



FOTOVOLTAICA

Manual de diseño e instalación

Una panorámica de la energía fotovoltaica



SOLAR ENERGY INTERNATIONAL

Educación en energía renovable para un futuro sostenible

1.1 El desarrollo de la energía solar fotovoltaica

Los sistemas fotovoltaicos son sistemas que producen electricidad directamente de la luz solar. Los sistemas fotovoltaicos (FV; en inglés PV) producen energía limpia y confiable sin consumir combustibles fósiles y pueden ser usados en una amplia variedad de aplicaciones. Una aplicación a pequeña escala de la tecnología FV es el suministro de energía para relojes y radios. En una escala mayor, muchas redes de servicios públicos han instalado recientemente grandes arreglos de módulos fotovoltaicos para abastecer a los consumidores con electricidad de generación solar, o como sistemas de respaldo para equipos críticos.

Las investigaciones en la tecnología fotovoltaica comenzaron hace más de cien años. En 1873 el científico británico Willoughby Smith observó que el selenio era sensible a la luz. Smith concluyó que la capacidad del selenio de conducir electricidad aumentaba en proporción directa con su exposición a la luz. Esta observación del efecto fotovoltaico llevó a muchos científicos a experimentar con ese elemento relativamente excepcional, con la esperanza de usarlo para generar electricidad. En 1880, Charles Fritts desarrolló la primera celda fotovoltaica basada en selenio. La celda producía electricidad sin consumir ninguna sustancia material y sin generar calor.

Hasta 1905, cuando Albert Einstein ofreció su explicación del efecto fotoeléctrico, no había una amplia aceptación de la FV como fuente de energía. Las teorías de Einstein condujeron a un mayor entendimiento del proceso físico de generación de electricidad a partir de la luz solar. A pesar de su baja eficiencia y altos costos de producción, los científicos continuaron sus investigaciones sobre la celda solar de selenio durante los años 30 del siglo XX.

A principios de la década de los 50 los laboratorios Bell comenzaron la búsqueda de una vía confiable para energizar los sistemas de comunicación remotos. Los científicos de Bell descubrieron que el silicio, el segundo elemento más abundante en la Tierra, era sensible a la luz, y que cuando se le trataba con ciertas impurezas, generaba una tensión eléctrica (voltaje) considerable. En 1954 Bell desarrolló una celda basada en silicio que alcanzaba un 6% de eficiencia.

El primer uso de la tecnología fotovoltaica no relacionado con trabajos de laboratorio fue la electrificación de una estación repetidora de telefonía

en los campos de Georgia, a finales de los años cincuenta.

Los científicos de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*), al buscar una fuente de energía ligera, robusta y confiable, apropiada para ser usada en el espacio exterior, instalaron en el primer satélite artificial de EE.UU., el Vanguard I, un sistema FV constituido por 108 celdas. A principio de la década de los 60, la mayoría de los satélites y naves espaciales contaban con sistemas FV.

Hoy en día los módulos solares brindan energía a millones de hogares en todo el mundo, han creado, hasta el 2012, más de 2,5 millones de puestos de trabajo, y generado innumerables oportunidades económicamente sostenibles. Para el año 2013, las instalaciones de productos fotovoltaicos en todo el mundo alcanzaron capacidades por encima de los 139 GW, con una inversión superior a los USD 113 mil millones de dólares en el mercado mundial. (Según el *Global Status Report* de REN21, 2014). Las aplicaciones incluyen comunicaciones, refrigeración para servicios médicos, riego de cultivos, purificación de aguas, iluminación, protección catódica, vigilancia ambiental, navegación aérea y marítima, redes de servicios públicos de electricidad y otras aplicaciones residenciales y comerciales.

El gran interés generado por las aplicaciones fotovoltaicas representa una sólida promesa para esta tecnología de rápido desarrollo.

1.2 Oportunidades actuales y emergentes

Las fuentes convencionales de energía han creado incontables problemas ambientales, tales como el calentamiento global, lluvias ácidas, smog, contaminación de las aguas, vertederos residuales que se llenan rápidamente, destrucción de hábitats por derrames de combustibles y pérdida de recursos naturales. Los sistemas fotovoltaicos no generan estas consecuencias ambientales.

En la actualidad la mayoría de los módulos FV utilizan el silicio como su componente principal. Las celdas de silicio fabricadas a partir de una tonelada de arena pueden producir tanta electricidad como 500 000 toneladas de carbón. La tecnología fotovoltaica también genera puestos de trabajo:

En el 2013, solo la industria solar empleó directamente a más de 2,8 millones de personas en áreas como investigación, producción e instalaciones.

De acuerdo con el reporte del año 2014 de REN21, *Global Status Report*, el mercado de instalaciones FV creció 32% en todo el mundo durante el año 2013. Este campo continúa creciendo y crea una demanda de instaladores profesionales calificados.

Los economistas han predicho que la energía fotovoltaica será la forma de energía comercial de más rápido crecimiento después del 2030, con ventas por encima de cien mil millones de dólares. De hecho, se espera que el uso de energía solar y otras renovables se duplique para el año 2010, lo que creará más de 350 000 nuevos puestos de trabajo. No es una sorpresa que esta fuente de energía eléctrica limpia y confiable sea considerada como el futuro de la producción energética.

1.3 Ventajas de la tecnología fotovoltaica

Los sistemas fotovoltaicos ofrecen ventajas sustanciales sobre las fuentes convencionales de energía:

Fiabilidad: Aún en las condiciones más severas, los sistemas fotovoltaicos han probado su fiabilidad, evitando fallas costosas en situaciones donde una operación continua resulta crítica.

Durabilidad: La mayoría de los módulos FV están garantizados por los fabricantes para producir energía durante 25 años, y pueden continuar generando más allá de ese tiempo.

Bajo costo de mantenimiento: Transportar personas y materiales a las áreas remotas para el mantenimiento de los equipos resulta caro. Como los sistemas FV solo necesitan inspecciones periódicas y mantenimiento ocasional, este costo resulta notablemente menor que en los sistemas convencionales.

No hay costo por combustible: Como no se usan combustible, no hay costos asociados con su adquisición, almacenamiento o transporte.

Reducción de la contaminación sonora: Los sistemas fotovoltaicos operan silenciosamente y con mínimas partes en movimiento, cuando las hay.

Modularidad: Los módulos pueden ser añadidos gradualmente para incrementar la potencia disponible y la energía producida.

Seguridad: En los sistemas FV no hay procesos peligrosos como combustión, ni los riesgos asociados al manejo de combustibles. Por eso son muy seguros cuando se han diseñado e instalado adecuadamente.

Independencia: Muchos usuarios residenciales de sistemas FV enfatizan en la independencia de las redes de servicio como su motivación primaria para adoptar esta tecnología.

Descentralización de la red eléctrica: Estaciones de generación pequeñas y cercanas al lugar de consumo de la energía eléctrica, reducen las posibilidades de cortes de suministro por problemas en la red eléctrica.

Desempeño a altas elevaciones: El incremento de la irradiación a altas elevaciones hace al uso de la energía fotovoltaica más ventajoso ya que se optimiza la producción de energía. Esto contrasta con el hecho de que un generador diésel en altas elevaciones debe descartarse debido a las pérdidas en eficiencia y potencia de salida.

1.4 Desventajas de la tecnología fotovoltaica

La energía fotovoltaica tiene algunas desventajas al compararse con sistemas de energía convencionales:

Costo inicial: Conectarse a la red no requiere de una inversión inicial, como es el caso con la tecnología FV, por esto, cada instalación debe ser evaluada desde una perspectiva económica y comparada con las alternativas existentes. Como el costo de los sistemas FV decrece y el de las fuentes convencionales de combustible se incrementa, los sistemas FV resultan cada vez más competitivos económicamente.

Variabilidad de la irradiación disponible: El estado del clima afecta considerablemente la energía producida por cualquier sistema energético basado en el sol. Variaciones en las condiciones del lugar requerirán modificaciones en el diseño del sistema.

Almacenamiento de energía: Algunos sistemas FV usan baterías para almacenar la energía, incrementando tamaño, costo y complejidad del sistema.

Aumento de la eficiencia de las cargas: El costo de un sistema fotovoltaico exige y es una oportunidad para mejorar la eficiencia de las cargas. Esto frecuentemente obliga a reemplazar los dispositivos y aparatos ineficientes.

2.1 Terminología

La electricidad es el flujo de electrones a través de un circuito. La fuerza o presión con la que los electrones se mueven en un circuito se mide como voltaje. El ritmo con que fluyen los electrones se mide como amperaje. La potencia del sistema se mide en watts, o vatios. Para efectos de este libro de texto se utilizarán los watts.

Un voltio es la unidad de la fuerza que causa el movimiento de los electrones en un cable (presión eléctrica o tensión eléctrica). Los voltios se representan con la letra V y la tensión se representa por el símbolo E. A la tensión eléctrica en algunas ocasiones se le llama fuerza electro motriz (FEM). Algunos valores de voltajes usados comúnmente en los sistemas eléctricos pequeños son 12 V, 24 V, 48 V. La mayoría de los hogares en América usan sistemas de 120 V y 240 V. Es común ver otros formatos, como por ejemplo en Chile y Argentina donde se utiliza 220 V. En Bolivia se utiliza 230 V.

Un amperio es la unidad de corriente eléctrica que pasa por un cable. Se representan por la letra A y la corriente se representa por el símbolo I (intensidad de la corriente). Así como una tubería se mide por el flujo de agua que pasa por ella, un cable se mide de acuerdo al flujo de electrones (corriente) que fluye por él. Una corriente de un amperio por una hora se refiere a un amperio-hora (Ah). Este término se usa comúnmente para describir la capacidad de almacenaje de energía de la batería amp-hora. (Para mayor información en métodos de cableados y de calibres de conductores, refiérase al Capítulo 9).

Un watt es la unidad de potencia equivalente, en el caso eléctrico, a la potencia consumida por una

corriente de un ampere generada bajo una tensión de un volt. La potencia, expresada en watts, indica el ritmo con el cual una carga usa la energía eléctrica, o el ritmo al que un dispositivo generador de electricidad produce la energía eléctrica.

Como los consumidores y productores de electricidad necesitan medir cuánta electricidad se consume, una unidad de energía eléctrica importante es el watt-hora. Un dispositivo que consume energía eléctrica a razón de un watt durante una hora, habrá consumido una cantidad de energía eléctrica igual a un watt-hora.

Para calcular los watt-hora que consume una carga, hay dos cosas que usted deberá conocer:

- La potencia o ritmo de consumo en watts del dispositivo.
- La duración estimada del tiempo que va a estar trabajando, o trabajó, el dispositivo.

El término watt-hora probablemente le resulte familiar, ya que las empresas de servicio eléctrico le cobran a sus clientes según la cantidad de kilowatt-hora consumidos. Así un kilowatt-hora de energía eléctrica equivale a 1 000 watt-hora (kWh).

Tipos de Corriente

Hay dos tipos de corriente eléctrica: Corriente Directa, CC (también conocida como Corriente Continua) y Corriente Alterna, CA. La corriente alterna (CA) es la corriente eléctrica en la que la dirección del flujo de electrones se invierte con una frecuencia estable. Este tipo de corriente es producida por alternadores. En un alternador un campo magnético hace que los electrones fluyan primero en una dirección y luego en la opuesta. Las compañías de electricidad de los servicios públicos suministran corriente alterna.

La corriente directa o corriente continua (CC) es el tipo de corriente eléctrica producida por un generador en la que los electrones fluyen solo en una dirección. Las baterías y módulos fotovoltaicos suministran corriente directa CC.

Problema: ¿Cuánta energía eléctrica se consume si un foco incandescente de 100 watts se utiliza durante 10 horas?

Solución: 100 watt x 10 horas = 1 000 watt-hora (1 kilowatt hora).

ECUACIONES:
 Potencia: Watts = Voltios x Amperios

$$W = V \times A$$

$$1\ 000\ W = 1\ \text{Kilowatt (kW)}$$

Energía: Watts-hora = Watt x Horas

$$Wh = W \times h$$

$$1\ 000\ Wh = 1\ \text{Kilowatt-hora (kWh)}$$

Capacidad: Amperios-hora = Amperes x Horas

$$Ah = A \times h$$

2.2 Acoplamiento de los aparatos eléctricos al sistema

Los diseñadores de sistemas FV dimensionan sus sistemas en base al consumo de las cargas. Éstas se calculan usando las potencias nominales de los aparatos eléctricos, dadas por los fabricantes, junto con una estimación del tiempo durante el cual será ocupado el aparato. Usted puede encontrar la clasificación nominal de frecuencia, voltaje y potencia en la placa de identificación del artefacto. Los términos discutidos en este capítulo le ayudarán a aprovechar la información dada en dicha placa, con el objetivo de ajustar correctamente el suministro de energía eléctrica a los requerimientos del equipo.

Algunos de los términos que se estudiarán más a fondo son: potencia (watts), corriente (amperios), tensión o voltaje (voltios), corriente alterna (CA) y corriente directa (CC).

Cuando un voltaje es parte de un circuito en CC, se abrevia como VCC. Cuando es parte de un circuito en CA, se abrevia como VCA.

Al elegir artefactos para usarse con un sistema FV, hay dos reglas muy importantes que deben ser seguidas estrictamente:

- El voltaje del artefacto debe coincidir con el voltaje que se le suministra. La fuente de energía, como una batería, un generador, un módulo fotovoltaico, o la red de servicios, determina el voltaje suministrado.
- El artefacto eléctrico debe funcionar con el tipo de corriente que se le suministre, ya sea alterna (CA) o directa (CC).

2.3 Circuitos eléctricos

Un circuito eléctrico es la trayectoria ininterrumpida del flujo de electrones desde una fuente de voltaje, tal como una batería o un módulo fotovoltaico, a través de un conductor (cable), hasta una carga, y su regreso a la fuente. Un circuito eléctrico simple se muestra en la Figura 2-1, como esquema y como diagrama. Este ejemplo muestra una fuente de voltaje simple, una batería de 12 V, conectada a una carga simple, un foco de 12 V y 24 W, con un interruptor para encender y apagar la luz.

El interruptor controla la continuidad del flujo de corriente. Si el interruptor está en la posición APAGADO, se entiende que el circuito está abierto, y el cable entre la fuente y la carga está desconectado por lo que la luz está apagada ya que los electrones no pueden fluir por ella. Si el interruptor está en la posición ENCENDIDO, el circuito está cerrado: el cable entre la fuente y la carga está conectado y la luz encendida. Ciertos dispositivos conocidos como relés o *relays*, se usan frecuentemente como controles para abrir o cerrar un circuito. Los relés se pueden accionar eléctricamente y se clasifican por voltaje, tipo de corriente (CA o CC) y por su estado normal (“normalmente abierto” o “normalmente cerrado”).

Un sistema eléctrico puede ser explicado con un sistema de bombeo de agua. Una bomba eleva dos litros de agua por minuto desde un tanque inferior a uno que está 12 metros más alto, incrementando su presión al aumentar su altura. La presión creada por la altura de 12 metros del tanque más alto es análoga a la tensión eléctrica de 12 voltios en la batería.

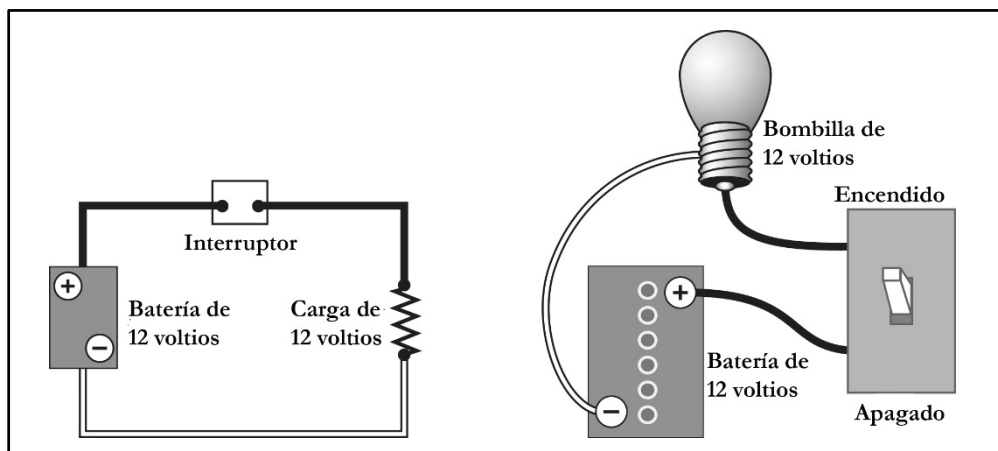


Figura 2-1

CIRCUITOS ELÉCTRICOS

3.1 Principios de radiación solar

El término usado para designar la energía solar que incide sobre una superficie en un momento y lugar particular es **radiación solar** (en muchos textos, y depende de su país, es posible que encuentre el término de forma intercambiable con **irradiación solar**). Cuando la radiación se describe como potencia, se expresa como una cantidad de watts por metro cuadrado (W/m^2) y usualmente se presenta como el valor promedio diario para cada mes. En un día claro, la radiación que golpea la Tierra es alrededor de $1\ 000\ W/m^2$. Sin embargo, muchos factores determinan cuánta radiación solar existe en un sitio determinado, incluyendo las condiciones atmosféricas, la posición de la Tierra con relación al Sol y las obstrucciones existentes en el sitio.

Nota: Aunque este libro expresa la radiación en kilowatt hora por metro cuadrado, también puede expresarse en BTU, joule (J), o Langley. Pueden usarse las siguientes equivalencias:

$$1kWh/m^2 = 317\ BTU/ft^2 = 3.6\ MJ/m^2$$

$$= 1\ Langley/85.93 = 1\ hora\ sol\ pico = 1\ SOL$$

La radiación solar recibida en la superficie de la Tierra está sometida a variaciones causadas por la atenuación atmosférica. Las causas primarias de este fenómeno son las siguientes:

- Las moléculas de aire, el vapor de agua y el polvo en la atmósfera dispersan la luz.

- El ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono de la atmósfera absorben la luz.
- Las moléculas de aire, el vapor de agua y el polvo en la atmósfera dispersan la luz.

Las **horas sol pico** son la cantidad de horas equivalentes a una irradiación de $1\ 000\ W/m^2$ en un día. Permiten describir la cantidad de energía solar disponible en el transcurso de un día por m^2 , perpendicular a la posición del Sol. Por ejemplo, si la energía recibida durante todo el día es igual a la energía recibida si el Sol brillara durante 5 horas a $1\ 000\ W/m^2$, diríamos que son 5 horas sol pico = $5\ kWh/m^2$.

Tanto la distancia de la Tierra al Sol como la inclinación del eje de la Tierra afectan la cantidad accesible de energía solar. Las latitudes del hemisferio norte de la Tierra están inclinadas hacia el Sol desde junio hasta agosto, lo que causa el verano en el hemisferio norte. La duración más extensa de los días en verano y la inclinación favorable del eje de la Tierra crea más radiación solar accesible de forma significativa en un día de verano que en un día de invierno.

En el hemisferio norte, cuando el Sol está predominantemente en la parte sur del cielo, los módulos FV deben orientarse hacia el Sur para captar la mayor cantidad de radiación y así producir el máximo de energía. En cada sitio en particular se debe optimizar la captación de radiación disponible variando la posición del arreglo.

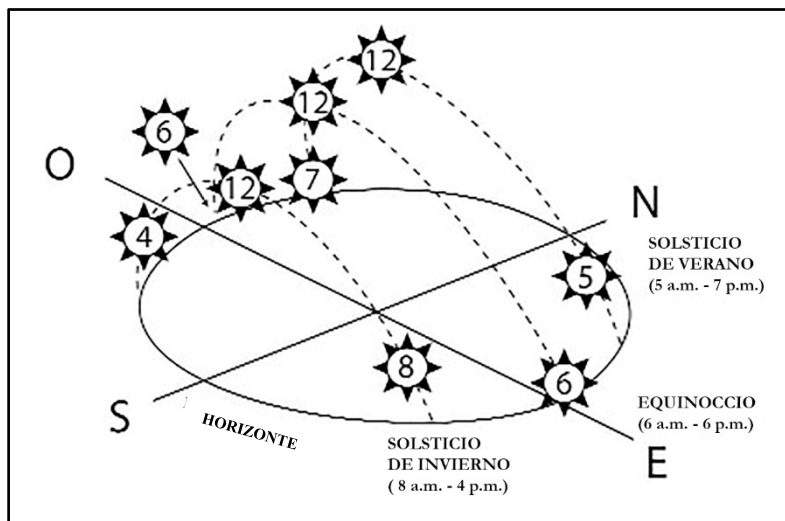


Figura 3-1

TRAYECTORIA SOLAR A LO LARGO DEL AÑO - LATITUDES SEPTENTRIONALES

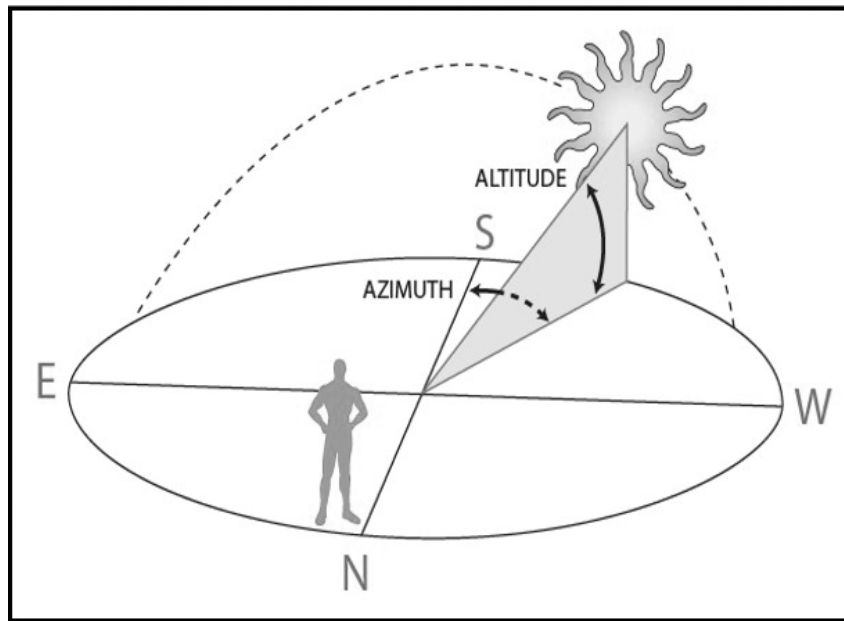


Figura 3-2

ACIMUT Y ALTITUD EN LATITUDES SEPTENTRIONALES

Por fortuna, la trayectoria solar a través del cielo es predecible. La latitud (distancia hacia el Norte o Sur a la que se encuentra un sitio del Ecuador terrestre, medida en grados) determina si el Sol parece moverse en la parte norte o la sur del cielo. Por ejemplo: Denver, Colorado, está situado aproximadamente 40 grados Norte y el Sol parece moverse a través de la parte sur del cielo. A mediodía el Sol señala exactamente el Sur. Si se está en una latitud sur, esto será inverso: el Sol parecerá moverse a través de la parte norte del cielo, y señalará exactamente al Norte al mediodía.

Una vez al día la Tierra da una vuelta sobre su eje, el cual está inclinado aproximadamente 23,5 grados de la vertical (respecto al plano de la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol). En los equinoccios de primavera y otoño (21 de marzo y 21 de septiembre, respectivamente), el Sol parece levantarse exactamente por el Este y ponerse exactamente por el Oeste. Si se está en el hemisferio norte, durante los meses de invierno el Sol parece salir hacia el sur del Este y ponerse hacia el sur del Oeste. En el hemisferio sur, de nuevo, será a la inversa. La Figura 3-1 ilustra la posición del Sol en diferentes momentos del día y del año para un sitio en el hemisferio norte.

Orientación

La localización aparente del Sol hacia el este u oeste del Sur se llama **ángulo de acimut**, y se mide en grados. Vea la Figura 3-2. Como hay 360 grados en una circunferencia y 24 horas en un día, el Sol parece moverse 15 grados en acimut cada hora (360 grados divididos entre 24 horas). El Sur magnético o el Sur marcado por una brújula no es lo mismo que el Sur verdadero.

Las brújulas se orientan con el campo magnético de la Tierra, el cual no está necesariamente alineado con el eje de rotación de la Tierra. La desviación del Sur magnético respecto al Sur verdadero (o geográfico) recibe el nombre de **declinación magnética**. Para conocer la declinación magnética de su localidad refiérase a un mapa de declinación magnética, disponibles ampliamente en Internet, o pregúntele a las especialistas de la zona. Las Figuras 3-3 y 3-4 brindan la declinación magnética aproximada para los Estados Unidos y el mundo, respectivamente. Estos mapas bastan para nuestros propósitos.

4.1 Uso eficiente de la energía

Los dispositivos que en su operación utilizan energía eléctrica son conocidos habitualmente como **cargas**. La cantidad de energía que ellas consumen es lo que más influye en el tamaño y costo de un sistema fotovoltaico. Para un diseño óptimo, el diseñador del sistema FV debería preocuparse primero de mejorar la eficiencia en el uso de la energía que se generará. Se deben analizar exhaustivamente las necesidades energéticas para poder identificar las oportunidades de ahorro energético. Por ejemplo, muchos artefactos (cargas) comunes utilizan una resistencia eléctrica para generar calor: hornos eléctricos, secadores de ropa, calentadores de agua, sistemas de calefacción ambiental y otros. Como regla general, alimentar esas cargas puede ser económicamente prohibitivo para sistemas residenciales FV, por lo tanto es recomendable encontrar una forma alternativa para el calentamiento. Esto se llama reemplazo de cargas. Un aparato para calentar agua puede requerir alrededor de 2 500 watts y operar solo un 25% del tiempo. Las cargas para calefacción de espacios y calentamiento de agua pueden satisfacerse a través de medios alternativos, incluyendo artefactos térmicos solares, de gas, de propano o de leña. Estas alternativas son un uso más eficiente de energía y un excelente ejemplo de reemplazo de cargas.

Aunque algunos electrodomésticos, como tostadoras y secadores de pelo, consumen bastante potencia (watts), pueden sin embargo alimentarse con sistemas FV, ya que por lo general no se utilizan durante largos períodos de tiempo, resultando en un bajo consumo general de energía.

Además del reemplazo de cargas, un diseñador puede mejorar la eficiencia energética del cliente sugiriendo el uso de cargas más eficientes. Por ejemplo, las bombillas incandescentes pueden ser reemplazadas por bombillas fluorescentes compactas que, para la misma iluminación, usan cerca de un cuarto de la potencia de las primeras.

Para reducir el costo de un sistema FV, evite los siguientes dispositivos:

- Artefactos eléctricos para calefacción de espacios
- Calentadores eléctricos de agua
- Secadores eléctricos de ropa
- Cocinas eléctricas
- Refrigeradores ineficientes.

También se puede disminuir la demanda de energía eléctrica innecesaria a través de las siguientes buenas prácticas:

- Vivir sin artículos innecesarios
- Reducir el uso de dispositivos y equipos cuando no los necesite
- Diseñar un sistema sin inversor y utilizar solo cargas de CC si es posible, evitando las pérdidas en eficiencia del inversor (esto se considera usualmente solo si se trata de un sistema pequeño como casas móviles y cabañas remotas)
- Realizar tareas durante las horas de luz diurna para maximizar la eficiencia de las baterías (en sistemas autónomos).

Los diseñadores deben involucrar a los usuarios del sistema FV en el proceso de diseño e instalación del sistema. El incremento de su conocimiento reducirá también la necesidad de energía eléctrica, ya que serán más cuidadosos al usar sus recursos eléctricos con más prudencia.

4.2 Requisitos de cargas eléctricas

Normalmente la potencia en watts requerida por las cargas está indicada explícitamente en la documentación aportada por los fabricantes y/o en las placas informativas de los propios artefactos. Cuando no es así, por lo general usted encuentra en su lugar el voltaje en voltios y la corriente en amperios. Entonces puede calcular la potencia requerida por una carga multiplicando el voltaje por la corriente; es decir, multiplicando valor en voltios por el valor en amperios.

La tabla 4-1, al final de este capítulo, lista las potencias de las cargas más comunes en el uso doméstico. Esta tabla es solo para referencia. Cuando se diseñe un sistema FV se deben usar las especificaciones reales de cada carga, en especial si se está diseñando un sistema autónomo.

Cargas cíclicas

La mayoría de las cargas consumen energía continuamente cuando están encendidas. Sin embargo, algunas cargas se encenderán y apagarán automáticamente mientras estén conectadas a una fuente de energía. Un **ciclo de trabajo** es el porcentaje de tiempo que un dispositivo encendido está realmente

consumiendo energía. Buenos ejemplos de dispositivos con ciclos de trabajo distintos al 100% son refrigeradores y congeladores. Un refrigerador puede tener un ciclo de trabajo de 50% ó 60% del tiempo, dependiendo de su eficiencia. Este es el porcentaje de tiempo que el refrigerador tiene su compresor realmente encendido y consumiendo (este no está encendido el 100% del tiempo).

Además los dispositivos que generan o usan calor usualmente operan también en ciclos de trabajo (de encendido y apagado). Por ejemplo las cobijas térmicas, los calefactores, las planchas y los dispositivos eléctricos de cocina. Un termostato controla este tipo de dispositivos.

Cargas fantasmas

Existen numerosas cargas eléctricas que consumen energía aun cuando están “apagadas”. Cuando se realizan cálculos de consumo energético de una casa, deben tenerse en cuenta estas cargas fantasmas. Las cargas fantasmas son pequeñas cargas que consumen energía y requieren potencia constantemente. Por ejemplo televisores (o cualquier dispositivo) que se encienda con control remoto, y aparatos con relojes digitales, como los hornos de microondas, consolas de video y algunas computadoras personales. Otras cargas fantasmas son aplicaciones con “cajas de pared” o transformadores externos como las contestadoras telefónicas, cargadores de baterías y recolectoras de polvo. Las cargas fantasmas pueden parecer despreciables a primera vista, pero la realidad es que ellas están consumiendo energía las 24 horas del día durante los 7 días de la semana, y esto llega a sumar

cantidades significativas de energía. Se recomienda reducir las cargas fantasmas a un mínimo, ya sea desconectándolas o colocándolas en un circuito que se pueda desconectar con una regleta de alimentación o un interruptor. La Fig. 4-1 muestra algunas cargas fantasmas comunes y la potencia consumida en watts.

Estimación de picos de consumo

Cuando se calcula el consumo de cargas eléctricas, es importante ponerle atención a las cargas que tienen un consumo pico de arranque. Estas son artefactos cuyos motores consumen más corriente (y potencia) cuando arrancan que cuando están operando en estado normal. Por ejemplo, una sierra que consume 900 W en operación, puede usar hasta 3 000 W para arrancar el motor. Consulte al fabricante, o mida el pico de corriente con un amperímetro al encender la carga, para determinar este requerimiento. Como una regla práctica, este requerimiento de potencia puede ser estimado multiplicando por tres la potencia requerida por la carga en operación normal (en watts). Para conocer el requerimiento de sobretensión específico vea la documentación del fabricante del equipo.

Pico de arranque ~ Potencia de operación x 3

4.3 Refrigeración

Comúnmente el refrigerador es uno de los aparatos que tienen mayor consumo eléctrico. Aunque hay otras formas de preservar los alimentos, las personas en la mayor parte del mundo raramente viven sin este

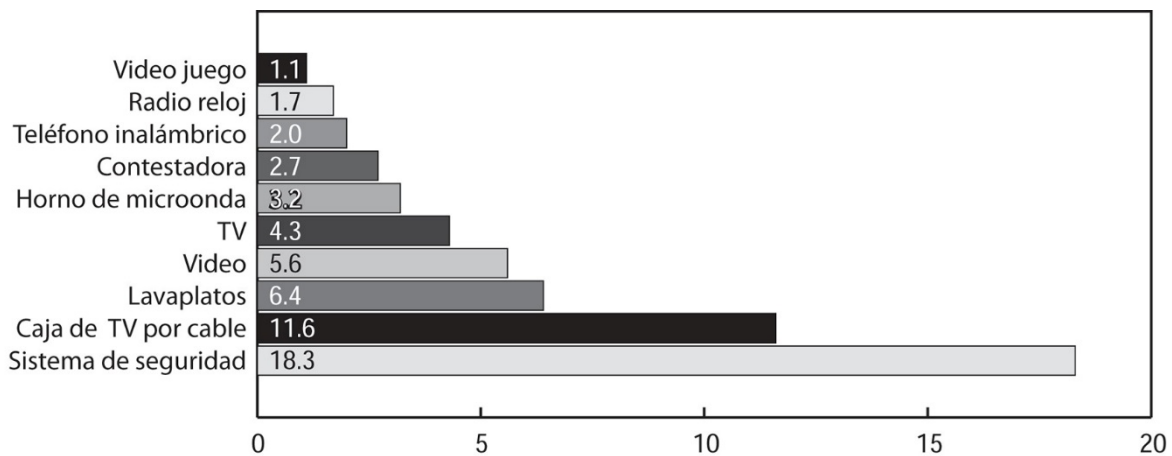


Figura 4-1

POTENCIA EN WATTS CONSUMIDA POR CARGAS FANTASMAS COMUNES

5.1 Principios de la energía fotovoltaica

Los módulos fotovoltaicos son una fuente confiable de energía eléctrica, pero es necesario un diseño adecuado del sistema FV para alcanzar un resultado efectivo y seguro. Este capítulo discute las características físicas básicas de los módulos FV y los efectos del clima y específicos del lugar sobre su desempeño.

La unidad básica de un sistema FV es la **celda fotovoltaica**. Las celdas son dispositivos eléctricos de un espesor cercano a 0,2 mm (una centésima de pulgada) que convierte la radiación del sol en corriente eléctrica directa gracias al efecto fotovoltaico. Estas no consumen ningún tipo de combustible y tienen una vida útil mínima de 25 años. Las celdas FV tienen el potencial de llegar a producir una cantidad importante de la energía eléctrica que necesitamos.

Un **módulo FV** es un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas en serie o serie-paralelo para producir voltajes y corrientes específicas. Así como las baterías, cuando las celdas FV se conectan en serie el voltaje se incrementa, mientras la corriente permanece constante. La mayoría de las celdas produce medio voltio (0,5 V). Por lo tanto, un módulo típico de 36 celdas tendrá un voltaje de salida de 18 VCC, medido bajo **condiciones estándar de prueba, STC** (por sus siglas del inglés: *Standard Test Conditions*) y un voltaje o tensión nominal de 12V. La corriente de salida estará determinada por el área y la eficiencia de cada celda en el módulo.

NOTA: STC (o CEP en español) son condiciones estándares usadas en la industria para medir, especificar y comparar las capacidades de los componentes de un sistema FV. Significan radiación de 1 000 Watt/m² y 25°C temperatura de celda. Los reportes de laboratorios y los catálogos de los productos suelen estar referidos a estas condiciones.

Las celdas FV están protegidas del clima (intemperie y factores ambientales) por vidrio y una estructura rectangular perimetral, conformando el módulo FV. Los módulos se comercializan en diversas formas y tamaños. Habitualmente son rectangulares y planos y producen entre 5 W y 300 W cada módulo. Los términos “módulo” y “panel” muchas veces se usan indistintamente aunque, hablando con más precisión, un **panel FV** es un grupo de módulos interconectados. Un **arreglo FV** es un grupo de paneles conectados entre sí para producir los valores deseados de corriente y voltaje, instalados sobre una estructura de montaje. Vea la Figura 5-1.

Un módulo puede convertir en energía eléctrica utilizable alrededor del 16% de la radiación disponible. Por ejemplo, al mediodía solar en un día claro, un arreglo FV puede recibir 1000 W/m² de radiación, lo que resultaría en unos 160 W de potencia por cada m² del arreglo.

Debido a que la posición del sol en el cielo cambia a través del día y del año, el arreglo recibirá distintas cantidades de radiación solar. Como la

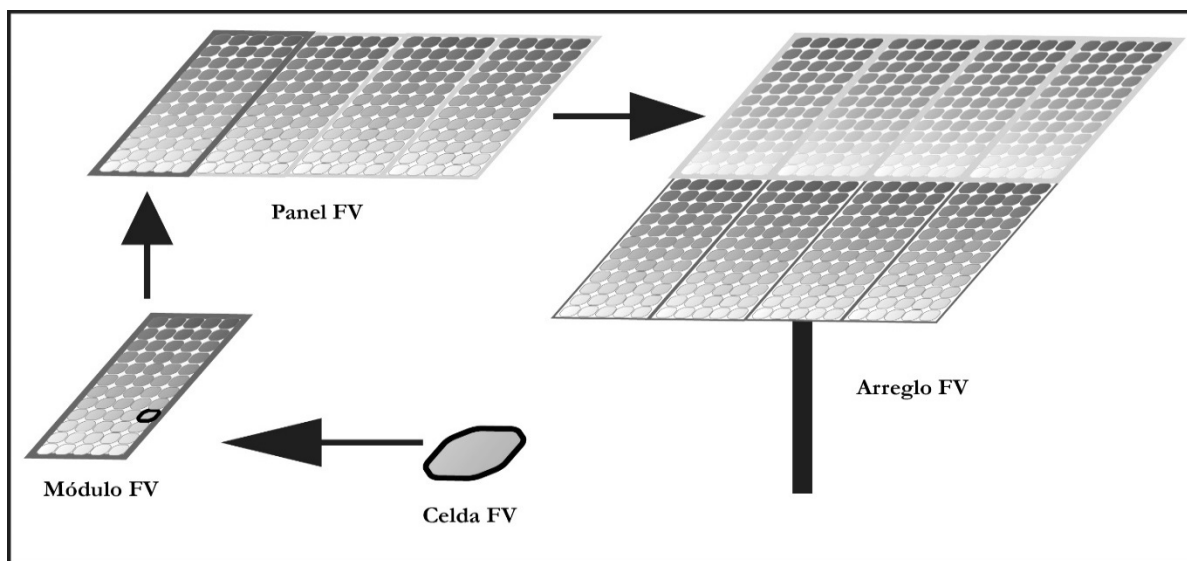


Figura 5-1

TERMINOLOGÍA FOTOVOLTAICA

potencia del arreglo es directamente proporcional a la cantidad de radiación que recibe, en raras ocasiones un arreglo produce su máxima potencia. Por ejemplo, un arreglo en Albuquerque, Nuevo México (35° latitud norte), orientado hacia el Sur e inclinado a 35 grados, recibe 6,4 horas sol pico cada día (promedio para un año típico). Si el módulo produce 100 W/m² bajo una radiación solar de 1000 W/m², se puede aproximar que un metro cuadrado del arreglo FV puede producir 640 Wh cada día.

La reacción fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas no necesitan partes móviles para generar energía eléctrica a partir de la radiación solar. Cuando la radiación del sol incide sobre una celda, se excitan los electrones y se generan el voltaje y la corriente que se transmiten desde la celda a un circuito eléctrico.

Describiremos el proceso de fabricación de las celdas cristalinas simples para ayudarle a entender la reacción fotovoltaica. Para fabricar celdas FV cristalinas simples, se toma el silicio, uno de los elementos más abundantes en la Tierra, se purifica y se le hace crecer en una estructura cristalina. El silicio, en su forma más pura, es un semiconductor; es decir sus propiedades eléctricas caen entre las de un conductor y las de un aislante y lo convierten en un mal conductor de electricidad. A través de un proceso conocido como “dopado” se le añaden impurezas al silicio, y se modifican sus propiedades naturales para facilitar el flujo eléctrico. Las impurezas (boro y fósforo) dispersas en el silicio crean un desbalance permanente en la carga molecular, y por consiguiente aumenta la habilidad del silicio para conducir electrones.

Una vez que el silicio ha crecido en una masa cristalina de forma cilíndrica, se rebana en obleas. Las obleas son entonces dopadas con boro o fósforo. Cuando el boro, que presenta déficit de un electrón, se difunde en el silicio, crea un material cargado positivamente (material tipo-p). Cuando el fósforo, que tiene un exceso de electrones, se difunde en el silicio, crea un material cargado negativamente (material tipo-n). Una celda solar cristalina es una oblea dopada por un lado con boro (+) y por el otro lado con fósforo (-). La región creada entre las capas positiva y negativa recibe el nombre de unión P-N. Una vez formadas las obleas, se integran con contactos de metal para barrer los electrones hacia el circuito eléctrico.

Cuando la radiación solar incide sobre una celda,

la “golpea” suavemente liberando electrones de la capa de silicio. Los electrones excitados son atraídos a la capa cargada positivamente por el boro, creando una carga eléctrica estática. Los electrones liberados crean una tensión eléctrica en la unión P-N y comienzan a fluir a través de los contactos de metal incorporados a la celda. Todos los contactos en la celda se unen en un cable que conecta el frente de una celda con el reverso de otra en mismo el módulo. Este circuito eléctrico permite a los electrones fluir a través de la unión P-N de cada celda conectada en serie, aumentando así el voltaje final.

El incremento de voltaje que ocurre en la unión P-N de cada celda tiene una fuerza electromotriz de aproximadamente medio volt. El voltaje de la celda es independiente del tamaño de la celda, aunque la corriente sí se ve afectada por el área de la celda y la intensidad de la radiación solar. A mayor área de la celda mayor será la corriente que produce.

Cada fabricante de módulos fotovoltaicos usa diseños y métodos de construcción propios para componer las obleas de silicio en un módulo. Las celdas son recubiertas con un revestimiento anti-reflejante para aumentar la absorción de la radiación solar. Las celdas individuales se colocan entonces sobre una base y se conectan para obtener los voltajes y corrientes deseados. Esta configuración base de las celdas es colocada en un marco para formar un módulo, el cual es encapsulado y protegido por una estructura para soportar adecuadamente la intemperie.

5.2 Características de módulos FV

Las siguientes características de un módulo FV son las que diferencian e identifican los diversos tipos de módulos disponibles en el mercado:

- Material de la celda
- Material del vidriado
- Conexiones eléctricas

La primera diferencia entre los módulos es el material de las celdas, siendo el silicio cristalino el más común. El material cristalino puede conformarse como un cristal único (monocristalino), ser moldeado en un lingote de cristales múltiples (policristalino) o ser depositado en una lámina delgada (silicio amorfo). Los dos tipos de celdas de silicio cristalino se comportan de manera similar, aunque las celdas monocristalinas

6.1 Tipos de baterías y su operación

Las baterías almacenan energía eléctrica de CC en forma química para un uso posterior. En un sistema FV, la energía se usa también por la noche y durante períodos nublados. Las baterías también sirven como fuentes de energía portátiles para aparatos como linternas y radios. Un sistema de almacenamiento con baterías es una fuente de energía relativamente estable frente a las variaciones propias de un sistema FV originadas en las variaciones de la radiación solar, ya sea a lo largo del día o por la noche. Las baterías o acumuladores pueden también alimentar las cargas cuando el sistema FV se desconecta por reparaciones o mantenimiento. Un banco de baterías bien diseñado puede también entregar potencias picos durante el arranque de motores.

Las baterías no son 100% eficientes. Cierta cantidad de energía se pierde en forma de calor y en las reacciones químicas, durante la carga y la descarga. Por lo tanto, deben considerarse módulos fotovoltaicos adicionales para compensar estas pérdidas en las baterías.

Recuerde, existen varios tipos de sistemas de uso diurno que no requieren baterías. Un sistema de bombeo de agua puede diseñarse para bombear durante el día a un tanque de almacenamiento

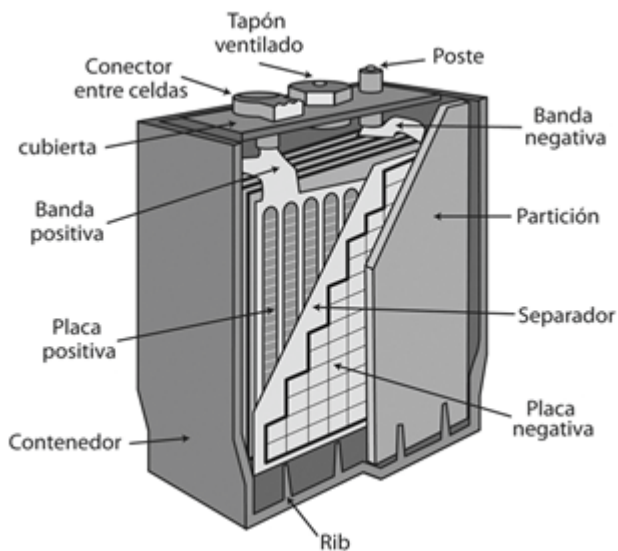


Figura 6-1

VISTA EN CORTE DE BATERÍA ÁCIDO-PLOMO TÍPICA

localizado a una altura mayor que el grifo (punto de salida) o al lugar de uso del agua. Algunas aplicaciones, como un ventilador para invernadero, requieren proporcionalmente más electricidad según la intensidad del sol se incrementa. Los ventiladores son necesarios y pueden operar solo cuando el sol brilla, un uso ideal para la energía FV.

Los sistemas fotovoltaicos interactivos (conectado a la red) no necesariamente necesitan baterías, aunque estas pueden actuar como una fuente de emergencia o de respaldo. Existen algunas pérdidas de eficiencia cuando se utilizan baterías en un sistema interactivo. Para más información vea el capítulo 11.

Existen muchos tipos y tamaños de baterías. Las más pequeñas son comúnmente utilizadas en linternas o radios portátiles, y están disponibles en las opciones desechables o recargables. Las baterías recargables de níquel cadmio (NiCd) se usan comúnmente para grandes cargas estacionarias tales como aplicaciones industriales, cargas diarias en climas fríos y pequeños dispositivos portátiles. Estas baterías pueden ser recargadas usando un cargador solar o uno de corriente alterna.

Los fabricantes de baterías NiCd declaran que estas pueden durar más ciclos de carga-descarga que las baterías de ácido-plomo. Una batería está cargando cuando recibe energía y descargando cuando se le extrae energía. Un ciclo se define cuando tiene lugar una secuencia de carga-descarga. En sistemas FV residenciales esto ocurre frecuentemente en un período de un día.

Los siguientes tipos de baterías se usan comúnmente en sistemas FV:

- Baterías de ácido-plomo
 - de líquido ventilada (abierta)
 - selladas (ácido-plomo de válvula regulada, VRLA por sus siglas de *Valve Regulated Lead Acid*)
- Baterías alcalinas
 - Níquel cadmio (NiCd)
 - Níquel hierro (NiFe)

Baterías ácido-plomo

En EEUU la batería más común para aplicaciones fotovoltaicas a escala residencial es la de ácido-plomo, la cual tiene ciertas similitudes con una batería de automóvil. Sin embargo las baterías de automóvil no se

recomiendan para aplicaciones FV, ya que no están diseñadas para “ciclos profundos”. Están diseñadas para descargar grandes cantidades de corriente durante cortos períodos de tiempo, necesario para arrancar un motor, y luego ser inmediatamente recargadas por el alternador o generador del vehículo. Los sistemas fotovoltaicos a menudo necesitan una batería capaz de descargar pequeñas cantidades de corriente durante largos períodos de tiempo y de ser recargada en condiciones irregulares. Las baterías de ciclo profundo pueden ser descargadas hasta en un 80%. Una batería de automóvil duraría solo unos pocos ciclos bajo estas condiciones de descarga. En contraste, las baterías ácido-plomo de ciclo profundo son apropiadas para aplicaciones fotovoltaicas ya que pueden soportar estas condiciones de descarga y, si se han seleccionado bien y han recibido mantenimiento adecuado, pueden durar entre tres y diez años, e incluso más.

En este capítulo se estudiarán a fondo los sistemas de baterías ácido-plomo, ya que estas baterías son recargables, ampliamente accesibles, relativamente baratas y están disponibles en una amplia variedad de tamaños y opciones. También son de uso común, de fácil mantenimiento y de una vida razonablemente larga. Como se mencionó, las baterías ácido-plomo pueden clasificarse en dos subcategorías: electrolito líquido (abiertas), y selladas o VRLA.

Baterías ácido-plomo abiertas: Las baterías de ácido-plomo son similares a las baterías de los automóviles. Están fabricadas de placas positivas y negativas, hechas de plomo y aleaciones de plomo, sumergidas en una solución electrolítica de ácido sulfúrico y agua. La Figura 6-1 muestra la sección transversal de una batería común de ácido-plomo abierta, de 12V, que contiene seis celdas individuales de 2 V cada una. Al igual que en las baterías de automóvil, se utiliza un controlador que regula el voltaje de la batería. Cuando el estado de carga de la batería se acerca a la carga completa, se produce hidrógeno gaseoso de la reacción química, y este es expulsado de la batería.

¡Cuidado! Si se acumula y no se ventila adecuadamente, el hidrógeno gaseoso es muy explosivo. No se deben permitir llamas ni chispas cerca de las baterías. Los motores generadores, sistemas de calefacción de gas y calentadores de agua con gas deben estar aislados de las baterías.

Cuando las aberturas de la batería eliminan gases se pierde también agua, por lo que esta debe reponerse periódicamente. Algunas baterías están equipadas con tapas de recombinación en cada celda, las cuales capturan los gases y los devuelven a la batería en forma de agua. Las baterías de ciclo profundo durarán más si se protegen de descargas demasiado profundas o completas. Controladores con desconexión por bajo voltaje (LVD de *Low Voltage Disconnect*) protegen a la batería de dichas descargas profundas. Al igual que la batería de un automóvil, tiene menos capacidad cuando la batería está fría, y las altas temperaturas le acortan la vida útil.

Baterías selladas (VRLA): Al contrario de las baterías abiertas, las baterías selladas no tienen tapa y por tanto no hay forma de acceder al electrolito. No están totalmente selladas; una válvula permite que si hay un exceso de presión por una sobrecarga, esta presión pueda disiparse. Esta característica define que una batería sea VRLA: de ácido-plomo regulada por válvula. Las baterías selladas se consideran libres de mantenimiento debido a que no se puede acceder al electrolito ni se les debe reponer el agua.

Los dos tipos de baterías selladas usadas comúnmente en sistemas FV son: de gel, o de esponja fibra de vidrio absorbente (AGM, *Absorbed Glass Mat*). En baterías tradicionales de gel, el electrolito se lleva a estado coloidal (se hace un gel) con la adición de gel sílica, la cual convierte al líquido en una masa coloidal. Las baterías AGM usan una capa de vidrio de sílice fibrosa para suspender al electrolito. Esta esponja tiene depósitos o bolsillos que ayudan en la recombinación de gases generados durante la carga y limitan la cantidad de hidrógeno gaseoso producido.

La principal ventaja de las baterías selladas es que son a prueba de derrames; el electrolito en gel no puede derramarse, aun en caso de que se quiebre la batería. Esto les permite ser transportadas y manipuladas con seguridad. Por esta razón son una elección razonable para aplicaciones remotas o marinas. Ellas pueden enviarse por avión, en contraste con las baterías comerciales ácido-plomo que necesitan ser transportadas en seco y luego ser activadas en el sitio al añadirles el electrolito. Las baterías selladas tampoco necesitan mantenimiento periódico (suministro de agua o ecualización). Esto las convierte en una buena elección para aplicaciones lejanas o remotas donde el mantenimiento regular sería complicado o simplemente imposible.