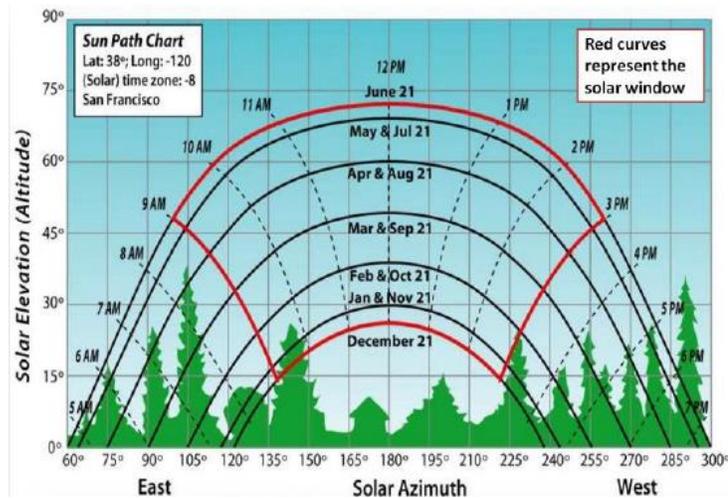
Un inversor es el encargado convertir la corriente continua (CC) de la generación de los paneles en corriente alterna (CA) adecuada para poder ser inyectada a la red.

Este tipo de conexión prescinde de acumuladores (baterías) y reguladores de carga, evitando a futuro desechos electrónicos debido a su escasa vida útil y reduciendo considerablemente el presupuesto.

El sistema conectado a la red (ON-GRID), representa la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas actualmente instaladas en el mundo.

En la actualidad, se utilizan software de simulación especialmente diseñados para el cálculo de la insolación y energía eléctrica generada en base a la ubicación geográfica, orientación e inclinación de los arreglos, sombreado, temperatura, tecnología utilizada, etc.

Ilustración 6 - Ángulo Azimuth



El ángulo de inclinación o elevación β es el formado entre la superficie colectora y la horizontal del lugar. El ángulo θ es el formado por la incidencia de los rayos solares y la perpendicular a la superficie colectora.

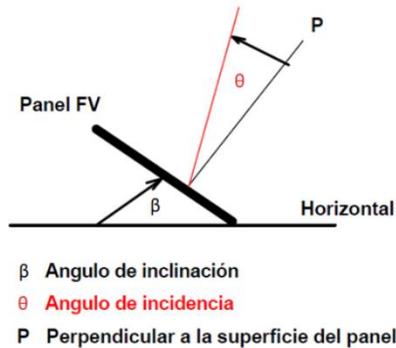
Cuando $\theta=0$, la superficie colectora es perpendicular a los rayos incidentes, por lo que la energía recolectada por el panel es máxima.

Debido al movimiento de traslación de la tierra, la altura del sol en el zenit varía con las estaciones, por lo que es imposible mantener un ángulo constante de elevación β óptimo ($\theta=0$) para todo un año.

Inclinación óptima

El ángulo óptimo de inclinación que maximiza la captación anual, viene dado por la siguiente expresión empírica:

Ilustración 7 - Ángulo Óptimo



$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 * [\text{Latitud}]$$

La célula o celda fotovoltaica

Es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotovoltaico.

Son fabricadas con materiales semiconductores como el Silicio (Si) o el Germanio (Ge) que al ser expuestas a la luz solar generan una tensión entre sus contactos cuyo valor depende del material utilizado en su fabricación.

Dependiendo del material y su forma de construcción, su eficiencia típica varía entre 16 y 30%. La máxima eficiencia lograda es de 47%.

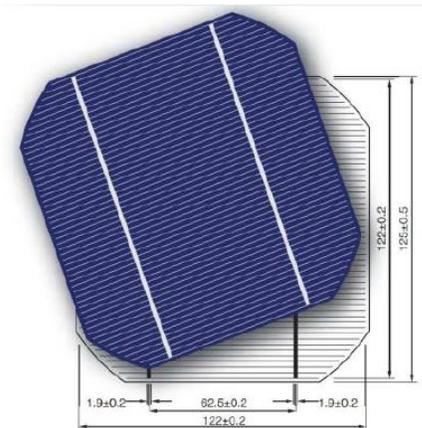
La vida útil de estos dispositivos dentro de un panel fotovoltaico es de entre 25 y 30 años, período en el cual la potencia disminuye aproximadamente 20%.

Dada que la tensión de estas celdas es pequeña, éstas se conectan entre sí en serie para elevar la tensión de trabajo (por ejemplo 12 o 24 [V]).

Para aplicaciones específicas, pueden conectarse en paralelo para aumentar la corriente de salida.

Un panel solar o panel fotovoltaico es un agrupamiento de células fotovoltaicas con el fin de incrementar la potencia y proteger las mismas de la acción de los elementos naturales.

Ilustración 8 - Célula Solar



Clasificación de tecnologías

La tecnología convencional de silicio cristalino (**c-Si**), ya sea monocristalino (**m-Si**) o policristalino (**p-Si**) se conoce como AL-BSF del inglés “Aluminum Back Surface Field” (Superficie posterior de aluminio).

Actualmente el mercado es dominado por una mejora de la tecnología convencional de silicio que incrementa la eficiencia en $\sim 1\%$ conocida como *PERC* del inglés “Passivated Emitter and Rear Cell” (emisor pasivado trasero localmente difuso) que puede ser de silicio monocristalino (m-Si PERC) o policristalino (p-Si PERC).

Actualmente, el mercado se divide como:

- 79,37% -Células de Silicio monocristalino (m-Si).
- 15,5% -Células de Silicio policristalino (p-Si).
- 0,13% -Células de silicio amorfo (a-Si).
- 4% -Células de telurio de cadmio (CdTe).
- 1% -Células de Cobre, Indio, Galio y Selenio (Ci(G)s).

Mencionaremos las dos de mayor porcentaje.

Silicio monocristalino (m-Si)

Presentan una estructura completamente ordenada, cuyo comportamiento uniforme lo convierte en óptimo semiconductor. Fácilmente reconocible por su color azulado oscuro y metálico.

Poseen los más altos valores de eficiencia:

- Eficiencia máxima de célula en laboratorio: 26,7%.
- Panel fotovoltaico convencional (AL-BSF): 16% -19%.
- Panel fotovoltaico PERC: 18% -24,4%.

La superficie necesaria como generador para alcanzar 1 [kWp] se encuentra entre 4,4 y 6,4 [m²].

La producción actual de este tipo de celdas abarca el 80% del total de células fabricadas, siendo la tecnología mono *PERC* el 98% de las celdas m-Si.

Silicio policristalino (p-Si)

Presentan una estructura ordenada por regiones separadas, en la que los enlaces irregulares de las fronteras cristalinas disminuyen el rendimiento.

Son reconocibles a simple vista, ya que reflejan la luz de forma no uniforme, pudiéndose observar las imperfecciones en el cristal. Tienen, asimismo, diferentes tonos de azules.

Poseen una eficiencia menor que las monocristalinas:

- Eficiencia máxima de célula en laboratorio: 24,4%.
- Panel fotovoltaico convencional (AL-BSF): 15% -18%.
- Panel fotovoltaico PERC: 17% -20,4%.

La superficie necesaria como generador para alcanzar 1 [kWp] se encuentra entre 4,9 y 6,7 [m²].

La producción actual de este tipo de celdas abarca el 15,5% del total de células fabricadas, siendo la tecnología poli *PERC* casi el 50% de las celdas p-Si.

Semiconductores

Los semiconductores son elementos que tienen una conductividad eléctrica inferior a la de un conductor, pero superior a la de un buen aislante.

Usualmente se utilizan elementos como el germanio (Ge), arseniuro de galio (GaAs) y el silicio (Si) para la fabricación de semiconductores.

Los Semiconductores actúan como aislantes a bajas temperaturas y conductores a temperaturas más altas.

La conducción se produce a una temperatura más alta debido a que los electrones que rodean los átomos semiconductores pueden separarse de su enlace covalente y moverse libremente por la red

La estructura del enlace de un semiconductor determina sus propiedades.

Cuando un electrón gana energía suficiente para participar en la conducción (es "libre"), se encuentra en un estado de alta energía. Cuando el electrón está enlazado, y, entonces, no pueden participar en la conducción, el electrón se encuentra en un estado de baja energía. Por lo tanto, la presencia de la unión entre los dos átomos introduce dos estados de energía distintos para los electrones.

Juntura PN

El material semiconductor en si no tiene mayores aplicaciones. Pero si a un semiconductor se le incorporan ciertos átomos de otras sustancias, la conductividad de estos materiales varía drásticamente.

A este proceso se lo conoce como *dopaje*.

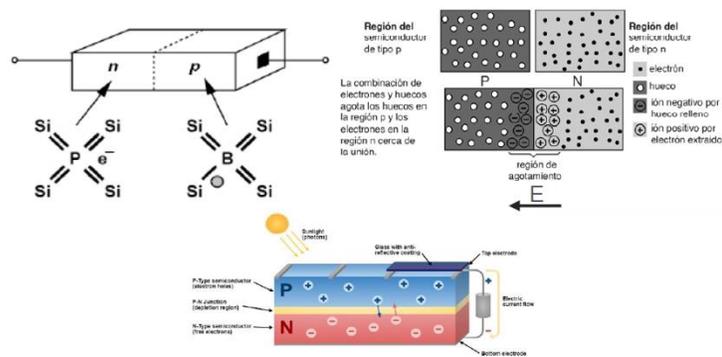
Si sobre un mismo trozo de semiconductor se dopa una zona con átomos que permiten la aparición de electrones sin huecos asociados (típicamente fósforo) y otro con átomos que permiten la aparición de huecos sin electrones asociados (boro, indio, galio, etc.), se crean dos zonas semiconductoras tipo N y tipo P, estableciéndose así, una zona de contacto o unión entre ambos, llamada juntura PN.

Esto genera una corriente de electrones y huecos llamada “*corriente de difusión*” debido a una diferencia de concentración de electrones y huecos en el material.

En consecuencia, empieza a formarse una región llamada “de agotamiento” donde se genera un campo eléctrico que contrarresta a la “corriente de difusión” logrando un equilibrio donde no hay movimientos de carga dentro del material.

Esta unión entre dos semiconductores dopados forma las bases de la electrónica de estado sólido.

Ilustración 9 - Junta P-N



Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es la base del proceso mediante el cual una célula fotovoltaica convierte la luz solar en electricidad. La interacción entre las ondas electromagnéticas y la materia se lleva a cabo mediante partículas elementales llamadas fotones.

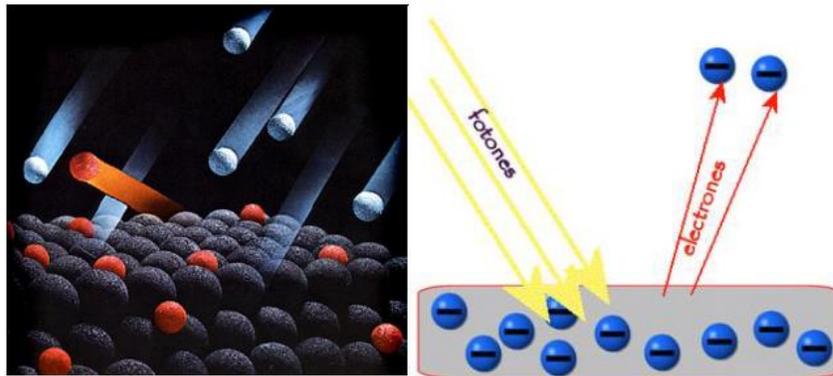
Los fotones de la radiación solar poseen diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda (frecuencias) del espectro solar.

Los semiconductores (al igual que los aislantes) poseen una “banda prohibida de energía”, que es la energía mínima necesaria para excitar un electrón desde su estado ligado a un estado libre que le permita participar en la conducción (generar pares electrón –hueco).

Cuando la luz solar (fotones) incide sobre un semiconductor pueden pasar tres cosas en base a su energía:

- El fotón atraviesa el silicio y sigue su camino como si fuese transparente (IR) (Si la energía del fotón no es suficiente).
- El fotón es fuertemente absorbido y genera calor (UV) (Si la energía del fotón es demasiada).
- El fotón es absorbido eficientemente por el semiconductor (Espectro visible) (Si la energía del fotón es óptima).

Ilustración 10 - Efecto Fotovoltaico



Únicamente los *fotones absorbidos* generan electricidad. Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula fotovoltaica, generando un par electrón –hueco.

Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo y ser arrastrado por el campo eléctrico formado en la juntura PN para generar una diferencia de potencial dentro de la célula fotovoltaica.

Si las terminales de la célula fotovoltaica son conectadas a una carga eléctrica, circulará una corriente eléctrica en el circuito formado por la celda, los cables de conexión y la carga externa.

Curva corriente - tensión (I-V)

La célula fotovoltaica posee una curva característica que asocia los valores de I y V para diferentes cargas. Al conectar la carga, la respuesta de la célula siempre será un punto dentro de su curva característica (**I-V**).

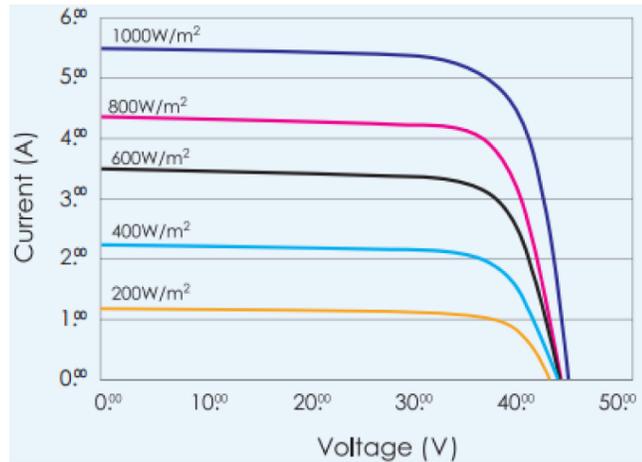
El fabricante proporciona una curva **I-V** que relaciona la corriente con la tensión de salida para determinadas condiciones de trabajo (irradiancia y temperatura).

Esta curva se obtiene variando una resistencia externa bajo condiciones estándares de ensayo (STC) en laboratorio:

- Irradiancia de 1000 W/m^2
- Espectro equivalente al de una masa de aire de MA 1,5
- Temperatura de trabajo de 25° C .
- Las condiciones de ensayo normalizadas se encuentran en la norma internacional IEC 61215.

La respuesta del panel fotovoltaico se encuentra siempre dentro de esta curva. La potencia de salida para una determinada condición de trabajo está dada por el producto de los valores de I y V correspondientes.

Ilustración 11 - Curva I-V



Todas las curvas tienen una zona donde el valor de la corriente permanece prácticamente constante para valores crecientes del voltaje de salida, hasta que alcanzan una zona de transición.

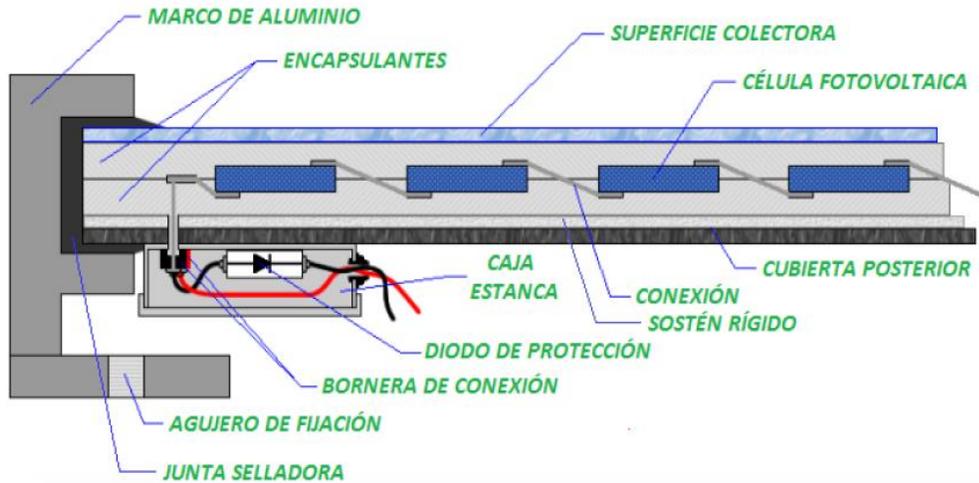
Módulos fotovoltaicos

Es necesario el uso de una estructura mecánica rígida, resistente y hermética que pueda contener y proteger un elevado número de células.

El módulo fotovoltaico cumple estos requisitos, facilitando además el transporte de las unidades, el conexionado externo, y el montaje de los mismos a un soporte.

Elementos de un panel fotovoltaico

Ilustración 12 - Elementos constitutivos



Marco de aluminio: Construido de aluminio anodizado, para evitar su corrosión. Su rigidez provee la presión necesaria para mantener juntas las partes que lo integran.

Superficie colectora: Construido de vidrio templado bajo hierro (típicamente de entre 3 mm y 4 mm de espesor) o un plástico de alto impacto, con un alto valor de transmisividad. Resistentes al granizo y vientos portadores de arena o tierra. El uso del vidrio ofrece una acción auto limpiante, ya que la suciedad tiende a adherirse menos a su superficie.

Junta selladora: Contribuye a evitar la humedad dentro del panel, evitando que las conexiones internas se oxiden o causen la apertura del contacto al semiconductor.

Material encapsulante: Alta transparencia. Protege las células fotovoltaicas frente a la abrasión, los rayos UV y la oxidación generada por el aire y la humedad. También protege las células y las conexiones de vibraciones y actúa como aislante eléctrico. (Típicamente se utiliza el EVA etileno vinil acetato).

Sostén rígido: Incrementa la rigidez del panel fotovoltaico.

Cubierta posterior: Puede ser plástica o metálica. La versión metálica mejora la disipación de calor al exterior.

Caja estanca: Se encuentra en la parte posterior del panel fotovoltaico. Es una caja de plástico preparada para exteriores, con tapa removible y agujeros laterales para la entrada y salida de los cables de conexión.

Cables de conexión: Usualmente, los paneles traen los cables positivo y negativo con terminales especiales llamadas MC. Estas terminales sirven para el ahorro de tiempo y la seguridad del cableado en serie y en paralelo de paneles fotovoltaicos.

Diodos de bypass: Protegen individualmente a cada panel, celda o grupo de celdas de posibles daños ocasionados por sombras parciales. Son utilizados en disposiciones en las que los módulos o celdas están conectados en serie. Generalmente no son necesarios en sistemas de potencias inferiores a 50 [Wp].

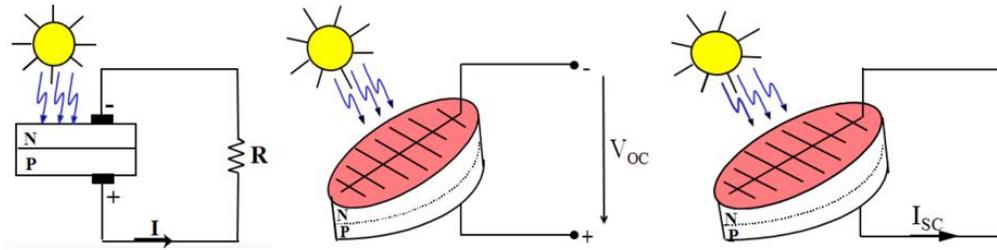
Ilustración 13 - Panel Solar Fotovoltaico



Definiciones eléctricas

- *Tensión:* Como las cargas son impulsadas por un campo eléctrico continuo, la tensión de salida es continua. Existe un lado positivo (lado P) y otro negativo (lado N). La tensión varía con la temperatura de trabajo de la celda y con la irradiancia, aunque relativamente poco si la misma es mayor a 200 [W/m²].
- *Corriente:* Dependerá de la carga, la irradiancia, la superficie de la celda y el valor de su resistencia equivalente.
- *Potencia:* En un instante determinado, la potencia será el producto de los valores instantáneos de tensión y la corriente de salida.
- *Tensión de circuito abierto (VCA o VOC):* La tensión de circuito abierto V_{CA} o V_{OC} (por sus siglas en inglés open circuit) es la máxima tensión para condiciones estándares de ensayo (STC) y ocurre cuando la célula no está conectada a ninguna carga (circuito abierto). Por no circular corriente, la potencia de salida es nula. El valor depende principalmente del material semiconductor. Para una célula de silicio en condiciones estándares de ensayo (STC) este valor se encuentra entre 0,6 [V] y 0,7 [V].
- *Corriente de cortocircuito (ICC o ISC):* La corriente de cortocircuito I_{CC} o I_{SC} (por sus siglas en inglés shunt circuit) es la máxima corriente para condiciones estándares de medición (STC) y ocurre cuando se realiza un cortocircuito a la salida de la célula. Por tener una tensión de salida nula, la potencia de salida será nula. Esto no daña a la célula fotovoltaica. Una célula de silicio monocristalino de 15 x 15 [cm] en condiciones STC producirá al menos una corriente de 9 [A].

Ilustración 14 - Circuitos fotovoltaicos



- *Potencia pico (WP o Pp)*: Al conecta una carga en condiciones estándares de ensayo (STC), la tensión y la corriente dependerán del punto de trabajo de la celda fotovoltaica. Existirá un único valor de corriente (I_p) y tensión (V_p) para esas condiciones de ensayo para los cuales la potencia será máxima ($P_p = V_p \times I_p$).

Aumento de la temperatura

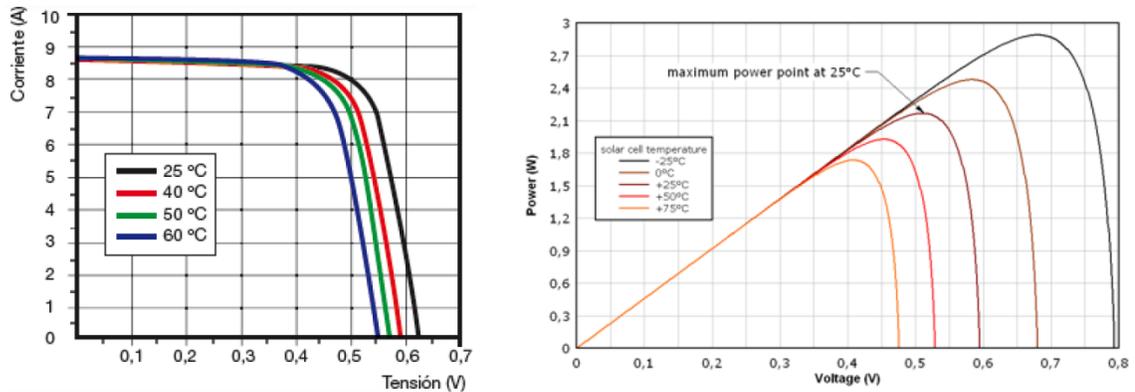
Se producirá una disminución de la tensión de circuito abierto V_{CA} o V_{OC}) debido a una disminución del campo eléctrico de la juntura PN. Esto se debe a que los electrones unidos a los átomos de la red cristalina comienzan a vibrar hasta romper los enlaces que los unen a los átomos, generando una corriente interna que se estabilizará cuando el campo eléctrico de la juntura disminuya.

Al mismo tiempo, un mayor porcentaje de la luz incidente tendrá energía suficiente para romper los enlaces debido a que el aumento de temperatura aporta energía a los electrones, por lo que se producirá una corriente más grande, aumentando la corriente de corto circuito (I_{CC} o I_{SC}).

Esto aplica también a cualquier conjunto de valores de corriente y tensión de la curva I V de la célula, en particular los valores picos (V_p e I_p).

Para un aumento dado de temperatura, el incremento de la corriente es menor que la disminución de la tensión, por lo que la potencia (y la eficiencia) de la celda se reduce ($\downarrow P = \downarrow \downarrow V \times I$).

Ilustración 15 - Curvas temperatura-Rendimiento



Inversores con conexión a la red eléctrica

Los inversores de conexión a la red (ON-GRID), se utilizan en combinación con paneles fotovoltaicos para adecuar la energía generada y ser aprovechada de manera más efectiva y eficiente para inyectar a la red eléctrica. Tienen la particularidad de hacer coincidir con precisión el voltaje y la fase de onda sinusoidal de corriente alterna de la red donde se instalan.

Según la potencia y característica de la red a la cual se deban conectar pueden ser monofásicos o trifásicos.

Cables solares

El conductor fotovoltaico, también conocido como cable PV, tiene un rol muy importante en la reducción de pérdidas de energía en el sistema debido a disipación de calor (efecto Joule), está compuesto por un conductor de cobre electrolítico estañado para asegurar una correcta conductividad, dispone de doble aislamiento para mejorar su resistencia en la intemperie. Son unipolares, no se fabrican agrupados en manguera.

Estimación de eficiencias

Eficiencia por temperatura $\eta_{\text{temperatura}}$: Eficiencia que contempla las pérdidas de potencia en los paneles fotovoltaicos (respecto de los valores nominales) debido a una temperatura de trabajo por encima de los 25 C.

Tabla 3 - Temperaturas Características

Temperature Characteristics	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.41 %/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.34 %/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.060 %/°C

Eficiencia por tolerancia $\eta_{\text{tolerancia}}$: Eficiencia debido a las pérdidas por tolerancia de los paneles fotovoltaicos debido a las pequeñas variaciones de potencia entre módulos individuales producidos por el mismo fabricante.

Si la tolerancia del fabricante es negativa, típicamente 3%, la potencia pico del módulo podrá ser como máximo 3% inferior a la indicada como nominal.

Eficiencia por suciedad η_{suciedad} : Eficiencia debido a las pérdidas por suciedad causadas por acumulación de polvo, ángulo de inclinación de los módulos, hollín, hojas, excremento de pájaros, etc.

Típicamente se utiliza un factor de suciedad de 0,90 (reducción del 10% en la producción debido a la suciedad) para sitios muy sucios y una eficiencia de 0,95 (reducción del 5% en la producción debido a la suciedad) para sitios relativamente limpios que experimentan lluvias regulares.

Eficiencia por sombreado $\eta_{\text{sombreado}}$: Eficiencia debido a la pérdida de potencia producida por el sombreado. El mismo produce una caída de tensión a la salida de las cadenas (strings).

Si la sombra es suficiente, esta tensión puede caer por debajo de la tensión mínima de funcionamiento del inversor. El sombreado disminuirá la potencia total del generador fotovoltaico durante la duración del mismo.

Eficiencia del inversor η_{inversor} : Eficiencia debido a las pérdidas de potencia dentro del inversor producidas por el consumo interno de la electrónica (autoconsumo).

Eficiencia debido a la caída de tensión en el cableado η_{cableado} : Pérdida de potencia debido al calentamiento de los conductores y terminales al circular una corriente eléctrica (efecto Joule).

Esta pérdida se manifiesta como una caída de tensión que, por norma, se recomienda que sea menor al 1%.

Protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas para sistemas fotovoltaicos sirven para proteger a los usuarios y evitar daños producidos por cortocircuitos, sobretensiones y sobrecargas.

En Argentina, la reglamentación que regula las protecciones eléctricas de un sistema conectado a la red es la AEA 90364-7-712 enunciada en 2016 por la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA).

Protecciones y maniobra CC

- Protecciones de sobretensión: Protegen contra los efectos de una descarga atmosférica indirecta.
- Interruptor: Permite desconectar bajo carga de forma segura el generador fotovoltaico del inversor.
- Fusibles o Interruptor termomagnético: Protegen ante sobrecargas el cableado y paneles.

Protecciones y maniobra CA

- Protecciones de sobretensión: Protegen contra los efectos de una descarga atmosférica indirecta y sobretensiones debido a cambios en la red eléctrica.
- Disyuntor diferencial: Protege la instalación de derivaciones a tierra y a las personas de contactos directos o indirectos. Usualmente se utiliza un valor de sensibilidad de 30 mA.
- Interruptor termomagnético: Protege la línea de sobrecargas y cortocircuitos.

Medidor bidireccional

Un medidor bidireccional es capaz de medir la energía en dos sentidos, por un lado, la energía eléctrica generada e inyectada por el sistema fotovoltaico y, por otro lado, la energía que es consumida de la red eléctrica por el usuario.