

Sistemas de energía solar fotovoltaica para equipos de telecomunicaciones

Introducción

Alberto Escudero-Pascual <aep@it46.se>

IT+46

v0.9

basado en el trabajo original de miembros de Ingeniería Sin Fronteras (ISF) y el Instituto de
Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid

Índice de contenidos

1 Agradecimientos y propiedad intelectual.....	2
2 Introducción.....	3
3 El sistema fotovoltaico	3
3.1 Descripción general del sistema.....	3
3.1.1 El generador fotovoltaico o campo de paneles	4
3.1.2 La batería o acumulador.....	4
3.1.3 El regulador de carga.....	5
3.1.4 El convertidor.....	6
3.1.5 Los equipos de consumo o cargas.....	6
4 El panel.....	7
4.1 Parámetros del panel.....	8
4.2 Valores del panel necesarios para el dimensionado.....	9
4.3 Interconexión de paneles.....	9
5 La batería.....	10
5.1 Tipos de baterías.....	11
5.1.1 Adaptación de baterías de automóviles	11
5.2 Estados de carga	12
5.2.1 Sobrecarga.....	12
5.2.2 Sobredescarga.....	12
5.3 Parámetros de la batería.....	13
5.3.1 Midiendo el estado de carga de la batería.....	13
5.4 Efectos de la temperatura.....	14
6 El regulador de carga.....	15
6.1 Valores del regulador necesarios para el dimensionado.....	15
7 Convertidores.....	16
7.1 Convertidores DC/DC.....	16
7.2 Convertidores DC/AC.....	16
8 Equipos de consumo.....	17
8.1 Equipos de consumo doméstico.....	17
8.2 Equipos de comunicaciones inalámbricas	18
8.3 Elección del voltaje de trabajo.....	19
9 Enlaces de referencia.....	20

1 Agradecimientos y propiedad intelectual

En el año 1998, la organización Ingeniería sin Fronteras (Federación Española) publicó la primera versión de un “Manual de Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación al Desarrollo”. El manual fue creado y editado por miembros de la ONG y expertos del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid. Por curiosidades de la historia, ninguno de los miembros del equipo de edición conservábamos el documento en formato electrónico y nunca se hicieron más ediciones. Han pasado casi diez años desde aquella primera edición y este documento es un esfuerzo de rescatar y extender dicho manual.

Con este rescate quiero agradecer el trabajo de los que fueron mis mentores en aquellos años de Universidad y coordinadores del manual original: Miguel Ángel Eguido Aguilera, Mercedes Montero Bartolomé y Julio Amador. Este trabajo está licenciado bajo Creative Commons Attribution Share Alike Non-Commercial 3.0. Esperamos que este material sea un punto de partida para las siguientes ediciones y su extensión por parte de la comunidad.

2 Introducción

Esta unidad sirve de introducción a los componentes de un sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica. El objetivo de este documento es mostrar los conceptos básicos de energía solar fotovoltaica, permitir al lector entender los componentes involucrados y servir como material base para dimensionar un sistema teniendo en cuenta la información y recursos disponibles en el país.

Para evitar posibles confusiones, esta unidad discute el uso de la energía solar para la producción de energía eléctrica (energía solar fotovoltaica). La energía solar también se puede usar para calentar fluidos (energía solar térmica).

La primera parte del documento da una visión general de los componentes que forma un sistema fotovoltaico, la segunda parte discute en detalle cada uno de los componentes del sistema.

3 El sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico se basa en la propiedad que tienen ciertos materiales de convertir la energía luminosa que reciben en energía eléctrica. A la energía luminosa incidente total por unidad de área se le denomina **Irradiancia global G** y se mide en vatios-hora por metro cuadrado (W/m^2) o (J/m^2). Normalmente, la irradiación se refiere a un cierto periodo de tiempo, y así se habla, por ejemplo, de irradiación horaria, diaria o mensual, como la energía luminosa incidente por unidad de superficie en una hora, un día o un mes, respectivamente.

Debido a la naturaleza aleatoria de la energía solar, no se puede determinar con exactitud la radiación que llegará a la superficie terrestre en el lugar de la instalación. Hay que conformarse con trabajar con datos estadísticos basados en la “*historia solar*” del lugar, datos normalmente recogidos en las estaciones meteorológicas, y también en tablas y bases de datos. En la mayoría de los casos no encontraremos información detallada y tendremos que asumir valores aproximados.

Existen varias organizaciones que dedican a la producción de mapas que incluyen valores medios de irradiación global diaria para una región. Estos valores también se conocen como “horas de *irradiación solar pico* al día por metro cuadrado”. Las horas de irradiación solar pico para un determinado lugar son una manera de simplificar nuestros cálculos. Cuando hablamos de una localidad con 4 horas de irradiación solar (pico) al día queremos decir que la irradiación solar en dicho lugar es equivalente a 4 horas con una radiación de 1000 W/m^2 .

3.1 Descripción general del sistema

Un sistema fotovoltaico consta de tres elementos principales, el *panel* o campo de paneles, el *regulador* de carga y la *batería o acumulador*. Los paneles son responsables de generar energía eléctrica, la batería de almacenarla y el regulador de que la batería funcione de manera óptima. Es importante recordar que los paneles y las baterías de un sistema fotovoltaico trabajan en corriente continua, si el rango de tensión de operación de tus equipos no incluye la tensión de operación de la batería será necesario utilizar algún tipo de convertidor. Si los equipos que quieres alimentar utilizan otra tensión de continua diferente a la de la batería será necesario el uso de un convertidor y si alguna de los equipos trabajan en

corriente alterna necesitarás un inversor. Otros elementos importantes en tu sistema fotovoltaico (aunque no se describen en detalle en esta introducción) son los interruptores termo-magnéticos *breakers* de todos los circuitos de corriente, los circuitos protectores contra picos de corriente, fusibles, cableado medido en AWG, pozos de tierra, protectores de línea, barra maestras, pararrayos y estructuras de soporte.

3.1.1 *El generador fotovoltaico o campo de paneles*

Es el elemento captador de energía, que recoge la radiación solar y la transforma en energía eléctrica. Está formado por un conjunto de paneles o módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, que deben proporcionar la energía necesaria para el consumo. La corriente que da un campo de paneles varía proporcionalmente a la irradiación solar. Como la irradiación solar varía en el tiempo debido a las condiciones climatológicas, la hora del día, etcétera, debemos contar con un acumulador de energía para disponer de energía durante cualquier instante.

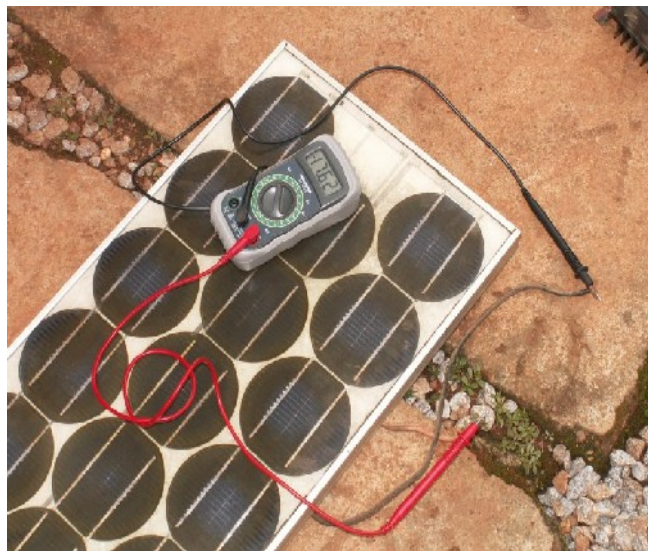


Figura 1: Panel solar fotovoltaico

3.1.2 *La batería o acumulador*

Se encarga de almacenar la energía producida por los paneles que no se consume inmediatamente para disponer de ella en periodos de baja o nula irradiación solar. La acumulación se realiza en forma de energía eléctrica mediante el uso de baterías, usualmente de plomo-ácido, salvo en los casos en los que el generador fotovoltaico.

Los acumuladores electroquímicos como las baterías de plomo-ácido también cumplen dos importantes misiones:

- Suministrar una potencia instantánea superior a la que el campo de paneles puede generar, necesaria para la puesta en marcha de algunos elementos (por ejemplo, el motor del frigorífico).
- Determinar el margen de tensiones de trabajo de la instalación.



Figura 2: Batería de plomo-ácido. Detalle de los conectores deformados por el peso de las baterías durante el transporte

3.1.3 El regulador de carga

Asegura que la batería funcione en condiciones apropiadas, evitando la sobrecarga y sobredescarga de la misma, fenómenos ambos muy perjudiciales para la vida de la batería. El procedimiento que utiliza para ello es determinar el estado de carga de la batería a partir de la tensión a la que ésta se encuentra.

A partir de este parámetro y el conocimiento del tipo de tecnología que se usa en la batería se controla la entrada y salida de corriente en la misma. El regulador puede incluir **otros elementos** que, aunque no sean imprescindibles, realizan útiles tareas de control o seguridad: amperímetros, voltímetros, contadores de amperios-hora, temporizadores, alarmas, etcétera.



Figura 3: Controlador de carga solar de 30 A para un campo de paneles de corriente máxima 25 A

3.1.4 *El convertidor*

La electricidad que proporciona el sistema paneles-acumulador es continua, y se extrae a una tensión determinada, lo cual no siempre coincide con las exigencias de los equipos de consumo. Un convertidor continua-alterna (las siglas en inglés (DC/AC), permite alimentar equipos que funcionen con corriente alterna. Si fuese necesario también se pueden usar convertidores continua-continua (en inglés, DC/DC) que transformen la tensión continua de las baterías en tensión de alimentación también continua pero de distinto valor. A la hora de diseñar un sistema de comunicaciones que usa energía fotovoltaica es recomendable que todos las cargas trabajen a la tensión que suministran las baterías evitando el uso de convertidores.



Figura 4: Convertidor DC/AC. Inversor con una potencia máxima de salida de 800 W

3.1.5 *Los equipos de consumo o cargas*

Son los equipos que se conectan al sistema y que consumen la energía del mismo (equipos de comunicaciones inalámbricas, enrutadores, estaciones de trabajo, iluminación, TVs, etcétera.). Aunque no es posible saber con certeza absoluta cuál va a ser el consumo total de dichos equipos en operación es vital, para un cálculo correcto del sistema, hacer una buena estimación del mismo. Asimismo, hay que tener cuidado en elegir equipos eficientes, para no derrochar energía. Por ejemplo, en escenarios donde sea necesario dimensionar equipos de comunicaciones por energía solar debemos considerar equipos basados en arquitecturas de bajo consumo.

4 El panel

El panel o módulo o generador fotovoltaico está formado por un conjunto de *células solares*. Las células están asociadas eléctricamente para proporcionar los valores de corriente y voltaje necesarios para una aplicación determinada, y convenientemente encapsuladas para proporcionar aislamiento y protección de la humedad y la corrosión.



Figura 5: Efecto del agua dentro del panel solar por problemas de humedad y corrosión

El mercado ofrece diferentes tipos de módulos. El más característico está constituido por entre 32 y 36 células solares de silicio cristalino, todas de igual tamaño, asociadas en serie y encapsuladas, habitualmente, entre vidrio y un material plástico, con una resina polimérica (EVA) como relleno. En función del tamaño de las células, el área del módulo varía entre 0'1 y 0'5 m². Presenta dos bornes de salida, positivo y negativo, y, a veces, alguno intermedio para permitir la instalación de diodos de paso. El objeto de estos diodos es proteger el panel contro un fenómeno que se conoce como “punto caliente”. Cuando algunas de las células se queda en sombra, se comporta como una carga que disipa energía pudiendo elevar su temperatura a valores entre 85 y 100°C.

El funcionamiento eléctrico de un módulo solar se representa mediante su **curva característica**, que representa la corriente que proporciona en función del voltaje que “ve”, y que típicamente presenta la forma de la Figura 6.

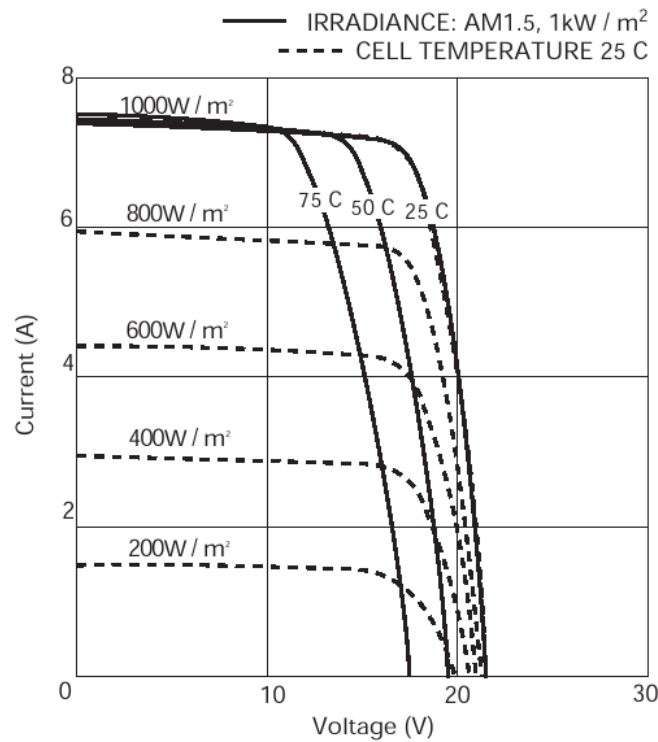


Figura 6: Curvas IV de una panel fotovoltaico con respecto a la radiación y la temperatura

La gráfica marca los valores posibles de voltaje y corriente, que principalmente dependen de la temperatura y de la radiación solar que reciben las células del módulo, respectivamente. El punto de funcionamiento A, determinado por la “carga” que vea el módulo entre bornes, vendrá dado por la pareja de valores de voltaje V e intensidad I , y el valor de la potencia que entrega se puede calcular mediante el producto $V \times I$.

4.1 Parámetros del panel

Los principales parámetros que caracterizan un panel fotovoltaico son:

1. *CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO I_{SC}* : Es la máxima intensidad de corriente que proporciona el panel, y corresponde a la corriente que entrega cuando se conectan directamente los dos bornes. I_{SC} suele rondar los 3 A.
2. *TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO V_{OC}* : Es el máximo voltaje que proporciona el panel, correspondiente al caso en que los bornes están “al aire”. V_{oc} suele ser menor de 22 V para módulos que vayan a trabajar a 12 V.
3. *PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA*: Existe un punto de funcionamiento (I_{Pmax} , V_{Pmax}) para el cual la potencia entregada es máxima ($P_M = I_{Pmax} \cdot V_{Pmax}$). Ése es el punto de máxima potencia del panel, y su valor se da en Vatios (W). Cuando trabaja en este punto, se obtiene el mayor rendimiento posible del panel. Sin embargo, no hay que olvidar que en la práctica la tensión de trabajo viene determinado por la batería. Los valores típicos de I_{Pmax} y V_{Pmax} son algo menores a los de I_{SC} y V_{OC} .
4. *FACTOR DE FORMA FF* : El factor de forma es la relación entre la potencia máxima

que el panel puede entregar y el producto $I_{SC} \cdot V_{OC}$. Da una idea de la calidad del panel porque es una medida de lo escarpada que es su curva característica, de forma que cuanto más se aproxima a la unidad, mayor potencia puede proporcionar. Los valores comunes suelen estar entre 0'7 y 0'8.

5. **EFICIENCIA O RENDIMIENTO η** : Es el cociente entre la máxima potencia eléctrica que el panel puede entregar a la carga y la potencia de la radiación solar P_L incidente sobre el panel, habitualmente en torno al 10%.

Teniendo en cuenta las definiciones de factor de forma y del punto de máxima potencia, se llega a la siguiente igualdad:

$$\eta = P_M / P_L = FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC} / P_L$$

Los valores de I_{SC} , V_{OC} , I_{Pmax} y V_{Pmax} los suministra el fabricante, refiriéndolos a unas **Condiciones Estándar** (CE) de medida, de uso generalizado, definidas como sigue:

- Irradiancia $G(CE) = 1000 \text{ W/m}^2$.
- A nivel del mar.
- Para una temperatura de las células $T_c(CE)=25^\circ\text{C}$.

Para otras condiciones de Irradiancia G y de temperatura T dichos valores cambian. A veces, el fabricante incluye gráficas o tablas con valores para condiciones distintas de las estándar.

El valor de la potencia máxima en las condiciones estándar se indica normalmente en Vatios-pico (W_p). Simplemente se recalca con ello que es la potencia máxima (Vatios) que puede entregar el módulo si las condiciones de medida son las arriba indicadas. Al adquirir un panel, es importante comprobar, si es posible, que sus parámetros (al menos, I_{SC} y V_{OC}) coinciden con los que suministra el fabricante. Para ello hay que tener en cuenta la variación del valor de los parámetros con las condiciones de irradiancia y temperatura.

4.2 Valores del panel necesarios para el dimensionado

El cálculo del número de paneles que necesitamos para cubrir nuestras necesidades energéticas se realiza a partir de los valores de intensidad y tensión para el punto de máxima potencia, I_{Pmax} y V_{Pmax} en condiciones estándar.

Es cierto que, en condiciones normales, el panel no funcionará a estas características, debido a que es el acumulador el que impone la tensión del sistema. En la práctica el error que cometemos al partir de los valores de I_{Pmax} y V_{Pmax} puede corregirse añadiendo una pérdida de eficiencia del 5% al sistema.

4.3 Interconexión de paneles

El campo de paneles del sistema está formado por el número de paneles necesarios conectados eléctricamente, e instalados con ayuda de una estructura de soporte.

Es importante que todos los que se conecten sean iguales (misma marca y mismas

características), pues cualquier dispersión afecta al funcionamiento del sistema. Incluso en el caso de que los paneles sean nominalmente iguales, presentarán alguna dispersión en sus características, debido al propio proceso de fabricación (habitualmente $\pm 10\%$), y eso se ha de tener en cuenta a la hora de hacer el montaje.

El objetivo al interconectar paneles es doble, por un lado queremos conseguir un nivel de tensión cercano y superior al nivel de tensión impuesto por las baterías y por otro tenemos que conseguir un nivel de corriente alimentar nuestros equipos y cargar las baterías.

La interconexión se realiza asociando primero paneles en serie, hasta conseguir el nivel de tensión adecuado, y después asociando en paralelo varias asociaciones serie, para alcanzar el nivel de corriente deseado.

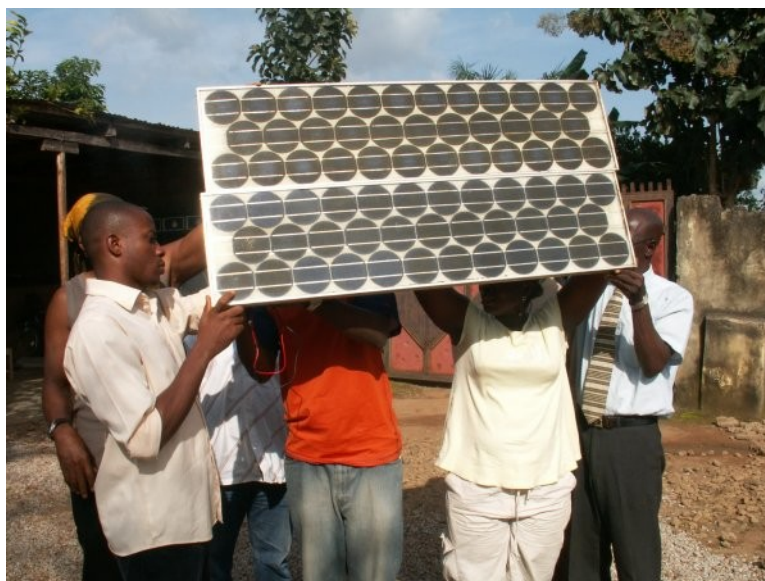


Figura 7: Interconexión de paneles en paralelo. El voltaje no cambia pero la corriente se duplica

5 La batería

En una batería se producen ciertas reacciones químicas reversibles que hacen posible que se pueda almacenar energía eléctrica para ser entregada posteriormente a tus equipos (cargas).

Una batería está formada por la asociación serie de varios “elementos”, “vasos” o “celdas”, cada uno de los cuales consta de dos electrodos de plomo inmersos en una disolución electrolítica (de agua y ácido sulfúrico). Entre los electrodos se establece una diferencia de potencial que tiene un valor próximo a 2 voltios, dependiendo el valor instantáneo del estado de carga de la batería. Las baterías más utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas son de 12 ó 24 voltios de tensión nominal, es decir, constan de 6 ó 12 vasos en serie.

La misión primordial de la batería es abastecer de energía eléctrica al sistema cuando no la proporciona el campo de paneles. Para ello, el acumulador repite cíclicamente un proceso de acumulación de energía (carga) y entrega de la misma (descarga), dependiendo de la presencia o ausencia de sol.

- Durante las horas en que hay sol, el campo de paneles produce energía eléctrica. La que no se consume inmediatamente se emplea en cargar la batería.
- Durante las horas de ausencia del sol, cualquier demanda de energía eléctrica es atendida por la batería, que, por tanto, se va descargando.

Estos ciclos de carga y descarga de la batería van parejos a tres ciclos distintos que afectan al soleamiento del lugar: el debido a las diferencias entre día y noche, el debido a las estaciones y el debido a la variación aleatoria de las condiciones climatológicas (nubes, polvo, contaminación, etcétera).

Si la batería no almacena suficiente energía como para hacer frente a la demanda durante los periodos sin sol, el sistema no estará disponible para el consumo. Por el contrario, un cálculo en exceso de la misma resulta caro e ineficiente. Se ha de llegar, pues, a un compromiso entre coste y disponibilidad del sistema, para la cual hacemos uso de un parámetro, el *número de días de autonomía*. El número de días de autonomía de un sistema de telecomunicaciones depende de su función crítica dentro de tu diseño. Si el equipo va a servir de repetidor y forma parte de la troncal de tu red, debes diseñar tu sistema fotovoltaico con una autonomía de hasta 5 días. Si por el contrario el equipo a alimentar es un equipo cliente puedes reducir el número de días de autonomía a 2. En cualquier caso, siempre deberás buscar un compromiso entre costo y fiabilidad.

5.1 Tipos de baterías

Existen distintos modelos constructivos de baterías destinadas a usos distintos. Para aplicaciones fotovoltaicas las más adecuadas son las baterías estacionarias, diseñadas para tener un emplazamiento fijo y para los casos en que el consumo es más o menos irregular. Las baterías del tipo “estacionario” no necesitan producir una corriente elevada en breves periodos de tiempo, aunque sí profundas descargas.

Las baterías estacionarias pueden tener electrolito alcalino (es el caso de las de Níquel-Cadmio) o ácido (las cuales se denominan de Plomo-Ácido, por ser el plomo el elemento base de sus electrodos). Las primeras son las más recomendadas, por su alta fiabilidad y resistencia, pero su elevado precio inclina la balanza a favor de las de plomo-ácido.

De todas formas, en algunos países no es posible encontrar fácilmente baterías estacionarias, o su precio (bien local o bien porque haya que importarlas) puede ser elevado, por lo cual habrá que utilizar baterías que ofrezca el mercado, usualmente las destinadas al mercado automovilístico.

5.1.1 Adaptación de baterías de automóviles

Las baterías de automóviles no son muy recomendables para aplicaciones fotovoltaicas, pues están pensadas para suministrar una gran intensidad durante unos pocos segundos (al arrancar) más que para suministrar bajas corrientes de forma más o menos regular. Ello hace que su vida útil se acorte al integrarlas en un sistema fotovoltaico. Pero para aplicaciones de pequeño tamaño, donde es importante tener costes bajos, o en los casos en los que no haya otras baterías en el mercado, tendrás que pensar en usarlas. Se puede alargar su vida

añadiendo agua destilada a la disolución para que su densidad baje hasta 1.2 en vez del habitual 1.28, disminuyendo así la corrosión en el ánodo. Para medir la densidad de la disolución hay que emplear un densímetro.

Las baterías de tracción están pensadas para vehículos y carretillas eléctricas, son más baratas que las estacionarias y pueden prestar servicio en una instalación fotovoltaica siempre que se tenga en cuenta que necesitan un mantenimiento muy frecuente. En todo caso deberás tener en cuenta que estas baterías no están diseñadas para descargas profundas. Una batería de camión solo se podrá descargarse hasta un 70% de su capacidad total (sí, solo se puede usar un 30% de su capacidad nominal!)

5.2 Estados de carga

En el funcionamiento normal del acumulador, durante el cual se va cargando y descargando cíclicamente, existen dos estados de carga extremos:

5.2.1 Sobrecarga

Cuando en el proceso de carga el acumulador llega al límite de su capacidad. Si en ese momento se le sigue inyectando energía, el agua de la disolución de ácido sulfúrico se empieza a descomponer, produciendo oxígeno e hidrógeno. Es el fenómeno de gasificación o gaseo, perjudicial por la pérdida de agua que supone, y, además, porque oxida el electrodo positivo.

Por otro lado, el gaseo presenta una ventaja, y es que evita el fenómeno de *la estratificación* debida a los continuos ciclos de carga y descarga que sufre la batería, y que deriva en que el ácido tiende a concentrarse en el fondo, disminuyendo la capacidad nominal de la batería.

Para llegar a un equilibrio entre las ventajas y los inconvenientes del gaseo, se debe permitir una ligera sobrecarga cada cierto tiempo (que se suele fijar en un valor entre 2'35 y 2'4 Voltios por cada elemento de la batería, a 25°C). El regulador es el encargado de impedir la entrada de energía por encima de la sobrecarga permitida.

5.2.2 Sobredescarga

Existe también un límite para el proceso de descarga, pasado el cual el acumulador se deteriora de forma importante. En este caso, vuelve a ser el regulador el que impide que se consuma más energía del acumulador, limitando la tensión mínima en cada elemento de la batería a un valor de 1'85 Voltios a 25 °C.

Si la descarga es muy profunda y el acumulador permanece mucho tiempo descargado, se produce el fenómeno de *sulfatación*, es decir, la formación de grandes cristales de sulfato plumboso que ni intervienen ni dejan que los electrodos intervengan en las reacciones químicas, y pueden dejar inservible el acumulador.

5.3 Parámetros de la batería

Los principales parámetros que caracterizan un acumulador son:

1. *TENSIÓN NOMINAL V_{NBat}* : Suele ser de 12 voltios.
2. *CAPACIDAD NOMINAL C_{NBat}* : Cantidad máxima de energía que se puede extraer del acumulador. Se expresa en Amperios-hora (Ah) o Vatios-hora(Wh). Como la cantidad de energía que se puede extraer depende también del tiempo en que se efectúe el proceso de extracción (cuanto más dure el proceso, más cantidad de energía podremos obtener), la capacidad suele venir referida a varios tiempos de descarga. Para aplicaciones fotovoltaicas, este tiempo debe ser de 100 horas o más.
3. *PROFUNDIDAD MÁXIMA DE DESCARGA PD_{max}* : La profundidad de descarga es el valor, en tanto por ciento, extraída de un acumulador plenamente cargado en una descarga. Los reguladores limitan esta profundidad, y se calibran habitualmente para permitir profundidades de descarga de la batería en torno al 70%. Dependiendo de la máxima profundidad de descarga permitida, el número de ciclos de carga y descarga durante toda la vida útil de la batería será mayor o menor. El fabricante debe suministrar gráficas que relacionan el número de ciclos con la vida de la batería. Como regla general deberías evitar que tu batería de descarga profunda no se descargase más del 50% y tan solo el 30% para baterías de automoción adaptadas.
4. *CAPACIDAD ÚTIL o DISPONIBLE C_{UBat}* : Es la capacidad de la que realmente se puede disponer. Es igual al producto de la capacidad nominal por la profundidad máxima de descarga (expresada en tanto por uno). Por ejemplo una batería estacionaria de capacidad nominal con tiempo de descarga de 100 horas de 120 Ah y profundidad de descarga de 70%, tiene una capacidad útil de tan solo 84 Ah.

5.3.1 Midiendo el estado de carga de la batería

Una batería de plomo-ácido de 12 V entrega diferente voltaje a los equipos dependiendo del estado de carga de la batería. Cuando la batería esta cargada al 100% el voltaje de salida es de 12.8 V y baja rápidamente cuando a 12.6 V cuando se le conecta las cargas. Debido a que la batería tiene que entregar una corriente constante durante operación, el voltaje de la batería baja linealmente entre 12.6 y 11.6 V linealmente dependiendo del estado de carga. Las baterías de plomo-ácido entregan el 95% de su energía dentro de este margen lineal y eso permite saber cual es el estado de carga de una batería conociendo su voltaje. Si asumimos que una batería esta al 100% con 12.6 V y vacía (0%) con 11.6 V podemos estimar que el voltaje cuando la batería se ha descargado un 70% es 11.9 V. Por desgracia estos valores son aproximados ya que dependen de la vida de la batería, la temperatura y de la calidad de la misma.

Estado de carga	Voltaje	Voltaje por celda
100%	12.7	2.12
90%	12.5	2.08
80%	12.42	2.07
70%	12.32	2.05
60%	12.20	2.03
50%	12.06	2.01
40%	11.9	1.98
30%	11.75	1.96
20%	11.58	1.93
10%	11.31	1.89
0%	10.5	1.75

Tabla 1: Relación del voltaje y estado de carga de una batería

Teniendo en cuenta la tabla anterior y que una batería de camión no se debe descargar más del 20% o el 30% tenemos que la capacidad útil de una batería de camión de 170 Ah se reduce a 34 Ah (20%) - 51 Ah (30%). El voltaje debe estar siempre por encima de 12.3 V.

5.4 Efectos de la temperatura

La temperatura afecta de forma importante a las características de la batería:

- Por un lado, la capacidad nominal de un acumulador (que el fabricante suele dar para 25°C) aumenta con la temperatura a razón de un 1%/°C, aproximadamente. Pero en el caso de que la temperatura sea demasiado alta, la reacción química que tiene lugar en la batería se acelera, lo que puede provocar la oxidación mencionada al hablar de la sobrecarga, provocando la reducción de la vida del acumulador. Para baterías de coche, este problema se compensa en parte poniendo densidades de disolución bajas (de 1.25 para baterías totalmente cargadas).
- Si la temperatura es baja, la vida útil aumenta, pero se corre el riesgo de congelación. La temperatura de congelación depende de la densidad de la disolución, a su vez directamente relacionada con el estado de carga de la batería: cuanto mayor es la densidad, menor es la temperatura de congelación. Por eso, para prevenir la congelación es mejor tener las baterías cargadas que descargadas, lo cual afecta a la máxima profundidad de descarga admisible.

6 El regulador de carga

Recordemos que el voltaje de una batería, aunque siempre próximo a 2 V por vaso, varía según su estado de carga. Así pues, midiendo con suficiente precisión este voltaje, el regulador impide la entrada o salida de corriente de la batería cuando una carga excesiva o por una descarga excesiva pueda dañarla. El regulador de carga es también conocido como cargador.

Los reguladores que se emplean son del tipo *serie*: desconectan el campo de paneles de la batería, para evitar la sobrecarga, y la batería de los equipos de consumo, para evitar la sobredescarga, mediante interruptores que pueden ser dispositivos electromecánicos (relés, contactores, etcétera) o de estado sólido (transistor bipolar, MOSFET, etcétera). Nunca se emplearán reguladores paralelo.

Para proteger la batería de la sobrecarga, el interruptor se abre cuando la tensión en la batería alcanza su *tensión de corte por alta* (*high voltage disconnect HVD*), y vuelve a cerrarse cuando la batería vuelve a la denominada *tensión de rearme por alta* (*reconnect HVD*). La tensión de corte por alta está en torno a 2.45 V por elemento de la batería, a 25°C.

En cuanto a la sobredescarga, el interruptor se abre cuando el voltaje de la batería se hace menor que la *tensión de corte por baja* (*low voltage disconnect LVD*) y se cierra cuando se recupera la *tensión de rearme por baja*. La tensión de corte por baja está en torno a 1.95 V por elemento.

Los reguladores más modernos son además capaces de desconectar automáticamente los paneles durante la noche para evitar la descarga de la batería, sobrecargar la batería de forma periódica (ecualización) para mejorar su vida útil y utilizar un mecanismo de mantenimiento de carga conocido como PWM (pulse width modulation).

6.1 Valores del regulador necesarios para el dimensionado

Los valores que se deben conocer del regulador para el cálculo son:

- *Máxima corriente* que permite que circule a través de él. Debe ser un 20% superior a la máxima corriente del generador fotovoltaico.
- *Tensión de trabajo*: 12, 24, ó 48 V.

Otros datos de interés, que también proporciona el fabricante:

- Valores de tensión de corte por alta (sobrecarga) y tensión de corte por baja (sobredescarga).
- Existencia de compensación con la temperatura. Las tensiones que indican el estado de carga de la batería varían con la temperatura, por eso algunos reguladores miden la temperatura y corrigen, basándose en ello, las tensiones de sobrecarga.
- Instrumentación de medida e indicadores. Suelen llevar un voltímetro que mide la tensión de la batería y un amperímetro que mide la corriente. La mayoría de ellos

disponen de indicadores que avisan de determinadas situaciones como: bajo estado de carga de la batería, circuito de paneles desconectado de batería, etcétera.

7 Convertidores

Los convertidores o inversores son equipos que transforman la tensión continua que proporcionan los módulos en tensión diferente, bien sea continua de otra magnitud, bien sea alterna, que es lo más usual. Los primeros son los convertidores DC/DC, y los segundos DC/AC. El aspecto que presenta un convertidor:

7.1 Convertidores DC/DC

También conocidos como “transformadores de continua” o “seguidores del punto de máxima potencia” (MPPT, en inglés). Se recurre al uso de éstos a fin de hacer trabajar a los paneles en su punto de máxima potencia (PMP). Atendiendo a criterios económicos, su utilización queda justificada cuando el coste de la energía desaprovechada por no trabajar en el PMP supera el de adquirir el convertidor.

7.2 Convertidores DC/AC

Se emplean cuando se precisa una línea de consumo en corriente alterna. A partir de la tensión continua, estos convertidores generan una onda de impulsos, y la filtran para eliminar los armónicos indeseados. En realidad, pocos son los convertidores que proporcionan una onda sinusoidal “pura”: la mayoría de los modelos disponibles en el mercado son de “onda cuadrada” (algún fabricante las denomina con el eufemismo “onda sinusoidal modificada”), ya que un gran número de equipos, aunque no todos, lo “aceptan”. De todas formas, hoy por hoy se venden más que los de onda sinusoidal pura, pero fundamentalmente por cuestiones de coste.

En general un inversor de onda sinusoidal “pura” tiene un rendimiento más bajo que uno de onda sinusoidal modificada.

Es importante tener en cuenta que no todos los equipos de telecomunicaciones aceptan una onda sinusoidal modificada y que deberás investigar la compatibilidad de tu convertidor con los equipos que quieras instalar. Por ejemplo, es común que algunas impresoras no funcionen, que las fuentes de alimentación de DC se calienten más y que los amplificadores emitan un sonido (buzz) en presencia de inversores de onda modificada.

Aparte de la forma de onda, algunas de las características que han de exhibir los inversores, y a las que otorgaremos especial importancia son:

1. *Fiabilidad* ante sobrecorrientes, sabiendo distinguir cuándo se debe al arranque de un motor (y tolerarla) y cuándo a un cortocircuito (y cortarla).
2. *Eficiencia de conversión*, altamente dependiente de la potencia demandada en cada instante. Como los convertidores muestran una mayor eficiencia trabajando cerca de su potencia nominal, es conveniente seleccionar bien el modelo, a fin de que opere en esta condición habitualmente. El fabricante suele suministrar el rendimiento del inversor al 70% de su potencia nominal η (70%).
3. *Cargador de baterías, conmutación automática*, muchos inversores también incorporan la función opuesta: la posibilidad de cargar baterías en presencia de una fuente de corriente alterna (red, generador, etc). A estos inversores se les conoce con el nombre de inversor/cargador. Otra característica especial es la capacidad de cambiar de una fuente de energía (Red, Baterías) de manera automática.

Cuando se trate de equipos de telecomunicaciones como los puntos de acceso inalámbricos deberás evitar el uso de convertidores DC/AC y alimentarlos directamente con tensión continua desde las baterías. La mayoría de los equipos de comunicaciones aceptan un rango de voltaje de entrada amplio, consulta con el fabricante para asegurarte cual es el voltaje óptimo de alimentación.

8 Equipos de consumo

Obviamente a mayores consumos demandados, más costosa resulta la instalación. Por tanto, es preciso insistir en dos aspectos fundamentales: En primer lugar, en hacer una estimación realista, pero ajustada, del consumo que se va a realizar, pues el sistema se va a calcular basándose en este consumo máximo. En segundo lugar, una vez que la instalación esté en marcha, hay que respetar este consumo máximo establecido so pena de frecuentes fallos en el suministro.

8.1 Equipos de consumo doméstico

Asimismo, el uso de energía solar fotovoltaica no está recomendado para aplicaciones en las que intervienen ciclos de calor o frío de uso habitual (calefacción, neveras eléctricas, etcétera), pues suponen un elevado consumo, por lo que puede ser mejor utilizar otra fuente de energía.

De forma más detallada:

- La energía solar fotovoltaica es muy apropiada para aplicaciones de iluminación. En este caso, es obligado el uso de lámparas halógenas o fluorescentes, ya que, aunque más caras, presentan rendimientos mucho mejores. En ningún caso se deben usar bombillas incandescentes, pues tienen un rendimiento muy bajo.
- También se puede usar con electrodomésticos de bajo consumo constante (el caso más típico, el de un televisor). Conviene elegirlos de tamaño pequeño, ya que consumen menos, y conviene saber que una televisión en color consume el doble que una en

blanco y negro.

- No se recomienda esta energía para aplicaciones que la transformen en energía térmica. Así, no es recomendable el uso de aparatos que calienten una resistencia, y en ningún caso debe utilizarse para calentar agua; cualquier otro sistema, como solar térmica o butano, obtendrá los mismos resultados con mucho menor coste.
- En el caso de instalación de lavadoras, se recomienda utilizar lavadoras automáticas convencionales evitando el uso de programas de lavado que incluyan calentamiento de agua y centrifugado, pues aunque existen equipos no automáticos de poca capacidad y que trabajan con corriente continua, la calidad del lavado y la comodidad que proporcionan son inferiores. Si se desea utilizar lavado con agua caliente, se puede acudir a equipos con dos tomas de agua, utilizando una fuente de energía térmica.
- Los frigoríficos deben ser de bajo consumo. Existen equipos apropiados para ESF trabajando en corriente continua y baja tensión, pero como su consumo es elevado (en torno a 1000 Wh/día), conviene considerar la opción de utilizar frigoríficos de butano.

Para la estimación del consumo total (paso fundamental en el cálculo del sistema) hay que conocer la potencia consumida por los distintos aparatos que se desean instalar. Son datos que proporciona el fabricante, pero conviene comprobarlos si es posible.

Equipo	Consumo (Watts)
Computadora Portátil	30-50
Lámpara de baja potencia	6-10
Punto de acceso WiFi (una radio)	4-10
Modem VSAT	15-30
PC Bajo consumo (con LCD)	20-30
PC (con LCD)	200-300
Switch (16 ports)	6-8

Tabla 2: Orientación sobre los consumos de potencia (en Vatios) de algunos equipos

8.2 Equipos de comunicaciones inalámbricas

En aquellas localizaciones que cuenten con suministro eléctrico es normal alimentar los equipos de comunicaciones a través de un PoE (Power over Ethernet), de acuerdo al estándar 802.3af. Gracias al estandar PoE se consigue llevar en un único cable datos y energía.

En muchos casos vamos a necesitar alimentar un equipo de comunicaciones inalámbricas en un lugar donde no exista suministro eléctrico. Las mejores ubicaciones para un repetidor suelen estar en lo alto de las montañas en lugares ventosos y alejados de zonas pobladas. Es necesario por tanto minimizar el consumo energético de los equipos para reducir el tamaño del subsistema de captación (los paneles) y de almacenamiento (la batería). Además es interesante integrar el mayor número de los elementos del sistema en una caja estanca en lo

alto de una torre. El tamaño de la batería y los paneles dependerá de la eficiencia energética de nuestros equipos de comunicación.

Una de las primeras cosas que deben tener en cuenta es que los routers inalámbricos (IEEE 802.11) basados en Intel x86 presentan consumos muy altos en comparación con otras arquitecturas como ARM o MIPS. Una de las placas con consumos más bajos es la plataforma Soekris que usa el procesador AMD ElanSC520. Otra alternativa a AMD (ElanSC o Geode SC1100) es el uso de equipos con procesadores MIPS. Los procesadores MIPS tienen un mayor rendimiento que los AMD Geode al precio de consumir entre 20-30% más de energía en reposo.

Equipo	Consumo (Watts)
Linksys WRT54G (radio BCM2050)	6
Linksys WAP54 (radio BCM2050)	3
Orinoco/WavePoint II ROR (radio 30 mW)	15
Soekris net4511 (no radio/radio)	1.8 / 4.8
WRAP.1E-1 (no radio)	2.04 / 5.04
Routerboard 532 (no radio)	2.3 / 5.3
Inhand ELF3 (no radio)	1.53 / 4.53
Radio Senao 250 mW	3
Radio Ubiquity 400 mW	6

Tabla 3: Consumo de potencia de equipos inalámbricos

Las mediciones de consumo energético de equipos inalámbricos son complicadas porque dependen no solo de la arquitectura sino del número de interfaces de red, radios o tipos de memorias en la unidad. Como norma general podemos decir que un equipo inalámbrico de bajo consumo consume en el rango de 2-3 W y una radio de 200 mW consume unos 3 W. Las tarjetas Ubiquity de 400 mW consumen 6 W. Una estación repetidora con dos radios consume entre 8 y 10 W.

Aunque el estándar 802.11 incorpora un mecanismo de ahorro de energía conocido como Powersaving mode (PS) sus beneficios no son tan buenos como los que se pudieran esperar. El modo de ahorro de energía permite a las estaciones dormir sus tarjetas inalámbricas de manera periódica a través de un circuito de temporización. Cuando la tarjeta despierta, comprueba si existe tráfico para ella a través de unas tramas *beacon*. Este ahorro de energía solo tiene lugar en el cliente porque el punto de acceso permanece siempre despierto, transmitiendo tramas *beacon* y almacenando los datos para los clientes que permanezcan dormidos.

8.3 Elección del voltaje de trabajo

La mayoría de los sistemas autónomos que vamos a diseñar van a trabajar en 12 o 24 V. Lo ideal es utilizar equipos que trabajen a 12 V que es el voltaje nominal de la mayoría de las

baterías de plomo-ácido. La mayoría de los puntos de acceso inalámbricos incorporan una fuente/regulador de voltaje conmutado capaz de trabajar en un margen amplio de voltajes de entrada con un alto rendimiento. Antes de elegir un punto de acceso asegúrese que puede operar eficientemente a tu tensión de instalación.

9 Enlaces de referencia

- Introducción a las baterías y enlaces relacionados
<http://homepages.which.net/~paul.hills/Batteries/BatteriesBody.html>
- Preguntas más frecuentes sobre baterías
http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm
- Diseño de un cargador y medidor de carga para un repetidor solar
http://wireless.ictp.it/school_2006/wiki/pmwiki~45.html
- Potencia de salida de tarjetas WiFi
<http://safari.adobepress.com/0321202171/app02>
- Alimentación de un router Linksys con baterías
<http://wiki.personaltelco.net/index.cgi/BatteryPoweredAP>
- Curso de energía solar en castellano
http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html