



### Introducción a la Tecnología Fotovoltaica

### Tema 1

Cuando pensamos en la energía solar, dos manifestaciones de ésta, luz y calor, son fácilmente reconocidas. Ambas juegan un papel vital en la vida de nuestro planeta. La luz solar hace posible el proceso de fotosíntesis, sin el cual el reino vegetal y animal desaparecerían. El calor tempera el clima y evapora las aguas del mar, las que, libres del contenido salino, son devueltas al planeta en forma de lluvia. Seres humanos, animales y plantas deben su existencia a este simple mecanismo de purificación. Varias de las civilizaciones antiguas, conscientes de esta dependencia, convirtieron al sol en una deidad digna de veneración.

Hoy en día la energía solar es utilizada como fuente de energía renovable, la cual se capta a través de paneles solares y se almacena en baterías como energía eléctrica, para proveer de electricidad a luminarias (focos) y equipos que funcionan con energía eléctrica, representando un costo mensual cero, dado que la energía solar es gratuita, sin embargo cabe mencionar que existe una inversión inicial por el equipamiento que permitirá captar la energía solar, controlar y almacenar la energía eléctrica.

La finalidad de este tema es ofrecer una comprensión básica de las posibilidades y restricciones de la tecnología fotovoltaica (FV).

Los aspectos técnicos de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) se discutirán desde un punto de vista práctico en los temas siguientes.

Durante el desarrollo del curso, después de este primer tema se discutirá el producto de entrada de los sistemas solares, es decir, el recurso de la energía solar: cuál es el flujo solar hacia la tierra, cómo podemos medir la radiación y cómo juzgar los datos meteorológicos. Más adelante se discutirán los principios de funcionamiento de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV), descripción de los componentes del sistema y los tipos y características de los paneles fotovoltaicos.

Posteriormente, se hará una presentación de las diferentes aplicaciones comerciales y no comerciales a nivel mundial, seguidamente se desarrollará la metodología y cálculos prácticos detallados dirigidos al cómo diseñar un Sistema Fotovoltaico.

### Historia de la Energía Fotovoltaica

La generación de electricidad con celdas fotovoltaicas solares fue descubierta en el siglo anterior, en 1839 por Edward Becquerel cuando observó casi accidentalmente la aparición de un voltaje en las terminales de un pedazo de selenio en electrolito.

## ELECTRICIDAD GRATUITA CON PANELES SOLARES

---



A pesar de este temprano descubrimiento de los principios de su funcionamiento, los Sistemas Fotovoltaicos sólo fueron recientemente una opción interesante para aplicaciones comerciales a grande escala. El desarrollo de la tecnología FV surgió durante los programas de investigación espacial, especialmente entre 1950 - 1970 debido a sus características idóneas, bajo peso, larga vida, resistencia al ambiente exterior y alta confiabilidad.

Durante los siguientes 15 años la tecnología de la celda fue mejorada y estuvo lista para que en 1975, con la llegada de la crisis petrolera y el incremento de los costos de energía, se pensara en dicha tecnología como alternativa de solución.

Las celdas fotovoltaicas (FV) eran aún muy costosas para muchas de las aplicaciones comerciales pero probaron ser una opción interesante para aquellos lugares, realmente alejados de la red pública. Desde entonces, los precios de las celdas FV han ido bajando y su eficiencia gradualmente se ha incrementado y por tanto los costos por unidad de electricidad generada con FV empiezan a ser cada vez más bajos.

Debido al descenso de los costos, el número de aplicaciones comerciales va creciendo. Al principio los PF eran sólo una opción interesante para aplicaciones espaciales, hoy en día pequeñas celdas FV se usan dondequiera alrededor del mundo en una infinidad de diferentes aplicaciones comerciales.

Hasta ahora, muchos de los paneles FV utilizados son celdas cristalinas o de silicio. Este tipo de módulos convierte la luz solar en electricidad con una eficiencia del 12 al 15 %. Las recientes mejoras en eficiencia probablemente influirán en una mayor utilización de estas celdas. Son especialmente interesantes los desarrollos con la tecnología de la película delgada para las celdas. Estas celdas están aún es una fase pre-comercial pero se espera que sean una alternativa económicamente viable en una o dos décadas. Se espera que a largo plazo estas celdas produzcan electricidad a una eficiencia de más del 15%.

Otro desarrollo reciente es el mejoramiento del comportamiento de módulos de silicio amorfo. La ventaja de un silicio amorfo es que su precio es bajo. Inicialmente estas celdas producían electricidad con una eficiencia muy baja (5%) pero con mejoras recientes (después de su estabilización) puede acercarse al 10%.

En la siguiente tabla se muestran las eficiencias y precios de las diferentes tecnologías de celdas. Los precios están dados en US\$ por Wp (Watt pico). Wp es la potencia de salida máxima de una célula bajo condiciones estándar.

Precios y eficiencias para diferentes módulos. (Fuente: Renewable Energy)



Tipo de célula	Eficiencia % (en la práctica)	Precio [US\$/Wp)
Cristalina	10 - 12	6
Polycristalina	8 - 9	5
Película delgada	15 (esperada)	2 (esperada)
Silicio Amorfo Polycristalina	3 - 6	1 - 2

### 1.1 Penetración de la tecnología FV en el mundo

Los Sistemas FV se utilizan en todas partes alrededor del mundo. En cada región del mundo hay proveedores que venden sus aplicaciones. La producción de módulos FV sin embargo, se hace principalmente en Europa, Japón y EEUU.

Debido a la complejidad del proceso de producción no hay muchos países en desarrollo que produzcan sus propias celdas FV. Tampoco es muy interesante transferir la producción de celdas a "países de bajos ingresos" porque el factor de costos en la labor en la producción es relativamente baja (10-20%). Más aún, los costos de producción por módulo son proporcionalmente inversos al tamaño de la planta de fabricación.

Por lo tanto, para competir con productores extranjeros, debe instalarse una gran planta con una gran capacidad de producción, requiriendo enormes inversiones. Sin embargo, ensamblar localmente paneles a partir de celdas y sistemas completos es bastante factible.

### 1.2 Posibilidades y limitaciones de la tecnología FV

Una de las restricciones más importantes de la tecnología FV es el precio. Por lo menos, eso es lo que la mayoría de la gente piensa. Uno de los objetivos de este curso es demostrar que el precio de la electricidad no es el único punto importante.

A veces la confiabilidad, seguridad o confort pueden ser buenas razones para pagar más por un sistema FV. Por ejemplo, una estación de llenado de botellas de gas pagaría una gran cantidad de dinero por un sistema de alumbrado seguro y confiable para sus componentes, ya que los riesgos de tener chispas, y por tanto explosiones, deben ser absolutamente inexistentes.

Un joyero estaría interesado en un sistema de alumbrado de emergencia automático FV en caso de cortes de corriente. El joyero es muy vulnerable en la oscuridad cuando en su tienda se encuentran muchos clientes. Asimismo, todas las tiendas necesitan luz para



trabajar. Por esto es que muchas tiendas, en lugares donde ocurren frecuentes cortes de energía, tienen sus propios generadores a petróleo diesel.

Como éstas, hay muchas situaciones en las que las personas estarían dispuestas a pagar más por soluciones diferentes a las convencionales como lámparas de kerosene o pequeños generadores a petróleo. La seguridad y confiabilidad de una ininterrumpida fuente de luz pueden ser más importantes que la más económica fuente de luz.

Por otro lado, en muchos de los casos los sistemas FV son más económicos que los sistemas convencionales! Aunque los costos de capital de los paneles FV son altos, los costos en general por unidad de electricidad pueden ser más bajos, por ejemplo que, extender la red.

En general se puede decir que usar FV para generación de electricidad se vuelve un costo efectivo cuando se requieren pequeñas cantidades de electricidad, y/o el lugar donde se requiere electricidad está muy alejado de la red pública.

### Puntos fuertes y débiles de la tecnología FV

Las razones por las cuales alguien usaría un sistema FV, en lugar de otro medio de generación de electricidad, no se han discutido aún. Para decirlo de otro modo, ¿Cuáles son las ventajas y las desventajas de un sistema FV.?

Algunas de sus ventajas son que los sistemas FV casi no requieren de mantenimiento, no tienen partes móviles, no hacen ruido, no contaminan, es un sistema modular aislado, etc.

De otro lado, hay desventajas, o puntos débiles de los sistemas FV. Una de las desventajas más conocidas es el alto costo inicial de los FV. Esto hace que mucha gente difícilmente adquiera un sistema FV sin un sistema de crédito. Otras desventajas son que algunas de las partes deben importarse y que es una tecnología nueva y desconocida.

### 2.1 Comportamiento del recurso energético solar

La energía que recibimos del Sol es más que suficiente para cubrir toda la demanda energética del mundo. En realidad la energía que recibimos es 10,000 veces el actual consumo de energía del mundo.



Si quisiéramos cubrir todo el consumo con energía solar, necesitaríamos un área de aproximadamente 25 millones de hectáreas que es lo mismo que 500km x 500 km. , casi la misma área que utilizamos para cultivar maní o semillas de algodón. Como referencia la actual producción de módulos fotovoltaicos está acercándose a los 100 MWp/día o más o menos 1 km. cuadrado al año.

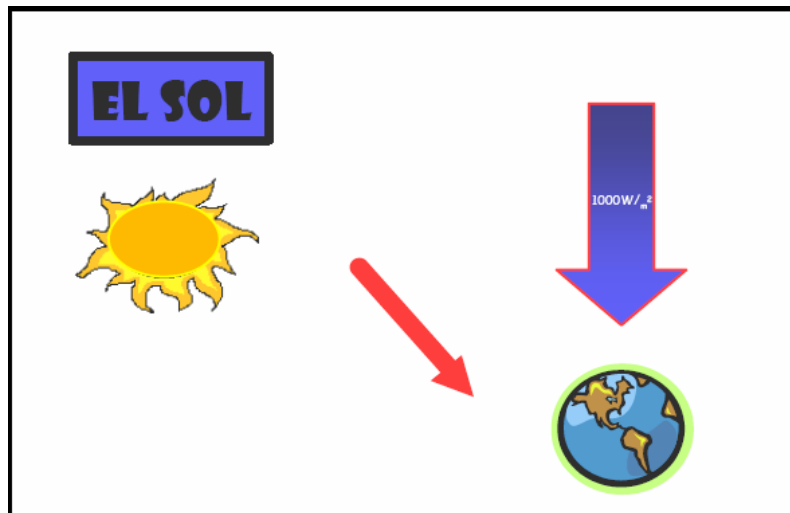


Figura 2.1

Fuera de la atmósfera la irradiación del Sol tiene una intensidad de 1350 W/m<sup>2</sup>, en la tierra la máxima intensidad de la irradiación es aproximadamente de 1000 W/m<sup>2</sup>, pero en días muy despejados puede ser un poco más alta. La irradiación no está distribuida equitativamente sobre la superficie de la Tierra, primeramente debido a la forma de la Tierra, las áreas alrededor del Ecuador reciben más energía solar que otras partes. En segundo lugar, debido a las diferencias en la humedad del aire, despeje del cielo y nubosidad, hay variaciones de país en país, aún si se encuentran en la misma latitud.

Las áreas desérticas con climas muy secos y claros, reciben mayor irradiación que las áreas tropicales donde la humedad es mucho mayor. Aún más hay fluctuaciones debido a la rotación de la tierra alrededor de su propio eje (fluctuación diaria) y alrededor del sol (fluctuación estacionaria). En días claros la energía solar está distribuida a lo largo del día en una especie de distribución de Gauss (forma de campana).

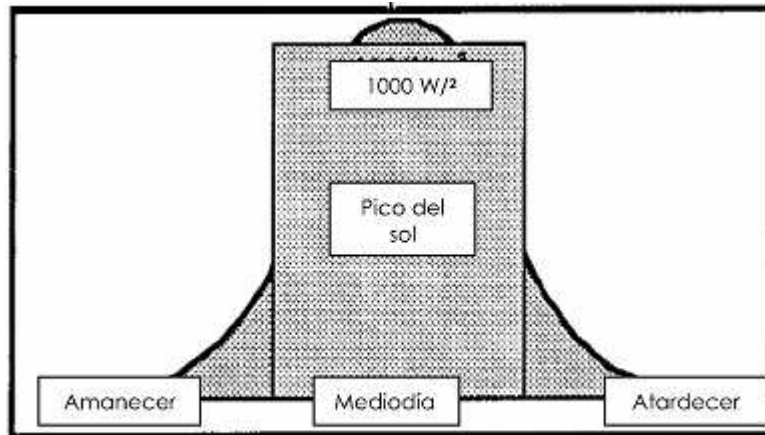


Figura 2.2

Este diagrama está referido a las horas efectivas de incidencia de irradiación solar por día (horas sol pico) en base a estudios de mediciones de horas de sol. Por ejemplo la estimación de energía solar en el Perú es de aproximadamente 5kWh /m<sup>2</sup> /día , esto quiere decir 1000 W/m<sup>2</sup> por cinco horas útiles de radiación solar al día.

Todos estos diferentes efectos hacen que la energía solar fluctúe fuertemente de región a región y de tiempo en tiempo.

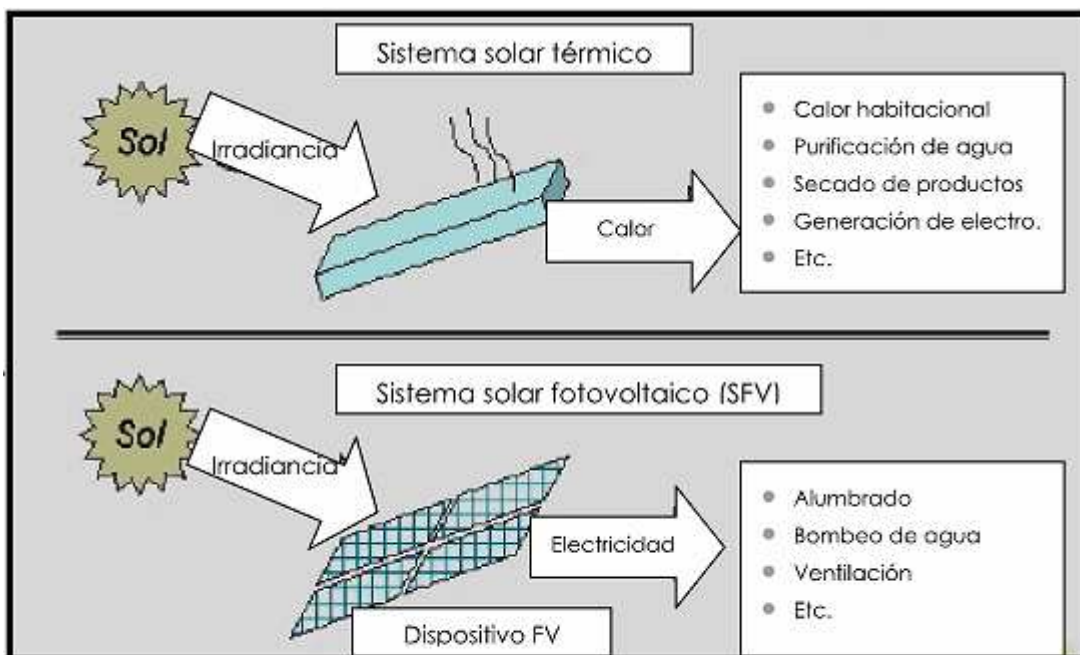


Figura 2.3  
Aprovechamiento del sistema solar



### 2.1.1 Patrones estacionales y diarios

Como se mencionó anteriormente, además de las variaciones de lugar a lugar, hay variaciones en la intensidad solar de tiempo en tiempo. Este es un problema común con muchas de las fuentes de energías renovables (es por eso que algunas veces son llamadas fuentes intermitentes y es también una de las mayores limitaciones de estas fuentes) y hace necesario usar algún elemento con capacidad de almacenamiento. Almacenar energía es siempre costoso y disminuye la eficiencia del sistema. Debería, en lo posible, evitarse el almacenar energía y minimizarse en otras circunstancias.

Almacenar electricidad por un corto tiempo (horas o un par de días) es posible utilizando las baterías. Por tanto, las fluctuaciones diarias pueden manejarse con baterías. Mucha de la energía es recibida tan sólo en un par de horas poco antes y después del mediodía. La demanda de energía es generalmente durante la tarde o noche cuando el sol ha desaparecido.

En estaciones lluviosas el sol puede desaparecer por varios días también. Si se requiere de un suministro ininterrumpido de energía, la capacidad de almacenamiento (y también el tamaño de los paneles) debería aumentar.

Normalmente el sistema debería estar diseñado de tal manera que unos cuantos días sin brillo solar puedan ser cubiertos sin problema.

Almacenar electricidad por un período más largo (meses) no es posible sin el uso de baterías y otras opciones son muy costosas. El almacenamiento a largo plazo para una pequeña generación de electricidad deberá entonces considerarse como no factible.

Por lo tanto, a veces se utiliza otro truco para nivelar fluctuaciones de estación. Los paneles solares se colocan, no en el ángulo que da el mayor rendimiento anual, pero en tal ángulo que las diferencias entre estaciones se minimizan. Tal vez esto disminuya la eficiencia del sistema pero aumenta la confiabilidad y aumenta también el comportamiento por dólar invertido.

### 2.1.2 Irradiación solar, inclinación, orientación

En el Perú, la irradiación promedio es una de las más altas del mundo comparada con Holanda, el Perú recibe más del doble de energía solar. La fluctuación por estaciones en el Perú es mucho menor que la de las regiones nórdicas. En Holanda por ejemplo, la irradiación promedio en invierno puede ser tan baja como 0.5 kWh-m<sup>2</sup>/día mientras que en el verano pueden darse valores como 5 kWh-m<sup>2</sup>/día (como en el Perú).



Tome en cuenta que los valores de irradiación por metro cuadrado que se dan están calculados para superficies horizontales. Muchos de los paneles solares se colocan inclinados para recoger mejor la irradiación solar, la cantidad óptima de energía se recoge cuando el panel está inclinado en el mismo ángulo que el ángulo de la latitud. El ángulo debería ser de por lo menos  $15^\circ$  para asegurar que el agua de las lluvias drenen fácilmente, lavando el polvo al mismo tiempo. A latitudes mayores ( $> 30^\circ$  norte o sur) los paneles están inclinados más sobre el ángulo de latitud para tratar de nivelar las fluctuaciones por estaciones.

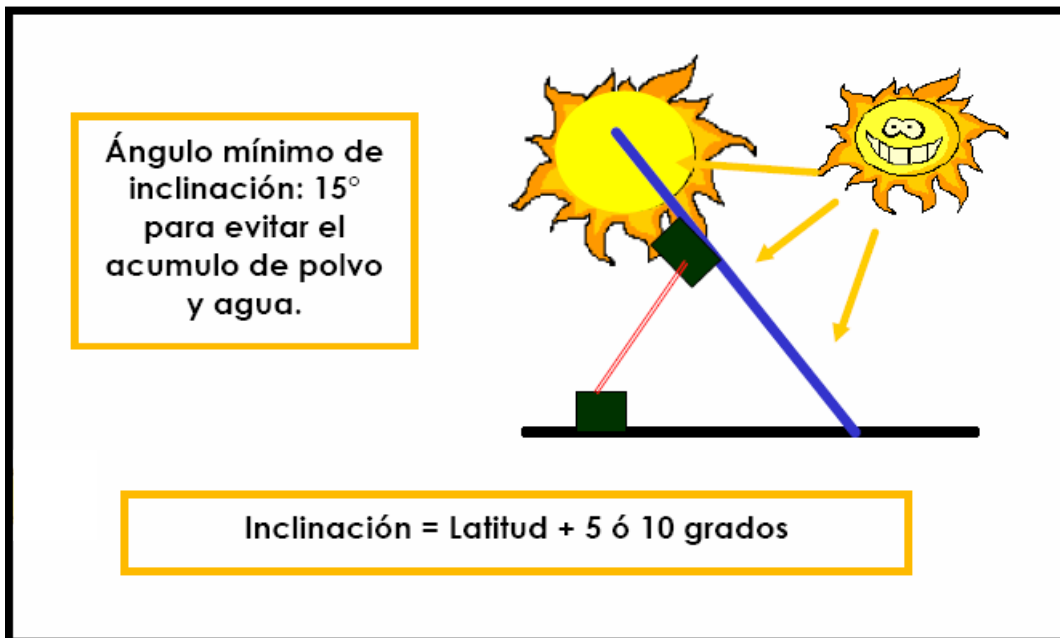


Figura 2.4



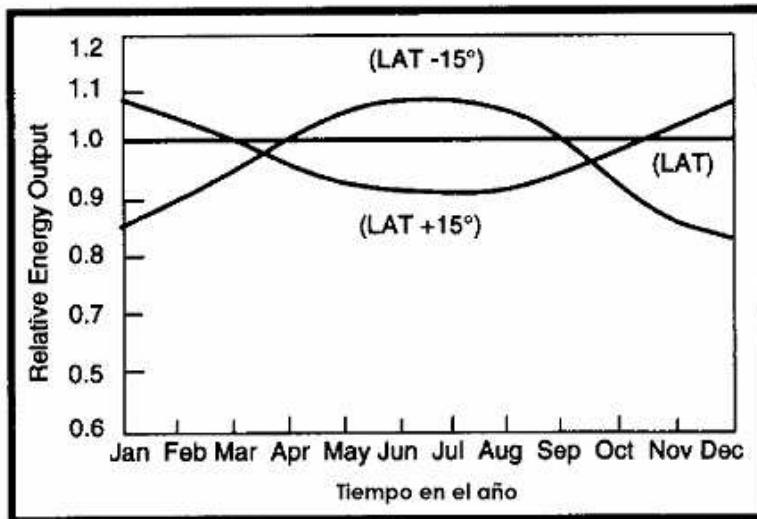


Figura 2.5

Para pensar...

¿Cuál es la latitud del lugar donde usted vive?





Figura 2.6  
Mapa de irradiación solar  
Sudamérica parte norte



Figura 2.7  
Promedio de horas Sol Pico

Para pensar...

¿Que significa que en el Perú haya entre 4,5 a 5,5 KWh/m<sup>2</sup> /día ?  
¿Donde hay mayor radiación en Quito o en Brasilia?



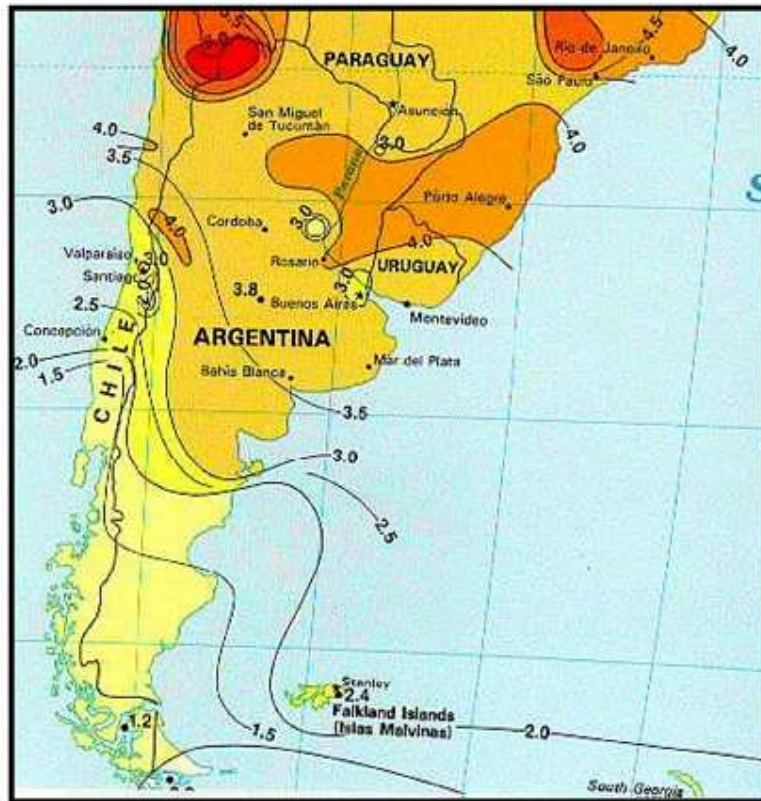


Figura 2.8  
Mapa de irradiación solar  
Sudamérica parte sur

Para pensar...

¿Por qué habría mayor radiación en Asunción (Paraguay) que en las Islas Malvinas?



### 2.1.3 Sombras y reflejos

Es obvio que deben evitarse las sombras lo más posible. Pero ¿cuál es exactamente la influencia de un pequeño árbol al este de un panel fotovoltaico, un edificio alto a 100 metros, o una pared detrás de los paneles?

Primeramente, uno debe considerar que la sombra puede crear problemas con puntos calientes, suponga que una célula de una serie de células, está en la sombra y las otras células están en el Sol. Las células en el sol están produciendo corriente que debe correr también por la célula de la sombra, la cual actúa como una gran resistencia, esta célula puede hacerse muy caliente por ese efecto.



En segundo lugar, cualquier sombra tiene su influencia negativa sobre el rendimiento de un sistema solar. Así que aún un árbol pequeño puede tener una influencia sustancial sobre el rendimiento si está justo en el lugar equivocado. Como regla la influencia de objetivos en los alrededores puede descuidarse cuando el ángulo de la línea, desde el panel fotovoltaico hasta la cima del objeto, con la horizontal es menor a  $15^\circ$ .

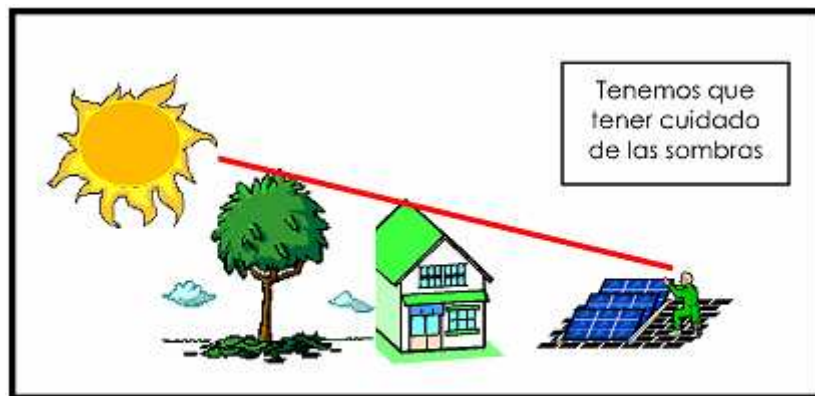


Figura 2.9

### 2.1.4 Instrumentos de medición de la irradiación

El nombre del instrumento que sirve para medir la energía solar es el solarímetro. Básicamente hay dos tipos de solarímetros: el piranómetro y el medidor fotovoltaico, a ambos tipos miden la irradiación solar tanto directa como difusa.

El piranómetro tiene una pequeña plancha de metal negro dentro con una termocupla unida a ella. Esta plancha negra se calienta al sol y con la termocupla el aumento del aumento de temperatura se puede medir. La plancha y la termocupla están cubiertas y aisladas por una cúpula de vidrio.

La salida de la termocupla es medida para la irradiación instantánea total en un momento dado.

El solarímetro fotovoltaico no es nada más que una célula fotovoltaica pequeña que genera electricidad. La cantidad de electricidad es nuevamente medida para la irradiación instantánea. Los Solarímetros fotovoltaicos son mucho más económicos que los piranómetros pero menos exactos.



Figura 2.10  
Piranómetro



Figura 2.11  
Polarímetro

### 2.1.5 Medición de la radiación total

La irradiación instantánea es solo útil para determinar el comportamiento de una instalación en determinado momento; por ejemplo, durante una inspección al término. La mayor parte del tiempo sin embargo, uno está más interesado en la irradiación durante un período más largo; por día, por mes o por año. Especialmente si uno desea monitorear el comportamiento de un sistema en detalle entonces será necesario medir la entrada y salida del sistema por un período más largo (varios meses, un año). Sólo en esa forma los disturbios o problemas a corto plazo pueden reglamentarse y hacerse evaluaciones más exactas del comportamiento.

Así, la irradiación total a lo largo de períodos de tiempo fijos (total por hora o día) tendrán que medirse. Una ventaja de los solarímetros fotovoltaicos es que están también disponibles con un integrador para que la irradiación total diaria u horaria puedan ser medidas sin dificultad. Si se utilizan los piranómetros, esto no puede realizarse automáticamente. Si la insolación total por hora o por día es requerida, tendrán que utilizarse los data loggers para almacenar y agregar las mediciones instantáneas.

Los data loggers son costosos y por lo tanto sólo se utilizan para monitoreos detallados de sistemas grandes o para estudiar sistemas experimentales.

Es importante, en un proyecto de monitoreo, la insolación se mida bajo el mismo ángulo en que están colocados los paneles.

## 2.2 Principios de funcionamiento de los Sistemas Fotovoltaicos

### 2.2.1 Conociendo los paneles



Una célula fotovoltaica es un conductor semiplano que convierte la irradiación solar directamente a corriente eléctrica, sin partes móviles y sin generar ruido o contaminación alguna. Las celdas fotovoltaicas consisten de un semiconductor de silicio, contactos metálicos y usualmente un recubrimiento delgado que aumenta la eficiencia de la célula (reflexión reducida).

El silicio cristalino es un semiconductor que consta de un registro periódico de átomos y un cristal. En general, un átomo consiste de un núcleo positivo y electrones negativos que circulan en órbitas alrededor del núcleo. Los electrones en las órbitas exteriores son las más importantes pues determinan las características del átomo. En un metal, por ejemplo, los electrones exteriores circulan libremente y por lo tanto un metal conduce electricidad muy bien.

El principio básico del efecto fotovoltaico es que es posible liberar electrones de sus átomos y en estos electrones libres hacer el material conductor. La cantidad de energía mínima para liberar a un electrón de su posición fija se llama Band-gap. Cuando un fotón cae sobre un semiconductor puede suministrar suficiente energía para liberar a un electrón.

La célula fotovoltaica realmente consiste en dos capas muy delgadas de semiconductores. La capa superior es un semiconductor del tipo n y la capa inferior es un semiconductor del tipo p.

Un semiconductor del tipo n (tipo negativo) es un semiconductor con un exceso de electrones libres. Esto se logra impurificando el cristal de silicio con átomos que tienen electrones libres.

Un semiconductor del tipo p (tipo positivo) está impurificado con átomos que tienen una escasez de átomos libres, que también pueden catalogarse con átomos con huecos. Estos huecos también se mueven libremente a través del cristal a temperatura ambiente. El electrón exterior de un átomo vecino tiene suficiente energía de vibración para saltar dentro del hueco, llenándolo pero dejando un hueco en el átomo original.

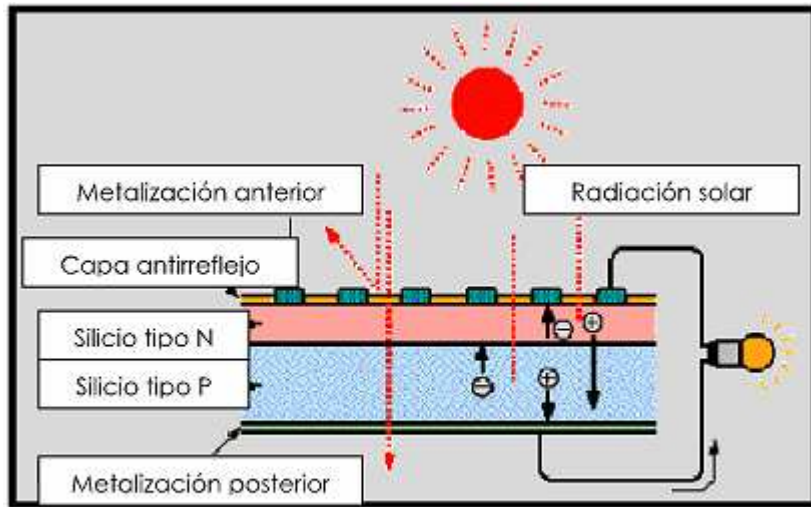


Figura 2.12

Cuando dos capas delgadas de materiales tipo p y tipo n se unen, los electrones libres de la capa tipo n fluirán hacia los huecos de la capa tipo p y llenarán estos huecos. Al hacer esto causan una carga positiva en la capa del tipo n porque los electrones negativos dejaron esta capa, al mismo tiempo en la capa del tipo p se da una carga b negativa debido a la recepción de electrones de la capa tipo n. La diferencia de cargas crea un voltaje interno que impide a más electrones fluir de la capa del tipo n a la capa del tipo p.

Cuando la luz solar cae sobre las capas se crearán más electrones libres en la capa p y huecos en la capa n, alterando por tanto el equilibrio. Para reponer el equilibrio, fluirá una corriente eléctrica, creando un voltaje en los contactos externos de las dos capas. Si no se hace ninguna conexión externa entre las dos capas, este voltaje externo permanecerá tal como está porque no hay electrones que puedan fluir de la capa n a la capa p.



Figura 2.13

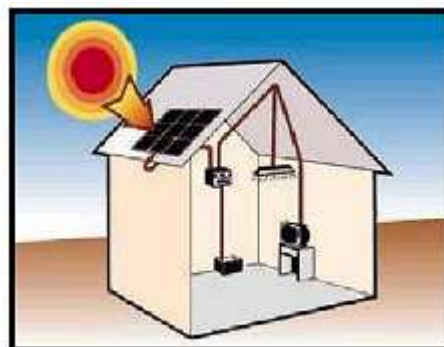


Figura 2.14

Este voltaje puede aplicarse para prender la luz o cargar baterías, etc.

### 2.2.2 Construcción y fabricación

#### Proceso de producción de una celda FV

El proceso de producción de las celdas FV es una actividad complicada de alta tecnología que requiere de inversiones gigantescas. Desde un punto de vista económico no es interesante armar una pequeña planta de fabricación en países en desarrollo porque el precio de las celdas que se fabrican es proporcionalmente inverso al tamaño de la planta manufacturera FV. Por lo tanto, una planta pequeña nunca podrá competir con las grandes y ya existentes plantas en los EEUU, Europa y Japón. Aún en un país como India, con muy bajos costos de mano de obra y bajos precios de energía, muy pocas





plantas están produciendo celdas FV por aproximadamente US\$ 5 por Wp, mientras que los precios internacionales hoy en día están en el orden de los US\$ 3 por Wp.

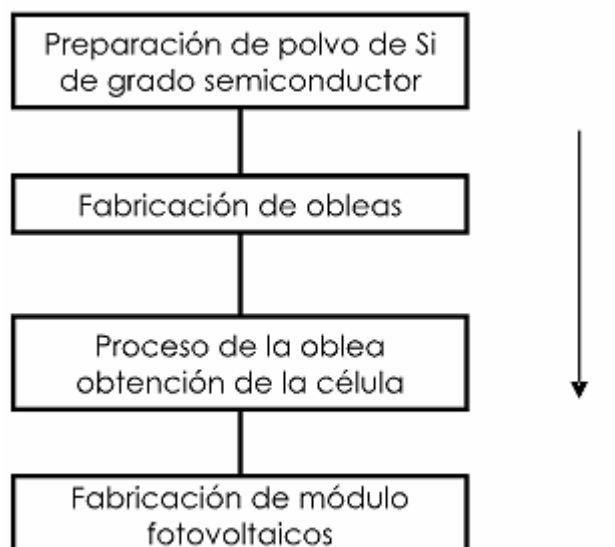
Básicamente el proceso de producción de celdas cristalinas consiste en producción de obleas y fabricación de celdas a partir de estas obleas.

Las obleas (láminas muy delgadas de silicio cristalino) se cortan de un bloque sólido de silicio. Se produce un silicio poli cristalino enfriando un container de silicio derretido. El cristalino-puro se produce sacando un lingote del silicio derretido. También es posible hacer crecer cristal directamente sobre una placa de metal, eliminando así el proceso de corte (que es el costoso).

Producir poli-cristalino es más barato que el cristalino-puro y también materia prima menos costosa puede utilizarse. Sin embargo la eficiencia es un poco menor. Los costos del silicio crudo son algo más caros y con la demanda creciente de celdas FV y otros semi-conductores los precios tienden más a subir que a bajar.

Para bajar el precio de las celdas FV se están utilizando nuevas técnicas de corte que producen menos desperdicio al serruchar y que pueden cortar láminas más delgadas. Otra posibilidad es, por supuesto, crear los cristales directamente sobre una superficie; las capas pueden hacerse muy delgadas y no hay pérdidas en el corte.

Las obleas son luego compuestas en celdas en varios pasos. En estas etapas, entre otras, las capas tipo n y p se producen (ver siguiente sección en el principio de funcionamiento de las celdas), se hacen contactos con metales y se hace una recubrimiento anti-reflexivo. Las celdas están entonces listas para ser usadas e incorporadas en los paneles FV o módulos.



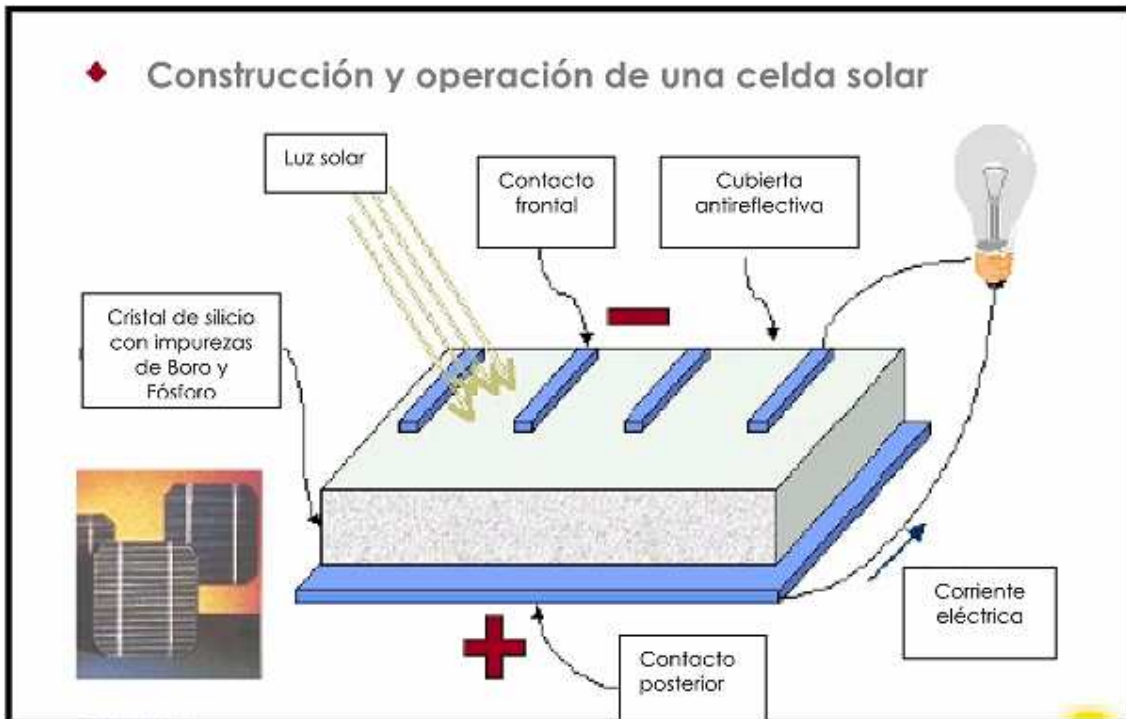


Figura 2.15  
La celda fotovoltaica

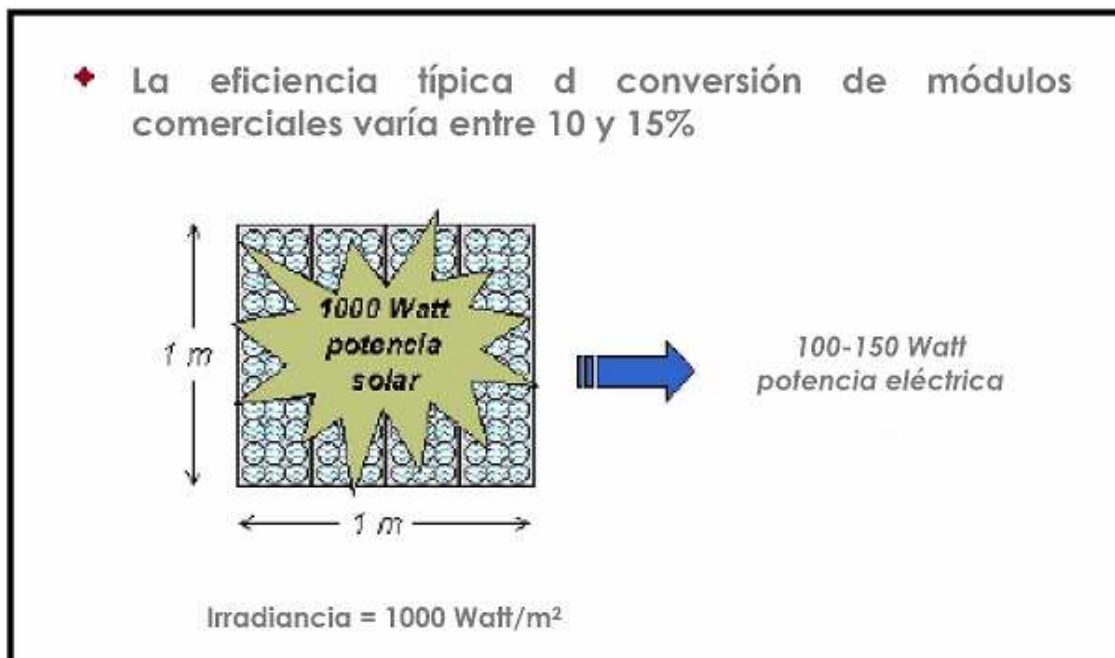


Figura 2.16  
Eficiencia del módulo FV

### 2.2.3 Efecto de la temperatura



El voltaje del punto de máxima potencia disminuye al aumentar la temperatura. Se debe seleccionar el módulo cuyo voltaje de máxima potencia coincida con el voltaje de la batería, considerando la temperatura de las celdas solares.

La temperatura de las celdas solares es de 20°C a 25°C más alta que la temperatura ambiente.

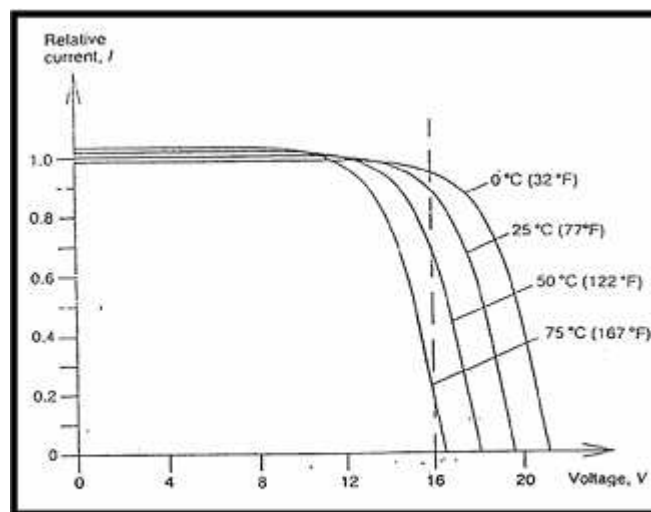


Figura 2.17

Si el voltaje a máxima potencia del módulo está exacto, entonces cuando el voltaje de la batería o las caídas de voltaje entre módulo y batería aumenten o la temperatura suba más allá de lo esperado, la corriente solar disminuirá a pesar de que haya buena insolación.

Es importante entonces asegurar que el módulo solar opere en el punto de máxima potencia con el voltaje de batería que se necesita y a la temperatura de la celda que se tenga en el lugar.

### 2.2.4 Paneles fotovoltaicos - módulos

Generalmente, las celdas son hechas en forma redonda o cuadrada, del orden de los 100 cm<sup>2</sup>. El voltaje de una célula es relativamente estable y aproximadamente de 0.55V CC. Para tener un voltaje mayor, como de 12 ó 24 V, un número de celdas se conectan en serie. Para el cargado de baterías el voltaje de salida de un módulo debería siempre ser un poco más alto que el voltaje de la batería. Esto significa que un módulo FV diseñado para cargar batería de 12V debería producir alrededor de 13V, dicho módulo puede hacerse, por ejemplo, de 33 celdas de silicio en serie (24 x 0.55 = 13.2 V).



El tamaño usual de los módulos es de alrededor de 0.5 m<sup>2</sup> que es el tamaño más pequeño posible para un panel de 12V cuando se utilizan celdas de 100 c m<sup>2</sup>. Un factor importante que determina la salida de un panel solar es el factor de empaque. Algunos módulos se hacen de tal manera que relativamente gran parte del panel permanece vacío, mientras que en otros módulos las celdas se empacan de manera bastante densa. Esto aumenta la salida neta por metro cuadrado de un módulo, aún si las mismas celdas FV se usan. La salida usual de los módulos FV es alrededor de 100 Wp por metro cuadrado.

Como se mencionara anteriormente, no tiene sentido comenzar a producir celdas FV a pequeña escala. Es posible sin embargo importar las celdas FV para ensamblar los paneles, más que importar los paneles completos. Esto puede hacerse con herramientas relativamente sencillas y se practica a pequeña escala en los países en desarrollo.

### 2.3 Descripción de los componentes de un Sistema Fotovoltaico

#### 2.3.1 Componentes del Sistema FV

##### Disposición del sistema

Un sistema FV es un sistema que convierte radiación solar en energía eléctrica. Los dispositivos de los sistemas FV solares pueden ser muy distintos pero en general la disposición del sistema y los principios de funcionamiento son siempre los mismos.

Un sistema FV consiste de un panel FV o módulo, una unidad de control, una batería de almacenamiento (opcional) y la carga eléctrica.

El panel FV convierte la radiación solar en corriente continua con un nivel de voltaje fijo. Muchos de los paneles surten potencia a un voltaje de 12V. La corriente depende de la intensidad de la irradiación solar.

La unidad de control está en el centro del sistema y dirige a la corriente desde el panel FV ya sea directamente a la carga eléctrica (uso final) o a la batería de almacenamiento. Si hay una carga eléctrica cuando no hay sol, la unidad de control dirigirá energía desde las baterías a la carga.

Las baterías se necesitan para almacenar la energía que se utilizará después, por ejemplo durante la noche o días nublados.

El uso final de la electricidad puede ser cualquier aplicación eléctrica, desde una simple bombilla de luz hasta pequeñas máquinas o bombas. Los sistemas FV grandes pueden también utilizarse para generación a gran escala y en esos casos los sistemas FV serán conectados a la red.



Como se mencionó, los módulos FV generarán potencia a un voltaje CC de 12V (o a veces 24V). Si se utilizan artefactos eléctricos estándar es necesario cambiar este bajo voltaje CC a un voltaje mayor (110 o 220V) 50 Hertz de potencia -AC. Para esta conversión de CC a AC se utiliza un inversor. Esto se hace antes del uso final y después de las baterías porque no puede almacenarse electricidad AC.

Los cables que se utilizan en el transporte de electricidad desde los paneles a los controles, baterías y uso final deben diseñarse para corriente CC de bajo voltaje. Esto significa que, si la misma cantidad de energía debe transportarse, deberán ser más gruesos que los cables que generalmente se usan para 220 V.

### Componentes eléctricos y electrónicos

#### Unidad de control

Como puede verse de la disposición del sistema, la unidad de control es un dispositivo localizado en el centro del sistema FV. Sus funciones son las siguientes:

- Dirigir la electricidad generada en los paneles FV hacia el uso final si el tiempo de demanda de electricidad coincide con las horas de sol. Dirigir la electricidad generada en los paneles FV hacia la batería en caso que haya un exceso de potencia solar (la potencia generada >demanda de potencia).
- Dirigir la electricidad de la batería al punto de uso final cuando la demanda exceda la generación de potencia del panel FV. Impedir que la batería se sobrecargue y descargue.
- Impedir daños en los cables y corto circuitos.
- Indicar el funcionamiento del sistema FV y el estado de carga.

Las unidades de control pueden venderse como un todo o pueden ensamblarse localmente. Unidades de control confiables y probadas están disponibles pero en los países en desarrollo puede resultar difícil o muy costoso comprarlas.

Una unidad de control puede fabricarse localmente pero uno debe tener mucho cuidado al diseñar su propio controlador. Como el controlador es el corazón de un sistema FV su funcionamiento determina el comportamiento y tiempo de vida del sistema completo. Una unidad de control que extrae demasiada electricidad de la batería causará la falla temprana de la batería y tal vez incluso pueda dañar los cables y dispositivos. Un controlador que apaga los paneles antes de tiempo influye en la eficiencia del sistema. Por lo tanto, es aconsejable usar sólo diseños probados.

Aún con diseños ya probados uno debe tener cuidado al construir sus propios diseños. Errores con la tolerancia correcta y la calidad de las partes electrónicas se cometen



fácilmente. Debe haber suficiente enfriamiento y ventilación del circuito electrónico para evitar el recalentamiento de los componentes pero la caja que alberga esto debe también ser a prueba de agua. Las conexiones a la unidad de control deben hacerse de tal manera que los usuarios menos capacitados no puedan cometer errores fatales, etc.

Las unidades de control puede diseñarse para realizar más tareas que simplemente la de controlar las corrientes y la carga/descarga de la batería.

También puede controlar diferentes usos finales (como darle prioridad a grupos de aplicaciones en caso de falta de fluido) y puede monitorear el comportamiento de todo el sistema (aunque la mayoría de los controladores sólo dan un indicador de estatus).

Otro aspecto de las unidades de control modernas es el MPPT o Máxima potencia del punto de tracción. Esto significa que el controlador determina el punto óptimo de trabajo de la curva FV. ¿Qué voltaje operativo da la mayor eficiencia?

### **Adaptadores, conversores**

Los adaptadores pueden utilizarse para graduar el voltaje de un sistema solar. Por ejemplo cuando la salida es 24 V y la aplicación de 12 V ó 6V, el voltaje debe disminuir. Esto puede hacerse con un adaptador cualquiera que se fabrican y venden en cantidad y son muy comunes. Usualmente sólo los contactos y enchufes deben ajustarse. Tenga cuidado de que el adaptador sea lo suficientemente grande para la aplicación.

Los adaptadores pueden ser hechos por uno mismo. La eficiencia de los adaptadores sencillos no es muy alta por lo que, en lo posible, debería evitarse su uso.

Un conversor es un aparato que también puede graduar el voltaje. Es un diseño un poco más complicado y no está siempre disponible en todos los lugares. La eficiencia es mucho más alta que la de un adaptador.

### **Inversor**

En muchos casos el cliente desea usar aplicaciones convencionales, generadas por sistemas FV. Aunque ésta no es siempre la mejor opción desde el punto de vista de la eficiencia energética, implica que la salida de un sistema FV sea cambiada de voltaje bajo continuo a 220 ó 110 V, 55 ó 50 Hertz, AC.

Un inversor puede parecer una solución fácil para convertir toda la salida del sistema solar a una potencia AC estándar pero tiene varias desventajas. La primera es que aumenta el costo y complejidad de sistema. Para muchas aplicaciones no es necesario



en lo absoluto utilizar un inversor. Por ejemplo para el alumbrado es mejor invertir en luces de bajo voltaje en lugar de invertir en un inversor. Más aún, en algunas aplicaciones, por ejemplo para radios, la primera cosa que se hace con la potencia que ingresa es convertirla en bajo voltaje CC.

Un inversor también consume energía y por tanto disminuye la eficiencia general del sistema. La ventaja del inversor es que el voltaje de operación es mucho más alto y por tanto puede evitarse el uso de cables gruesos. Especialmente cuando deben usarse cables largos podría ser económicamente viable utilizar un inversor.

### Estructuras de soporte

Como los paneles solares deben mirar al sol sin interferencia de obstáculos en los alrededores, los paneles generalmente están colocados en una posición alta, sobre un techo o un poste.

Cuando los paneles se colocan sobre un techo hay varias soluciones. Primeramente el panel puede ser montado sobre una estructura inclinada ya existente, si la orientación de la caída del techo es cercana a la óptima. El techo debe ser lo suficientemente fuerte para soportar el peso extra de los paneles, y o más importante, el peso extra del viento. Las penetraciones para cables deben ser impermeables.

En segundo lugar existe la posibilidad de integrar paneles al techo. Esto significa que los paneles actuarán como parte del tejado y que los materiales del techo como las tejas se ahorran. Los paneles ya son bastante fuertes a prueba de agua, entonces para qué desperdiciar materiales de construcción.

Otra ventaja es que la carga del viento se disminuye cuando los paneles están colocados en el techo más que sobre el techo.

En tercer lugar, los paneles pueden colocarse en un techo plano sobre un marco que lo soporte. El marco está hecho de metal y fijado al techo (con pernos grandes) o se hacen lo suficientemente pesados utilizando concreto. La ventaja es que se puede escoger cualquier dirección e inclinación pero, claro, el marco aumenta los costos del sistema. Estos marcos también se utilizan en instalaciones en áreas planas sobre el piso.

Si no hay un techo adecuado disponible será necesario elevar el panel a cierta nivel a modo de evitar las sombras; esto puede hacerse con postes. Esto sólo se logra con paneles pequeños utilizando construcciones parecidas a la de los postes de alumbrado público. También se utilizan los postes para evitar potenciales daños en los paneles por causa, por ejemplo, de ganado o niños que juegan en los alrededores.



Los módulos FV sobre marcos o postes pueden equiparse con mecanismos de tracción que ajustan los paneles de tal manera que estén siempre mirando al sol. Estos sistemas son muy costosos y complicados, generando numerosos desperfectos, y por lo tanto no se utilizan comúnmente. Para sistemas más grandes podría ser atractivo utilizar los mecanismos de tracción, pero, para sistemas pequeños, las inversiones no pueden justificarse por un mayor rendimiento.

Bajo todas circunstancias los paneles deben colocarse de tal manera que queden a la mano para realizar trabajos de limpieza y mantenimiento.

### 2.4 Tipos y características de los paneles

#### 2.4.1 Tipos de módulos fotovoltaicos

##### ◆ **Monocristalinos**

- **Celdas de un sólo cristal de silicio**
- **Eficiencia 12-15%**

##### ◆ **Policristalinos**

- **Celdas de cristales múltiples**
- **Eficiencia entre 11-13%**
- **Comparable a los monocristalinos en construcción, costo, características eléctricas y durabilidad**





◆ **De película fina (amorfo)**

- **Estructura cristalina irregular**
- **Eficiencia alrededor de 8-10%**
- **Tienden a sufrir degradación más acelerada**
- **Tecnología en proceso de maduración**
- **Prometen reducir significativamente los costos de fabricación**

Figura 2.19

◆ **De placa plana (módulos comunes)**

- **Se pueden instalar en estructuras fijas o rastreadoras**

◆ **Concentradores**

- **Necesitan rastreadores sofisticados**

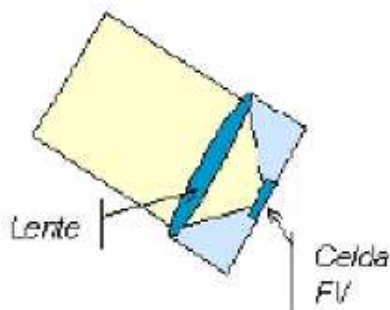


Figura 2.20

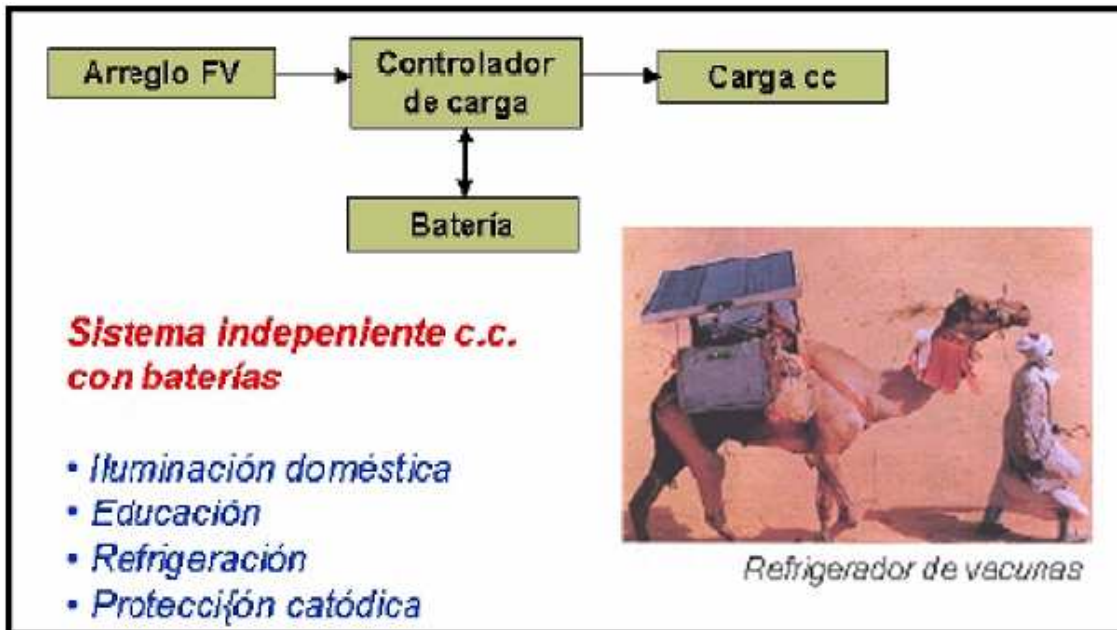


Figura 2.21

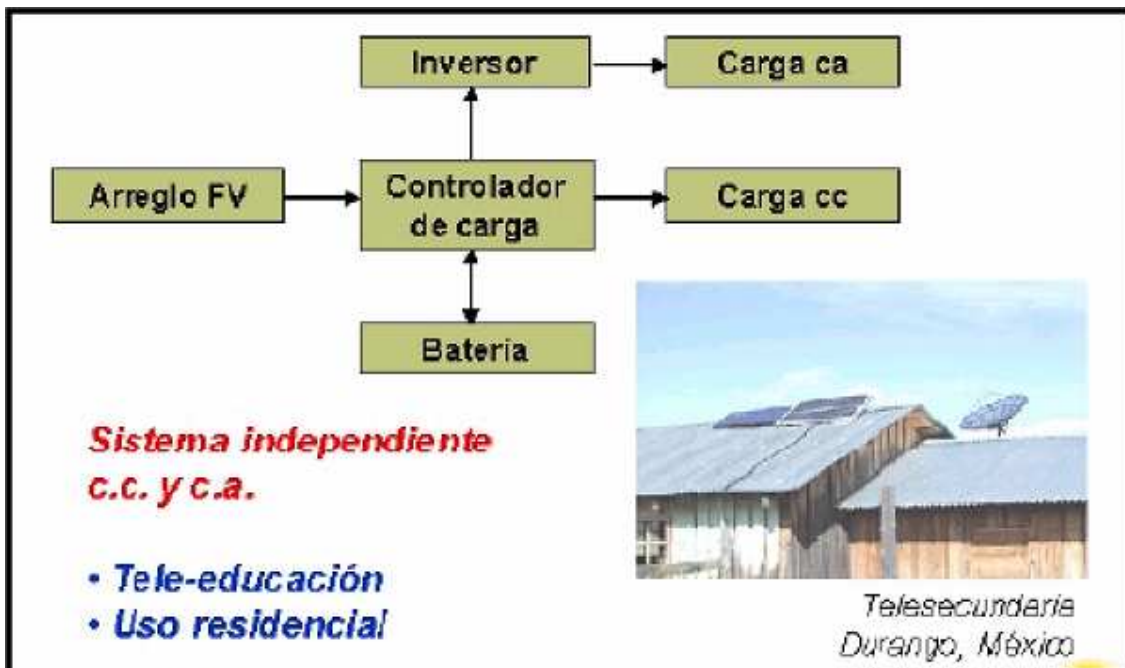


Figura 2.22

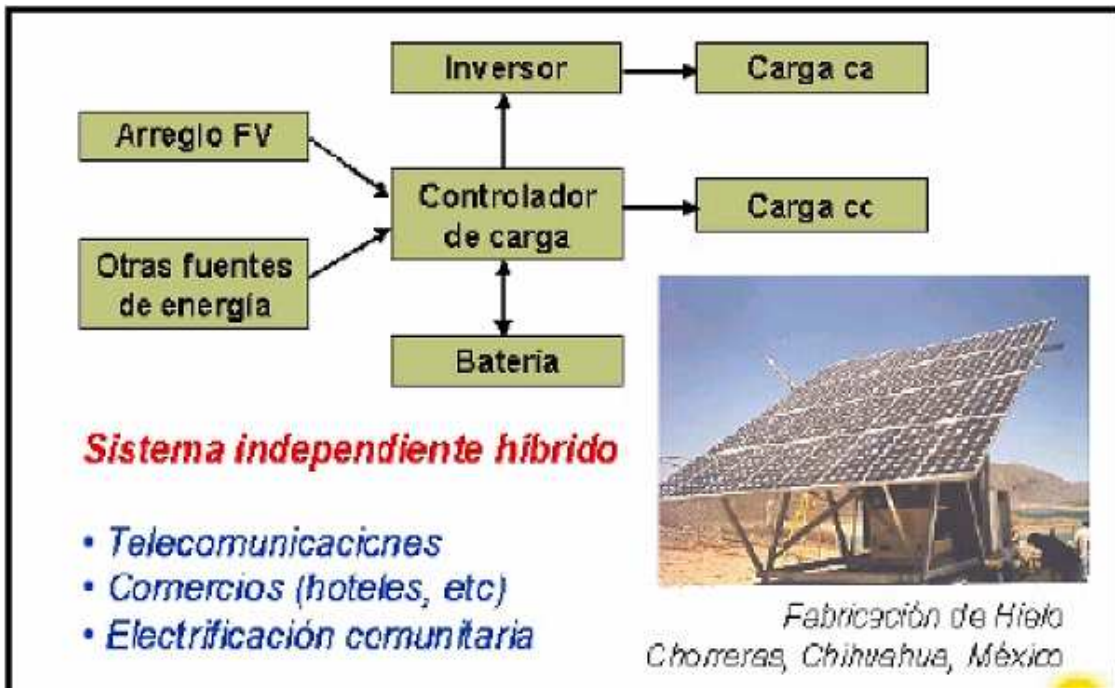


Figura 2.23

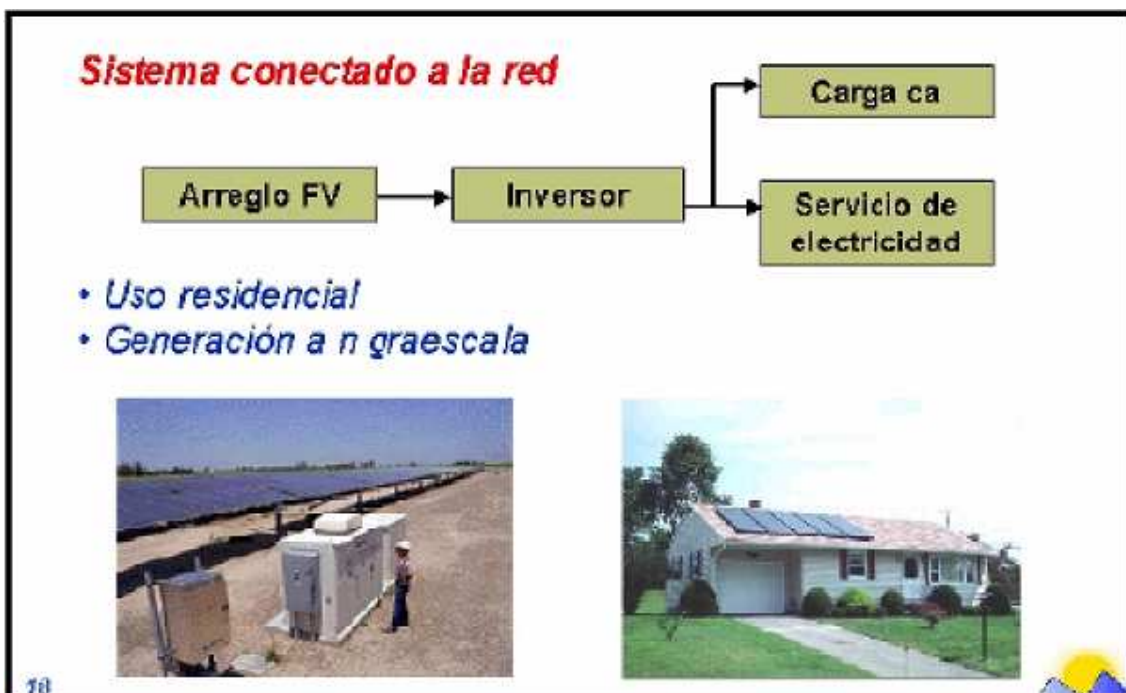


Figura 2.24